











# WASSER IN GEBIRGSRÄUMEN – DISASTER RISK MANAGEMENT TRANSDISZIPLINÄRE STUDIEN AUS ÖSTERREICH

HERAUSGEBER: DANIEL ELSTER, KAY HELFRICHT, WALTER SEHER









# www.geosphere.at

#### Adressen der Herausgeber

Daniel Elster GeoSphere Austria Hohe Warte 38 1190 Wien Österreich Daniel.Elster@geosphere.at

Kay Helfricht Österreichische Akademie der Wissenschaften Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung Innrain 25 6020 Innsbruck Österreich Kay.Helfricht@oeaw.ac.at

Walter Seher Universität für Bodenkultur Wien Department für Raum, Landschaft und Infrastruktur Institut für Raumplanung, Umweltplanung und Bodenordnung Peter-Jordan-Straße 82 1190 Wien Österreich Walter.Seher@boku.ac.at **Bundesministerium** Bildung, Wissenschaft und Forschung



#### Wasser in Gebirgsräumen – Disaster Risk Management: Transdisziplinäre Studien aus Österreich

Dieser Sammelband vereint die Endberichte der Forschungsprojekte Hidden.Ice, EXTRIG und PoCo-FLOOD aus dem Themenschwerpunkt Disaster Risk Management des Forschungsprogramms Earth System Sciences (ESS) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. Ihr gemeinsamer thematischer Hintergrund sind Naturgefahren und ihre Auswirkungen auf den Alpinen Raum.

#### **Cover Fotos**

oben: Blick vom Rußkopf auf den Jamtalferner (Silvretta, Tirol, Österreich; Aufnahme vom 26. Juli 2021, Kay Helfricht) Mitte: Bohrarbeiten im Untersuchungsgebiet, Sibratsgfäll (Stephan Hochleithner) unten: Systemgrafik PoCo-FLOOD, PoCo-FLOOD Projektteam Hochwasser Grein 2013 (Severin Hohensinner)

#### Zitiervorschlag (Gesamtwerk)

Elster, D. (Hrsg.), Helfricht, K. (Hrsg.) & Seher, W. (Hrsg.) (2023): Wasser in Gebirgsräumen – Disaster Risk Management: Transdisziplinäre Studien aus Österreich. – Abhandlungen der GeoSphere Austria, 77, 192 S., Wien.

#### Zitiervorschlag (Artikel)

Helfricht, K., Hiller, C., Hohensinner, S., Haas, F., Schwaizer, G., Achleitner, S. & Fischer, A. (2023): Veränderte Schuttbedeckung auf ostalpinen Gletschern: Quantifizierung und hydrologische Auswirkungen (Hidden.ice). In: Elster, D. (Hrsg.), Helfricht, K. (Hrsg.) & Seher, W. (Hrsg.): Wasser in Gebirgsräumen – Disaster Risk Management: Transdisziplinäre Studien aus Österreich. – Abhandlungen der GeoSphere Austria, 77, 81–129, Wien.

ABHANDLUNGEN DER GEOSPHERE AUSTRIA, BAND 77 ISSN 2960-4494 (Print) ISSN 2960-4907 (Online) ISBN 978-3-903252-15-8

Alle Rechte für In- und Ausland vorbehalten. Medieninhaber, Herausgeber und Verleger: GeoSphere Austria, Hohe Warte 38, 1190 Wien. Technische Redaktion: Christoph Janda Lektorat: Christian Cermak Umschlaggestaltung und Bildbearbeitung: Monika Brüggemann-Ledolter Satz, Gestaltung und Druckvorbereitung: Jarmila Böhm Druck: Ferdinand Berger & Söhne Ges.m.b.H., Wienerstraße 80, 3580 Horn Verlagsort: Wien

ABHANDLUNGEN DER GEOSPHERE AUSTRIA				
ISSN 2960-4494	ISBN 978-3-903252-15-8	Band 77	192 Seiten	Wien, Mai 2023
Wasser in Gebirgsräumen – Disaster Risk Management Transdisziplinäre Studien aus Österreich				

#### Inhalt Contents

••••	ient		
Vorwort	5	Preface	5
ELSTER, D, HELFRICHT, K. & SEHER, W.: Vernetzungs-Workshop zum Thema "Transdisziplinäre Zugänge und Methoden in den Projekten" im Themencluster Disaster Risk Manage- ment	7	ELSTER, D, HELFRICHT, K. & SEHER, W.: Networking workshop on "Transdisciplinary approaches and methods in the projects" in the Disaster Risk Management thematic cluster	7
ELSTER, D, HOCHLEITHNER, S, TUREWICZ, V., OTTOWITZ, D., JA- RITZ, W., SCHATTAUER, I., KRALIK, M., HIEBL, J., HÖFLER, A., HOLZSCHUSTER, R., BISPING, C., WÖHRER-ALGE, M., ALMER, M., HOYER, S. & HOBIGER, G.: Verständnis extremer klimatolo- gischer Auswirkungen in besiedelten alpinen Gebieten durch	10	ELSTER, D, HOCHLEITHNER, S, TUREWICZ, V., OTTOWITZ, D., JARITZ, W., SCHATTAUER, I., KRALIK, M., HIEBL, J., HÖFLER, A., HOLZ- SCHUSTER, R., BISPING, C., WÖHRER-ALGE, M., ALMER, M., HOYER, S. & HOBIGER, G.: Understanding of Extreme Climato- logical Impacts in Populated Alpine Areas from 4D Modelling of Hydrogeological Processes (EXTRIG)	13
4D-INIODellierung hydrogeologischer Prozesse (EXTRIG) HELFRICHT, K., HILLER, C., HOHENSINNER, S., HAAS, F., SCHWAI- ZER, G., ACHLEITNER, S. & FISCHER, A.: Veränderte Schutt- bedeckung auf ostalpinen Gletschern: Quantifizierung und hydrologische Auswirkungen (Hidden.ice)	83	HELFRICHT, K., HILLER, C., HOHENSINNER, S., HAAS, F., SCHWAIZ- ER, G., ACHLEITNER, S. & FISCHER, A.: Changing debris cover on Eastern Alpine glaciers: Quantification and hydrological impacts (Hidden.ice)	83
GRÜNEIS, H., NIEDERMAYR, J., SCHROLL, K., WAGNER, K., HOHEN- SINNER, S., HERRNEGGER, M., STECHER, G., LEBIEDZINSKI, K., SEHER, W., JUNGER, L., LÖSCHNER, L. & NORDBECK, R.: Inte- griertes Hochwasserrisikomanagement in Berggebieten: sektorale Interdependenzen, Konflikte und Möglichkeiten der Politikkoordination (PoCo-FLOOD)	133	GRÜNEIS, H., NIEDERMAYR, J., SCHROLL, K., WAGNER, K., HOHEN- SINNER, S., HERRNEGGER, M., STECHER, G., LEBIEDZINSKI, K., SEHER, W., JUNGER, L., LÖSCHNER, L. & NORDBECK, R.: Inte- grated Flood Risk Management in Mountain Areas: Assess- ing Sectoral Interdependencies, Conflicts and Options for Policy Coordination (PoCo-FLOOD)	133
Buchbesprechung	192	Book Review	192

#### Vorwort

Das im Jahr 2013 eingerichtete Forschungsprogramm Earth System Sciences (ESS), ein von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW) durchgeführtes Programm des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft und Forschung (BMBWF), hat die Erforschung des Systems Erde zum Ziel. In diesem Programm werden inter- und transdisziplinäre Projekte zu derzeit wenig untersuchten Themen gefördert, denen wissenschaftliche Pionierfunktion zukommt, wobei hinsichtlich der gewählten Ansätze und der zu erwartenden Ergebnisse High-Risk-High-Potential-Projekte ebenfalls berücksichtigt werden. Die thematische Ausrichtung des ESS-Programms umfasst die von drei an der ÖAW angesiedelten Nationalkomitees verwalteten Bereiche Global Change, Geo/Hydro-Sciences sowie UNESCO MAB (Man and the Biosphere). Das Programm zielt darauf ab, durch die Förderung inter- und transdisziplinärer Forschungsprojekte zu ausgewählten relevanten Fragen der Gestaltung des Verhältnisses von Mensch und Umwelt und zum Dialog zwischen Wissenschaft und Gesellschaft beizutragen.

Der starke transdisziplinäre Anspruch an die Forschungsprojekte stellt sicherlich ein Alleinstellungsmerkmal des ESS-Programms in der österreichischen Forschungslandschaft dar. ESS zielt damit auf die Förderung einer innovativen Forschungsstrategie, die sich durch interdisziplinäre Zusammenarbeit von Natur- und Gesellschaftswissenschaften sowie durch die Einbeziehung des Wissens und der Perspektiven von Praxispartnern auszeichnet, und damit der Komplexität der zu untersuchenden Phänomene und Vorgänge gerecht wird.

Im Rahmen von etwa alle drei Jahre durchgeführten Ausschreibungen werden Forschungsprojekte gefördert, die dem neuesten Stand der Wissenschaft entsprechen. In der Projektausschreibung des Jahres 2018 wurden insgesamt 12 hochqualitative Forschungsprojekte gefördert. Das Internationale ESS Advisory Board, das mit der Vergabe der nach einem internationalen Begutachtungsverfahren bestgereihten Projekte betraut ist, hat im Zuge des Vergabeprozesses Projekte mit starken thematischen Gemeinsamkeiten identifiziert und zu insgesamt drei Themenclustern (Transdisziplinarität, Grundwasser, Disaster Risk Management) zusammengefasst. Den Projektteams wurde dadurch ermöglicht, verstärkte Kooperationen auszuloten und Synergien während der Projektlaufzeit anzustreben. Diese Kooperation sollte auch in den Berichten aller Projekte ihren Niederschlag finden. Der Cluster "Disaster Risk Management" umfasste die drei mit der vorliegenden Publikation befassten Projekte der Forschungsteams um KAY HELFRICHT (Österreichische Akademie der Wissenschaften), WALTER SEHER (Universität für Bodenkultur Wien) und DANIEL ELSTER (GeoSphere Austria). Da ich damals als Koordinator der Internationalen Forschungsprogramme der ÖAW mit der Abwicklung dieses Projektvorhabens befasst war, freut es mich sehr, dass die drei Projektteams die Chancen der Vernetzung bestens genützt haben. Die vorliegende gemeinsame Publikation ist tatsächlich ein großartiger Beweis für die Zusammenarbeit und die Nutzung von Synergien. Der Sammelband vereint die drei Projekte des Themenschwerpunktes Disaster Risk Management. Ihr gemeinsamer Hintergrund sind Naturgefahrenprozesse und ihre Auswirkungen im Alpinen Raum - ein Thema, das in Zeiten eines sich ändernden Klimas und eines zunehmenden Risikobewusstseins für eine Reihe von Stakeholdern aus Politik und Wirtschaft von großer Bedeutung und für einen großen Teil der Gesellschaft von Interesse ist. Ich freue mich, dass neben den wissenschaftlichen Publikationen die Ergebnisse dieser drei Projekte so auch einem breiteren Publikum zur Verfügung stehen und darf allen Beteiligten dazu sehr herzlich gratulieren! Ich bin überzeugt, dass die für die Durchführung dieser drei Projekte notwendige inter- und transdisziplinäre Projektarbeit die Kolleginnen und Kollegen weiterhin durch ihre Wissenschaftskarriere begleiten wird. Womit ein Anspruch an das ESS-Programm erfüllt wäre...

> GÜNTER KÖCK Österreichische Akademie der Wissenschaften

ABHANDLUNGEN DER GEOSPHERE AUSTRIA					
ISSN 2960-4494	ISBN 978-3-903252-15-8	Band 77	Seite 7-9	Wien, Mai 2023	

# Vernetzungs-Workshop zum Thema "Transdisziplinäre Zugänge und Methoden in den Projekten" im Themencluster Disaster Risk Management

DANIEL ELSTER<sup>1</sup>, KAY HELFRICHT<sup>2</sup> & WALTER SEHER<sup>3</sup>

## Networking workshop on "Transdisciplinary approaches and methods in the projects" in the Disaster Risk Management thematic cluster

#### Inhalt

1	Einleitung	8
2	Transdisziplinarität im Projektantrag und in der Projektvorbereitung.         2.1       Theoretisch-Methodischer Rahmen         2.2       Chancen         2.3       Risiken         2.4       Akteurinnen und Akteure         2.5       Erwartungen         2.6       Strukturen	8 8 8 8 8 8 9
3	Transdisziplinarität in der Projektbearbeitung         3.1       Austausch         3.2       Wissensintegration         3.3       Grenzen des transdisziplinären Forschungsansatzes	9 9 9 9
4	Transdisziplinarität nach dem Projektabschluss	9

<sup>1</sup> 

DANIEL ELSTER: GeoSphere Austria, Hohe Warte 38, 1190 Wien, Österreich. Daniel.Elster@geosphere.at Kay HELFRICHT: Österreichische Akademie der Wissenschaften, Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung, Innrain 25, 6020 Innsbruck, Österreich. 2 Kay.Helfricht@oeaw.ac.at

WALTER SEHER: Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Raumplanung, Umweltplanung und Bodenordnung, Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien, Österreich. 3 Walter.Seher@boku.ac.at

# 1 Einleitung

Der Workshop des Earth System Sciences (ESS) Themenclusters "Disaster Risk Management" fand am 8. September 2020 statt. Die Projektleiter der drei Projekte trafen sich an der Geologischen Bundesanstalt, welche die Infrastruktur bereitstellte. Die weiteren Projektmitglieder konnten wegen der damals geltenden COVID-19-Bestimmungen ausschließlich online an der Veranstaltung teilnehmen. Nach einer Vorstellungsrunde und der Vorstellung der drei Projekte durch die Projektleiter erfolgten Gruppendiskussionen (drei Gruppen) zu den folgenden Themen:

- Transdisziplinarität im Projektantrag und in der Projektvorbereitung.
- Transdisziplinarität in der Projektbearbeitung.
- Transdisziplinarität nach dem Projektabschluss.

Für die Online Veranstaltung wurde das World Café Format gewählt und die Projektleiter moderierten jeweils eine der drei Gruppen für insgesamt 60 Minuten, also ca. 20 Minuten pro Thema.

Die Auswertung der Ergebnisse und die Dokumentation des Workshops erfolgten gemeinsam mit allen Projektmitgliedern. Ein detaillierter Bericht zum Workshop wurde an die Österreichische Akademie der Wissenschaften (ÖAW) übermittelt. Es ist anzumerken, dass ergänzende Informationen bzw. Vorschläge zu Themen bzw. Subthemen auch nach dem Workshop einflossen. Im Folgenden wird auf die Ergebnisse des Workshops eingegangen.

# 2 Transdisziplinarität im Projektantrag und in der Projektvorbereitung

#### 2.1 Theoretisch-Methodischer Rahmen

Bei allen Projekten wurden transdisziplinäre Ansätze in der Antragsphase berücksichtigt. Die tatsächliche Integration der nichtwissenschaftlichen Akteurinnen und Akteure war vor der Durchführung der Projekte jedoch schwer zu planen. Es stellte sich heraus, dass bei allen drei Projekten die Projektziele nur unter Berücksichtigung von transdisziplinären Ansätzen zu erreichen waren. Die Zusammenarbeit unter Bedachtnahme unterschiedlicher Herangehensweisen war bereits in den Antragsphasen der Projekte ersichtlich. Es wurde erkannt, dass insbesondere für Problemlösungen unterschiedliche Ansätze aus verschiedenen Fachrichtungen zielführend sein können. Zudem ist der Kontakt zu bekannten, nichtwissenschaftlichen Akteurinnen und Akteuren aus vorangegangenen Projekten hilfreich, um deren Interessen im geplanten Projekt besser einzuschätzen.

Von Seiten des Fördergebers sollte für zukünftige transdisziplinär ausgerichtete Projekte eine Projektvorlaufphase geschaffen werden. Hierbei sollte auf folgende Punkte eingegangen werden:

- Bereits in der Projektantragsphase sollten geförderte Workshops stattfinden. Diese würden einen transdisziplinären Ansatz entscheidend fördern.
- Die Vorlaufphase sollte je nach Projektziel ausreichend lange sein, um gegebenenfalls bereits sozialwissen-

schaftliche Erhebungen durchführen zu können, die einer Schärfung der Fragestellung und der Identifikation von tatsächlich relevanten nichtwissenschaftlichen Akteurinnen und Akteuren dienen.

- Während der Antragsphase zeigte sich, dass insbesondere Projektmitglieder mit einem sozialwissenschaftlichen Background wertvolle Erfahrung für transdisziplinäre Ansätze einbringen können.
- Für die methodische Vorgangsweise sollte für die erste Projektphase Flexibilität eingeräumt werden können, dies verbessert die Möglichkeit transdisziplinäre Ansätze später situationsabhängig besser einzusetzen.
- Für eine gute Synthesebildung bzw. Prozessbeschreibung hinsichtlich des Zusammenspiels von Forschungsansätzen aus unterschiedlichen Disziplinen wird Zeit benötigt, dies steht in Konflikt mit dem Druck "klassische" Forschungsergebnisse zu produzieren.

# 2.2 Chancen

Im Rahmen der Diskussion stellte sich heraus, dass eine transdisziplinäre Vorgangsweise aufgrund des Zusammenspiels mit Praxisakteurinnen und -akteuren grundsätzlich zu mehr Erkenntnisgewinn führen kann. Auch können praktische Handlungsempfehlungen für die Akteurinnen und Akteure von Forschungsergebnissen, die auf einer transdisziplinären Herangehensweise basieren, abgeleitet werden. Weiters kann durch transdisziplinäre Ansätze bei komplexen Themen Transparenz geschaffen werden, die zumeist auch von den Akteurinnen und Akteuren gewünscht wird. Bei der Einbindung von nichtwissenschaftlichen Akteurinnen und Akteuren trägt die Co-Produktion von Wissen zum besseren Verständnis komplexer Zusammenhänge, insbesondere im Bereich "Mensch-Natur" bei. Abschließend besteht durch die Einbindung transdisziplinärer Ansätze die Möglichkeit, gegenseitig Wissen zu vermitteln und Bewusstsein ("Awareness") zu schaffen.

## 2.3 Risiken

Entscheidungen von einzelnen Akteurinnen und Akteuren in wichtigen Positionen können transdisziplinäre Herangehensweisen auch negativ beeinflussen (z.B. mangelnde Kooperation oder eine skeptische Bevölkerung).

## 2.4 Akteurinnen und Akteure

In allen drei Projekten sind zahlreiche Akteurinnen und Akteure aus den verschiedensten Bereichen beteiligt. Die Struktur (zentrale Akteurinnen und Akteure, Verhältnis der Akteurinnen und Akteure zueinander) ist in der Projektantragsphase aber nur bedingt ersichtlich.

## 2.5 Erwartungen

Die Akteurinnen und Akteure aus der Praxis erwarten tendenziell projektübergreifend praxis- und umsetzungsrelevante Forschungsergebnisse. Insbesondere Fragestellungen aus der Praxis sollen im Zuge der Projekte beantwortet werden. Klare Informationen zu Entscheidungsgrundlagen auf höherer Ebene (z.B. zur Besteuerung von Entschädigungen) werden ebenfalls gewünscht. Zudem wird erwartet, Funktion und Ziel der transdisziplinären Forschungen klar zu definieren und darauf aufbauende Erwartungen der Praxisakteurinnen und -akteure zu erfüllen.

Von Projektseite wird erwartet, dass sich die nichtwissenschaftlichen Akteurinnen und Akteure konstruktiv in das Projekt einbringen (Datenbereitstellung, Interviews, Workshops, Mitentwicklung von Vorschlägen und Ideen).

# 2.6 Strukturen

Die folgenden Methoden sind für den Austausch mit den Akteurinnen und Akteuren nützlich: Advisory Board als Brücke zu den Praxisakteurinnen und -akteuren, Interviews, Workshops, Datenaustausch (z.B. von Zeitreihen), direkte Gespräche, Artikel in niederschwelligen Publikationen (z.B. Zeitungen), um Projekte und Ergebnisse publik zu machen, Webpage, Konferenzen und Papers, App-Entwicklung, allgemeine Infoveranstaltungen.

# 3 Transdisziplinarität in der Projektbearbeitung

## 3.1 Austausch

Die Ergebnisse zum Austausch mit den Akteurinnen und Akteuren zeigten, dass viel Flexibilität von Projektseite notwendig ist. So können in vielen Fällen andere Akteurinnen und Akteure zu einem Thema mehr beitragen, als ursprünglich geplant. Beim tatsächlichen Austausch mit den Akteurinnen und Akteuren werden Interessenskonflikte ersichtlich, die bei der Antragsphase nicht oder nur bedingt offensichtlich waren. Der Austausch mit nichtwissenschaftlichen Akteurinnen und Akteuren erfolgt mehrheitlich über sozialwissenschaftlich orientierte Projektteile.

Bei Interviews ist damit zu rechnen, dass man sehr viel Input bekommen kann und somit den Fokus verliert. Dieser Input ist jedenfalls zu filtern und gegebenenfalls muss auf prinzipiell interessante Informationen verzichtet werden. In vielen Fällen schätzt man die Interviewpartner falsch ein und sie können spezifische Fragen (z.B. aus einem vorgefertigten Fragenkatalog) nicht beantworten. Diesen beiden Aspekten kann durch die Einbindung sozialwissenschaftlich ausgebildeter Forscherinnen und Forscher (v.a. qualitative Sozialforschung) entgegengewirkt werden.

Informelle Gespräche mit Akteurinnen und Akteuren aus der Bevölkerung sind neben den formellen Interviews ebenfalls sehr wichtig und sollten bereits in der Projektplanung Berücksichtigung finden. Es zeigte sich weiters, dass auch informelle Gespräche mit Akteurinnen und Akteuren, die im Projekt ursprünglich nicht vorgesehen waren, wichtig sind. Es ist anzumerken, dass eine direkte Nutzbarkeit der Forschungsergebnisse Attraktivität erzeugt bzw. die Motivation, sich in ein Projekt einzubringen, erhöht. Die Altersstruktur der Akteurinnen und Akteure erfordert unterschiedliche Methoden (erfahrungsreich/alt vs. jung/digital/modern). Auch ist beispielsweise an Wochenenden ein großer Teil der Bevölkerung tendenziell besser erreichbar.

Die Reflexion der Prozesse transdisziplinärer Zusammenarbeit in Kombination mit guter projektinterner Kommunikation trägt zu einem erhöhten Lernfaktor bei den Projektmitgliedern bei.

# 3.2 Wissensintegration

Zunächst sollten die Rahmenbedingungen festgelegt werden, unter welchen die nichtwissenschaftlichen Akteurinnen und Akteure Forschungsergebnisse verwenden können. Auch müssen Anforderungen geklärt werden, bei deren Berücksichtigung Forschungsergebnisse für nichtwissenschaftliche Akteurinnen und Akteure bestmöglich nutzbar werden.

Transdisziplinäre Ansätze fördern die Akzeptanz für Forschung in der Bevölkerung. Interviews/Workshops dienen nicht nur dem Informationsgewinn, sondern sollen gezielt eingesetzt werden, um Interesse am Projekt zu wecken. Diese Methoden sind als Zwischenstufe zu "klassischen" Ergebnisworkshops zu betrachten. Auch zeigte sich, dass die Bildung von Fokusgruppen (Gruppendiskussion) eine wertvolle Dynamik in der Teilnahme erzeugen kann.

#### 3.3 Grenzen des transdisziplinären Forschungsansatzes

Die Ergebnisse des Workshops machen deutlich, dass der Erfolg von transdisziplinären Ansätzen stark von einzelnen Menschen (Schlüsselakteurinnen und -akteuren, "Gatekeeper") abhängig sein kann. Diese Personen sind für einzelne, aber für das Projekt wichtige Bereiche zuständig. Ein möglicherweise hemmender Faktor wird auch in den unterschiedlichen Erwartungen (von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie Praxisakteurinnen und -akteuren) hinsichtlich der Projektergebnisse und deren Umsetzung gesehen. Das unterstreicht die Bedeutung der Kommunikation mit den Praxisakteurinnen und -akteuren.

# 4 Transdisziplinarität nach dem Projektabschluss

In der Dissemination sollte eine große Bandbreite an Publikationstypen angestrebt werden, um den Nutzen der Projektergebnisse möglichst zu optimieren. Eine Integration der Erkenntnisse in Lehre und Weiterbildung ist anzustreben. Auch erscheinen Seminare und Exkursionen mit Bezug zu den Projektergebnissen sinnvoll.

Im Zuge der Dissemination werden die Projektergebnisse in diesem Abhandlungsband gemeinsam veröffentlicht. Eine weitere Möglichkeit ist die gemeinsame Erarbeitung von Material für die Lehre auf Grundlage der Erfahrungen aus transdisziplinären Projekten im Themenbereich Wasser in Gebirgsräumen. Auch die PR-Arbeit kann teilweise projektübergreifend und gebündelt erfolgen.

Veranstaltungen gemeinsam mit Akteurinnen und Akteuren aus der Praxis sind empfehlenswert. Für die Dissemination sind Beiträge in Zeitschriften (wissenschaftliche Publikationen für Hochschulpublikum und populärwissenschaftliche Veröffentlichungen von Magazinen bis Gemeindezeitungen), die Nutzung von Foren, die einen Austausch von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie Praxisakteurinnen und -akteuren ermöglichen (z.B. ÖWAV, ÖROK) und die laufende Kommunikation der Projektresultate über Projektwebseiten oder Factsheets anzustreben.

# EXTRIG

# Understanding of Extreme Climatological Impacts in Populated Alpine Areas from 4D Modelling of Hydrogeological Processes

Verständnis extremer klimatologischer Auswirkungen in besiedelten alpinen Gebieten durch 4D-Modellierung hydrogeologischer Prozesse



Untersuchungsgebiet, Sibratsgfäll (Foto: Stephan Hochleithner)

GeoSphere Austria

MJP Ziviltechniker GmbH

Universität Wien

Wildbach- und Lawinenverbauung Sektion Vorarlberg









	ABHANDLUNGEN	DER GE	OSPHERE /	AUSTRIA
ISSN 2060 4404	ISPN 079 2 002252 15 9	Pand 77	Soito 12, 90	Wion Mai 2022

#### ISSN 2960-4494

ISBN 978-3-903252-15-8

Band 77 Seite 13-80

Wien, Mai 2023

# Verständnis extremer klimatologischer Auswirkungen in besiedelten alpinen Gebieten durch 4D-Modellierung hydrogeologischer Prozesse (EXTRIG)

DANIEL ELSTER<sup>1</sup>, STEPHAN HOCHLEITHNER<sup>2</sup>, VERONIKA TUREWICZ<sup>1</sup>, DAVID OTTOWITZ<sup>1</sup>, WOLFGANG JARITZ<sup>3</sup>, INGRID SCHATTAUER<sup>1</sup>, MARTIN KRALIK<sup>4</sup>, JOHANN HIEBL<sup>5</sup>, ANGELIKA HÖFLER<sup>1</sup>, RAMON HOLZSCHUSTER<sup>4</sup>, CHRISTIAN BISPING<sup>4</sup>, MARGARETE WÖHRER-ALGE<sup>6</sup>, MARTIN ALMER<sup>1</sup>, STEFAN HOYER<sup>1</sup> & GERHARD HOBIGER<sup>1</sup>

46 Abbildungen, 13 Tabellen

Österreichische Karte 1:50.000 BMN / UTM 112 Bezau / NL 32-03-13 Sonthofen Transdisziplinäre Forschung Alpine Hydrogeologie Klimawandel Kimaextreme Wasserhaushalt

#### Inhalt

Zu: Ab	sammenfassung	15 16
1	Einleitung und Motivation (D. ELSTER & S. HOCHLEITHNER)	18
2	Bürgerwissenschaften und transdisziplinäre Forschung (S. HOCHLEITHNER)         2.1         Ausgangssituation und Community Profile         2.1.1         Methodik         2.1.2         Ergebnisse         2.2         Initiale Transdisziplinäre Integrationsstrategie         2.2.1         Methodik         2.2.2         Ergebnisse         2.3         Grounded Evaluation – Adaptierte transdisziplinäre Integrationsstrategie         2.3.1         Erhöhte Relevanz des Sozialen         2.3.2         Einbettung sozialwissenschaftlicher Tätigkeiten         2.3.3         Drainage Walks	19 19 20 22 23 25 26 27 27
3	<ul> <li>Geologische Verhältnisse und 3D-Modellierung (W. JARITZ, V. TUREWICZ, D. OTTOWITZ &amp; I. SCHATTAUER).</li> <li>3.1 Regional und lokal geologische Übersicht (W. JARITZ)</li> <li>3.2 Geophysikalische Untersuchungen (D. OTTOWITZ &amp; I. SCHATTAUER).</li> <li>3.2.1 Methodik (D. OTTOWITZ &amp; I. SCHATTAUER)</li> <li>3.2.2 Ergebnisse der Aero-Elektromagnetik (I. SCHATTAUER)</li> <li>3.2.3 Ergebnisse der 2D-Geoelektrik (D. OTTOWITZ)</li> <li>3.2.4 Geologische Interpretation der Ergebnisse der 2D-Geoelektrik (D. OTTOWITZ)</li> <li>3.3 Geologische 3D-Modellierung (V. TUREWICZ &amp; W. JARITZ)</li> <li>3.3.1 Methodik (V. TUREWICZ)</li> <li>3.3.2 Konzeptionelle Modellvorstellung (W. JARITZ &amp; V. TUREWICZ)</li> <li>3.3.3 Ergebnisse und Interpretation (V. TUREWICZ)</li> </ul>	28 29 29 30 31 32 33 33 33 33

DANIEL ELSTER, VERONIKA TUREWICZ, DAVID OTTOWITZ, INGRID SCHATTAUER, ANGELIKA HÖFLER, MARTIN ALMER, STEFAN HOYER, GERHARD HOBIGER: GeoSphere Austria, Hohe Warte 38, 1190 Wien, Österreich. Daniel. Elster@geosphere.at, Veronika. Turewicz@geosphere.at, David. Ottowitz@geosphere.at, Ingrid. Schattauer@geosphere.at, Angelika. Höfler@ 1 geosphere.at, Martin.Almer@geosphere.at, Stefan.Hoyer@geosphere.at, Gerhard.Hobiger@geosphere.at STEPHAN HOCHLEITHNER: Universität Zürich, Winterthurerstrasse 190, 8057 Zürich. Stephan.Hochleithner@geo.uzh.ch WOLFGANG JARITZ: MJP Ziviltechniker GmbH, Georg-Scherer-Straße 7, 5760 Saalfelden. W.Jaritz@mjp-zt.at

<sup>2</sup> 

З

MARTIN KRALIK, RAMON HOLZSCHUSTER, CHRISTIAN BISPING: Universität Wien, 1090 Wien, Martin Kralik@univie.ac.at, Ram.Holzschuster@gmail.com, 4

bispingchristian@icloud.com 5 JOHANN HIEBL: Konsulent der GeoSphere Austria.

MARGARETE WÖHRER-ALGE: Wildbach- und Lawinenverbauung Sektion Vorarlberg, Rheinstraße 32/5, 6900 Bregenz. Margarete.Woehrer-alge@die-wildbach.at 6

4	Klim	atische Bedingungen und Klimaszenarien (J. HIEBL & A. HÖFLER)	36
	4.1	Lufttemperatur	38
		4.1.1 Methodik	38
	4.0	4.1.2 Ergebnisse und Interpretation	38
	4.2	Niederschiag	38
		4.2.1 Methodik	30 40
	13	4.2.2 LigeDillsSe.	40
	4.0	A 3.1 Methodik	40
		4.3.2 Fraebnisse	40
	4.4	Schneewasseräquivalent	40
		4.4.1 Methodik	40
		4.4.2 Ergebnisse	41
	4.5	Klimatologische Auswertung und Klimaindizes.	42
	4.6	Quantitative Beurteilung der Güte der erstellten Daten.	44
	4.7	Klimaszenarien	46
		4.7.1 Methodik	46
		4.7.2 Ergebnisse und Interpretation	47
_			
5	Hydr	ogeologie (D. Elster, M. Kralik, R. Holzschuster, C. Bisping, W. Jaritz, V. Turewicz & G. Hobiger).	51
	5.1	Verweilzeiten der Grundwasser (M. KRALIK)	51
		5.1.1 Methodik	51
	5.2	S.1.2 Ergeblisse und Endergemeter (D. E. TER, M. KRAUK & G. Horizer)	52
	5.2	5.2.1 Hydrochemie (D. Elster, M. KRALIK & G. Hobiger)	55
		5.2.2 Frgebnisse und Interpretation (D. ELSTER & M. KRALIK)	55
	5.3	Quell- und Oberflächenabfluss (D. ELSTER & R. HOLZSCHUSTER)	56
	0.0	5.3.1 Methodik (D. Elster & R. Holzschuster)	56
		5.3.2 Ergebnisse und Interpretation (D. ELSTER)	56
	5.4	Niederschlag-Abfluss-Modellierung (D. ELSTER)	57
		5.4.1 Methodik	57
		5.4.2 Ergebnisse und Interpretation	57
	5.5	Wasserbilanz (D. Elster, R. Holzschuster & M. Kralik)	58
		5.5.1 Untersuchungszeitraum und Zeitraum 1996 bis 2020 (D. ELSTER, R. HOLZSCHUSTER & M. KRALIK)	58
		5.5.2 Klimaszenarien (D. ELSTER).	58
	5.6	Infiltrationsbedingungen im Bereich der Eisseesedimente und deren oberflächennahe Entwässerung	~~
		(C. BISPING, D. ELSTER & M. KRALIK)	60
		5.6.1 Methodik	60
	57	5.6.2 Ergebnisse und interpretation	62
	5.7	Tyulogeologische Konzeptvolsteilung (D. Elsten, IVI. KRALIK, W. JANTZ, V. TUNEWICZ & R. HOLZSCHUSTEN)	03
6	Num	erische 4D-Modellierung (V Tubewicz)	66
0	6.1	Methodik	66
	0	6.1.1 Modellaufbau.	66
		6.1.2 Modellkalibrierung	66
	6.2	Geometrie, Untergrundparameter und Randbedingungen	67
	6.3	Modellkalibrierung	69
	6.4	Ergebnisse und Interpretation.	71
		6.4.1 Erste Modellrechnungen	71
	6.5	Klimaszenarien in der numerischen Modellierung	73
_			
1	Disk	ussion und Ausblick (D. ELSTER, S. HOCHLEITHNER, V. TUREWITZ & M. KRALIK)	/5 75
	7.1	Syntnese der transdisziplinaren vorgangsweise (S. HOCHLEITHNER)	15
	1.2	(D FISTER V TUREWICZ & M KRAUK)	76
		U. LUTEN, V. TUNEVVIUZ & IVI. MALIN.	10
8	Liter	atur.	76
-			
9	Rech	ntsnormen	80

#### Zusammenfassung

EXTRIG liefert einen wichtigen Beitrag für ein verbessertes Verständnis von hydrogeologischen Prozessen in inneralpinen Einzugsgebieten in Bezug auf Vulnerabilität im Kontext des Klimawandels und zu transdisziplinärer Forschung. Als Untersuchungsgebiet wurde die von einer kriechenden Massenbewegung betroffene Gemeinde Sibratsgfäll im Bregenzerwald (Vorarlberg) gewählt, da für dieses Gebiet bereits qualitativ hochwertige geologische Informationen vorlagen. Der innovative Forschungsansatz folgte einem transdisziplinären Zugang, der auf der Zusammenarbeit von professionellen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie der lokalen Bevölkerung beruht. Letztere wurden im Zuge einer transdisziplinären Integrationsstrategie aktiv in das Projekt eingebunden und gestaltete so die Forschung mit.

Der Ausgangspunkt des Projektes ist von Auswirkungen des Klimawandels geprägt: Im Alpenraum Österreichs liegen in zahlreichen Gebieten hohe Niederschlagsmengen von über 2.000 mm pro Jahr vor, weshalb die Gebiete sensibel auf durch den Klimawandel hervorgerufenen Temperaturanstieg reagieren (APCC, 2014). Insbesondere die Auswirkungen auf die Entwicklung der Grundwasserspeicherung standen in den letzten Jahren zunehmend im Fokus der angewandten Forschung. Dabei wurden für die Beschreibung der Trendentwicklung des Klimas zumeist regionale Klimamodelle (Representative Concentration Pathways – RCPs) berücksichtigt (z.B. FINGER et al., 2012; EPTING et al., 2021; LINDINGER et al., 2021). Grundsätzlich sind zukünftig wärmere Winter zu erwarten, die zu einer früheren und schnelleren Schneeschmelze und zu einem verstärkten Oberflächenabfluss im Winter und Frühling führen (BARNETT et al., 2005). In Folge werden Engpässe bei den Wasserversorgungen im Sommer und Herbst, insbesondere bei begrenztem Speichervermögen, wahrscheinlicher. Die Zunahme von extremen Ereignissen, wie anhaltende Trockenperioden und Starkniederschläge, sind weitere Belastungsfaktoren. Letztere können insbesondere in Bereichen von Massenbewegungen, die durch erhöhte Porenwasserdrücke induziert werden, verheerende Auswirkungen haben. In übertieften Alpentälern sind solche Hangbewegungen oftmals auf Druckentlastung infolge der Deglaziation zurückzuführen (PREUSSER et al., 2010; HILBERG & RIEPLER, 2016). Um mit klimatologischen Ereignissen zusammenhängende Prozesse verstehen zu können, müssen hydrogeologische Bedingungen im Detail eruiert werden. Die Erstellung von hydrogeologischen Modellen von alpinen Einzugsgebieten hängen in der Regel von der Verfügbarkeit und Interpretation von multidisziplinären und hochqualitativen Daten ab. Abgesehen von naturwissenschaftlichen Ansätzen empfiehlt es sich daher auch die lokale Bevölkerung und deren lokale Expertise einzubinden.

Die transdisziplinäre Forschung in Zusammenarbeit mit der lokalen Bevölkerung umfasste drei miteinander zusammenhängende Bereiche: Erstens, die Gewährleistung einer integrativen Forschungspraxis im Sinne eines transdisziplinären Forschungsansatzes auf Ebene des Gesamtprojektes in enger Zusammenarbeit mit dem Projektmanagement. Zweitens, die Umsetzung einer integrativen Kooperation mit nichtwissenschaftlichen Akteurinnen und Akteuren, insbesondere der lokalen Bevölkerung. Drittens, das Koordinieren, das reflexive Evaluieren und das den jeweils aktuellen Erfordernissen entsprechende Adaptieren der Forschungsmethoden. Operativ lag der Fokus auf der Co-Entwicklung eines Citizen Science-Paketes zusammen mit der lokalen Bevölkerung. Dieser Fokus wurde im Verlauf des Projektes entsprechend des Adaptabilitätsprinzips transdisziplinärer Forschung erweitert: Während der Citizen Science-Ansatz weiterverfolgt wurde, erfolgten als Ergebnis eines fortdauernden Evaluations- und Reflexionsprozesses in Kooperation mit lokalen, nichtwissenschaftlichen Akteurinnen und Akteuren Anpassungen im Bereich der Methodik mit stärkerer Gewichtung im qualitativen Methodenbereich. Die Ergebnisse des Projekts umfassen dementsprechend sowohl das Material, das im Zuge des Citizen Science-Ansatzes generiert wurde, als auch und im Besonderen Erkenntnisse analytisch-kritischer Reflektion der Methodik und ihrer Adaption. Diese Vorgehensweise erlaubte es, über die ursprünglichen Projektziele hinaus auch eine methodische Lücke zu adressieren, der in den letzten Jahren verstärkt in den Fokus von Forschung zu transdisziplinären Projekten in Hydrologie und Hydrogeologie rückte (RE, 2015, 2021; BARTHEL & SEIDL, 2017).

Die naturwissenschaftliche Methodik der wissenschaftlichen Expertenschaft umfasste Ansätze aus Meteorologie, Geologie, Hydrogeologie und Geophysik. So wurden verfügbare Klimabeobachtungsdaten (Lufttemperatur, Niederschlag, Evapotranspiration, Schneewasseräquivalent) für das Untersuchungsgebiet gesammelt und aufbereitet. In einem zweiten Schritt wurden die Klimabedingungen abgeleitet und ausgewertet; sie bieten die Grundlage für die Erhebung und Beschreibung der hydrogeologischen Prozesse im Untersuchungsgebiet für den Zeitraum 1995 bis 2020. Um Aussagen über Auswirkungen von Klimaszenarien im Untersuchungsgebiet treffen zu können, wurden in einem weiteren Schritt regionale Klimamodelle (Representative Concentration Pathways – RCPs) für den Zeitraum 1995 bis 2100 berücksichtigt. Von dem etwa 5 km<sup>2</sup> großen Untersuchungsgebiet wurde ein geologisches 3D-Modell erstellt. Dieses beruht auf der Auswertung von geologischen und geophysikalischen Informationen. Das 3D-Modell stellte die Grundlage für die Geometrie und geologischen Randbedingungen für die hydrogeologische Konzeptvorstellung und die numerische Modellierung dar. Hydrogeologische Untersuchungen umfassten die Installation eines Oberflächenabflussmonitorings zur Ermittlung der Wasserbilanz, Niederschlag-Abfluss-Modellierungen, Grundwassermonitoring und Untersuchungen zur Verweilzeit des Grundwassers. Zudem wurden entsprechend der Bedürfnisse der Bevölkerung die Funktionalität der seichten landwirtschaftlichen Drainagen evaluiert. Die Forschungsergebnisse flossen in ein kalibriertes numerisches Modell ein, um die konzeptionelle hydrogeologische Vorstellung zu validieren und um die mögliche Entwicklung des Grundwasserspeichers im Zuge des Klimawandels zu beschreiben.

Das primäre Ziel der transdisziplinären Herangehensweise, gemeinsam mit lokalen, nicht-wissenschaftlichen Akteurinnen und Akteuren Wissen über Zusammenhänge zwischen hydrogeologischer Dynamik, den Auswirkungen des Klimawandels und sozialer Dimensionen zu generieren, erforderte eine intensive Einbindung lokaler Stakeholder, die ursprünglich durch ein Citizen Science-Paket umgesetzt werden sollte. In dessen Mittelpunkt stand die gemeinsame Entwicklung einer Smartphone-App zur Generierung hydrogeologischer Daten, die in das Modell des Untersuchungsgebiets einfließen sollten. Bei der Umsetzung des geplanten transdisziplinären Ansatzes sah sich das Projektteam jedoch bald mit einigen entscheidenden Herausforderungen konfrontiert, die sich speziell aus dem kleinräumigen Umfeld eines inneralpinen Tals ergaben. Zu diesen Herausforderungen gehören vor allem eine erhöhte Relevanz des Sozialen, eine kleine Anzahl von (potentiellen) Teilnehmenden, die mit einer großen Anzahl von divergierenden Interessen, Bedürfnissen und Anliegen der lokalen Stakeholder zusammentrifft, sowie eine starke Diskrepanz zwischen klassischen, theoriededuzierten Risikovorstellungen und lokalen, kontextuell definierten Risikowahrnehmungen. Das Herzstück des Ansatzes, ein Citizen Science-Paket zur Koproduktion von Wissen durch die gemeinsame Entwicklung einer hydrogeologischen Smartphone-App, lieferte nur begrenzte Ergebnisse in Bezug auf die Generierung hydrogeologischer Daten, erwies sich jedoch als sehr fruchtbar für die Einbindung lokaler Interessengruppen sowie für das Generieren und die Kommunikation von Wissen. Im Rahmen von Reflexions- und Adaptionsprozessen wurden verstärkt gualitative sozialwissenschaftliche Methoden eingesetzt, was zu klareren und detaillierteren Ergebnissen, einer stärkeren Beteiligung lokaler Interessengruppen, einer höheren Aufmerksamkeit bezüglich hydrogeologischer Dynamiken und einer stärkeren Unterstützung der Forschungsaktivitäten insgesamt führte. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Einbeziehung qualitativer sozialwissenschaftlicher Methoden in die transdisziplinäre hydrogeologische Forschung in kleinräumigen Untersuchungsgebieten fruchtbarer zu sein scheint als die Umsetzung von in anderen Kontexten durchaus bewährten, transdisziplinärer Methoden und Toolkits, wie z.B. quantitative Evaluierung oder Citizen Science über Smartphone-Apps. Die Anpassung von Methoden aus den Sozialwissenschaften, wie z.B. Transect Walks, kann in dieser Hinsicht ebenfalls zielführend sein, ebenso wie die "Einbettung" von Sozialwissenschaftlerinnen und Sozialwissenschaftlern in hydrogeologische Feldteams. Die Einbeziehung der Sozialwissenschaften, insbesondere aus Disziplinen mit einem starken qualitativen methodischen Schwerpunkt, wie z.B. der Sozialanthropologie oder der Humangeographie, kann daher für die sozio-hydrogeologische Forschung in kleinräumigen Kontexten von großem Nutzen sein. Weitere Forschungsarbeiten sollten sich auch auf erkenntnistheoretische Aspekte konzentrieren, wie etwa in Bezug auf die (sozialen und politischen) Konstruktion(en) von Risiko. Kleinräumige Untersuchungskontexte bringen im Bereich transdisziplinärer hydrogeologischer Forschung spezifische Herausforderungen mit sich, bieten jedoch auch besondere Potentiale, wie sich aus unseren Erkenntnissen ebenfalls ableiten lässt. Wenn eine transdisziplinäre Komponente ernst genommen (und nicht bloß nominell angeführt) wird, ermöglicht die transdisziplinäre hydrogeologische Forschung in kleinräumigen Settings eine größere Tiefe des generierten Materials sowie eine größere Wirkung von Projekten, insbesondere, wenn diese auf Sensibilisierung und Koproduktion von Wissen über nachhaltiges und resilientes Wasser- und Risikomanagement abzielen.

Das Becken von Sibratsgfäll weist mächtige Ablagerungen von eiszeitlichen Lockersedimenten mit komplexer Zusammensetzung auf, die unterschiedliche hydraulische Eigenschaften zeigen. Deren räumliche Ausdehnung wurde mithilfe eines geologischen 3D-Modells beschrieben und dargestellt. Mit geophysikalischen Methoden wurde nachgewiesen, dass die Sedimente im zentralen Bereich des übertieften Beckens eine Mächtigkeit von 200 bis 250 m erreichen. Unter Eisseesedimenten befinden sich mächtige Grobklastika, die während einer Vorstoßphase im Würm während des Gletscheraufbaus abgelagert wurden. Eine darauffolgende Stillwasserphase repräsentiert demnach die bereits gehinderten Abflussverhältnisse der Bäche aus den Seitentälern Richtung Haupttal, da dort bereits der mächtigere Bregenzerachgletscher den Abfluss der Seitenbäche behinderte. Die Eisseesedimente wurden im Laufe des weiteren Gletscheraufbaus bis zum Last Glacial Maximum (LGM) von diesem überfahren. Darauf weist die durchwegs hohe Konsolidierung der Eisseesedimente hin.

Untersuchungen zu den mittleren Verweilzeiten der artesischen und gespannten Grundwässer der Vorstoßschotter und der Randzone zeigten, dass Grundwasserlater von mindestens 30 bis 40 Jahren vorliegen und alte Grundwasserkomponenten mit einem Alter von zumindest einigen hundert Jahren beteiligt sind. Zudem dürfte das Einzugsgebiet der Wässer in einem Seehöhenbereich von 1.200 bis 1.400 m liegen. Da die Wassertemperaturen der tieferen Grundwässer 2,5 bis 3 °C über den Jahresdurchschnittstemperaturen von Sibratsgfäll liegen, ist eine Beteiligung von tiefer zirkulierenden Wässern wahrscheinlich. Aufgrund der ungewöhnlich hohen Wasseralter und der erhöhten Wassertemperaturen ist ein tieferer Zufluss über Klüfte im Festgestein des Rhenodanubischen Flyschs und der Feuerstätter Decke anzunehmen: dieser Prozess wurde als "Mountain-Block Recharge" (MBR) erkannt. Es ist zu erwarten, dass diese ältere Grundwasserkomponente zumindest rund 30 % ausmacht.

Im Zuge der Untersuchungen zur Wasserbilanz wurden im Untersuchungsjahr 2020 ein Niederschlag von ca. 2.500 mm, ein Oberflächenabfluss von 1.300 mm, eine Evapotranspiration von 800 mm und eine Änderung des Grundwasserspeichervolumens von +330 mm festgestellt. Die klimatologische Auswertung für den Zeitraum 1995 bis 2020 zeigt auf, dass die Lufttemperatur in diesem klimatologisch kurzen Zeitraum um 1,5 °C anstieg. Damit einhergehend erhöhte sich die Evapotranspiration um 11 % und das Schneewasseräquivalent nahm um 36 % ab. Weitgehend stabil blieb die Niederschlag-Jahressumme. Auf Grundlage von berechneten Klimaindizes lässt sich schlussfolgern, dass die regionalen Klimamodelle bei verstärkten bis moderaten Klimaschutzanstrengungen überschaubare Änderungen der hydrogeologischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet simulieren. "Fossiler Weg"-Modellabläufe von RCP 8.5 zeigen sowohl hinsichtlich sommerlicher Trockenheit als auch hinsichtlich extremer Niederschläge deutliche Zunahmen auf, die teilweise am Rand der Spannweite der aus Beobachtungen bekannten Klimabedingungen liegen. Diese Klimaprojektionen stellen plausible Entwicklungen des Klimas unter der Voraussetzung definierter anthropogener Aktivitäten dar, sie sind allerdings keine konkreten Vorhersagen des tatsächlichen künftigen Klimageschehens.

In enger Zusammenarbeit mit lokalen Landwirten wurde die Funktionalität landwirtschaftlicher Drainagen an ausgewählten Wiesen im Bereich der Eisseesedimente evaluiert. Bei den undurchlässigen Hanggley-Haftwasserpseudogley Böden findet grundsätzlich eine Rohrdränung statt. Offene Gräben wären grundsätzlich für eine effektive Entwässerung zu empfehlen, führen jedoch bei der landwirtschaftlichen Nutzung zu Problemen. In der Praxis werden Füllungen von Drainagegräben mit Humus bedeckt, mechanische Bodenverdichtung (z.B. Viehtritt und Radlasten) können die Funktionalität jedoch stark beeinträchtigen. Der Bevölkerung wurde im Zuge einer Informationsveranstaltung deshalb die Anwendung von bodenverbessernden Maßnahmen empfohlen.

Mit einer numerischen Modellierung wurde die konzeptionelle hydrogeologische Modellvorstellung validiert und Grundwasserfließverhältnisse unter Berücksichtigung der klimatischen Verhältnisse und Klimaszenarien simuliert. Es konnten vor allem qualitative Aussagen zum Verhalten des Grundwasserkörpers in Form von Trends der Grundwasserstände und dem Discharge im Zeitverlauf getroffen werden. Bedingt durch die geringe Datenlage bei Grundwasserstandsmessungen – in der Projektantragsphase war von einer größeren Anzahl von Grundwassererschließungen auszugehen – ist das Modell allerdings hinsichtlich quantitativer Aussagen mit deutlichen Unsicherheiten behaftet.

#### Understanding of Extreme Climatological Impacts in Populated Alpine Areas from 4D Modelling of Hydrogeological Processes (EXTRIG)

#### Abstract

EXTRIG provides an important contribution to an improved understanding of hydrogeological processes in inner alpine catchments in relation to vulnerability in the context of climate change and to transdisciplinary research. The municipality of Sibratsgfäll in the Bregenzerwald (Vorarlberg), which is affected by a creeping mass movement, was chosen as the study area because of available high quality geological information. Our research followed a transdisciplinary approach based on collaboration of professional scientists and the local population. Locals were actively involved in the transdisciplinary integration approach to improve scientific findings.

The project's background is shaped by the effects of climate change: High precipitation amounts of more than 2,000 mm per year are present in numerous areas within the Alpine region of Austria. Those areas react sensitively to temperature increases caused by climate change (APCC, 2014). In particular, the impacts on groundwater storage trends have been an increasing focus of applied research in recent years. In this context, regional climate models (Representative Concentration Pathways – RCPs) are considered to describe the development of climate trends (e.g., FINGER et al., 2012; EPTING et al., 2021; LINDINGER et al., 2021). Overall, warmer winters can be expected in the future, leading to earlier and faster snowmelt and increased surface runoff in winter and spring (BARNETT et al., 2005). As a result, shortages of water supplies become more likely in summer and fall, especially when limited storage capacity is present. Increases in extreme events, such as prolonged dry periods and heavy precipitation, are other stress factors. This can have devastating effects, especially in areas with mass movements induced by increased pore water pressures. In overdeepened alpine valleys such slope movements are often caused by pressure relief resulting from deglaciation (PREUSSER et al., 2010; HILBERG & RIEPLER, 2016). Hydrogeological conditions have to be investigated in detail in order to understand processes related to climatological events. The creation of hydrogeological models of alpine catchments usually depends on the availability and interpretation of multidisciplinary and high quality data. Apart from natural science approaches, it is therefore highly recommended to involve the local population and their local expertise.

The transdisciplinary research towards collaboration with the local population included three interrelated dimensions: First, ensuring integrative research practice in terms of a transdisciplinary research approach at the level of the overall project in close collaboration with project management. Second, implementing integrative cooperation with non-scientific actors, especially the local population. Third, coordination, reflexive evaluation and adaptation of research methods according to requirements. Operationally, the focus was set on the co-development of a Citizen Science package together with the local population. This focus was extended in course of the project according to the adaptability principle of transdisciplinary research: While the Citizen Science approach was further pursued, methodology was adapted towards a stronger emphasis on qualitative methods as a result of ongoing evaluation and reflection processes in cooperation with local, non-scientific actors. The results of the project thus include both the material generated in the course of the Citizen Science approach and findings from analytical-critical reflection on methodology and its adaptation. This approach also allowed to address, beyond the original project goals, a methodological gap that has increasingly become the focus of research on transdisciplinary projects in hydrology and hydrogeology in recent years (Re, 2015, 2021; BARTHEL & SEIDL, 2017).

The methodology of natural scientists included approaches from meteorology, geology, hydrogeology and geophysics. Thus, available climate observation data (air temperature, precipitation, evapotranspiration, snow water equivalent) for the study area were collected and processed. In a second step, the climatic conditions were

derived and evaluated. They provide the basis for the description of the hydrogeological processes in the study area for the period 1995 to 2020. Regional climate models (Representative Concentration Pathways – RCPs) for the period 1995 to 2100 were considered in a further step in order to be able to describe possible effects from climate scenarios in the study area. A 3D geological model was created of the study area, which covers an area of about 5 km<sup>2</sup>. This is based on the evaluation of geological and geophysical information. The 3D model provided the basis for the geometry and geological boundary conditions for the hydrogeological conceptual design and numerical modelling. Hydrogeological investigations included installation of surface runoff monitoring to determine water balance, precipitation-runoff modelling, groundwater monitoring, and groundwater residence time investigations. In addition, corresponding with local residents' needs, the functionality of shallow agricultural drainages was evaluated. The research results were incorporated into a calibrated numerical model to validate the conceptual hydrogeological model and to describe the potential trends of groundwater availability in the valley basin within the context of climate change.

The primary goal of the transdisciplinary approach was to co-generate knowledge about interactions between hydrogeological dynamics, climate change impacts, and social dimensions together with local, non-scientific stakeholders. This required intensive involvement of local stakeholders, which was originally to be implemented through a citizen science package. Initially, we intended to focus on the collaborative development of a smartphone app to generate hydrogeological data to be incorporated into the research. However, the project team was soon confronted with a number of critical challenges that arose specifically from the small-scale environment of an inner-alpine valley. These challenges primarily include an increased relevance of the social, a limited number of (potential) participants coinciding with a large number of diverging interests, and concerns of local stakeholders in addition to a strong discrepancy between classical, theory-deduced risk perceptions and local, contextually defined risk perceptions. The main approach, a Citizen Science package to co-produce knowledge through the collaborative development of a hydrogeological smartphone app, yielded only limited results in terms of hydrogeological data generation, but proved very useful for engaging local stakeholders and generating and communicating knowledge. More qualitative social science methods were used as part of reflection and adaptation processes, leading to clearer and more detailed results, more involvement of local stakeholders, more attention regarding hydrogeological dynamics, and more support for the research activities as a whole. In summary, incorporating qualitative social science methods into transdisciplinary hydrogeological research in small-scale study areas seems to be more fruitful than implementing transdisciplinary methods and toolkits, such as quantitative evaluation or Citizen Science via smartphone apps, which are well established and have proven fruitful in other contexts. Adapting methods from the social sciences, such as transect walks, can be beneficial in this regard, as can "embedding" social scientists in hydrogeological field teams. The involvement of social scientists, particularly from a strong gualitative methodological focus background, e.g. social anthropology or human geography, can therefore be of great benefit to socio-hydrogeological research in small-scale contexts. Further research should also focus on epistemological aspects, such as those related to the (social and political) construction of risk. Small-scale contexts pose specific challenges in the field of transdisciplinary hydrogeological research, but also offer specific potential, as can also be inferred from our findings. When a transdisciplinary component is taken seriously (and not merely nominally invoked), transdisciplinary hydrogeological research in small-scale settings allows for greater depth of material generated as well as greater impact of projects, especially when they aim to raise awareness and co-produce knowledge about sustainable and resilient water and risk management.

The basin of Sibratsgfäll comprises of deposits of glacial unconsolidated sediments with complex compositions that bear different hydraulic properties. Their spatial extent was described with a geological 3D model. Findings from geophysical methods proved that sediments in the central part of the overdeepened valley reach 200 to 250 m in thickness. Proglacial gravels were initially deposited during an advance phase in the Würm Glacial during glacial buildup. A subsequent stagnant water phase followed an already obstructed drainage of the streams from the side valleys towards the main valley. Those lacustrine ice lake sediments were overrun by the glacier in the course of its further buildup until the Last Glacial Maximum (LGM). This is indicated by the consistently high consolidation of the lacustrine ice lake sediments.

The artesian and stressed groundwater of the proglacial gravels and the marginal zone have mean residence times (MRT) of at least 30 to 40 years and findings prove the involvement of very old groundwater components with an age of at least several hundred years. In addition, the catchment area of the investigated groundwater samples is found at an elevation range of 1,200 to 1,400 m. Since the water temperatures of the deeper groundwater are 2.5 to 3 °C above the annual average temperatures of Sibratsgfäll, a participation of deeper circulating waters is likely to take place. Based on the unusually elevated groundwater ages and elevated water temperatures, deeper inflow via fractures in the bedrock is likely. This process has been recognized as "mountain-block recharge" (MBR). This older groundwater component is expected to account for at least about 30 %.

The water balance calculation of 2020 shows a precipitation rate of approximately 2,500 mm, a surface runoff of 1,300 mm, an evapotranspiration of 800 mm and a change in the groundwater storage volume of +330 mm. The climatological evaluation for the time period 1995 to 2020 indicates that the air temperature has increased by 1.5 °C in this climatologically short period. This was accompanied by an 11 % increase in evapotranspiration and a 36 % decrease in snow water equivalent. The annual total of precipitation remained largely stable. From climate indices it can be concluded that regional climate models simulate minor changes in hydrogeological conditions in the study area with increased to moderate climate change mitigation efforts (RCP 2.6 and 4.5). However, business-as-usual model runs of RCP 8.5 show significant increases in both summer drought and extreme precipitation, some of which are at the edge of the range of climate conditions known from real observations. These climate projections represent plausible developments of the climate under the assumption of defined anthropogenic activities, but they are not predictions of actual future climate events.

The functionality of agricultural drainages was evaluated at chosen pastures in the area of the lacustrine ice lake sediments in close cooperation with local farmers. Pipe drainage basically occurs in the rather impermeable pseudogley soils. Open ditches would generally be recommended for effective drainage, but cause problems for agricultural use. In practice, drainage ditch fillings are covered with humus, but mechanical soil compaction (e.g., cattle tread and wheel loads) can severely reduce the functionality as a consequence. The use of soil improvement measures was therefore recommended to local farmers in the course of an information event.

Numerical modelling was finally used to validate the conceptual hydrogeological model and to simulate groundwater flow conditions under consideration of climatic conditions and climate scenarios. Overall, qualitative statements on the behaviour of the groundwater body in the form of trends in groundwater levels and discharge over time could be made. However, due to the limited data available for groundwater level measurements – a larger number of groundwater discharges was assumed during the project application phase – the model bears significant uncertainties concerning precise quantitative statements.

# 1 Einleitung und Motivation

#### (D. ELSTER & S. HOCHLEITHNER)

Der Alpenraum weist in vielen Gebieten hohe Niederschlagsmengen von über 2.000 mm pro Jahr auf und reagiert sensibel auf Temperaturanstieg und Niederschlagsrückgang hervorgerufen durch den Klimawandel (vgl. APCC, 2014). Die Auswirkungen auf die Entwicklung der Grundwasserspeicherung standen deshalb in den letzten Jahren zunehmend im Fokus der angewandten Forschung, hierbei wurden regionale Klimamodelle (Representative Concentration Pathways - RCPs) berücksichtigt (z.B. FIN-GER et al., 2012; EPTING et al., 2021; LINDINGER et al., 2021). Grundsätzlich sind zukünftig wärmere Winter zu erwarten, die zu einer früheren und schnelleren Schneeschmelze und zu einem verstärkten Oberflächenabfluss im Winter und Frühling führen (BARNETT et al., 2005). In Folge werden Engpässe bei den Wasserversorgungen im Sommer und Herbst, insbesondere bei begrenztem Speichervermögen wahrscheinlicher. Die Zunahme von extremen Ereignissen, wie anhaltende Trockenperioden und Starkniederschläge, sind weitere Belastungsfaktoren. Letztere können insbesondere in Bereichen von Massenbewegungen, die durch erhöhte Porenwasserdrücke induziert werden, verheerende Auswirkungen haben. In übertieften Alpentälern sind solche Hangbewegungen oftmals auf Druckentlastung infolge der Deglaziation zurückzuführen (PREUSSER et al., 2010; HILBERG & RIEPLER, 2016). Um mit klimatologischen Ereignissen zusammenhängende Prozesse verstehen zu können, müssen hydrogeologische Bedingungen im Detail eruiert werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, die vorliegenden Bedingungen möglichst umfassend nachzubilden. Die Erstellung eines hydrogeologischen Modells für ein alpines Einzugsgebiet hängt in der Regel von der Verfügbarkeit von multidisziplinären und hochqualitativen Daten ab. Diese sind jedoch in den meisten Fällen nicht vorhanden.

Das Projektziel von EXTRIG war, zu einem verbesserten Verständnis von hydrogeologischen Prozessen in inneralpinen Einzugsgebieten hinsichtlich Vulnerabilität im Kontext des Klimawandels beizutragen. Hierbei wurden ein Ansatz auf Fallstudienebene bzw. der unteren Mesoskala (ca. 5 km<sup>2</sup>) verfolgt. Als Untersuchungsgebiet wurde die von einer kriechenden Massenbewegung betroffene Gemeinde Sibratsgfäll im Bregenzerwald (Vorarlberg) gewählt, da für dieses Gebiet bereits hochqualitative geologische Informationen vorlagen (Abb. 1). Der innovative Forschungsansatz beruhte auf einem transdisziplinären Zugang, der auf der Zusammenarbeit von Geologen, Meteorologen, Hydrogeologen, Geophysikern, Sozialwissenschaftlern und der lokalen Bevölkerung beruht. Letztere wurden im Zuge von Citizen Science aktiv in das Projekt eingebunden.

Konkret wurden folgende Zielsetzungen entsprechend der Arbeitspakete verfolgt:

 Arbeitspaket 2 "Bürgerwissenschaften" (Kapitel 2) umfasste drei miteinander zusammenhängende Bereiche: Erstens, die Gewährleistung einer integrativen Forschungspraxis im Sinne eines transdisziplinären Forschungsansatzes auf Ebene des Gesamtprojektes in enger Zusammenarbeit mit dem Projektmanagement. Zweitens, die Umsetzung einer integrativen Kooperation mit nichtwissenschaftlichen Akteurinnen und Ak-

teuren, insbesondere durch Zusammenarbeit mit der lokalen Bevölkerung. Drittens, das Koordinieren, das reflexive Evaluieren und das den jeweils aktuellen Erfordernissen entsprechende Adaptieren der Forschungsmethoden. Operativ lag der Fokus auf der Co-Entwicklung eines Citizen Science-Paketes zusammen mit der lokalen Bevölkerung. Dieser Fokus wurde im Verlauf des Projektes entsprechend des Adaptabilitätsprinzips transdisziplinärer Forschung erweitert: Während der Citizen Science-Ansatz weiterverfolgt wurde, erfolgten als Ergebnis eines fortdauernden Evaluationsund Reflexionsprozesses in Kooperation mit lokalen, nichtwissenschaftlichen Akteurinnen und Akteuren Anpassungen im Bereich der Methodik. Die im Folgenden präsentierten und diskutierten Ergebnisse umfassen dementsprechend sowohl das Material, das im Zuge des Citizen Science-Ansatzes generiert wurde, als auch und im Besonderen eine analytisch-kritische Reflektion der Methodik und ihrer Adaption. Diese Vorgehensweise erlaubt es, über die ursprünglichen Projektziele hinaus auch einen methodischen "gap" zu adressieren, der in den letzten Jahren verstärkt in den Fokus von Forschung zu transdisziplinären Projekten in Hydrologie und Hydrogeologie rückte (RE, 2015, 2021; BARTHEL & SEIDL, 2017).

- In Arbeitspaket 3 "Geologische 3D Modellierung, Konzept und Umsetzung" (Kapitel 3) wurde von dem Untersuchungsgebiet ein geologisches 3D-Modell erstellt. Dieses beruht auf der Auswertung von geologischen und geophysikalischen Informationen. Das 3D-Modell stellte die Grundlage für die Geometrie und geologischen Randbedingungen des numerischen 4D-Modells in Kapitel 3 dar.
- In Arbeitspaket 5 "Klimatologische Bedingungen und Klimaszenarien" (Kapitel 4) wurden zunächst verfügbare Klimabeobachtungsdaten (Lufttemperatur, Niederschlag, Evapotranspiration, Schneewasseräquivalent) für das Untersuchungsgebiet gesammelt und aufbereitet. In einem zweiten Schritt wurden die Klimabedingungen abgeleitet und ausgewertet, sie bieten die Grundlage für die Erhebung und Beschreibung der hydrogeologischen Prozesse im Untersuchungsgebiet für den Zeitraum 1995 bis 2020. Um Aussagen über Auswirkungen von Klimaszenarien im Untersuchungsgebiet treffen zu können, wurden in einem weiteren Schritt regionale Klimamodelle (Representative Concentration Pathways – RCPs) für den Zeitraum 1995 bis 2100 berücksichtigt.
- In Arbeitspaket 4 "Hydrogeologische Konzeptvorstellung" (Kapitel 5) wurde eine detaillierte konzeptionelle hydrogeologische Modellvorstellung des Untersuchungsgebietes erstellt. In die Wasserbilanz flossen zunächst die erhobenen Daten zu den Klimaparametern, siehe Kapitel 4, direkt ein. Weitere Methoden umfassten unter anderem die Installation eines Oberflächenabflussmonitorings, Grundwassermonitoring, Untersuchungen zur Verweilzeit des Grundwassers und eine Niederschlag-Abfluss-Modellierung.



Abb. 1. Das Untersuchungsgebiet Sibratsgfäll (929 m) mit Blick nach Nordwesten (Foto: M. Kralik).

 In Arbeitspaket 6 "Numerische Modellierung 4D-Modellierung" wurde auf Basis der Erkenntnisse der Kapitel 3, 4 und 5 ein kalibriertes numerisches Modell des Untersuchungsgebietes erstellt. Darauf aufbauend wurden im Zuge von Arbeitspaket 7 "Wassermanagement und Klimatologische Simulierungen" Modellierungen zu vergangenen Klimadaten und ausgewählten Läufen von Klimaszenarien durchgeführt. Ziel war die Beschreibung der Entwicklung des Grundwasserspeichers im Untersuchungsgebiet bei unterschiedlichen Bedingungen.

# 2 Bürgerwissenschaften und transdisziplinäre Forschung (S. HOCHLEITHNER)

#### 2.1 Ausgangssituation und Community Profile

#### 2.1.1 Methodik

Als Grundlage der transdisziplinären Untersuchung diente das Erstellen eines Community Profiles mittels einer Adaption der Community Profiling Methode nach MESSER & TOWNSLEY (2003). Ein initialer Workshop vor Ort diente der Identifikation von Schlüsselpersonen in der Gemeinschaft, die in weiterer Folge individuell konsultiert wurden. Im Zuge dessen wurden das Projekt und der transdisziplinäre Ansatz präsentiert und erläutert, um soziale, kulturelle und ökonomische (Interessens-)gruppen, weitere Schlüsselpersonen, und Kernanliegen (insbesondere mit Projektbezug) zu identifizieren. Weitere individuelle Konsultationen, narrative Interviews und Fokusgruppendiskussionen generierten die Basis für das Community Mapping. So entstand ein generelles Bild der Gemeinschaft im Untersuchungsgebiet, das einen Überblick über Schlüsselressourcen, kulturelle, soziale und ökonomische Gruppierungen, Aktivitäten zur Lebensgrundlage und Existenzsicherung sowie Institutionen bot und das Identifizieren von Regeln und Regulierungen erlaubte. In einem weiteren Schritt fanden weitere Konsultationen, Interviews und Gruppendiskussionen statt, in denen das Augenmerk vor allem auf die Identifikation von Verknüpfungen, Intersektionen und Konflikten zwischen Individuen, Gruppierungen und Institutionen lag. Das auf diese Weise generierte Material floss zusammen mit historischen Recherchen und Informationen aus "grauer" Literatur, wie etwa 1999 niedergeschriebene Zeitzeugenberichte zur "Rindberg-Rutschung", in das Community Profile ein.

Insgesamt fanden im Rahmen dieses Prozesses neun Konsultationen mit Schlüsselpersonen, zwei Workshops (inklusive des ersten App-Entwicklungsworkshops, siehe unten), vier Fokusgruppendiskussionen, sowie 12 semi-strukturierte, narrative Interviews statt. Je nach Zustimmung der durchgehend voll informierten und aufgeklärten Beteiligten wurden während der Gespräche Audioaufzeichnungen, Notizen oder ex-post Protokolle erstellt. Da von den meisten Teilnehmenden eine Anonymisierung gewünscht war, wurde diese durchgehend vorgenommen. Zur Ergänzung und Validierung dienten ex-post Protokolle moderat-teilnehmender Beobachtungen (DEWALT et al., 1998; LIU & MAITLIS, 2010). Die Auswertung des Materials erfolgte mittels qualitativer Inhaltsanalyse auf Basis eines Systems offener Kategorien und variabler Verknüpfungen nach GLÄ-SER & LAUDEL (2009) mithilfe der Software f4analyse.

#### 2.1.2 Ergebnisse

Die historische Quellenlage zum Untersuchungsgebiet ist relativ dünn, explizite wissenschaftliche Studien konnten nicht identifiziert werden (cf. WÖHRER-ALGE, 2013). Das diesem Abschnitt zugrundeliegende historische Material wurde im Rahmen von Interviews und Gruppendiskussionen generiert, regional kontextualisiert und mittels Aufzeichnungen der Gemeindeverwaltung und von Privatpersonen eingeordnet. Auf diese Weise konnte eruiert werden, dass das Untersuchungsgebiet historisch durch eine relativ junge Besiedlungsgeschichte gekennzeichnet ist. Spätestens ab dem 16. Jahrhundert wurde das Gebiet als Vorsäß (Drei-Stufen-Landwirtschaft) primär im Rahmen von Viehwirtschaft und auf Teile des Sommers beschränkt genutzt (Anmerkung: Die erste entsprechende urkundliche Erwähnung stammt nach Information der Gemeindeverwaltung Sibratsgfäll - Stand 2021 - aus dem Jahr 1511). Die saisonale Nutzung wurde ab Mitte des 17. Jahrhunderts auf den gesamten Sommer ausgeweitet, was mit der graduellen Intensivierung forstwirtschaftlicher Tätigkeiten in Verbindung steht. Holzproduktion und Flößerei stellten lokalen Narrativen zufolge die primären Aktivitäten zur Lebensgrundlage und Existenzsicherung dar und prägten fortan die weitere Entwicklung der sozial-ökologischen Situation im Gebiet nachhaltig. Laut privaten Dokumenten von Interviewpartnern begann eine ganzjährige Besiedlung des Untersuchungsgebietes frühestens im 18. Jahrhundert im Zuge von Migrationsbewegungen aus nahegelegenen Gemeinden. Dies steht in Zusammenhang mit der traditionellen Residenzfolgeordnung, die sich, wie weiter unten erläutert, auch auf heutige Zusammenhänge auswirkt: Grundsätzlich ist die traditionelle Erbfolge patrilinear ausgerichtet und mit Patrilokalität verknüpft, wobei Ansprüche nach Geburtsreihenfolge priorisiert werden. Ließ sich aufgrund der Ressourcenlage die Residenzregel nicht in-situ umsetzen, kam es zu Erbteilungen und Neolokalität an vom Haushalt des Vaters weiter entfernten Liegenschaften, wie bis dahin lediglich saisonal oder jedenfalls nicht dauerhaft genutzten Flächen. So entwickelte sich aus den Vorsäßen im Untersuchungsgebiet eine dauerhafte Siedlung, die spätestens mit der Errichtung eines permanenten Kirchengebäudes im Jahr 1805 und dessen Erhebung zur Pfarrkirche 1807 als vollständig etabliert betrachtet werden kann.

Aus dem im Zuge des Community Profiling generierten Material geht hervor, dass Forstwirtschaft bis in das 20. Jahrhundert den Kern lokaler Aktivitäten zur Lebensgrundlage und Existenzsicherung darstellte und erst ab etwa den 1920er Jahren durch Wiesen- und Viehwirtschaft abgelöst wurde, was mit der Gründung von landwirtschaftlichen Genossenschaften einherging. Ab etwa Mitte des 20. Jahrhunderts fanden in diesem Kontext starke Eingriffe in die Landschaft statt, um die Flächen, zum Beispiel durch Planieren, maschinell bewirtschaftbar zu machen. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wuchs auch der Tourismussektor im Untersuchungsgebiet stark und entwickelte sich zu einer zentralen sozialen und ökonomischen Größe: Neben der Bedeutung als Aktivität zur Lebensgrundlage und Existenzsicherung führte Tourismus auch zur Zuwanderung von Personen, die ursprünglich nur als saisonale Arbeitskräfte gekommen waren, sowie zu generell intensiveren, auch regionalen Mobilitätsdynamiken, was zu einer positiven Migrationsbilanz der Gemeinde beitrug. Der

Einen für das Community Profile besonders signifikanten historischen Punkt stellt die großflächige Hangrutschung auf der Parzelle Rindberg (außerhalb des Untersuchungsgebietes dieses Projekts, jedoch unmittelbar benachbart gelegen) im Jahr 1999 dar. Das kollektiv wie individuell Erlebte und dessen Folgen beeinflussen zentrale Aspekte des Community Profils: zum einen Konfliktdynamiken zwischen Individuen und Gruppen, jedoch auch von den Teilnehmenden der Untersuchung durchaus positiv konnotierte Aspekte, wie Kooperation, Solidarität und Selbstorganisation beim Bewältigen der Folgen des Ereignisses. Von besonderer Bedeutung sind das Ereignis und seine Folgen auch für Einstellung, Wahrnehmung und Wissen in Bezug auf geologische Zusammenhänge in der Bevölkerung des Untersuchungsgebietes. Für direkt von den Folgen der Hangrutschung Betroffene, deren Angehörige, sowie auch dem Bekanntenkreis und schließlich für die gesamte Dorfgemeinschaft ergab sich so ein teils beachtlicher Grundstock an Wissen zu geologischen Dynamiken allgemein sowie zu den Dynamiken im Untersuchungsgebiet im Speziellen. Hydrologisches Wissen war vor allem bei Landwirtinnen und Landwirten besonders hoch, das sich diese im Zuge von Drainagierungsarbeiten mit dem Ziel der Ertragssteigerung insbesondere von Wiesen sowie zur Sicherung maschineller Bewirtschaftbarkeit angeeignet hatten. Weitere Schlüsselpersonen mit besonders hohem Wissensstand waren der kommunale Wasserwart sowie ein lokaler Baumeister. Letzterer war sowohl beruflich bei der Herstellung von baulichen Maßnahmen zum Wassermanagement aktiv, als auch zivilgesellschaftlich bei der Erstellung von Gefahrenkarten beteiligt und Mitbegründer des Vereins Bewegte Natur Sibratsgfäll (VEREIN BEWEGTE NATUR SIBRATSGFÄLL, 2022). Der Verein stellt eine Besonderheit des Untersuchungsgebietes dar. Im Zuge der Erstellung und des Betriebs der "Georunde", eines auch mit hochrangigen Architekturpreisen ausgezeichneten Rundwanderweges, der sich dokumentarisch und künstlerisch mit der Hangrutschung, ihren Folgen und Ursachen/Zusammenhängen beschäftigt, trägt der Verein maßgeblich zur Schaffung und Erweiterung von Wissen und Bewusstsein im Untersuchungsgebiet bei.

Die Phase der Erstellung von Gefahrenkarten infolge der Hangrutschung im Jahr 1999 bildet ein zentrales Momentum der sozialen Dynamiken mit Bezug auf (hydro-)geologische Dynamiken im Untersuchungsgebiet. Zum einen stellen die im Zuge der Erstellung der Gefahrenkarten (und im Rahmen eines detaillierten vorangehenden Forschungsprojektes) erhobenen geologischen und hydrologischen Daten einen wesentlichen Teil der Grundlagen für dieses Projekt dar (JARITZ, 2013; GMEINDL, 2007; SUPPER et al., 2005). Zum anderen prägen der Prozess der Erstellung der Gefahrenkarten sowie ihre letztlich gültige Beschaffenheit heutige Beziehungen zwischen Individuen, Gruppen und Institutionen stark mit. Auch die Haltung gegenüber wissenschaftlichen Untersuchungen wurde dadurch - tendenziell negativ - beeinflusst. Auch kulturell ist ein qualitativ durchaus signifikanter Einfluss der Gefahrenkarten in Zusammenhang mit oben erwähnter patrilokaler Residenzfolge beobachtbar und wird weiter unten in diesem Abschnitt deshalb detaillierter besprochen.

Die im Rahmen des Community Profiling identifizierten und befragten Stakeholder-Gruppen waren (1) die örtliche Gemeinde, (2) lokale und translokale Eliten, darunter (ehemalige) Politiker (ausschließlich Männer) und Geschäftsleute (Bau- und Tourismusbranche), (3) lokale Expertinnen und Experten ohne formell einflussreiche Positionen (z.B. der kommunale Wasserwart, der Kläranlagenbetreiber und ihre Nachfolger sowie Jäger), (4) örtliche Landwirtinnen und Landwirte sowie (5) Anwohnerinnen und Anwohner. Während sich die Interessengruppen zwangsläufig zum Teil überschneiden, hatten die meisten der ca. 230 Einwohnerinnen und Einwohner sehr klare Interessen, die sich einer der fünf Interessengruppen zuordnen ließen.

Aus den formellen und informellen Dokumenten sowie den (meist unveröffentlichten) Berichten über frühere Studien in dem Gebiet hatten wir ursprünglich einen eher klassischen Risikoansatz im Rahmen des Gemeindeprofils abgeleitet. Bei klassischen Risikoansätzen liegt der Schwerpunkt der Forschung häufig auf Aspekten des Risikos und der Resilienz, die sich auf das Mitigieren des physischen Risikos infolge der Massenbewegung konzentrieren. Die Ergebnisse der narrativen Interviews deuteten jedoch auf eine höhere Bedeutung weitergefasster Risikoaspekte hin. Wir führten daher weitere qualitative Untersuchungen, Interviews, Fokusgruppendiskussionen und Workshops durch, die zusätzliche Indizien für die mangelnde Genauigkeit eines klassischen Risikoforschungsansatzes im Untersuchungsgebiet lieferten.

Wie die Ergebnisse der qualitativen Untersuchungen zeigen, wird "Risiko" in Sibratsgfäll nicht als direkte Folge physischer Gefahren im Zusammenhang mit Wassermangel bzw. Wasserüberschuss/Niederschlag oder der Massenbewegung verstanden, sondern von den Einheimischen eher als Folge der Dynamik rund um das physische Risiko und, was noch bedeutsamer scheint, der Dynamiken, die sich aus den traditionellen Praktiken der Risikominderung ergeben. "Risiko", wie es sich aus unserem qualitativen Material ergibt, kann in Sibratsgfäll also eher als ein Spannungsfeld verstanden werden, das sich zwischen Prekarität, die sowohl durch physische Gefahren als auch durch Ansätze zur Risikominderung (wie etwa erwähnte Gefahrenkarten) erzeugt wird, und den Anpassungsstrategien der lokalen Akteurinnen und Akteure aufspannt. Vier kontextuell definierte Dimensionen dieses Spannungsfeldes konnten identifiziert werden: eine *kulturelle Dimension* des Risikos, eine *wirtschaftliche Dimension*, eine *soziale Dimension* und eine *politische Dimension*. Die Interessen, Bedürfnisse und Sorgen der lokalen Akteurinnen und Akteure entsprechen diesen Risikodimensionen und stehen in direktem Zusammenhang mit ihrer Lebensweise und Lebensgestaltung (RAEYMAEKERS, 2011). Abbildung 2 zeigt lokale Interessen in Relation zu kontextuellen Risiko-Dimensionen.

In Anlehnung an unseren anfänglichen Ansatz, der sich von weit verbreiteten Strategien in der transdisziplinären Forschung ableitet, haben wir eine Interessen-/Wissensmatrix erstellt, um die lokalen Interessengruppen entsprechend abzubilden. Eine Interessen-/Wissensmatrix dient in der Regel auch dazu, Stakeholder zu identifizieren, die aufgrund ihrer Fähigkeit, transformative Ergebnisse zu unterstützen, für ein Forschungsprojekt von besonderem Interesse sind. Wie ebenfalls Abbildung 2 verdeutlicht, rechtfertigte die Divergenz zwischen Interessen, Bedürfnissen und Anliegen in Bezug auf die verschiedenen Risikodimensionen in unserem Untersuchungsgebiet jedoch nicht die Fokussierung auf bestimmte Stakeholder-Gruppen, da die Interessen teilweise gegensätzlich sind, in jedem Fall aber in einem Maße divergieren, welches gemeinsame Anstrengungen erschwert.

Verschärft wurde diese Situation durch die wahrscheinlich größte Herausforderung für einen transdisziplinären Ansatz in kleinem Rahmen: die begrenzte Zahl der (potentiellen) Teilnehmenden. Für die Erstellung des Community Profile und die Suche nach Teilnehmenden machte es dieser Aspekt in erster Linie äußerst schwierig, einen gemeinsamen Schwerpunkt zu finden. Mit anderen Worten, eine begrenzte Gesamtzahl potentieller Teilnehmender schränkt leider nicht die Zahl der verschiedenen Interessengebiete in Bezug auf Wasser und Massenbewegungen ein. Während Stakeholder- und Interessengruppen eng miteinander verbunden sind und sich teilweise überschneiden, haben Einzelpersonen oft einen klaren Fokus auf eine bestimmte Kategorie. Ein Umstand, der zur Nichtteilnahme führt, wenn ihr Interessenschwerpunkt nicht im Vorderarund des gemeinsam entwickelten transdisziplinären Forschungsprogramms steht.



Dimensionen des Risikos.

Während unsere erste Informationsveranstaltung (17.12.2019) von einer beträchtlichen Anzahl von Anwohnerinnen und Anwohnern besucht wurde, nämlich 32 Personen (ca. 14 % aller Einwohner), nahm die Zahl bei den folgenden Workshops drastisch ab. Vor allem Landwirtinnen und Landwirte waren oft unterrepräsentiert, was direkt mit den unterschiedlichen Arbeitszeiten der verschiedenen Interessengruppen zusammenhing: abends, wenn Nicht-Landwirte Zeit hatten, die sie in Workshops oder Diskussionsveranstaltungen verbringen konnten, mussten Landwirtinnen und Landwirte arbeiten, vor allem im Bereich der Viehwirtschaft. Die Zahl der aktiven und kontinuierlich teilnehmenden Mitglieder unserer Citizen Science Gruppe (siehe unten) umfasste daher lediglich sieben Personen

#### 2.2 Initiale Transdisziplinäre Integrationsstrategie

#### 2.2.1 Methodik

Die zentrale Komponente für die Einbindung nichtwissenschaftlicher Akteurinnen und Akteure war ein Citizen Science-Paket, das in erster Linie auf der gemeinsamen Entwicklung einer Smartphone-App basierte. Diese App sollte es der lokalen Bevölkerung ermöglichen, Daten zur Integration in das hydrogeologische Modell des Einzugsgebietes, siehe Kapitel 5, beizusteuern. Gleichzeitig sollte lokales Wissen über hydrogeologische Prozesse im Allgemeinen und speziell in Bezug auf das Untersuchungsgebiet erweitert werden, was letztlich zu einem stärkeren Bewusstsein für die damit verbundenen Risiken und zu besser informierten, resilienteren Risiko- und Wassermanagementstrategien führen sollte. Darüber hinaus planten wir die Umsetzung weiterer transdisziplinärer Aspekte, wie etwa Stakeholder-Workshops und qualitative Interviews, um die beiden wichtigsten Komponenten zu nennen.

Die Ergebnisse aus dem Community Profiling lieferten vor allem zwei für das Erstellen, Umsetzen und laufende Adaptieren einer transdisziplinären Integrationsstrategie: Erstens ist "Risiko" in unserem Untersuchungsgebiet stark kontextabhängig definiert und entspricht nicht einem Ansatz, der sich auf physische Risiken in Zusammenhang mit Schwankungen im Wasserdargebot und Massenbewegungen konzentriert. Zweitens führt die geringe Anzahl potentieller Teilnehmender nicht zu einer geringeren Anzahl unterschiedlicher, teils gegensätzlicher Interessen, Bedürfnisse und Anliegen. Dieser Aspekt stellt eine Herausforderung für die Erstellung eines transdisziplinären Forschungsprogrammes dar, das den Erwartungen der lokalen Bevölkerung entspricht, und führt daher zu Schwierigkeiten bei der Gewinnung von Teilnehmenden für Citizen Science und transdisziplinäre Aktivitäten im weiteren Sinne. Trotz dieser Umstände blieb die Erstellung der Smartphone App ein zentraler Baustein unseres transdisziplinären Integrationsplans. Trotzdem sich die fertiggestellte App, wie im Weiteren erläutert, im Verlauf des Projekts als nur bedingt fruchtbar erwies, stellte der Prozess der Erstellung ein wertvolles Integrationsinstrument dar.

#### 2.2.1.1 Smartphone App "SIBRA"

Die gemeinsame Entwicklung einer Smartphone-Anwendung (App) bildete den Kern des Citizen Science-Ansatzes. Zu den Zielen dieses Teilprojekts gehörten die Entwicklung einer App (sowohl für Android-Betriebssystem- als auch für Apple iOS-basierte Smartphones), die es den Nutzenden in Sibratsgfäll ermöglicht, erstens Daten für die Integration in Analyse und Modellierung des Gesamtprojektes zu generieren, zweitens Daten zu generieren, die für die Nutzenden selbst bzw. für die gesamte Gemeinde Sibratsofäll nützlich sind, und drittens die Ergebnisse der geologischen, hydrologischen und hydrogeologischen Untersuchungen an die Bevölkerung zurückzuspielen. Während das Untersuchungsgebiet als Grundlage für die Entwicklung der App dient, strebten wir auch ein App-Design an, das eine breitere Anwendung ermöglicht sowohl in Bezug auf die geografische Reichweite, als auch auf die disziplinäre Anwendbarkeit. Während des Koproduktionsprozesses der App wurden daher Forschende des Projekts, die lokale Bevölkerung in Sibratsgfäll, aber auch Kolleginnen und Kollegen aus anderen Abteilungen der Geologischen Bundesanstalt (GBA), insbesondere der Geophysik und Ingenieurgeologie, einbezogen. In mehreren Workshops, Einzelberatungen und Feedbackrunden wurde ein Aufbau der App erstellt, der all diesen Aspekten gerecht werden sollte.

Die Rahmenbedingungen zur Verwendung von Smartphone Apps für Citizen Science sind in HOCHLEITHNER (2022) erläutert. Gemeinsam mit dem österreichischen App-Entwickler SPOTTERON wurde der Entwurf in eine funktionierende Anwendung umgesetzt, die Mitte Juni 2020 sowohl für Android-OS als auch für iOS-Geräte veröffentlicht wurde (Abb. 3). Anschließend wurde die App im Untersuchungsgebiet vorgestellt und eine Testphase mit unserer Kerngruppe von Citizen Scientists sowie weiteren interessierten Einheimischen gestartet.

In den folgenden Abschnitten werden zuerst der gemeinsame Entwicklungsprozess und die technischen Aspekte der App beschrieben, die als Referenz an das Untersuchungsgebiet Sibratsgfäll den Namen Systems Integrating Bottom-Up Research Application for Hydro- and Engineering Geology - kurz SIBRA - erhielt. Abschließend folgt eine kritische Reflektion zur Qualität und vor allem Nutzbarkeit der mittels der App generierten Daten: Wie sich im Verlauf des Projektes herausstellte, war der Ko-Entwicklungsprozess sehr fruchtbar im Sinne transdisziplinärer Integration, der Schaffung von Wissen und Bewusstsein sowie der Verbesserung der allgemeinen Haltung zur Wissenschaft. Die Nutzbarkeit der App, insbesondere durch technische Einschränkungen wie etwa im Bereich der Verfügbarkeit und Qualität von Mobilfunksignalen im Untersuchungsgebiet, sowie die Integrierbarkeit der generierten Daten, erwiesen sich jedoch im Rahmen von EXTRIG als nur bedingt geeignet.

#### 2.2.1.2 Quantitativer, Indikatoren-basierter Evaluationszugang

Die Entwicklung eines Ansatzes zur Evaluierung transdisziplinärer hydrogeologischer Forschung ist wie eingangs erwähnt ein weiterer zentraler Aufgabenbereich. Der anfänglich gewählte Evaluationsansatz (Kapitel 2.1) basierte auf deduktiven Schlussfolgerungen aus traditionellen Citizen Science-Evaluationsschemata (siehe KIESLINGER et al., 2017 für einen Überblick) und war dementsprechend quantitativ ausgerichtet. Als Startpunkt dieses Ansatzes diente eine Sequenz aus Fragebögen (qA, qB, qC) zur quantitativen Bewertung verschiedener Indikatoren, hauptsächlich



Abb. 3. Promotion-Banner der "SIBRA"-App.

auf individuell-persönlicher Ebene der Citizen Scientists, mit Querbezügen zur Projektevaluation (HOCHLEITHNER, 2021, 2022), die an die Citizen Scientists in verschiedenen Phasen ihres Engagements verteilt wurden: bei ihrem Eintritt in das Projekt [qA], an Meilensteinen (wie z.B. Workshops; qB) und an strategischen Punkten während des Projektablaufs (qC). Die Gestaltung der Fragebögen konzentrierte sich auf individuelle [a] Fähigkeiten und Kenntnisse, [b] Einstellungen/Haltungen, [c] Erfahrungen, [d] Indikatoren zur Projektevaluierung sowie [e] demografische Angaben. Der Aufbau der einzelnen Items orientierte sich an Empfehlungen aus der Evaluierungsliteratur (siehe KIES-LINGER et al., 2017) sowie an Standards der Statistik Austria (https://www.statistik.at).

#### 2.2.2 Ergebnisse

#### 2.2.2.1 Smartphone App "SIBRA": Entwicklungsprozess und Datengenerierung

Den Ausgangspunkt des Entwicklungsprozesses stellten die im Rahmen des Community Profiling (Kapitel 2.1) ermittelten Interessen und Anliegen der lokalen Bevölkerung dar. Diese flossen in ein Entwicklungsdokument ein, das auf einer vierstufigen Vorlage basierte, die von der Entwicklerfirma SPOTTERON bereitgestellt worden war. Am 13. November 2019 fand ein Treffen statt, um Inputs und Feedback von GBA-internen Abteilungen zu erhalten, die anschließend in das Entwicklungsdokument integriert wurden. Während eines Feldaufenthalts im November 2019 wurden mittels qualitativer Methoden, insbesondere Interviews und Gruppendiskussionen, die Bedürfnisse, Anliegen, Interessen und Fähigkeiten der lokalen Stakeholder ermittelt. Die meisten Befragten gaben implizit oder explizit an, dass ihr Hauptinteresse in Bezug auf eine App darin besteht, (bessere) Informationen über hydrogeologische Verhältnisse zu erhalten, insbesondere über Niederschläge, Grundwasserverfügbarkeit bei Brunnen und Quellen sowie Vorhersagen zu Wasserständen von Gräben und Bächen. Was die Fähigkeiten in Bezug auf eine potentielle Nutzung der App anbelangt, so entspricht deren Bandbreite relativ genau den generellen Fähigkeiten der Teilnehmenden Smartphones zu nutzen. Diese scheinen jedoch nicht mit dem Alter der Teilnehmenden zu korrelieren. Auch das Interesse an der Entwicklung der App ergab sich als nicht zwangsläufig mit Smartphone-Fähigkeiten verknüpft: auch einige Personen, die im Alltag ihr Smartphone nur sehr eingeschränkt oder gar keines nutzen, bekundeten deutliches Interesse sich an dem Proiekt zu beteiligen. Die Ergebnisse dieser Erhebungen flossen in das Entwicklungsdokument und die weiteren Aktivitäten im Rahmen der Entwicklung der App ein. Nachdem die wissenschaftlichen, nichtwissenschaftlichen und gestalterischen Überlegungen miteinander verknüpft worden waren, fand am 26. November 2019 ein weiteres Koordinationstreffen mit der Entwicklerfirma statt. Im Rahmen einer Informationsveranstaltung am 17. Dezember 2019 im Untersuchungsgebiet, zu dem alle Einwohnerinnen und Einwohner mittels Postaussendung durch die Gemeindeverwaltung geladen worden waren, wurden erneut Interessen, Bedürfnisse, Anliegen und Fähigkeiten mittels guantitativer Fragebögen erhoben und anschließend in den Entwicklungsprozess integriert.

Neben der Anforderung, die Erwartungen sowohl der wissenschaftlichen als auch der nichtwissenschaftlichen Beteiligten an die mittels der App generierten Daten in Einklang zu bringen, musste das endgültige Entwicklungskonzept auch bestimmte Designanforderungen berücksichtigen. Zu letzteren gehören Möglichkeiten, neue Nutzende zur Verwendung der App zu ermutigen, die Motivation der Nutzenden aufrechtzuerhalten und zu ermöglichen, dass die App über den Projektumfang und Projektbereich hinaus genutzt werden konnte.

Als erstes Zwischenergebnis wurde aus dem Entwicklungsdokument ein komplexes Diagramm erstellt, das alle Funktionen der App darstellte. Dieses Diagramm wurde zuerst mit GBA-internen Abteilungen, insbesondere aus der Ingenieursgeologie, diskutiert. Am 31. Januar 2020 fand in Sibratsgfäll weiters ein Workshop, die "App Werkstatt", statt, um das Diagramm mit unserer Kerngruppe von sieben Citizen Scientists zu diskutieren. Die Ergebnisse dieser Diskussion flossen in den technischen Aufbau der App sowie in Designüberlegungen ein. Abschlie-Bend wurde das Diagramm noch einmal mit Kollegen aus der Ingenieursgeologie diskutiert. Die endgültige und sehr detailreiche Version des Entwicklungsdiagramms der SIB-RA-App ist in HOCHLEITHNER (2022) angeführt.

Die finalen Informationen wurden schließlich in ein Coding Sheet für die Entwicklerfirma übertragen (HOCHLEITHNER, 2022). Erklärende Texte zur Verwendung in der App wurden in Abstimmung mit GBA-internen Abteilungen sowie mit den beteiligten Citizen Scientists erstellt (HOCHLEITH-NER, 2021, 2022), erklärende Fotos wurden von der GBA bereitgestellt. Da alle Texte im Entwicklungsprozess auf Deutsch erstellt worden waren, wurde abschließend eine vollständige englische Übersetzung angefertigt, was insbesondere in Bezug auf Fachbegriffe eine enge Abstimmung mit GBA-internen Abteilungen erforderte. Die technische Entwicklung der App durch SPOTTERON dauerte länger als erwartet, vor allem aufgrund der Dynamik in Zusammenhang mit Anfang des Jahres 2020 einsetzenden COVID-19-Pandemie. Dennoch konnte eine erste einsatzbereite Version der App im Mai 2020 fertiggestellt und von Freiwilligen der GBA getestet werden. Am 18. Juni 2020 konnte schließlich eine weitere "App Werkstatt" in Sibratsgfäll organisiert und die SIBRA-App in einer weiteren Informationsveranstaltung vorgestellt werden. Die Beteiligung der lokalen Bevölkerung an der Veranstaltung war höher als erwartet: 31 Personen nahmen teil und wurden in die Funktionsweise der App eingeführt. Screenshots der SIBRA-App sind in Abbildung 4 dargestellt.

Im Sommer 2020 durchgeführte Evaluierungen der App-Daten sowie in Sibratsgfäll durchgeführte Fokusgruppendiskussionen und Konsultationen zeigten jedoch, dass das Interesse an der App sehr gering ausfiel und sich noch keine "App-Community" entwickelt hatte. Es wurden deshalb während folgender Feldaufenthalte weitere Treffen zwischen Projekt-Forschenden und der lokalen Bevölkerung organisiert, bei der die App während gemeinsamer Spaziergänge genutzt wurde. Des Weiteren wurde das "Community Feature" der App intensiver genutzt und Projektforschende kommentierten neu eingehende Dateneinträge von lokalen Nutzenden. Dennoch konnte keine intensivere Nutzung generiert werden, was vor allem in im folgenden Abschnitt besprochenen technischen Herausforderungen sowie in den Folgen der Maßnahmen der CO-VID-19-Pandemie begründet ist.

Obwohl die Beteiligung am App-Entwicklungsprozess hinter den Erwartungen zurückblieb (nur sieben Personen beteiligten sich regelmäßig und kontinuierlich an der gemeinsamen Entwicklung), erwies sich der Prozess der gemeinsamen Entwicklung der App im Rahmen einer Reihe von Workshops, Gruppendiskussionen und Konsultationen als ein wertvolles Instrument zur Einbindung lokaler nichtwissenschaftlicher Akteurinnen und Akteure. Auf unerwartete Weise konnte im Zuge dessen auch qualitatives Material in Bezug auf Risikowahrnehmung, Wissen/Wissenszuwachs und Einstellung zur Wissenschaft generiert werden. Informelle Diskussionen, die wir begleitend zu den Workshops organisierten, sowie Interviews, die sich aus dem Interesse einzelner Teilnehmender an einer vertieften Auseinandersetzung mit bestimmten Aspekten ergaben, waren in dieser Hinsicht besonders fruchtbar.

Eine der größten Herausforderungen für den gemeinsamen Entwicklungsprozess der Smartphone-App betrifft die Kombination aus einer kleinen Anzahl von Teilnehmenden und den oben erwähnten trotzdem teils stark divergierenden Interessen. Die Teilnehmenden waren sehr daran interessiert, ihre Interessen, Bedürfnisse und Anliegen bzw. die für ihre Interessengruppe wichtigen Aspekte in der Anwen-

24

dung wiederzufinden (siehe auch Abb. 2). Hinzu kam der Umstand, dass auch Interessen und (technische) Anforderungen des wissenschaftlichen Projektteams einbezogen werden mussten. Infolgedessen war die endgültige App mit Funktionen überladen.

Der Einsatz einer Smartphone-Applikation als Instrument zur Generierung von Citizen Science Data in einer alpinen Umgebung brachte auch eine Reihe von technischen Herausforderungen mit sich. Die Topografie des Tals, in dem sich unser Untersuchungsgebiet befindet, schränkte die Nutzbarkeit der Anwendung aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Mobilfunkdiensten ein, insbesondere außerhalb des Hauptsiedlungsgebietes. Insbesondere an abgelegeneren Orten, an denen sich viele der für die Beobachtung durch die Citizen Scientists relevanten Punkte befanden, war es aufgrund des schlechten Mobilfunkempfangs nicht möglich, die App im Online-Modus zu nutzen. Auch der Offline-Modus der App bot aufgrund der topografischen Bedingungen nur eine oft sehr ungenaue Georeferenzierung und die im Offline-Modus erfassten Daten wurden nicht immer auf den Server hochgeladen. Die Lösung dieser Probleme war nicht möglich, da eine Nachbesserung der App durch SPOTTERON weitere Investitionen erfordert hätte. Während sich die SPOTTERON-Plattform in vielen anderen Fällen als sehr nützlich gezeigt hat (z.B. SEIBERT et al., 2019; BíL et al., 2020; PEER et al., 2021), erwiesen sich die Funktionen, die unserem Projekt während des Mitentwicklungsprozesses zur Verfügung standen, als für die Generierung von Daten nur sehr begrenzt geeignet. Ursprünglich war die Einbeziehung dieser Daten in die hydrogeologische Modellvorstellung geplant.

Schließlich führte die geringe Anzahl an ansässigen Personen auch zu einer nur begrenzten Anzahl von App-Nutzenden. Obwohl die Release-Veranstaltung im Juni 2020 von 31 lokal Ansässigen besucht wurde und trotz oben erwähnter Maßnahmen zur Verstärkung der App-Nutzung stagnierte die Gesamtzahl der aktiv Nutzenden bei 14 (Stand: September 2022), die Gesamtzahl der aufgezeichneten Datenpunkte belief sich auf insgesamt 312. Auch unsere Bemühungen, die App unter Touristinnen und Touristen im Untersuchungsgebiet zu verbreiten, hatten nur begrenzten Erfolg, was vor allem auf die COVID-19-Pandemie und entsprechende Maßnahmen zurückzuführen ist.

#### 2.2.2.2 Quantitativer, Indikatoren-basierter Evaluationszugang

Der initiale Fragebogen qA wurde zu Beginn des ersten Workshops an die Citizen Scientists verteilt, in dem Projektwissenschaftler und die Kerngruppe der sieben lokalen Citizen Scientists an der Entwicklung der Citizen Science Smartphone App arbeiteten. gA wurde vor dem Workshop verteilt und ausgefüllt, gB wurde anschließend verteilt und nach dem Workshop ausgefüllt. Dieser quantitative Ansatz zur Evaluierung mit Hilfe von Fragebögen erwies sich jedoch als ungeeignet. Die Grundgesamtheit (n = 7) war zu klein, die Teilnehmenden wirkten irritiert und die Ergebnisse lieferten keine besonders nützlichen Erkenntnisse, abgesehen von jener, dass die Teilnehmenden aus anderen als den üblichen demografischen Gruppen stammten: Während Citizen Scientists in anderen Projekten tendenziell im Ruhestand, prekär oder nicht erwerbstätig sind, war die Kerngruppe im vorliegendem Projekt diverser: 2 arbeiteten in Vollzeit, 2 in Teilzeit, 1 war mit Betreuungsarbeit



beschäftigt, 1 war selbständig erwerbstätig, 1 war ohne Erwerbstätigkeit und 1 wollte keine Angaben machen. Die Auswertung der weiteren Ergebnisse unterstreicht die Limitierungen der Nützlichkeit von quantitativen Erhebungen in kleinräumigen Settings wie dem Untersuchungsgebiet von EXTRIG. Aussagekräftige, qualitative Ergebnisse ergaben sich erst im Rahmen einer Fokusgruppendiskussion mit denselben Teilnehmenden, die einige Wochen nach der quantitativen Erhebung stattfand. Eine detaillierte Analyse und Diskussion der quantitativen Ergebnisse findet sich in HOCHLEITHNER (2022).

## 2.3 Grounded Evaluation – Adaptierte transdisziplinäre Integrationsstrategie

Da sich indikatorbasierte, quantitative Evaluierung im kleinräumigen Setting des Projektes als ungeeignet erwies, entwickelte das Projekteam ein alternatives Design zur Evaluierung der transdisziplinären Integration allgemein und des Citizen Sciences Ansatzes im speziellen. Diese Alternative baute auf eine Kombination von qualitativen Methoden, insbesondere von Gruppendiskussionen, Interviews und Konsultationen mit teilnehmenden "Citizen Scientists" und Schlüsselpersonen. Sowohl die der Evaluation zugrundeliegenden Kriterien als auch die Evaluierung selbst erfolgten dementsprechend in Koproduktion mit der lokalen Bevölkerung, weshalb wir im Weiteren bezüglich dieses Evaluations-Designs von "Grounded Evaluation" sprechen. Die so entwickelten Kriterien lassen sich in drei Kategorien zuordnen: [1] Wissen, Bewusstsein; [2] Haltung, Einstellung; [3] Qualität und Nutzbarkeit von Daten. Alle drei Kategorien beziehen sich nicht nur auf die lokale Bevölkerung, sondern auch auf die Forschenden des Projektes: in die Evaluationskriterien wurde also z.B. auch Wissenszuwachs der Forschenden in Bezug auf transdisziplinäre Zusammenarbeit mit aufgenommen. Selbiges gilt im Besonderen in Bezug auf die Qualität von Daten. Die Qualität und Nutzbarkeit der im Rahmen des Projektes generierten Daten wurde nicht nur hinsichtlich ihrer Verwendung im wissenschaftlichen Outcome, z.B. in Kapitel 5, evaluiert, sondern auch hinsichtlich ihres (praktischen) Nutzens für die lokale Bevölkerung.

Die Ergebnisse dieses Evaluationsprozesses werden in den folgenden Abschnitten präsentiert und diskutiert. Hier soll jedoch festgehalten werden, dass sich vor allem die Einstellung von lokalen Teilnehmenden gegenüber wissenschaftlicher Forschung qualitativ deutlich positiv entwickelte, sobald qualitative anstatt quantitativer Methoden zum Einsatz kamen. Während eine solche, gualitativ-methodische Herangehensweise sicherlich hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit je nach Setting, vor allem bezüglich der Größe des Untersuchungsrahmens, beurteilt werden muss, scheint "Grounded Evaluation" ein für transdisziplinäre Projekte in kleinräumigen Settings vielversprechend. Eine Weiterentwicklung und formale Ausgestaltung dieses Ansatzes scheint für künftige Forschung zu transdisziplinärer Integration demnach fruchtbar. Ähnlich wie das in den Sozialwissenschaften häufig verwendete Konzept der "Grounded Theory" (OKTAY, 2012) könnte eine Grounded Evaluation auf einem qualitativen methodischen Ansatz aufbauen, um Kriterien und Kategorien für die Evaluierung von transdisziplinären Projekten in Koproduktion zwischen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie nichtwissenschaftlichen Teilnehmenden zu definieren und dabei gleichzeitig Material für eine evaluative Analyse zu generieren.

#### 2.3.1 Erhöhte Relevanz des Sozialen

Eine der wichtigsten "Lessons-Learned" aus der Evaluation des transdisziplinären und Citizen-Science Ansatzes, beschrieben in Kapitel 2.1 und 2.2, ist die erhöhte Relevanz des Sozialen, die sich auch und vor allem aus der Kleinräumigkeit des Untersuchungsrahmens ergibt. Wie zum Beispiel das Material, das im Rahmen der Grounded Evaluation generiert wurde, zeigt, wurden Aktivitäten im Feld sowie das allgemeine Verhalten von Projektforschenden durch die lokale Bevölkerung genauestens beobachtet. Darüber hinaus sind viele Aspekte von "Risiko", wie es im Untersuchungsgebiet konzipiert wird, hochgradig politisiert und stehen im Zusammenhang mit teils anhaltenden Konflikten zwischen lokalen Akteurinnen und Akteuren. Und schließlich zeigt das qualitative Material auch, dass die Bereiche Wasser- und Risikomanagement informellen Prozessen unterliegen und in lokale soziale Dynamiken eingebettet sind, die sich auf Prozesse der Wissensund Resilienz-Koproduktion auswirken.

Die Beobachtungen, Gespräche und Interpretationen der lokalen Bevölkerung zu den Forschungsaktivitäten hatten direkte Auswirkungen auf ihre Haltung gegenüber dem Projekt, was sich in variierender Akzeptanz und Unterstützung des Projekts durch die lokale Bevölkerung allgemein und Vertreterinnen und Vertreter lokaler Institutionen - wie der Gemeindeverwaltung - niederschlug (z.B. in Bezug auf den Zugang zu Grundstücken, die Weitergabe von Informationen, die Bereitstellung von Dokumenten etc.). Wann immer ein Projektteam vor Ort Messungen durchführte, wurde dies von lokal Ansässigen beobachtet und im Zusammenhang mit ihren Interessen, Bedürfnissen und Sorgen interpretiert. Vor allem von Landwirten und Landwirtinnen wurde der Wunsch nach Konsultation im Vorfeld besonders deutlich zum Ausdruck gebracht. Das Projektteam begegnete dieser Herausforderung mit verstärkter individueller Beratungstätigkeit und kontinuierlicher Information sowie mit der "Einbettung" von lokal Ansässigen und einem Sozialwissenschaftler in die Feldteams. Die Ergebnisse der anschließenden Fokusgruppendiskussionen und Einzelinterviews zeigten eine unmittelbare Steigerung der Akzeptanz des Projekts.

Die Ergebnisse der Grounded Evaluation zeigen auch deutlich, wie (transdisziplinäre) Forschungsaktivitäten in kleinräumigen Settings Teil der lokalen sozialen Dynamik werden. Beginnend bei der Frage, wo sich Feldteams aufhalten, wo sie essen und natürlich mit wem sie sprechen, bis hin zu der Frage, was sie abends nach der Arbeit im örtlichen Gasthaus trinken, wurde das gesamte Tun der Forschenden im Untersuchungsgebiet im Kontext bestehender sozialer Dynamiken interpretiert. Im Untersuchungsgebiet sind insbesondere die Gefahrenkarten und der Kartierungsprozess hochgradig politisiert und mit allen vier weiter oben genannten Risikodimensionen verknüpft: kulturell, wirtschaftlich, sozial und politisch. Hierunter kann vor allem die Relevanz im Bereich der kulturellen Risikodimension hervorgehoben werden: Obwohl Gefahrenkarten dazu gedacht sind, physische Risiken für beispielsweise Gebäude zu vermeiden, haben sie an unserem Studienort kulturelle Risiken erzeugt. Wie das Material aus den narrativen Interviews und den Fokusgruppendiskussionen zeigt, gibt die traditionelle Residenzfolge im Untersuchungsgebiet vor, dass z.B. vor allem im landwirtschaftlichen Kontext ein Sohn sein Haus auf dem Grundstück seines Vaters baut. Wenn die Gefahrenkarten Bauplätze als Hochrisikozonen ausweisen und somit für den Bau ungeeignet machen, wird die traditionelle Residenzfolge erschwert. Einige lokal Ansässige sehen dadurch die Tradition bedroht und fürchten damit verbundene wirtschaftliche und soziale Folgedynamiken, wie etwa die lokal stets gefürchtete Landflucht junger Menschen. Der Prozess der Gefahrenkartierung wurde daher von teilweise enormen Anstrengungen einiger Einheimischer begleitet, diese zugunsten des lokalen kulturellen und sozialen Kontexts zu beeinflussen, wodurch es auch zu bis heute andauernden Konflikten kam. Infolgedessen löst jede Forschungsaktivität, die von den Einheimischen als in welcher Form auch immer mit der Gefahrenkartierung verbunden interpretiert werden könnte, sofort Misstrauen aus.

Die erhöhte Relevanz des Sozialen wirkt sich auch erheblich auf die Koproduktionsprozesse von Wissen und auf Pläne für Wasser- und Risikomanagement aus. Während die Entscheidungsfindung und ein großer Teil der Umsetzung größerer Maßnahmen in diesem Bereich meist topdown und durch staatliche Stellen erfolgt, sind kleinere Projekte und die Praxis des Wasser- und Risikomanagements in der Gemeinde lokalisiert. Die Entscheidungsfindungsprozesse auf dieser Ebene sind formalisiert, aber von informellen Netzwerken und Dynamiken durchdrungen. Die Befragten bezeichneten dies einerseits als positiv: Viele Aspekte des praktischen Wasser- und Risikomanagements, wie z.B. das Graben von Entwässerungskanälen, können bei Bedarf und auf der Grundlage gegenseitiger Hilfe organisiert werden. Andererseits wurde von einigen Befragten als negativ angemerkt, dass politische und sogar persönliche Konflikte das organisierte Wasser- und Risikomanagement beeinträchtigen können und dies auch regelmäßig geschieht.

Das im Rahmen der Grounded Evaluation bezüglich unseres transdisziplinären Ansatzes generierte Material unterstreicht vor allem den enormen Nutzen des Einsatzes qualitativer sozialwissenschaftlicher Methoden. Wie im Folgenden diskutiert, führte der Einsatz qualitativer Methoden wie Interviews, Gruppendiskussionen und angepasste Formen der partizipatorischen Forschung zu einem deutlich stärkeren Engagement der lokalen Bevölkerung, zu aufschlussreicheren Ergebnissen und zu einer stärkeren Zunahme von Wissen und Bewusstsein. Dies deutet auch auf die Potentiale eines erkenntnistheoretischen Wandels hin: Die Zusammenhänge zwischen hydrogeologischen und sozialen Dynamiken können wesentlich deutlicher sichtbar gemacht werden, wenn "Risiko" nicht technisch deduziert, sondern als lokal kontextualisiert verstanden wird, also lokale Quellen und Formen von Risiken die Basis eines Risiko- und Resilienzansatzes bilden.

Dies zeigt sich zum Beispiel in Bezug auf das in Kapitel 2.1 erwähnte Community Profiling. Qualitative Methoden waren hierbei zentral, um die relevanten Stakeholder und Stakeholdergruppen sowie ihre Interessen, Bedürfnissen und Bedenken zu identifizieren. Fokusgruppendiskussionen, narrative Interviews mit Einzelpersonen, aber auch informelle Gespräche und gemeinsame Aktivitäten, wie etwa ein gemeinsames Getränk oder ein Spaziergang, brachten tiefe Einblicke in die lokalen sozialen, politischen, kulturellen und wirtschaftlichen Dynamiken, die mit hydrogeologischen Dynamiken zusammenhängen. Der Einsatz von qualitativen Methoden machte auch die Notwendigkeit deutlich, an einige Interessengruppen anders heranzugehen als an andere: Landwirte und Landwirtinnen zum Beispiel haben andere Arbeitszeiten als Nichtlandwirte und können daher oft nicht an abendlichen Workshops teilnehmen. Sobald wir begannen, Landwirte und Landwirtinnen auf ihren Höfen zu besuchen, nahm ihr Engagement insgesamt zu, und einige von ihnen organisierten infolge sogar die Arbeitsabläufe in ihren Familien um, um an besonderen Veranstaltungen oder Workshops des Projekts teilnehmen zu können.

#### 2.3.2 Einbettung sozialwissenschaftlicher Tätigkeiten

Um die informierte Sichtbarkeit von Forschenden und ihrer Aktivitäten in der Region zu erhöhen, wurden auch Feldaktivitäten (siehe Feldarbeiten in den Kapiteln 3 und 5) sozialwissenschaftlich begleitet. Wie RE (2015) feststellte, verbringen Hydrogeologen einen Großteil ihrer Zeit im Feld und kommen dabei fast zwangsläufig mit lokal Ansässigen in Kontakt. Während, wie HYNDS et al. (2018) erwähnten, einige daher von Hydrogeologen verlangen könnten, sich mit sozialwissenschaftlichen Methoden vertraut zu machen, entschieden wir uns im Rahmen von EXTRIG für das Einbetten eines Sozialwissenschaftlers während einiger Feldaktivitäten von hydrogeologischen Teams, wie etwa beim Durchführen von Bohrungen oder der Installation von Monitoring-Stationen. Der in unsere Feldteams eingebettete Sozialwissenschaftler hatte Abschlüsse sowohl in Sozialanthropologie, die sich als Disziplin stark auf ethnografische Methoden konzentriert, als auch in Geografie, was auch ein grundlegendes Verständnis für die Prinzipien hydrogeologischer Forschung erlaubt. Diese Form der Einbettung förderte die Kommunikation zwischen der lokalen Bevölkerung und Forschenden, die als entscheidend für sozio-hydrologische Ansätze gilt (TROY et al., 2015; LIMAYE, 2017), und ermöglichte es uns so, die erhöhte Sichtbarkeit in kleinräumigen Settings zu nutzen.

#### 2.3.3 Drainage Walks

Der oben erwähnte individuelle Austausch mit Landwirtinnen und Landwirten brachte auch eines ihrer Hauptanliegen in Bezug auf das Wassermanagement ans Licht. Wie die Interviews zeigten, sehen viele von ihnen das physische Risiko, das von der hydrogeologischen Dynamik ausgeht, nicht per se als Bedrohung an. Oder, wie es einer der Gesprächspartner formulierte: "Es ist wie mit den Jahreszeiten. Man kann sie nicht ändern, sie sind das, was die Natur einem gibt. Man muss also einen Weg finden damit umzugehen, oder man kann in diesem Tal kein Landwirt sein". Ihr Anliegen war es vielmehr, Wege zu finden, um ihre Wiesen trocken zu halten, da sie eine der Hauptquellen für die Produktion von Nutzpflanzen sind, hauptsächlich in Form von Heu als Futter für ihr Vieh und für den Verkauf. Im Rahmen des Projektes wurde deshalb eine Methode angewandt, die wir versuchsweise "Drainage-Walks" nennen (in Anlehnung an Transect-Walks; siehe z.B. WALPOLE & SHELDON, 1999). Bei diesen Spaziergängen begleiten jeweils ein Forschender oder eine Forschende sowohl aus der Hydrogeologie als auch aus den Sozialwissenschaften einen Landwirt oder eine Landwirtin bei der Kartierung der Drainagen auf seinen oder ihren Wiesen. Während dieser Spaziergänge sammelt das kleine transdisziplinäre Team gemeinsam Wissen über Lage, Funktion, Geschichte und soziale Aspekte der Drainagen. Die anschließenden hydrogeologischen Untersuchungen der Drainagen und ihrer Wirksamkeit werden in die wissenschaftlichen Projektergebnisse eingespeist und den Landwirtinnen und Landwirten kommuniziert. Details zur in diesem Bereich angewandten Methodik finden sich in Kapitel 5.6.

# 3 Geologische Verhältnisse und 3D-Modellierung

(W. JARITZ, V. TUREWICZ, D. OTTOWITZ & I. SCHATTAUER)

# 3.1 Regional und lokal geologische Übersicht

(W. JARITZ)

Das Untersuchungsgebiet liegt zur Gänze im Bereich der nördlichen Außenzone der Ostalpen, die sich als schmaler Streifen am Nordrand der Kalkalpen hinzieht und im Bereich des weiteren Untersuchungsgebietes aus vier tektonischen Einheiten aufgebaut ist. Vom Liegenden zum Hangenden handelt es sich dabei um Gesteinsserien des Helvetikums, der Liebensteiner Decke, der Feuerstätter Decke sowie des Rhenodanubischen Flyschs (Abb. 5).

Im Hauptsiedlungsraum von Sibratsgfäll – dieser liegt nördlich der Subersach – treten nur Gesteine des Rhenodanubischen Flyschs sowie Gesteine der Feuerstätter Decke auf. Die Deckengrenze folgt dem Sägenbach vom Sattel bei der Neuburg-Alpe bis zum Grabenausgang rund 20 Höhenmeter oberhalb der Kirche von Sibratsgfäll. Erst dort taucht sie unter die quartäre Talfüllung ab. Südlich der Subersach ist die Deckengrenze im Bereich Unterbergvorsäß aufgeschlossen. Es kann demnach davon ausgegangen werden, dass die Deckengrenze im Untergrund des Beckens ca. SW–NE streichend der gedachten Linie vom Grabenausgang des Sägenbachs bis zur Unterbergvorsäß folgt. Das anstehende Festgestein im Untersuchungsraum wird von mächtigen eiszeitlichen und nacheiszeitlichen Sedimenten überlagert. Dabei ist im zentralen Sibratsgfäller Becken von Überlagerungsmächtigkeiten von mehr als 100 m auszugehen.

Folgende Lockergesteine werden unterschieden:

- Den Großteil der eiszeitlichen und nacheiszeitlichen Talfüllung im Sibratsgfäller Becken bauen Eisseesedimente, daher Ablagerungen, die im direkten Zusammenhang mit einem eiszeitlichen Seestadium stehen, auf. Ein wesentliches Merkmal der Eisseesedimente ist ihr hoher Matrixanteil (Ton-Schluff-Feinsand-Fraktion). Der Matrixanteil schwankt zwischen 60 Vol.-% und 100 Vol.-%. Bei einem Matrixanteil > 80 Vol.-% ist häufig eine Feinlamination feststellbar, Linsen- oder Flaserschichtungen sind hingegen selten festzustellen.
- Eisrandsedimente wurden am Talrand im nördlichen Beckenabschnitt abgelagert. Die am höchsten gelegenen Eisrandsedimente im Untersuchungsgebiet sind jene Talverbaue, die im Nestgraben und im Dorfgraben auf rund 1.100 m bis 1.150 m (diese und alle folgenden Angaben in Seehöhe) mit Mächtigkeiten von etwa 10 m anstehen. Das Material setzt sich ausschließlich aus lokalen, kantigen Gesteinsbruchstücken des unmittelbaren Einzugsgebietes zusammen. Der Matrixreich-





Geologischer Überblick und Lage des Untersuchungsgebietes, geologische Informationen im Maßstab 1:200.000 nach OBERHAUSER & RATAY (1998), Topografie OEK 1:200.000.

tum der gemischtkörnigen Ablagerungen erklärt sich durch die zum Teil geringe Verwitterungsresistenz der Ausgangsgesteine. Der markanteste und ausgedehnteste Terrassenkörper im Untersuchungsgebiet ist iene Terrasse, deren Oberkante sich auf rund 1.000 m über dem Hauptsiedlungsraum von Sibratsgfäll hinzieht. Die Terrasse ist ausgehend vom Sattel bei Sausteig bis Scheibladegg verfolgbar. Sie wird durch die Gräben, welche die nach Südwest schauende Flanke des Renkknies (1.398 m) entwässern, zerschnitten. In den Grabenanschnitten werden in horizontaler und vertikaler Richtung rasch wechselnde, unterschiedlich zusammengesetzte Sand-Kies-Gemische aufgeschlossen. Die Schichtmächtigkeiten liegen deutlich unter einem Meter. Das Schichteinfallen ist überwiegend nach Südwesten mit einem Einfallswinkel zwischen 5-10° orientiert. Das Geschiebespektrum ist bunt.

- Grundmoränenablagerungen Sedimente der Gletscherbasis – sind nur in den oberen und mittleren Hangarealen oberhalb von rund 950 m bis maximal 1.070 m nachgewiesen. Die Grundmoränenablagerungen im Untersuchungsgebiet sind von dunkelgrauer Färbung. Das Geschiebespektrum spiegelt das Einzugsgebiet der Subersach wider, wobei Gesteine des Helvetikums dominieren. Auffällig sind die dunklen, gut gerundeten und zumeist deutlich gekritzten Schrattenkalk-Geschiebe.
- In den Kernbohrungen KB1/03 und KB1/07 sind unter den Eisseesedimenten Grobklastika in Form von weitgestuften Sand-Kies-Gemischen mit unterschiedlichem Steinanteil aufgeschlossen.
- Spät- bis postglaziale Lockergesteine treten im Untersuchungsgebiet in Form von Hangschuttdecken sowie als Hangumlagerungssedimente an Hängen und in Talkerben auf. Die Hangschuttdecken der Flyschgesteine sind ihrem Ausgangsmaterial entsprechend zum überwiegenden Teil gemischtkörnig und zerfallen verwitterungsbedingt rasch zu feinteilreichen Lockermassen, in denen verwitterungsresistente Gesteinsbruchstücke (Sandsteine, Kalksandsteine, Kalkmergel) eingelagert sind. Die Gesteinsbruchstücke sind aufgrund der geringen Transportweiten überwiegend kantig. Die mächtigen Lockersedimente wurden entlang der Talkerben durch die Bäche überwiegend in Form von Muren abtransportiert (gemischtkörniges Geschiebespektrum) und beim Eintritt in das Sibratsgfäller Becken (Unterhang ab rund 970 m) als Murkegel oder Schwemmfächer abgelagert.

# 3.2 Geophysikalische Untersuchungen

(D. OTTOWITZ & I. SCHATTAUER)

Als Basis für die Erstellung eines geometrischen Modells wurden in erster Linie geoelektrische Profile herangezogen. Dabei wurden 20 schon vorhandene Messprofile neu ausgewertet. Um eine eventuelle Abschätzung der großräumigen Geometrie im gesamten Studiengebiet zu erlangen, wurde außerdem eine aeroelektromagnetische Messung aus dem Jahr 2009 mit aktueller Software neu ausgewertet. Diese oft über mehrere Quadratkilometer vorhandenen Daten haben das Potential, große lithologische Einheiten voneinander zu unterscheiden, sofern ausreichend großer Kontrast im Messparameter des spezifischen elektrischen Widerstandes vorhanden ist. Außerdem wurden ergänzende geoelektrische und bodengestützte elektromagnetischer Messungen vor Ort durchgeführt, um gezielt offene Fragen der geologischen Interpretation zu klären.

#### 3.2.1 Methodik

#### (D. OTTOWITZ & I. SCHATTAUER)

Die Gleichstromgeoelektrik ist ein geophysikalisches Messverfahren, bei dem mittels galvanisch erfolgter Einspeisung eines elektrischen Gleichstroms in den Untergrund und gleichzeitiger Messung der elektrischen Spannung im Untergrund dessen spezifischer elektrischer Widerstand bestimmt werden kann. Der spezifische elektrische Widerstand des Untergrundes hängt grundsätzlich vom Gesteinstyp, der Porosität, der Wassersättigung und der elektrischen Leitfähigkeit der Porenflüssigkeit ab. Des Weiteren spielt bei Sedimenten auch der Tongehalt eine zentrale Rolle. In der Praxis erfolgt die Messung in der Form, dass in einem regulären Abstand entlang eines vordefinierten Messprofils Stahlspieße (Elektroden) wenige Zentimeter in den Boden geschlagen werden und diese mit einem speziell dafür geeigneten Messkabel (Multicore-Kabel, eine Kabelader pro Elektrode) verbunden werden. Moderne geoelektrische Messsysteme können, je nach Ausführung, bis zu 130 Elektroden über ein entsprechendes Messkabel ansteuern und so eine Vielzahl von Messpunkten in sogenannten 4-Punktanordnungen (2 Elektroden -Stromeinspeisung, 2 Elektroden - Spannungsmessung) abarbeiten. Durch verschiedene geometrische Anordnungen der Elektroden werden unterschiedliche Bereiche des Untergrundes messtechnisch erfasst. Die maximale Eindringtiefe der geoelektrischen Messung beträgt dabei etwa 20 % der Profillänge. In der Regel umfasst eine volle Messung, auch Tiefensektion genannt, mehrere tausend Messpunkte. Die so gewonnenen Rohdaten werden mittels Dateninversion in ein Modell des spezifischen elektrischen Widerstandes entlang des Messprofils umgesetzt. Das Ergebnis liefert, ähnlich einem geologischen Profilschnitt, einen 2D-Tiefenschnitt, der die Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes des Untergrundes entlang des Profils wiedergibt. Durch entsprechende Zusatzinformationen (Geologie, Bohrlochinformationen etc.) können die unterschiedlichen Wertebereiche des spezifischen elektrischen Widerstandes als unterschiedliche geologische/ lithologische Einheiten angesprochen werden.

Auch bei der Aero-Elektromagnetik wird die Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes des Untergrundes bestimmt. Hierbei kommt eine spezielle, unter dem Hubschrauber geschleppte Sonde (Bird) mit Sende- und Empfangsspulen zum Einsatz (vier Frequenzen, koaxial, koplanar orientiert). Die Sendespulen emittieren kontinuierlich ein elektromagnetisches Feld, Primärfeld genannt. Das Primärfeld dringt in den Untergrund ein und regt dort Wirbelströme an. Die Eindringtiefe hängt von der Frequenz ab. Die Wirbelströme emittieren ihrerseits ein Feld, das als Sekundärfeld bezeichnet wird. Die Empfangsspulen nehmen die Überlagerung aus Primär- und Sekundärfeldern auf. Die Stärke des Sekundärfeldes hängt von der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Untergrund ab. Gemessen werden Verhältnisse von Phase und Amplitude von Primär- und Sekundärfeld zueinander

simultan für vier Frequenzen, zehn Mal pro Sekunde, das heißt bei normaler Fluggeschwindigkeit in Abständen von ca. 3 m. Die großflächige Befliegung erfolgt entlang von vordefinierten Fluglinien und liefert eine sehr große Datenmenge, die teils mit semiautomatischen Verfahren bearbeitet und ausgewertet wird. Im Prinzip wird für jeden Messpunkt mittels Dateninversion ein Tiefenschichtmodell des spezifischen elektrischen Widerstandes berechnet. Durch die Gesamtheit der Messpunkte ergibt sich so eine räumliche Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes unter den Fluglinien. Mittels komplexer Interpolationsmethoden kann so, bei ausreichend kleinem Fluglinienabstand, eine grobe räumliche Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes für das gesamte Befliegungsgebiet errechnet werden. Die räumliche Auflösung der Aero-Elektromagnetik ist um ein Vielfaches geringer als bei der Geoelektrik, wodurch sich bei der Betrachtung und Interpretation kleinräumiger geologischer/lithologischer Strukturen deutliche Einschränkungen ergeben. Zusätzlich wurden bodengestützte elektromagnetische Messungen mit dem Messsystem CMD-Explorer (GF Instruments) durchgeführt, das vom grundsätzlichen Messprinzip mit der Aero-Elektromagnetik vergleichbar ist, allerdings nur die ersten paar Meter des Untergrundes erfassen kann. Diese großflächigen elektromagnetischen Untersuchungen wurden vor allem für die Abschätzung des Niederschlagsinfiltrationspotentials der obersten Untergrundschicht und den etwaigen Einfluss von künstlichen Drainagen Systemen auf die Bodenfeuchte durchgeführt (Kapitel 5.5).

#### 3.2.2 Ergebnisse der Aero-Elektromagnetik

#### (I. SCHATTAUER)

Beim Reprozessing der Aero-Elektromagnetik konnte auf Messdaten von zwei unterschiedlichen Befliegungen (2000 und 2009) zurückgegriffen werden. Aufgrund der, hinsichtlich Datenqualität im Vergleich zu vorangegangenen Inversionsmethoden (homogener Halbraum, 2-Schicht- bis max. 3-Schichtfall mit unterschiedlichen Inversionsansätzen (Details siehe z.B. SEIBERL et al., 2002; AHL et al., 2007)), deutlich sensibleren Multi-layerinversion (Inversionssoftware EM1DFM der University of Britisch Columbia), konnte der Datensatz der Befliegung aus dem Jahr 2000 nicht verwendet werden. Somit beschränkte sich das Reprozessing auf den Datensatz aus dem Jahr 2009. Die genannte Multi-layerinversion wurde im Jahr 2013 an der GBA als Standardauswertemethode für Aero-Elektromagnetik-Daten etabliert. Neben der Möglichkeit unter den einzelnen Fluglinien profilhaft die Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes mit der Tiefe darzustellen (für jeden Messpunkt erfolgt eine unabhängige 1D-Multi-layerinversion), kann diese Verteilung mit ausgeklügelten Interpolationsmethoden auf das ganze Befliegungsgebiet ausgeweitet werden, wodurch man eine 3D-Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes für dieses Gebiet bekommt. Nun kann man zwar beliebige Schnitte durch dieses 3D-Widerstandsmodell definieren und sich die entsprechende Widerstand-Tiefenverteilung entlang dieses Schnittes betrachten, allerdings ist zu berücksichtigen, dass der Schritt der Dateninterpolation eine relativ starke Glättung und somit eine wesentliche Reduktion der räumlichen Auflösung des Modells darstellt. Speziell bei Fragestellungen, die für die maximale räumliche Auflösung der Aero-Elektromagnetik grenzwertig sind, sind daher für die Interpretation die profilhaften Inversionsergebnisse entlang der Fluglinien zu bevorzugen. Unter Berücksichtigung der verfügbaren geoelektrischen Messergebnisse und deren geologischer Interpretation wird schnell klar, dass für eine sinnvolle Einbeziehung der Aero-Elektromagnetik die profilhafte Betrachtung in Frage kommt. Es wurde zwar versucht, mit einem neuen Ansatz (Details dazu siehe JARITZ et al., 2022) die auf den geoelektrischen Ergebnissen beruhende geologische Interpretation mit den Aero-Elektromagnetik-Ergebnissen auf Basis von Häufigkeitsverteilungen zu verknüpfen, allerdings hat sich hier kein ausreichend signifikanter Zusammenhang gezeigt. Damit können die Ergebnisse der Aero-Elektromagnetik, wie sie in Abbildung 6 dargestellt sind, primär als visuelle Hilfestellung und Ergänzung für die Erstellung des geologischen 3D-Modells, vor allem in Bereichen, wo wenig 2D-Geoelektrik-Informationen vorhanden sind, verwendet werden.



#### Abb. 6.

3D-Ansicht der Ergebnisse der Aero-Elektromagnetik; dargestellt als profilhafte Tiefenschnitte des spezifischen elektrischen Widerstandes, wobei zur leichteren Interpretation die Gruppierung auf vier Widerstandsbereiche erfolgte. Das Ziel der Aero-Elektromagnetik-Ergebnisse war einerseits eine großräumige Unterteilung der Beckenfüllung anhand des spezifischen elektrischen Widerstandsbereiches in vorwiegend grobkörnige/feinkörnige Bereiche zu ermöglichen und andererseits eine Tiefeninformation zur Flysch-Oberkante im gesamten Untersuchungsgebiet zu bekommen. Eine Einschätzung bezüglich des ersten Ziels ist anhand der Ergebnisse auf jeden Fall möglich, wenngleich die Anforderungen hinsichtlich des Detaillierungsgrades bei der Erstellung des geologischen 3D-Modells zum Teil nicht ganz erfüllt werden konnten, das heißt, die sehr heterogene Untergrundstruktur, die für die Einschätzung der hydrologischen Eigenschaften maßgeblich ist, konnte nur zum Teil erfasst werden (Details dazu siehe JA-RITZ et al., 2022). Diese Einschränkung ist prinzipiell auf die maximale räumliche Auflösung der Methode zurückzuführen. So konnte beispielsweise die Grenze zwischen Beckenfüllung und Flysch mit der Aero-Elektromagnetik nicht bestimmt werden, da durch das elektrisch sehr leitfähige Material der Beckenfüllung eine Abschirmung des elektromagnetischen Signals einhergeht, wodurch sich die maximale Eindringtiefe der Methode in diesem Fall auf 60 m reduziert. Daher können nur in wenigen Teilbereichen (entsprechend seichte Lage der Grenze Beckenfüllung/ Flysch) des Untersuchungsgebietes entsprechende Aussagen getroffen werden. Zusätzlich wird die Bestimmung dieser Grenze durch den eher geringen Kontrast im spezifischen elektrischen Widerstand zwischen Beckenfüllung und Flysch nochmals erschwert (Details dazu siehe JARITZ et al., 2022). Es ist anzumerken, dass die Ergebnisse der Aero-Elektromagnetik trotz verschiedener Auswerte- und Interpretationsansätze (JARITZ et al., 2022), aufgrund der zu geringen räumlichen Auflösung nicht im gewünschten Ausmaß in die Erstellung des geologischen 3D-Modells einbezogen werden.

# 3.2.3 Ergebnisse der 2D-Geoelektrik

(D. OTTOWITZ)

Insgesamt wurden knapp 20 geoelektrische Messprofile neu ausgewertet, die im Zeitraum 1999 bis 2007 gemessen wurden. In den letzten zehn Jahren wurden, neben den Inversionsalgorithmen, auch die Möglichkeiten der Datenfilterung enorm weiterentwickelt. Daher ist es nicht verwunderlich, dass ein entsprechendes Reprozessing der Daten nach dem neusten Standard zu verbesserten Ergebnissen führt. Nach verschiedenen Testauswertungen wurde für das schlussendliche Reprozessing die kommerzielle Software Res2DINV (© Geotomo Software) in der Version 4.9.11 verwendet. Der schnelle Vergleich mit den alten Inversionsergebnissen zeigte zum Großteil eine deutliche Verbesserung hinsichtlich des Detailgrades in den berechneten Widerstandsmodellen. Zudem wurde auch festgestellt, dass die neue Version der Inversionssoftware eine deutlich umfangreichere Auswahl an steuerbaren Inversionsparametern bietet, die an den jeweiligen Datensatz angepasst werden können. Um eine einheitliche Beurteilung der geoelektrischen Ergebnisse zu ermöglichen, wurden diverse Inversionseinstellungen an ein paar repräsentativen Messprofilen ausprobiert und basierend auf den Kriterien "niedrigster rms-Fehlerwert" und der "geologischen Plausibilität" des Modells festgelegt. Die gewählten Einstellungen wurden für alle Messprofile beibehalten. Die Filterung der Messdaten beschränkte sich, um den subjektiven Einfluss bei der Datenauswertung möglichst gering zu halten, lediglich auf die sogenannte rms-Fehlerdatenfilterung, bei der Datenpunkte, die eine entsprechende Abweichung vom berechneten Model aufweisen, eliminiert werden. So erfolgt eine schrittweise Verbesserung des Eingangsdatensatzes für den nächsten Inversionsschritt. Im vorliegenden Fall wurde diese Datenfilterung einheitlich in zwei Schritten ausgeführt, wobei darauf geachtet wurde, dass einerseits nicht mehr als 20 % der ursprünglichen Messpunkte eliminiert wurden und andererseits der schlussendliche rms-Fehlerwert unter 7 % zu liegen gekommen ist. Abbildung 7 zeigt als repräsentatives Ergebnis des Reprozessings den Vergleich zwischen dem ursprünglichen und dem neuen Endergebnis des Inversionsprozesses für das Messprofil 1.

Zwar sind in Abbildung 7 die dominierenden elektrischen Widerstandsstrukturen in beiden Bespielen größtenteils zu erkennen, bei der detaillierten Betrachtung bzw. beim Versuch einer geologisch/lithologischen Interpretation zeigt sich aber ganz deutlich, dass im unteren Ergebnis einzelne Einheiten entlang des gesamten Messprofils deutlich leichter zu verfolgen sind. Zudem ist beim unteren Ergebnis der rms-Fehlerwert, der auch in gewisser Weise als Maß für die Zuverlässigkeit des berechneten Modells gewertet werden kann, signifikant niedriger (3,9 % zu 7,5 %). Ein zusätzlicher Aspekt, der beim Reprozessing beachtet wurde, der aber einen wesentlich geringeren Einfluss auf das Endergebnis hatte, war die Berücksichtigung genauerer digitaler Geländemodelle für die Topografie entlang der geoelektrischen Messprofile. Die ursprüngliche Topografie beruhte zum Teil nur auf groben Geländeskizzen in Kombination mit einigen wenigen (relativ) genau eingemessenen Koordinaten. Aufgrund der Tatsache, dass es im Untersuchungsgebiet durchaus zu größeren Massenbewegungen kommen kann, wurde die Aktualisierung der Topografie selbstverständlich nur bei den Profilen vorgenommen, wo eine Änderung der Topografie im Meterbereich ausgeschlossen werden kann (bei Änderungen von wenigen Dezimetern überwiegt der Vorteil durch die genauere Topografie). Der große Vorteil der aktualisierten Topografie liegt vor allem in der Eliminierung entsprechender topografischer Diskrepanzen zwischen unterschiedlichen Datensätzen, die spätestens bei der Berücksichtigung als Eingangsdaten beim geologischen 3D-Modell zu Problemen führen würde.

Basierend auf den verfügbaren geophysikalischen Ergebnissen konnte der Tiefenverlauf des Flyschs, der im Nordosten des Untersuchungsgebietes als anstehend kartiert ist, nicht bestimmt werden. Daher wurde im Projektverlauf ein zusätzliches geoelektrisches Messprofil realisiert, das mit einer Profillänge von knapp 2 km (Profillage NW-SO) beinahe das gesamte Untersuchungsgebiet im zentralen Bereich überspannt. Die maximale Eindringtiefe dieses Messprofils beträgt etwa 350 m und sollte, basierend auf vorhandenen geologischen Modellvorstellungen, auf jeden Fall bis zur Oberkante des Untergrundes reichen. Um einen Anhaltspunkt für den zu erwartenden elektrischen Widerstandsbereich des Flyschs zu bekommen, wurde im Nordosten des Untersuchungsgebietes ein kurzes geoelektrisches Profil direkt im anstehenden Flysch gemessen. Hier hat sich gezeigt, dass der Flysch zwar eine sehr hohe Bandbreite im spezifischen elektrischen Widerstand aufweisen kann, im Allgemeinen aber doch eher niedri-



ge Widerstandswerte (< 60  $\Omega$ m) zeigt. Obwohl hier auch mit Sicherheit ein Unterschied zwischen dem anstehenden und dem mehrere Zehnermeter überdeckten Flysch zu erwarten ist, wurde diese Information als Grundlage für die geologische Interpretation des langen geoelektrischen Messprofils herangezogen.

#### 3.2.4 Geologische Interpretation der Ergebnisse der 2D-Geoelektrik

#### (D. OTTOWITZ)

Als Einleitung zu Kapitel 3.3 soll die geologische Interpretation von allen verfügbaren geoelektrischen Messergebnissen beschrieben werden. Dieser Arbeitsschritt erfolgte iterativ unter Berücksichtigung der konzeptionellen geologischen Vorstellung und Berücksichtigung von Bohrdaten. Als repräsentatives Beispiel ist in Abbildung 8 die geologische Interpretation des im Projektverlauf gemessenen, langen geoelektrischen Messprofils dargestellt. Grundsätzlich erfolgt die Einteilung in fünf verschiedene Einheiten (Hangumlagerung, Eisseesediment, grobklastische Ablagerung, Eisrandsediment, Flysch), die sich neben Unterschieden im spezifischen elektrischen Widerstand auch durch deren räumliche Lage und jeweilige Abfolge voneinander unterscheiden lassen.

Dementsprechend wurden für alle geoelektrischen Ergebnisse geologische/lithologische Grenzflächen definiert und in einem finalen Schritt im 3D-Raum digitalisiert (mit © ArcScene von Esri Inc.). Diese digitalisierten Grenzflächen stellten eine zentrale Datengrundlage bei der Erstellung des geologischen 3D-Modells dar, wobei im Zuge der 3D-Modellierung in Teilbereichen noch geringfügige Anpassungen notwendig waren, um der gesamtheitlichen, geologischen Modellvorstellung zu entsprechen (Kapitel 3.3).



Abb. 8.

Ergebnis des im Projektverlauf gemessenen, langen geoelektrischen Profils inklusive geologischer Interpretation, Lokation von vorhandenen Bohrungen sowie der Kreuzungspunkte (inklusive Ausschnitt) mit bereits vorhandenen geoelektrischen Messprofilen.

# 3.3 Geologische 3D-Modellierung

(V. TUREWICZ & W. JARITZ)

#### 3.3.1 Methodik

#### (V. TUREWICZ)

Die Integration von heterogenen Eingangsdatensätzen in eine gemeinsame 3D-Umgebung ermöglicht eine Qualitäts- und Plausibilitätsprüfung erster Ordnung, da so Unstimmigkeiten in den Datensätzen sichtbar werden. Im Laufe der Modellierung wurde eine Datenbereinigung und Datenharmonisierung durchgeführt und entschieden, welche Informationen direkt in das 3D-Modell einfließen und welche nur indirekt genutzt werden. Dies führte zur Erstellung eines einheitlichen Modells, das den Untergrund nach bestem Wissen und Gewissen abbildet, und Informationen über die Lage der geologischen Grenzen und Geometrie der äußeren und inneren Formationen liefert.

Das 3D-Untergrundmodell wurde mithilfe der Software © SKUA-GOCAD erstellt und basiert dabei weitestgehend auf allen bereits vorhandenen sowie neu generierten Informationen. SKUA-GOCAD ist eine etablierte 3D-Modellierungssoftware, die in der Lage ist, große 2D- und 3D-Datensäte zu bearbeiten und zu visualisieren (ASPEN TECHNOLOGY INC., 2022). Einige der benötigten Datensätze mussten dabei erstmal in direkt verwendbare Datenformate extrahiert werden. Wichtigste Eingangsdaten waren vor allem eine geologische Karte im Maßstab 1:5.000 (JARITZ, 2013), die geophysikalischen Untersuchungen, Bohrdaten sowie ein digitales Höhenmodell (DHM10m).

#### 3.3.2 Konzeptionelle Modellvorstellung

(W. JARITZ & V. TUREWICZ)

Der Hauptsiedlungsraum von Sibratsgfäll mit den Ortsteilen Wieseln, Nest, Sibratsgfäll, Mähmoos und Krähenberg ist von einem großräumigen Hangkriechen betroffen. Die Bewegungsraten erreichen im mittleren besiedelten Hangabschnitt bis zu 7 cm pro Jahr.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die vom Hangkriechen erfassten Flächen aus mächtigen, komplex zusammengesetzten, späteiszeitlichen Lockersedimenten aufgebaut werden. Die Lockergesteine geben zahlreiche Hinweise auf ein gletschernahes Ablagerungsmilieu. Aufgrund dieses Milieus mit den sich oft ändernden Sedimentationsbedingungen wechselt die Sedimentzusammensetzung, deren Mächtigkeit und deren Verteilung rasch. Neben den zum Teil fein geschichteten Seesedimenten treten auch unstrukturierte, feinsandige, tonige Schluffe auf, die als waterlain till, daher Eisseesedimente in direktem Gletscherkontakt, interpretiert werden. Sie entstanden im Zuge der Verfüllung eines eiszeitlichen Sees, der einst das Sibratsgfäller Becken mit wechselnder Ausdehnung besetzt hielt.

In der vorangegangenen Bearbeitung (JARITZ, 2013) wurde davon ausgegangen, dass eine Differenzierung zwischen westlichem Beckenabschnitt (Ortsteil Mähmoos) und östlichem Beckenabschnitt (Ortsteil Sibratsgfäll) in Bodenaufbau und Genese besteht. Da in den alten Geoelektrikprofilen unter den mächtigen feinkorndominierten Eisseeablagerungen nur im westlichen Abschnitt höherohmige Sedimente (ca. 150–200  $\Omega$ m) detektiert wurden und diese in den beiden östlichen Profilen nicht in dieser Widerstandsverteilung angetroffen wurden, wurde von einer Zweiteilung im Beckenaufbau ausgegangen. Die unterschiedliche Verteilung der Lockergesteine im Becken wurde durch die ungleiche Verteilung der zu diesem Zeitpunkt abschmelzenden Eismassen im Spätglazial erklärt.

Wie die neuen Untersuchungen zeigten, konnten aber auch im östlichen Beckenabschnitt mit den langen und daher tief reichenden Messdaten des Geoelektrikprofiles 1-2019 (Abb. 8) höherohmige Abfolgen nachgewiesen werden. Es wurde bestätigt, dass der niedrigohmige, oberflächennahe Horizont (Eisseesedimente) sich laut Geoelektrik entlang der Profillinie 1-2019 ausgehend vom Messpunkt-Anfang bis zum Profilende, daher über das gesamte Sibratsgfäller Becken erstreckt. Die Mächtigkeit schwankt dabei zwischen wenigen Metern am Beckenrand im Nordwesten und nimmt im zentralen Beckenabschnitt von der Gemeindestraße bei Mähmoos bis in den Bereich der Kernbohrung KB 2/01 auf über 60 m zu. Laut neuen Messdaten werden die Eisseesedimente entlang der gesamten Profillinie von unterschiedlich zusammengesetzten, jedoch scheinbar zusammenhängenden Sand-Kies-Gemischen unterlagert. In Korrelation mit dem im Oberhang neu gemessenen Profil 2-2019 im Bereich des anstehenden Flyschs und dem ihm zugewiesenen spezifischen elektrischen Widerstand von maximal 75 Ωm kann zudem folgendes geschlussfolgert werden:

- In den tief reichenden geoelektrischen Profilen wurde das anstehende Festgestein und somit die Beckenbasis detektiert.
- Die maximale Überlagerungsmächtigkeit bzw. die Beckenübertiefung erreicht im zentralen Becken rund 200 bis 250 m.
- Das Untergrundrelief ist ausgeprägt mit Eintiefungen und Erhebungen, wobei Höhendifferenzen von mehreren Zehnermetern erreicht werden.

Am nördlichen Beckenrand wurden eiszeitliche Lockergesteine nachgewiesen, die von Schmelzwasserflüssen zwischen Gletscher und Beckenrahmen abgelagert wurden. Schmelzwassersedimente – überwiegend Sand-Kies-Gemische – verzahnen sich dort mit Schwemmfächerablagerungen der Seitenbäche aus den angrenzenden Hangflanken sowie mit Suspensionsablagerungen, die auch von der Gletscheroberfläche in das Becken vorstießen.

Nach Zusammenschau aller neuen und alten Mess- und Untersuchungsergebnisse kann der relative zeitliche Ablauf der Beckenverfüllung im Würm-Glazial, die Verteilung sowie der interne Aufbau der einzelnen geologischen Körper der Beckenverfüllung wie folgt rekonstruiert werden.

Im Unterschied zur ursprünglichen Annahme einer ausschließlich späteiszeitlichen Beckengenese (JARITZ, 2013) werden die Grobklastika unter den Eisseesedimenten einer Vorstoßphase im Würm während des Gletscheraufbaus zugeordnet. Die darauffolgende Stillwasserphase repräsentiert demnach die bereits gehinderten Abflussverhältnisse der Bäche aus den Seitentälern (Subersachtal, Ruhbachtal) Richtung Haupttal (Bregenzerachtal), da dort bereits der mächtigere Bregenzerachgletscher den Abfluss der Seitenbäche behinderte. Die Eisseesedimente wurden im Laufe des weiteren Gletscheraufbaus bis zum Last Glacial Maximum (LGM) von diesem überfahren. Darauf weist die durchwegs hohe Konsolidierung der Eisseesedimente hin. Am Beckenrand ist mit massiven Sedimenteinstößen der Seitenbäche in das Seebecken auszugehen, die zu einer beckenrandnahen Verzahnung unterschiedlichster Ablagerungen (Wildbachablagerungen, Murstoßablagerungen, Bachsedimente, Seesedimente) führten. Demnach ist auch in diesem Verzahnungsbereich von stark unterschiedlichen und wechselnden hydrogeologischen Gegebenheiten auszugehen. Die hydrogeologischen Verhältnisse werden durch diesen oftmaligen Wechsel von feinkorndominierten und grobkörnigen Ablagerungen bestimmt. Durch die mächtigen feinkorndominierten Sedimente im zentralen Beckenabschnitt werden Hang- und Grundwasservorkommen, die vom Beckenrand über gröberklastische Abfolgen in tiefere Beckenabschnitte gelangen (Vorstoßschotter zwischen 45 und 85 m), eingespannt. Das Druckniveau dieser Grundwasservorkommen liegt dabei bis zu 20 m über der derzeitigen Geländeoberfläche.

Alle weiteren quartären Ablagerungen und Bildungen werden dem Würm-Spätglazial zugerechnet und in die Zeitphase des Gletscherrückzuges bzw. seiner Abschmelzphase eingeordnet. Die höchstgelegenen und somit die ältesten erhaltenen Zeugen der spätglazialen Beckengenese sind Ablagerungen in den Seitengräben hoch über dem heutigen Talboden. Im Zuge der Abschmelzphase wird der ehemalige Gletscherrand durch eine markante Eisrandterrasse nachgezeichnet, die heute die Grenze zwischen bewegten und unbewegten Hangabschnitten markiert. Das sukzessive Abschmelzen des verbliebenen Toteises im Becken selbst wird durch kleinere Terrassenkörper unterhalb des mächtigen Eisrandstaukörpers der Rückzugphase 2 markiert.

Nach dem Eisfrei des Beckens setzte die Erosion durch die nun wieder frei abfließenden Gerinne ein. Diese Erosionsprozesse sind der Auslöser für die großräumigen Bodenunruhen im Sibratsgfäller Becken. Durch die Tieferlegung und unterschneidende Wirkung der Bäche Subersach und Rubach werden die Flanken in den Beckensedimenten nach wie vor übersteilt. Die Lockergesteine reagierten mit Ausgleichsbewegungen. Diese Prozesse bewirken ein Wechselspiel zwischen Abtrag am Hangfuß und Materialnachlieferung durch Hangbewegungen aus den Einhängen.

Die Bewegung vollzieht sich ausschließlich in den feinkörnigen Eisseesedimenten entlang von einigen wenigen, zum Teil tiefliegenden Gleitflächen. Bewegungshorizonte wurden in Tiefen von 10 bis 12 m, um 15 m und bei 35 m Tiefe festgestellt. Diese Bewegungsflächen greifen bergwärts weit in den Sedimentkörper bis in den Ortsbereich ein.

Es werden drei Phasen des Sedimentabtrags und der Sedimentumlagerung nach erfolgter Beckenverfüllung unterschieden.

- Erosion: Nach dem Eisfrei am Ende des Spätglazials zerschnitt die Subersach, nachdem der Abfluss zur Vorflut (Bregenzer Ache) frei wurde, die Beckenfüllung.
- Gleitungen: Der Massenverlust an den Einhängen zu den Bächen Rubach und Subersach löste in den feinkörnigen Seesedimenten Bewegungen aus, die weit in den Sedimentkörper bis in das Ortgebiet von Sibratsgfäll zurückgriffen. Diese Bewegungen halten bis heute an und führen zu einem tiefgreifenden Zergleiten der

gesamten Talfüllung. Dadurch entstanden die gering geneigten Flächen um den Ort, wobei das entstandene getreppte und gestufte Hangprofil durch die langanhaltende intensive Nutzung überprägt wurde.

Fließen/Kriechen: Durch die Gleitungen wurde das Sedimentgefüge weiträumig aufgelockert. Entlang der Bewegungsflächen und dem zum Teil neu entstandenen Trennflächengefüge wird dem Wasser der Zutritt in tiefere Bodenhorizonte ermöglicht. Die von den Bewegungen betroffenen Eisseesedimente sind wasserempfindlich und reagieren in Abhängigkeit vom Spannungsniveau auf Wasserzutritt mit Konsistenzverringerung. Das Ergebnis sind schneller ablaufende Hangbewegungen vom Typ Erd-/Schuttstrom, die überwiegend im untersten bis zum mittleren Hangbewegungsbereich ausgebildet sind. Dieser Hangbewegungstyp überprägt die bereits vorhandene, durch Treppen und Stufen dominierte Morphologie. Im Untersuchungsgebiet können in den untersten Hangabschnitten sechs verschiedene Erd-/Schuttstromsysteme in unterschiedlichen Entwicklungsstadien beobachtet werden: 1) Rasch ablaufende Systeme (Fließen; Bewegungsgeschwindigkeiten von rund 0,5-1 m pro Jahr mit deutlich ausgebildeten seitlichen Begrenzungen (Scherbahnen), aber meist undeutlich entwickelten bzw. anthropogen überprägten Anbruchgebieten. 2) Hangabschnitte, die als Vorphase von schneller ablaufenden Bewegungen angesehen werden, wo muschelförmig Anbruchkanten Hangareale mit getreppter Geländemorphologie überprägen.

#### 3.3.3 Ergebnisse und Interpretation

(V. TUREWICZ)

Für die Erstellung des 3D-Untergrundmodells wurde in einem ersten Schritt das digitale Höhenmodell mit 10 m Auflösung (DHM10) in die Software © SKUA-GOCAD eingespeist und die Geologische Karte auf das Höhenmodell projiziert (Abb. 9). Die geologisch interpretierten Grenzflächen der Geoelektrik-Profile wurden daraufhin in der Software dreidimensional zusammengeführt und einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Bei Unstimmigkeiten wurden die geologischen Grenzen nach bestimmten Kriterien soweit verschoben, dass sie dreidimensional zusammenpassen. Hierbei wurden die interpretierten Grenzen der kürzeren Profile aufgrund höherer Auflösung bevorzugt herangezogen und die allgemeine geologische Modellvorstellung für das Gebiet berücksichtigt (Kapitel 3.3.2). Im Zuge dessen wurde die Einheit der Eisrandsedimente als ein Bereich von grobklastischen Eisrandterrassen bezeichnet und zusätzlich ein Bereich von Schwemmfächern (Verzahnungsbereich) definiert. In einem nächsten Schritt wurden die Einheiten der Legende der Geologischen Karte zugeordnet, um Informationen über die Ausdehnung der generalisierten Einheiten an der Oberfläche zu erhalten. Als zusätzliche wichtige Information wurden in den Bohrprofilen noch die Übergänge der Einheiten identifiziert und die Basis der jeweiligen Grenzschichten als Marker in die Software hinzugefügt.

Basierend auf all diesen Informationen wurden die Grenzflächen (Unterkante) der geologischen bzw. lithologischen Einheiten erstellt. In Abbildung 10 ist das 3D-Untergrundmodell mit den Grenzflächen der Einheiten und exemplarisch das Geoelektrik-Profil 3 dargestellt. Zu erkennen ist, dass, wie bereits erwähnt, die Eisseesedimente niedrigere Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes aufweisen und die Unterkante bis zu einer Tiefe, wo höherohmige Bereiche beginnen, verläuft. Abbildung 11 zeigt nochmals das 3D-Untergrundmodell, jedoch ohne die Grenzfläche der Eisseesedimente. Hier ist zu erkennen, dass die grobklastischen Ablagerungen den höher ohmigen Bereich zugeordnet werden können. Da der Übergang zum Flysch



#### Abb. 9.

Darstellung des 3D-Modells mit der Lage der Bohrungen und der Geologischen Karte, die auf das digitale Höhenmodell projiziert wurde. Das 3D-Modell ist überhöht dargestellt (Überhöhungsfaktor 2).



#### Abb. 10.

Darstellung des 3D-Modells mit dem digitalen Höhenmodell (transparent in grau dargestellt), dem Geoelektrik-Profil 3, der Lage der Bohrungen und den Grenzflächen (Unterkante) der geologischen/lithologischen Einheiten (transparent dargestellt): Grobklastische Eisrandterrassen (dunkelrot), Schwemmfächer (hellrosa), Eisseesedimente (grün) und Grobklastische Ablagerungen (blau). Das 3D-Modell ist überhöht dargestellt (Überhöhungsfaktor 2).


#### Abb. 11.

Darstellung des 3D-Modells mit dem digitalen Höhenmodell (transparent in grau dargestellt), dem Geoelektrik-Profil 3, der Lage der Bohrungen und den Grenzflächen (Unterkante) der geologischen/lithologischen Einheiten (transparent dargestellt) ohne die Eisseesedimente: Grobklastische Eisrandterrassen (dunkelrot), Schwemmfächer (hellrosa) und Grobklastische Ablagerungen (blau). Das 3D-Modell ist überhöht dargestellt (Überhöhungsfaktor 2).

vermutlich durch die tendenzielle Abnahme des spezifischen elektrischen Widerstandes angedeutet wird, verläuft die Unterkante der grobklastischen Ablagerungen bis zu einer Tiefe, wo wieder niedrigere ohmige Bereiche beginnen. Dementsprechend kann der ganze Bereich unterhalb aller Grenzflächen als Flysch interpretiert werden. Der topografisch höhere Bereich der grobklastischen Eisrandterrassen weist, wie in Abbildung 10 leicht zu erkennen, höhere Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes auf.

In einem letzten Schritt wurden die Aero-EM Ergebnisse (Abb. 6) als visuelle Hilfestellung in die 3D-Modellierungssoftware importiert und mit den geologisch interpretierten geoelektrischen Profilen verglichen. Ein großer Teil des Untersuchungsgebietes lässt sich einem Bereich zuordnen, wo eine mittel- bis hochohmige Schicht an der Oberfläche zu sehen ist und eine sehr niederohmige Schicht in mittlerer Tiefe. Vergleichen wir diese Werte mit der geologischen Modellvorstellung sowie den Geoelektrik-Profilen, dann lassen sich die Bereiche als Eisseesedimente bewerten. Außerdem kann ein höherohmiger Bereich ab einer Tiefe von etwa 55 m unter Geländeoberkante (GOK) den Grobklastischen Ablagerungen zugeordnet werden, was auch grob mit den Widerstandswerten der Geoelektrik-Profile übereinstimmt. Die topografisch höheren Bereiche weisen deutlich höhere Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes auf und können grob den restlichen Einheiten (Grobklastische Eisrandterrassen, Schwemmfächer und Flysch) zugeordnet werden. Auch diese Widerstandswerte korrelieren ungefähr mit denen der geoelektrischen Messprofile. Somit wurden auf Basis der Aero-EM Ergebnisse und aller zur Verfügung stehenden Eingangsdaten keine weiteren Änderungen der Einheiten im 3D-Modell vorgenommen.

In Abbildung 12 ist eine Reihe von Profilschnitten vom finalen 3D-Untergrundmodell sowie deren Lage im Untersuchungsgebiet dargestellt.

## 4 Klimatische Bedingungen und Klimaszenarien

(J. HIEBL & A. HÖFLER)

Um die klimatischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet zu beschreiben, kommen für Klimavariablen maßgeschneiderte geostatistische Interpolationsmethoden auf dem aktuellen Stand der Forschung zum Einsatz. Diese übertragen im Wesentlichen die punktbezogenen Stationsmessungen auf ein regelmäßiges flächiges Gitterfeld. Während die Untergrenze der nominellen Auflösung der so gewonnenen Gitterfelder typischerweise mit 1 × 1 km erreicht ist, ist die Skala der tatsächlich aufgelösten Klimamuster etwa um eine Größenordnung gröber anzusetzen. Aufgrund der Kleinheit des Einzugsgebietes (etwa 4,6 km<sup>2</sup>) und der Feinheit des zu betreibenden hydrogeologischen Modells werden hingegen im konkreten Anwendungsfall wesentlich engmaschigere Gitterfelder von 50 × 50 m erzeugt. Es sei vorausgeschickt, dass die in den Feldern enthaltenen räumlichen Muster weitaus nicht in dieser ho-



Abb. 12. Eine Reihe von Profilschnitten vom 3D-Modell (unten) und deren Lage im Untersuchungsgebiet (oben).

hen, rein technisch benötigten Genauigkeit aufgelöst sind (mehr zu Unsicherheiten und Interpretierbarkeit ist am Ende dieses Abschnitts zu lesen). Dies hängt unter anderem mit der räumlichen Dichte des Klimabeobachtungsnetzes zusammen.

So liegt keine der österreichweit derzeit über 250 Klimastationen der GeoSphere Austria (ehemals: Zentralanstalt fur Meteorologie und Geodynamik – ZAMG) direkt im Untersuchungsgebiet. Der etwa 7 km entfernte Beobachtungsstandort in Hittisau wurde 2008 eingestellt. Im 13 km südlich gelegenen Schoppernau (839 m) begannen 1947, im 14 km westlich gelegenen Alberschwende (715 m) 1995 Klimaaufzeichnungen. Hinzu kommen Messungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) im etwa 18 km östlich gelegenen Oberstdorf (806 m). In nördlicher Richtung ist die nächste Station, nicht mehr repräsentativ für die inneralpine Situation, erst in etwa 40 km Entfernung anzutreffen. Aufgrund der Datenlage musste daher ein Untersuchungszeitraum von 1995 bis 2020 festgelegt werden. Dies liegt etwas unter dem in der Klimatologie verbreiteten Standard von mindestens 30 Jahren, der als Untergrenze die nötige Robustheit statistischer Auswertungen garantieren soll. Die betrachtete zeitliche Auflösung beträgt einen Tag.

## 4.1 Lufttemperatur

## 4.1.1 Methodik

Zunächst wurden Gitterfelder der Lufttemperatur erstellt, die in weiterer Folge für die Modellierung der Evapotranspiration und des Schneewasseräquivalentes benötigt wurden. Die betrachteten Klimavariablen sind das tägliche Minimum und Maximum der Lufttemperatur. Um die regionalen Bedingungen in den Tallagen abzubilden, wurde neben den Messstandorten in Schoppernau. Alberschwende und Oberstdorf noch Dornbirn berücksichtigt. Um die Temperaturverläufe in größeren Höhen erfassen zu können, wurde der räumliche Fokus deutlich erweitert und vier Gipfelstationen aus Österreich. Deutschland und der Schweiz hinzugenommen (Abb. 13a). Zur Interpolation wurde eine speziell für die Interpolation von Lufttemperatur in stark gegliedertem Gelände entworfene Methode verwendet, die von FREI (2014) für die Schweiz entwickelt und von HIEBL & FREI (2016) für Österreich adaptiert wurde. Demnach wird das tägliche vertikale Temperaturprofil aus den eingehenden Stationsmessungen mittels nicht-linearer Regression geschätzt. Dies geschieht in drei Schichten, wie hier vereinfacht wiedergegeben wird (Abb. 13b): In der obersten Schicht (oberhalb von  $h_1$ ) wird aus den Messungen der Gipfelstationen ein linearer Temperaturgradient y abgeleitet. Dieser kommt auch in der untersten Schicht (oberhalb von h<sub>0</sub>) zur Anwendung, wobei ein Versatz um einen Temperaturbetrag a, der die Stärke einer möglichen Inversion wiedergibt, vorgesehen ist. In der dazwischenliegenden Schicht gewährleistet eine Kosinusfunktion einen glatten Übergang. Durch die flexible Anpassung an Inversionsstärke, Höhe und Dicke der Inversionsschicht wird die Modellierung typischer vertikaler Temperaturverläufe ermöglicht, die unterschiedliche Inversionstypen, multilineare Abschnitte und quasi-lineare Profile einschließt (FREI, 2014). Die Methode wurde gegenüber der originalen Fassung in einigen Punkten abgewandelt, die alle durch die Kleinheit des Untersuchungsgebietes motiviert sind. Von Profilanpassungen in mehreren Subregionen wurde abgesehen. Auch die zweite Hauptkomponente der Methode, die Aufprägung von Residualfeldern aus nicht-euklidischen Distanzen, ergibt aufgrund der wenigen Stationen und dem kleinen Gebiet keinen Sinn. Um die räumliche Repräsentativität der Stationsmessungen für das Untersuchungsgebiet einfließen zu lassen, wurden diese hingegen in der Profilanpassung entsprechend der nicht-euklidischen Distanz zum Gebietsmittelpunkt gewichtet.

## 4.1.2 Ergebnisse und Interpretation

Abbildung 14 zeigt drei unterschiedlich gelagerte Ergebnisbeispiele der Lufttemperatur, jeweils eines täglichen Tiefstwerts. Im ersten Beispiel vom 16. Jänner 2017 (links) lässt ein quasilinearer Temperaturgradient auf eine gut durchmischte untere Atmosphäre schließen. Die resultierende räumliche Analyse zeigt eine starke Bindung an die Seehöhe. Im zweiten Beispiel vom 23. Jänner 2017 (Mitte) lässt die vertikale Temperaturverteilung eine starke Inversion vermuten. Das völlige Fehlen von Stationen im Seehöhenbereich zwischen 1.000 und 2.000 m zeigt die Wichtigkeit der Hinzunahme der hochalpinen, wenn auch entfernten Stationen. Die Anpassungskurve orientiert sich in tiefen Lagen stärker an den nahe gelegenen Stationen Alberschwende und Schoppernau, als am wärmeren Dornbirn und kälteren Oberstdorf. Im Ergebnisfeld zeichnet sich die Temperaturzunahme mit der Seehöhe deutlich ab. Schließlich ist im dritten Beispielfall vom 2. Jänner 2017 (rechts) von einer schwachen Inversion auszugehen, die sich im Seehöhenbereich des Untersuchungsgebietes in einer stagnierenden Temperaturabnahme ausdrückt. Demnach zeigen sich im Ergebnisfeld weitgehend einheitliche Temperaturverhältnisse ohne erkennbare Seehöhenabhängigkeit. Die Beispiele verdeutlichen die Flexibilität der Profilanpassungsmethode und deren plausible Ergebnisse selbst bei dünner Datenlage. Gleichzeitig führt das Fehlen von Messdaten in mittlerer Seehöhe um 1.500 m zu großer Unsicherheit.

## 4.2 Niederschlag

## 4.2.1 Methodik

Zur räumlichen Analyse der täglichen Niederschlagssumme kam ein Zwei-Schritt-Verfahren zum Einsatz, wie es im Wesentlichen von MASSON & FREI (2014) für die Schweiz und von HIEBL & FREI (2018) für Österreich auf nationaler Ebene getestet und angewandt wurde. Im ersten Schritt werden zwölf Hintergrundfelder des mittleren monatlichen Niederschlags über den 30-jährigen Referenzzeitraum 1991–2020 erstellt. Die Interpolation geschah anhand von Kriging mit einem Set aus topografischen Prädiktoren als externer Drift (SCHABENBERGER & GOTWAY, 2005; DIGGLE & RIBEIRO, 2007). Um die regionalen topografischen Abhängigkeiten erfassen zu können, wurde dieser Schritt in einem weiter gefassten Gebiet von 50 × 50 km umgesetzt, aus welchen die Daten von 45 Niederschlagsstationen von GeoSphere Austria, des Hydrographischen Landesdiens-





#### Abb. 14.

(a) Anpassung des Vertikalprofils (rote Linie) des Minimums der Lufttemperatur aus Stationsmessungen (rote Punkte, Intensität nach Distanzgewicht) am 16.01.2017 (links), 23.01.2017 (Mitte) und 02.01.2017 (rechts). Der Seehöhenbereich des Untersuchungsgebietes ist grau hinterlegt. (b) Die daraus abgeleiteten räumlichen Analysen.

tes Vorarlberg sowie des Deutschen Wetterdienstes gesammelt werden konnten (Abb. 15a). Mit der Station Sibratsgfäll ist das Untersuchungsgebiet punktuell beprobt. Experimente mit verschiedenen topografischen Prädiktoren in unterschiedlichen räumlichen Skalen mündeten in der Verwendung von Seehöhe sowie geografischer Länge und Breite in der originalen Auflösung von 50 m. Die sonst oft verwendeten Prädiktoren Nord-Süd-Gradient und West-Ost-Gradient wurden aufgrund der Lage der Klimabeobachtungsstationen in Tälern oder auf Bergrücken in dem kleinen Gebiet nicht aufgelöst und konnten daher die räumlichen Muster nicht plausibler erklären. Die Verwendung von geografischer Länge und Breite stellt eine gute Alternative dar. Im zweiten Schritt wurden die täglichen relativen Niederschlagsanomalien zu den entsprechenden mittleren Monatssummen interpoliert (Abb. 15b). Dazu wurden die täglichen Messwerte der acht nächstgelegenen Stationen im Umkreis von bis zu 12 km verwendet. Wieder konnte die hydrologische Station Sibratsgfäll verwendet werden. Während sich die umliegenden Stationen westlich des Untersuchungsgebietes konzentrieren, ist der Osten schlecht abgedeckt, weshalb die Berücksichtigung solcher Richtungscluster in der räumlichen Analyse ausschlaggebend ist. Demgemäß interpretiert der Interpolationsalgorithmus SYMAP die Gitterpunktwerte als Summe von distanz- und richtungsgewichteten Messwerten (SHEPARD, 1984; FREI & SCHÄR, 1998). Die täglichen absoluten Niederschlagsfelder entstehen schließlich aus der Multiplikation der täglichen Anomaliefelder mit dem dazugehörigen monatlichen Hintergrundfeld.



Abb. 15. (a) Räumliche Verteilung der zur Erstellung der Niederschlag-Hintergrundfelder (rote und blaue Punkte) und zur Erstellung der Niederschlag-Anomaliefelder (blaue Punkte) verwendeten Beobachtungsstandorte. Angegeben ist die Seehöhe [m]. (b) Mittlere monatliche Niederschlagssumme im Februar 1991-2020 [mm]. Das Untersuchungsgebiet ist jeweils rot umrandet.



Abb. 16.

Räumliche Analyse der täglichen Niederschlagssumme am 07.05.1996 (links), 18.09.1996 (Mitte) und 12.05.1996 (rechts) zusammen mit den eingehenden umliegenden Stationsbeobachtungen [mm].

## 4.2.2 Ergebnisse

In Abbildung 16 sind drei Beispiele von Gitterfeldern der täglichen Niederschlagssumme dargestellt. Am 7. Mai 1996 (links) registrierte die Station Balderschwang etwa 6 km nordöstlich des Untersuchungsgebietes isoliert einen hohen Tagesniederschlag, während an allen anderen Stationen (fast) kein Niederschlag auftrat. Obwohl es auch an der im Gebiet liegenden Station Sibratsgfäll trocken blieb, reicht der Einfluss von Balderschwang aus, im Niederschlagsfeld einen leichten, horizontal graduellen Anstieg nach Nordosten hin bis etwa 3 mm zu modellieren. Am 18. September 1996 (Mitte) verzeichnete Sibratsgfäll ebenfalls keinen Niederschlag, während alle umliegenden Stationen niedrige Tagessummen aufwiesen. Deren Einfluss ist zu schwach, weshalb für das ganze Untersuchungsgebiet trockene Bedingungen angenommen werden. Schließlich traten am 12. Mai 1996 (rechts) an allen Stationen ungefähr mäßige Niederschläge in ähnlicher Höhe auf. Dies führt dazu, dass in der räumlichen Analyse im Untersuchungsgebiet topografische Effekte hervortreten.

## 4.3 Referenz Evapotranspiration

## 4.3.1 Methodik

Die Gitterfelder der Evapotranspiration wurden mangels direkter Beobachtungen dieser Klimavariable nicht direkt interpoliert, sondern aus den zuvor erstellten Feldern der täglichen Extrema der Lufttemperatur modelliert. Dazu diente der Ansatz nach Hargreaves (HARGREAVES & SAMANI, 1985), wie er von HASLINGER & BARTSCH (2016) für die klimatischen Bedingungen in Österreich adaptiert wurde. Darin gehen neben dem Mittelwert und der Spannweite der täglichen Lufttemperatur die genäherte extraterrestrische Strahlung (berechnet aus der geografischen Breite und der jahreszeitlichen Tageslänge) sowie eine Kalibrierungskonstante ein. Letztere wurde von HASLINGER & BARTSCH (2016) monats- und stationsweise dem Penman-Monteith-Ansatz entsprechend rekalibriert und anschließend interpoliert, da dieser üblicherweise mit geringerem Fehler einhergeht. Die Details sind HASLINGER & BARTSCH (2016) zu entnehmen. Anhand dieser Daten wurde rund um das hier betrachtete Untersuchungsgebiet eine polynomiale Abhängigkeit zwischen Seehöhe und Kalibrierungsfaktor abgeleitet und auf die Topografie angewandt. Die daraus resultierenden Gitterfelder der angepassten Kalibrierungskonstante gehen

dann gemeinsam mit den Feldern der Minimum- und Maximum-Temperatur in die adaptierte Hargreaves-Formel ein und als Ergebnisgröße geht die Referenzevapotranspiration (ETo) einer standardisierten Oberfläche bei ausreichendem Wasserdargebot hervor.

## 4.3.2 Ergebnisse

Zwei Gitterfelder der Evapotranspiration sind in Abbildung 17 herausgegriffen. Im Fall des 23. Jänner 2017 (links), einem kalten, trockenen und sonnigen Wintertag, wird eine niedrige tägliche Verdunstung angenommen, die aufgrund einer beständigen leichten Inversion zu höheren Lagen hin leicht zunimmt. Im Fall des 25. Juni 2017, einem warmen, regnerischen und trüben Sommertag, wird von einer sichtlich intensiveren Verdunstung mit den höheren Werten im Tal ausgegangen.

## 4.4 Schneewasseräquivalent

## 4.4.1 Methodik

Auch die Erstellung der Gitterfelder des Schneewasseräquivalents (SWE) basiert auf einem Modellansatz ohne direkte Verwendung von Beobachtungsdaten. Stattdessen gehen die Felder der Temperaturextrema, der Niederschlagssumme und der Evapotranspiration in die Klimaversion (CL) des Schneedeckenmodells SNOWGRID ein (OLEFS et al., 2013, 2020). Zur Gewährleistung der Konsistenz mit den meteorologischen Antriebsdaten wurden sämtliche topografischen Parameter neu aus dem 50 × 50 m-Höhenmodell für das Untersuchungsgebiet abgeleitet und das Modell technisch an das Untersuchungsgebiet angepasst.



Abb. 17.

Räumliche Analyse der täglichen Evapotranspiration [mm] am 23.01.2017 (links) und 25.06.2017 (rechts).

Die Methodik von SNOWGRID-CL berücksichtigt, dass der Schneedeckenabbau neben der Lufttemperatur auch über die kurzwellige Strahlungsbilanz (Enhanced temperature index model; PELLICCIOTTI et al., 2005) gesteuert wird. Das erforderte die Berechnung der täglichen mittleren Bewölkung über den Umweg der Parametrisierung aus dem Tagesgang der Lufttemperatur kalibriert mit Globalstrahlungsmessdaten, der Globalstrahlungswerte auf die reale Fläche für Clear-Sky-Bedingungen mithilfe des Strahlungsmodelles STRAHLGRID (OLEFS & KOCH, 2013) für ein Referenzjahr und der Boden- bzw. Schneealbedo unter Berücksichtigung der Schneealterung (BROCK et al., 2000). Diese erweiterte Methodik trägt den Schmelzvorgängen im komplexen Gelände Rechnung. Da keine historische räumliche Feuchteinformation für die Berechnung der Schneefallgrenze vorhanden ist, erfolgt die Berechnung des Festanteils des Niederschlags durch einen einfachen tanh-Ansatz über die Lufttemperatur anstatt über die Feuchttemperatur. Ansonsten beinhaltet SNOWGRID-CL Prozesse wie Wärmeinhalt und Setzung der Schneedecke, aktuelle Schneesublimation als Funktion der Evapotranspiration und der Niederschlagsmenge, laterale Umverteilung der Schneedecke, Energie durch flüssigen Niederschlag und Schmelzen bzw. Wiedergefrieren. SNOWGRID-CL erzeugt tägliche Felder der Gesamtschneehöhe und des Gesamt-SWE. Details sind in OLEFS et al. (2020) zu finden.

Da direkt aus dem Untersuchungsgebiet an der Station Sibratsgfäll eine unabhängige Schneemessreihe vorliegt, die nicht in die Schneedeckenmodellierung einfließt, wurden diese Daten verwendet, um einige für Gesamtösterreich optimierte Einstellungen in der Modellkonfiguration von SNOWGRID-CL zu verfeinern. Die im erweiterten Gradtagsmodell für die Schneeschmelze wesentlichen Parameter "temperature factor" und "shortwave radiation factor" (Abschmelzrate pro °C bzw. pro W/m²) wurden auf diese Weise für die lokalen Gegebenheiten kalibriert. Außerdem konnte der modellierte Schneedeckenaufbau verbessert werden, indem der Temperaturbereich für den Übergang zwischen festem und flüssigem Niederschlag angepasst wurde und auch Änderungen im jahreszeitlichen Verlauf berücksichtigt wurden. Ausgehend von einer massiven Überschätzung der Schneehöhe von mehr als 60 % in der ursprünglichen Konfiguration konnte erreicht werden, dass über das Winterhalbjahr hinweg kein systematischer Fehler mehr vorliegt. Auch der mittlere RMSF-Fehler (Root Mean Square Fraction) im Winterhalbjahr konnte von 2,19 deutlich reduziert werden, bleibt mit einem Wert von 1,64 aber auf hohem Niveau. Dies liegt unter anderem an der groben zeitlichen Auflösung der eingehenden Temperaturdaten auf Tagesbasis, da der Tagesmittelwert der Lufttemperatur im Allgemeinen nicht der Lufttemperatur zum Zeitpunkt des Niederschlags entspricht und daher bei Temperaturen um 0 °C die Unterscheidung zwischen festem und flüssigem Niederschlag verfälscht sein kann.

#### 4.4.2 Ergebnisse

Grundsätzlich wird die Schneedecke in SNOWGRID-CL unabhängig von Schneehöhenmessungen modelliert. Aufgrund der Unsicherheiten in den Eingangsdaten, besonders des systematisch unterschätzenden Messfehlers bei festem Niederschlag, und unzureichend berücksichtigter Prozesse im Modell weicht der simulierte Auf- und Abbau der Schneedecke in bestimmten Gebieten und Wintersaisonen vom tatsächlichen Schneedeckenauf- und -abbau, wie er durch Schneehöhenmessungen abgebildet ist, in nicht vernachlässigbarem Ausmaß ab (Abb. 18a). Da direkt aus dem Untersuchungsgebiet eine Messreihe und im Umkreis von 15 km 13 weitere Messreihen der täglichen Schneehöhe vorliegen, konnten diese zur Nachbearbeitung der Modellergebnisse auf Tagesbasis herangezogen werden. Aus ihnen wurden mithilfe einer linearen, distanzgewichteten Regression die Schneehöhen am unteren und oberen vertikalen Gebietsrand abgeleitet. Die Abweichungen zwischen diesen beiden Pseudo-Messungen und den lokal modellierten Schneehöhen wurden in Abhängigkeit von der Seehöhe in ein Anpassungsfeld überführt, das in weiterer Folge auf das modellierte Feld des SWE angewendet wurde. Somit wird die Diskrepanz zwischen modellierter und beobachteter Schneehöhe proportional auf das modellierte SWE übertragen (Abb. 18b).

Als Übergang zur klimatologischen Auswertung soll der quantitative Einfluss der Schneedecke auf das verfügbare Wasser betrachtet werden. Dazu wird das insgesamt verfügbare Wasser aus Niederschlag in das direkt dem Boden zur Verfügung stehende und das zwischenzeitlich in der Schneedecke gespeicherte Wasser aufgeteilt. Abbildung 19 zeigt den zeitlichen Verlauf der jahreswei-



Abb. 18.

(a) Vergleich von SWE (rot) und Schneehöhe (blau) in der Wintersaison 1996/1997 vor (durchgezogen) und nach der Nachbearbeitung (gestrichelt). Die beobachtete Schneehöhe ist als hellblaue Fläche dargestellt. (b) Gitterfelder des Untersuchungsgebietes (3 × 3 km) von SWE (oben) und Schneehöhe (unten) am 01.01.1997 vor (links) und nach (rechts) der Nachbearbeitung.



Abb. 19. Anteile von direkt für den Boden verfügbarem und zwischenzeitlich in der Schneedecke gespeichertem Niederschlagswasser in den Jahren 1995/1996 bis 2019/2020.

sen Komponenten von 1995/1996 bis 2019/2020, wobei der Monatswechsel von August auf September zur Abgrenzung der Jahre verwendet wurde, um die natürliche Wintersaison nicht zu teilen. Typisch ist die hohe Variabilität von Jahr zu Jahr. Am höchsten war der Anteil des vorübergehend gebundenen Wassers mit 49 % im Jahr 2003/2004, am niedrigsten mit 15 % im Jahr 2019/2020. Während die Niederschlagssumme im Beobachtungszeitraum stabil blieb, zeigt das in der Schneedecke gebundene Wasser einen zwar nicht statistisch signifikanten, aber deutlich abnehmenden Trend von 27 %. Entsprechend nahm die Höhe des unmittelbar verfügbaren Wassers um etwa 18 % zu. Absolut gesehen wurden zu Beginn des Beobachtungszeitraumes etwa 225 mm pro Jahr mehr in der Schneedecke zwischengespeichert als zu dessen Ende.

## 4.5 Klimatologische Auswertung und Klimaindizes

Auf Basis der räumlichen Analysen lassen sich die klimatischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet skizzieren (Abb. 20). Obwohl 26 Jahre zu wenig für eine robuste zeitliche klimatologische Auswertung sind, da Trends über kurze Zeiträume typischerweise von zufälligen Ausreißern beherrscht sein können, wurde versucht, Klimaänderungen der jüngsten Vergangenheit grob abzuschätzen. Die mittlere Lufttemperatur lag im 26-jährigen Zeitraum 1995-2020 bei 6,9 °C und schwankte zwischen 5,5 °C im Jahr 1996 und 8,1 °C im Jahr 2018. Die mittlere Jahressumme des gemessenen Niederschlags betrug etwa 2.180 mm, wobei bei starken Jahr-zu-Jahr-Schwankungen 2003 am niederschlagsärmsten (1.540 mm) und 1999 (2.710 mm) am niederschlagsreichsten verlief. Die durchschnittliche Jahressumme der Evapotranspiration wird mit 770 mm angenommen, am schwächsten war die Verdunstung 1996 (700 mm), am intensivsten 2003 (840 mm) ausgeprägt. Schließlich lag das Jahresmittel des SWE als kombiniertes Maß für Mächtigkeit und Andauer der Schneedecke (im Zeitraum 1996-2020) bei 31 mm und variierte stark zwischen nur 8 mm im Jahr 2002 und 66 mm im Jahr 2012. Während dieses klimatologisch kurzen Zeitraumes stieg die Lufttemperatur massiv und statistisch signifikant um

#### Abb. 20.

Zeitliche Entwicklung (a) des jährlichen Mittelwertes der Lufttemperatur, (b) der jährlichen Summe des Niederschlages und (c) der jährlichen Summe der Evapotranspiration, jeweils im Zeitraum 1995–2020 sowie (d) des jährlichen Mittelwertes des SWE im Zeitraum 1996–2020.





Abhandlungen der GeoSphere Austria, Band 77

1,5 °C an. Damit einhergehend erhöhte sich die modellierte Jahressumme der Evapotranspiration ebenfalls signifikant um 11 %, während das mittlere SWE aufgrund der ausgeprägten zwischenjährlichen Variabilität nicht signifikant, aber dennoch deutlich um 36 % abnahm. Die Jahressumme des Niederschlags blieb hingegen weitgehend stabil (-4 %).

Zusätzlich zu den Klimagrößen Lufttemperatur, Niederschlag, Verdunstung und Schneedecke wurden Klimaindizes auf Tages- und Mehrtagesbasis herangezogen, die hydrologisch relevante Extremereignisse (Trockenheit, Starkniederschlag und starke Schneeschmelze) beschreiben sollen. Sie sind in Tabelle 1 definiert. Sie kommen neben der Besprechung der klimatischen Bedingungen im Beobachtungszeitraum auch bei der Auswertung möglicher zukünftiger Entwicklungen anhand von Klimaszenarien zum Einsatz (Kapitel 4.6). Bei den Indizes, die binominale Zählvariablen enthalten (rr0 und aw30), wurde die Odds ratio des Trends anhand von logistischer Regression berechnet (z.B. FREI & SCHÄR, 2001), während die Trends aller anderen Klimavariablen und Indizes als Theil-Sen-Schätzer berechnet und mit dem nicht-parametrischen Mann-Kendall-Test getestet sind (z.B. YUE et al., 2002).

Um Trockenheit anhand von Indizes zu erfassen, wurden die jährliche Anzahl der niederschlagsfreien Tage und die jährliche Dauer der längsten Trockenperiode gewählt. Komplexer und hydrologisch aussagekräftiger ist der standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), ein etablierter Indikator für den Bodenwasserhaushalt, der die klimatische Wasserbilanz wiedergibt (VINCENTE-SERRANO et al., 2010). Dieser transformiert die Wasserbilanz als Differenz aus Niederschlag und potentieller Evapotranspiration in eine Standardnormalverteilung und ist in Bezug auf den Klimazustand im Zeitraum 1961–1990 geeicht. Somit drückt ein SPEI-Wert von 0 eine ausgeglichene Wasserbilanz aus. Unter- bzw. oberhalb von  $\pm 1$  spricht man von zu trockenen bzw. feuchten Bedingungen. Hier wurden sowohl ein über 365 Tage als auch ein über 90 Tage aggregierter SPEI berechnet, um die Entwicklung in der Jahresbilanz sowie in den einzelnen klimatologischen Jahreszeiten verfolgen zu können.

Die Extremereignisse starker Niederschlag und starke Schneeschmelze (Ablation) sind kombiniert zu verstehen. Aus hydrogeologischer Sicht ist nämlich das dem Boden insgesamt zu einem Zeitpunkt zur Verfügung stehende Wasser relevant. Deshalb wurde die Summe aus täglichem Niederschlag und Schneedeckenabbau (positive Differenz der Schneewasseräquivalente des Vortages und des betrachteten Tages, die Sublimation der Schneedecke wird dabei vernachlässigt) gebildet. Mithilfe dieser Größe wurden Extremwertindizes berechnet: Die jährliche Anzahl der Tage mit starkem Niederschlag bzw. Schneeschmelze, die mittlere Niederschlags- bzw. Schmelzintensität und die jährlichen Maxima der Tagessumme sowie der 30-Tagessumme an Niederschlags- und Schmelzwasser.

Um einen genaueren Blick auf hydrogeologisch relevante Klimaphänomene zu werfen, werden die in Tabelle 1 vorgestellten Klimaindizes betrachtet. Was Trockenheit betrifft, sind im Durchschnitt der Jahre 1995 bis 2020 im Einzugsgebiet 201 niederschlagsfreie Tage zu erwarten. Die längste durchgehende niederschlagsfreie Periode eines Jahres umspannt üblicherweise 17 Tage. Die mittleren SPEI-Werte liegen in der Jahresbilanz und den Jahreszeitenbilanzen erwartungsgemäß nahe null. Hinsichtlich des

Klimaindex	Abkürzung	Einheit	Definition
niederschlagsfreie Tage	rr0	d	Jährliche Anzahl an Tagen mit einer Niederschlagssumme von weniger als 1 mm.
längste Trockenperiode	cdd	d	Dauer der längsten ununterbrochenen jährlichen Folge an Tagen, an denen die Niederschlagssumme jeweils weniger als 1 mm beträgt.
jährliche Wasserbilanz	spei	-	SPEI der über 365 Tage aggregierten klimatischen Wasser- bilanz am 31.12.
jahreszeitliche Wasserbilanz im Winter	spei.djf	-	SPEI der über 90 Tage aggregierten klimatischen Wasserbi- lanz am 28.02.
jahreszeitliche Wasserbilanz im Frühling	spei.mam	-	SPEI der über 90 Tage aggregierten klimatischen Wasserbi- lanz am 31.05.
jahreszeitliche Wasserbilanz im Sommer	spei.jja	-	SPEI der über 90 Tage aggregierten klimatischen Wasserbi- lanz am 31.08.
jahreszeitliche Wasserbilanz im Herbst	spei.son	-	SPEI der über 90 Tage aggregierten klimatischen Wasserbi- lanz am 30.11.
starke Niederschlags- und Schmelztage	aw30	d	Jährliche Anzahl an Tagen mit einer Summe aus Nieder- schlag und Schneeschmelze von größer oder gleich 30 mm.
Niederschlags- und Schmelzintensität	awi	mm d <sup>-1</sup>	Mittlere jährliche Tagessumme aus Niederschlag und Schneeschmelze an Tagen mit einer Summe aus Nieder- schlag und Schneeschmelze von größer oder gleich 1 mm.
maximale Tagessumme von Niederschlags- und Schmelzwasser	awx	mm	Maximale jährliche Tagessumme aus Niederschlag und Schneeschmelze.
maximale 30-Tagessumme von Niederschlags- und Schmelzwasser	awx30	mm	Maximale jährliche 30-Tagessumme aus Niederschlag und Schneeschmelze.

Tab. 1

Definition der verwendeten Indizes, die extreme Trockenheit und starken Niederschlag bzw. Schneeschmelze ausdrücken.

für den Boden verfügbaren Wassers treten pro Jahr üblicherweise 16 Tage mit starkem Niederschlag bzw. starker Schneeschmelze auf. Die mittlere kombinierte Niederschlag-Schmelz-Intensität beträgt 12,0 mm. 80 mm kommen typischerweise am Tag mit dem intensivsten Niederschlag bzw. Schneeschmelze des Jahres zusammen, in einem zusammenhängenden 30-tägigen Zeitraum sind es 409 mm.

Unter den "trockenen" Indizes wurde den räumlichen Beobachtungsdaten zufolge das Eintreten eines niederschlagsfreien Tages von 1995 bis 2020 um 13 % wahrscheinlicher (Tab. 6). Mit Ausnahme des Winters (+1,2) tendieren die SPEI-Werte zu trockeneren Bedingungen (-0,6 bis -1,3). Hingegen nahm die Dauer der längsten Trockenperiode um neun Tage ab, was den einzig statistisch signifikanten Trend aller Indizes im kurzen Beobachtungszeitraum darstellt. Unter den "feuchten" Indizes wurde das Eintreten eines Tages mit starkem Niederschlag bzw. starker Schneeschmelze um 12 % wahrscheinlicher. Die beobachteten Änderungen der restlichen Niederschlag-Schneeschmelze-Indizes waren hingegen negativ. Die maximale 30-Tagessumme des Niederschlags- und Schmelzwassers nahm nach einem außergewöhnlichen Höchststand im Jahr 1999 um 43 mm ab. Zwischen den Jahreszeiten gibt es allerdings markante Unterschiede: Während die Niederschlag-Schneeschmelze-Indizes in den Übergangsjahreszeiten leicht rückläufig waren und im Sommer wenig Änderung zeigten, waren im Winter deutliche Zunahmen zu verzeichnen. Selbst diese verblieben aber statistisch insignifikant.

Die zeitliche Entwicklung zweier Indizes ist in Abbildung 21 herausgegriffen. Der schwach und statistisch insignifikant abnehmende Trend des sommerlichen Wasserbilanzindex (–0,8) ist aufgrund der hohen Variabilität von Jahr zu Jahr schwer erkennbar (Abb. 21a). Der von lang andauernder Wärme und Trockenheit geprägte Sommer 2003 (–2,8) war jener mit der negativsten Wasserbilanz des kurzen Beobachtungszeitraumes. Von 2011 bis 2020 herrschten mit Ausnahme des Sommers 2014 zu trockene bis normale sommerliche Wasserbilanzen vor. Die maximale jährliche 30-Tages-Summe des gesamt verfügbaren Wassers aus Niederschlag und Schneeschmelze lässt ebenfalls einen insignifikant abnehmenden Trend (–43 mm) erkennen (Abb. 21b). Diese Abnahme ist neben dem sich verringernden Beitrag der Schneeschmelze (Abb. 19) einem extremen Ausreißer zu Beginn des betrachteten Zeitraumes, nämlich 1999, geschuldet. Von Ende April bis Ende Mai dieses Jahres standen im Mittel über das Untersuchungsgebiet jedem Quadratmeter Boden 629 mm zur Verfügung, 460 mm davon innerhalb von zwölf Tagen Mitte Mai.

## 4.6 Quantitative Beurteilung der Güte der erstellten Daten

Die quantitative Beurteilung der Güte der erstellten Gitterfelder ist nur sehr eingeschränkt möglich. Der Hauptgrund dafür ist die dünne Beobachtungsdatenlage im Verhältnis zur Kleinskaligkeit des betrachteten Untersuchungsgebietes. Eine Überprüfung der Interpolationsmethoden von Lufttemperatur und Niederschlag sowie der aufbauenden Modelle von Evapotranspiration und SWE durch eine svstematische Leave-one-out-Kreuzvalidierung anhand der wenigen eingehenden Stationsstandorte in der Umgebung bzw. innerhalb des Untersuchungsgebiets (8 bzw. 0 bei Lufttemperatur, 8 bzw. 1 bei Niederschlag) würde keine für das Einzugsgebiet repräsentativen Fehlermaße und deren sinnvolle Interpretation zulassen. Somit ist die Beurteilung der Güte und Interpretierbarkeit der Ergebnisse auf spärliche unabhängige Beobachtungsdaten sowie qualitative Einschätzungen und allgemeingültige Erkenntnisse angewiesen.

Unabhängige Beobachtungsdaten von Temperatur und Niederschlag über mehrere Jahre in unmittelbarer Nähe zum Untersuchungsgebiet bietet nur die Station Rindberg (1.028 m) der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV). Sie wurde nicht für die Erstellung der Gitterfelder verwendet, da einerseits ihre Messungen weniger als 40 % des Untersuchungszeitraumes abdecken und es sich andererseits



Abb. 21. Zeitliche Entwicklung (a) des Index der Wasserbilanz im Sommer im Zeitraum 1995–2020 und (b) des jährlichen Maximums der 30-Tages-Summe von Niederschlags- und Schmelzwasser im Zeitraum 1996–2020. nicht um eine klassische Klimastation, deren Datengualität üblicherweise durch normierte Messbedingungen, regelmäßige Wartung und Datenprüfung sichergestellt werden sollte, handelt. Tatsächlich weisen die Zeitreihen neben unrealistischen Verläufen (z.B. bei offenbar eingeschneitem Temperatursensor) nicht-plausible Ausreißer auf, was die Existenz von systematischen und zufälligen Messfehlern vermuten lässt. Aus Mangel an Alternativen der guantitativen Evaluierung wurde sie trotzdem zur Berechnung von Fehlermaßen gegenüber der Interpolationsmethode verwendet. Genauer gesagt wurden mittels der beschriebenen Interpolationsmethoden für Temperatur und Niederschlag (Kapitel 4.1 und 4.2) Schätzwerte für den Stationsstandort Rindberg berechnet und mit den dortigen Messungen verglichen. Für das tägliche Minimum der Lufttemperatur ergibt sich ein Bias (mittlerer Fehler) von -0,8 °C (Tab. 2). Während im Sommer eine gute Übereinstimmung herrscht, liegt im Winter eine Unterschätzung vor. Das tägliche Maximum wird gegenüber den Beobachtungen von Rindberg im Mittel um +1,5 °C systematisch überschätzt. Der Bias zeigt einen klaren Jahresgang. Die Werte von mittlerem absolutem Fehler (MAE) und Root Mean Square Error (RMSE) sind allgemein hoch einzustufen, wobei das Maximum insgesamt etwas schlechter abschneidet als das Minimum.

Zur Evaluierung der täglichen Niederschlagssumme wurde zunächst untersucht, wie gut die Unterscheidung von trockenen bzw. niederschlagsarmen Tagen zu Niederschlagstagen durch die Interpolation getroffen wird. Dazu dient ein Schwellwert von 3 mm. Ein fractional Bias von über 1, im konkreten Fall 1,09, weist auf eine Überschätzung der Anzahl an Niederschlagstagen im Vergleich zur Messung in Rindberg hin (Tab. 3). Dies deutet auf die typische Eigenschaft aller Interpolationsmethoden hin, tendenziell zu glatte Muster zu produzieren. Die Hanssen-Kuipers-Maßzahl (HK) beurteilt die Eignung der Interpolationsmethode, die Überschreitung der 3 mm-Schwelle anhand der Messungen richtig vorherzusagen (0 ... keine Eignung, 1 ... perfekte Vorhersage). Dies gelingt im Herbst besser als im Frühling, über das ganze Jahr hinweg liegt der HK-Wert bei 0,87. Die beiden nächsten Fehlermaße wurden für Tage mit mehr als 3 mm Niederschlagssumme berechnet. An diesen wird die Niederschlagssumme am Standort Rindberg um 26 % beträchtlich überschätzt. Im Winter beträgt die systematische Überschätzung sogar nahe 50 %. Inwieweit das auf einen verstärkten Messfehler bei festem Niederschlag und Wind zurückzuführen ist, der auch bei den für die Interpolation verwendeten Beobachtungen grundsätzlich evident ist, muss dahingestellt bleiben. Auch die Root Mean Square Fraction (RMSF), die als durchschnittlicher multiplikativer Zufallsfehler gelesen werden kann (1 ... perfekte Vorhersage), belegt eine deutliche Dissonanz zwischen Interpolationsergebnis und unabhängiger Beobachtung mit höheren Abweichungen im Winter.

Aufgrund der Schwierigkeit der Verdunstungsmessung und des Fehlens von Beobachtungsdaten ist eine quantitative Beurteilung der Interpolationsgüte der Gitterfelder der Evapotranspiration nicht möglich. Hier konnte nur die qualitative Plausibilität einzelner Ergebnisfelder begutachtet werden. Von HOLZSCHUSTER (2022) wurden zudem weniger komplexe methodische Ansätze zur Abschätzung der Evapotranspiration berücksichtigt, die im Vergleich zu der in Kapitel 4.3 beschriebenen Methode deutlich unterschätzte Werte liefern.

Auch die generell raren Beobachtungen des SWE sind nicht für das Untersuchungsgebiet erhältlich. Als mit dem SWE korrelierendem alternativen Ergebnis des Schneedeckenmodells kann jedoch die Gesamtschneehöhe mit den unabhängigen Messungen der Station Sibratsgfäll (902 m) verglichen werden. Dies geschieht selbstverständlich für den direkten Modell-Output vor der Nachbearbeitung und spiegelt somit nicht den endgültigen Zustand der Gitterdaten wider. Über das Jahr hinweg liegt demnach kein systematischer Fehler vor (Tab. 4). Im November und April wird die Schneehöhe jedoch um 15 % bzw. 18 % unterschätzt, während sie im Jänner um 8 % überschätzt wird. Dem steht eine erhebliche zufällige Fehlerkomponente gegenüber, die sich durch einen RMSF-Wert von 1,64 ausdrückt und im Hochwinter etwas niedriger ist.

Insgesamt kann aus dem Versuch der Quantifizierung der Güte der Gitterfelder der Schluss gezogen werden, dass eine Unterscheidung, ob die Gründe für Unsicherheiten aus der Erstellung der Gitterfelder oder aus Unsicherheiten der Referenzmessungen zu finden sind, nur unzureichend möglich ist. Umso schwerer wiegen allgemeingültige Er-

			Minimum			Maximum				
	DJF	MAM	JJA	SON	Jahr	DJF	MAM	JJA	SON	Jahr
Bias	-1,3	-0,8	-0,2	-0,8	-0,8	-0,2	2	2,3	1,9	1,5
MAE	2,1	1,8	1,4	1,8	1,8	2	2,2	2,5	2,3	2,2
RMSE	2,7	2,2	1,8	2,3	2,3	2,6	2,5	2,7	2,7	2,6

Tab. 2

Fehlermaße aus dem Vergleich der Interpolationsergebnisse des täglichen Minimums und Maximums der Lufttemperatur gegen die unabhängige WLV-Station Rindberg.

		DJF	MAM	JJA	SON	Jahr
< oder ≥ 3 mm?	fractional Bias	1,15	1,11	1,06	1,07	1,09
	нк	0,86	0,83	0,88	0,9	0,87
≥ 3 mm	Bias	1,49	1,29	1,13	1,21	1,26
	RMSF	1,85	1,79	1,49	1,53	1,66

Tab. 3.

Fehlermaße aus dem Vergleich der Interpolationsergebnisse der täglichen Niederschlagssumme gegen die unabhängige WLV-Station Rindberg.

	Ν	D	J	F	М	Α	Jahr
Bias	0,85	1,03	1,08	0,98	0,96	0,82	1
RMSF	1,65	1,67	1,59	1,68	1,62	1,66	1,64

Tab. 4.

Fehlermaße aus dem Vergleich der rohen Gitterfelder der täglichen Schneehöhe gegen die unabhängige HD-Station Sibratsgfäll.

kenntnisse zur qualitativen Beurteilung klimatologischer Gitterdaten und entsprechende Empfehlungen zur Interpretation aus der Literatur. So zeigten HIEBL & FREI (2016), dass Gitterfelder der täglichen Temperatur für Österreich generell zuverlässiger für das Maximum, den Sommer und außeralpine Vorländer als für das Minimum, den Winter und inneralpine Täler sind. In Tälern ohne eingehende Messreihe, also auch im betrachteten Einzugsgebiet, muss von einer systematischen Unterschätzung talgebundener Inversionen und somit einer Überschätzung der Minimumtemperaturen ausgegangen werden. Im konkreten Anwendungsfall führt daneben das Fehlen eines Beobachtungsstandortes im oberen Seehöhenbereich des Untersuchungsgebietes zu Unsicherheiten.

Noch stärker als bei der Lufttemperatur werden aufgrund der höheren räumlich-zeitlichen Variabilität bei täglichen Niederschlagssummen Extremwerte systematisch unterschätzt. Der Grund liegt in der Eigenschaft der Interpolationsmethoden, unbekannte Werte im Raum anhand von Fehlerminimierung möglichst genau vorherzusagen. Dies führt aber im Verhältnis zur Realität zu unrealistisch glatten räumlichen Mustern. Die Folge ist ein konditionaler, also werteabhängiger Bias, der sich durch abweichende Häufigkeitsverteilungen zwischen tatsächlich gemessenen und gegitterten Niederschlagssummen ausdrückt. Dabei werden geringe Niederschlagswerte tendenziell überschätzt und hohe Niederschlagswerte tendenziell unterschätzt (ISOTTA et al., 2014; HIEBL & FREI, 2018). Das führt ferner zu Verfälschungen bei der Berechnung schwellwertbasierter Indizes. Demnach wird etwa die Anzahl an Niederschlagstagen systematisch überschätzt (umgekehrt jene der niederschlagsfreien Tage unterschätzt), während die Anzahl an Starkniederschlagstagen systematisch unterschätzt wird. Dieser Effekt ist auch bei der Interpretation der hier vorgestellten Klimaindizes zu beachten. Werden die Gitterfelder jedoch über größere räumliche und zeitliche Bereiche hinweg ausgewertet, verringern sich konditionaler Bias als auch Zufallsfehler merklich.

Generell gilt es bei Anwendung und Interpretation, streng zwischen nomineller und effektiver Auflösung zu unterscheiden. Die nominelle Auflösung von 50 × 50 m wurde bereitgestellt, um die weitere Bearbeitung im kleinen Einzugsgebiet technisch zu ermöglichen. Häufig werden räumliche Klimabeobachtungsdatensätze in 1 km-Auflösung angeboten. Bei der Interpretation auf Tagesbasis ist die Skala der tatsächlich aufgelösten räumlichen synoptischen Muster zu beachten. Diese effektive Auflösung liegt typischerweise im Bereich der mittleren Stationsdistanz, also im niedrigen zweistelligen Kilometerbereich. CHIMANI et al. (2020) quantifizieren die effektive Auflösung für tägliche Niederschlagsfelder in Österreich, basierend auf einem Ansatz von FREI & ISOTTA (2019), auf etwa 2.000 km<sup>2</sup> (etwa 45 × 45 km) und empfehlen eine Interpretation oberhalb dieser Größenordnung.

Die tatsächliche Auflösung der Gitterfelder ist von der bereitgestellten Maschenweite um einige Größenordnungen entfernt. Unsicherheiten mitteln sich nicht heraus, sondern verursachen systematische Fehler in der Verteilung, Extremen und Indizes. Die konkrete Empfehlung lautet daher, sowohl die Gitterfelder als auch darauf aufbauende Modellergebnisse konservativ auf der Skala des gesamten Einzugsgebiets zu interpretieren (FREI, 2021).

## 4.7 Klimaszenarien

### 4.7.1 Methodik

Globale Klimamodelle simulieren die komplexen dreidimensionalen Prozesse in Atmosphäre und Ozeanen und haben aufgrund des hohen Rechenaufwands eine horizontale Auflösung von wenigen hundert Kilometern (z.B. TAYLOR et al., 2012). Sie vollziehen die Klimaentwicklung der vergangenen Jahrzehnte nach und lassen sich in die Zukunft fortsetzen. Unsicherheiten im zukünftigen anthropogenen Klimaantrieb, der sich je nach Bevölkerungswachstum, Energie- und Nahrungsmittelproduktion sowie technischer Innovationen unterschiedlich entwickeln kann. werden anhand von repräsentativen Konzentrationspfaden (representative concentration pathways, RCP) behandelt (Moss et al., 2010). Diese definieren erhöhte Treibhausgaskonzentrationen, also verstärkte Strahlungsantriebe im Vergleich zum vorindustriellen Wert. Häufig verwendete Szenarien sind RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5, die hinsichtlich des Zuwachses des Strahlungsantriebs bis zum Jahr 2100 als relativ niedrig (2,6 W/m<sup>2</sup>), mäßig (4,5 W/m<sup>2</sup>) bzw. sehr hoch (8,5 W/m<sup>2</sup>) eingestuft werden. Während im RCP 8.5 das Wirtschaftswachstum wie bislang zum Großteil auf der Verbrennung fossiler Energieträger beruht, zeichnet RCP 2.6 ein optimistisches Bild mit verstärkten globalen Klimaschutzbemühungen. RCP 4.5 entspricht einem moderaten Szenario mit Anstrengungen zur Emissionsminderung, die zu einem Absinken der Emissionen unter den heutigen Wert bis in das Jahr 2070 führen.

Um Aussagen für kleinräumigere Gebiete treffen zu können, übernehmen regionale Klimamodelle die Randbedingungen aus Globalmodellen und werden anhand von dynamischem Downscaling in diese eingebettet. Zahlreiche Prozesse (z.B. Turbulenz, Gewitter) laufen auf so kleinen Raum- und Zeitskalen ab. dass sie von den Regionalmodellen nicht explizit aufgelöst werden. Um ihren Einfluss zu berücksichtigen, werden sie mithilfe vereinfachter empirischer oder statistischer Formeln parametrisiert. In Europa koordiniert die Initiative EURO-CORDEX die internationalen Anstrengungen zur regionalen Klimamodellierung und stellt insgesamt mehr als 60 regionale Klimasimulationen mit einer Gitterweite von 12,5 km bereit (z.B. JACOB et al., 2014). Da die Simulationen zwar auf denselben physikalischen Prinzipien beruhen, sich jedoch in ihrer Implementierung, Numerik und Parametrisierung unterscheiden,

liefern sie unterschiedliche Simulationsergebnisse. Weil einerseits jeder Modelllauf einen plausiblen Zustand des Klimasystems beschreibt und andererseits die Komplexität des Klimasystems prinzipiell eine exakte Vorhersage verhindert, ist die Betrachtung einer möglichst großen Anzahl an Modellläufen, eines Ensembles, pro Treibhausgasszenario geboten.

Die Klimafolgenforschung drängt auf Szenariendaten in noch höherer räumlicher Auflösung. Daher werden die Ergebnisse der regionalen Klimamodellierung mit gegitterten Daten des beobachteten Klimas in 1 km-Auflösung (u.a. HIEBL & FREI, 2016) kombiniert. Dies geschieht nicht dynamisch, sondern statistisch, indem gitterpunktweise systematische Abweichungen entfernt werden (Bias-Korrektur; SWITANEK et al., 2017). Auf räumliche Korrelationen wird dabei keine Rücksicht genommen. Auf diese Weise entstanden die derzeit gültigen nationalen Klimaszenarien für Österreich (ÖKS15; CHIMANI et al., 2016, 2020). Die ÖKS15-Szenariendaten bieten acht Modellläufe auf Grundlage des RCP 2.6 sowie jeweils 16 Läufen auf Grundlage von RCP 4.5 und 8.5 an (Tab. 5).

Diese insgesamt 40 Modellläufe werden herangezogen, um die mögliche zukünftige Entwicklung hydrogeologisch relevanter Extremereignisse im untersuchten Einzugsgebiet in Sibratsgfäll abzuschätzen. Aus den ÖKS15-Daten wurden jene neun Gitterpunkte (also 3 × 3 km) extrahiert, die vom Einzugsgebiet berührt werden. Aufgrund der Kleinheit des Untersuchungsgebiets und den unverhältnismäßig großen Unsicherheiten der Klimamodellierung wäre eine räumlich differenzierte Betrachtung innerhalb des Untersuchungsgebiets nicht vertretbar. Daher wurden Gebietsmittelwerte der Klimavariablen gebildet. Während die mittlere Seehöhe des Einzugsgebiets tatsächlich 1.012 m beträgt (780–1.410 m), repräsentieren die Gitterpunkte im Mittel eine Seehöhe von 1.034 m (849–1.267 m). Es sind daher keine relevanten systematischen Unterschiede aus der Seehöhendifferenz zwischen Realität und Modellwelt zu erwarten.

Der Schwerpunkt der klimatologischen Auswertung liegt auf hydrogeologisch relevanten Extremereignissen, nämlich Trockenheit, Starkniederschlag und starker Schneeschmelze, die anhand von Klimaindizes auf Tages- oder Mehrtagesbasis beschrieben werden sollen. Diese sind aus Kapitel 4.5 (Tab. 1) bekannt. Für deren Berechnung wurden drei Klimavariablen in täglicher Auflösung für den Zeitraum 1990 bis 2100 direkt aus den Szenarien ausgelesen, nämlich Minimum und Maximum der Lufttemperatur sowie Niederschlagssumme. Die Näherung abgeleiteter Klimavariablen auf Grundlage der Szenariendaten erfolgte sodann analog zu den räumlichen Beobachtungsdaten (Kapitel 4.5). Aus den Extremwerten der Lufttemperatur wurde die potentielle Evapotranspiration anhand einer adaptierten Hargreaves-Formel geschätzt (HARGREA-VES & SAMANI, 1985; HASLINGER & BARTSCH, 2016). Lufttemperatur und Niederschlag dienten als Eingangsgrößen in das Schneedeckenmodell Snowgrid-CL, mithilfe dessen das Schneewasseräquivalent simuliert wurde (OLEFS et al., 2013).

### 4.7.2 Ergebnisse und Interpretation

Welche mittleren Werte die Extremwertindizes im Beobachtungszeitraum auf Basis der räumlichen Beobachtungsdaten annehmen, wurde bereits in Kapitel 4.5 besprochen. Sie sind nochmals Tabelle 6 zu entnehmen (Spalte "obs"). Um zu beurteilen, inwieweit die Klimasimulationen Zustand und Entwicklung der Extremwertindizes im Beobachtungszeitraum erfassen, wurde aus jedem der drei RCP jener Lauf gewählt, der die geringste mittlere Abweichung zum Median aller Modellläufe aufweist. Sie sind in Tabelle 6 gekennzeichnet. Für das optimistische RCP 2.6

Niz	globales Institution (Land) regionales		Institution (Land)		RCP		
INF.	Klimamodell		Klimamodell		2.6	4.5	8.5
1	CNRM-CM5	CNRM, CERFACS (FR)	CCLM4-8-17	CLMcom (int.)		×	×
2	CNRM-CM5	CNRM, CERFACS (FR)	ALADIN53	CNRM (FR)		×	×
3	CNRM-CM5	CNRM, CERFACS (FR)	RCA4	SMHI (SE)		×	×
4	EC-EARTH	ICHEC (IE)	CCLM4-8-17	CLMcom (int.)	×	×	×
5	EC-EARTH	ICHEC (IE)	RACMO22E	KNMI (NL)	×		
6	EC-EARTH	ICHEC (IE)	RCA4	SMHI (SE)	×	×	×
7	EC-EARTH	ICHEC (IE)	RACMO22E	KNMI (NL)		×	×
8	EC-EARTH	ICHEC (IE)	HIRHAM5	DMI (DK)	×	×	×
9	IPSL-CM5A-MR	IPSL (FR)	WRF331F	IPSL, INERIS (FR)		×	×
10	IPSL-CM5A-MR	IPSL (FR)	RCA4	SMHI (SE)		×	×
11	HadGEM2-ES	MOHC (UK)	CCLM4-8-17	CLMcom (int.)		×	×
12	HadGEM2-ES	MOHC (UK)	RCA4	SMHI (SE)	×	×	×
13	MPI-ESM-LR	MPI-M (DE)	CCLM4-8-17	CLMcom (int.)		×	×
14	MPI-ESM-LR	MPI-M (DE)	REMO2009	MPI-CSC (DE)	×	×	×
15	MPI-ESM-LR	MPI-M (DE)	RCA4	SMHI (SE)	×	×	×
16	MPI-ESM-LR	MPI-M (DE)	REMO2009	MPI-CSC (DE)	×	×	×
17	NorESM1-M	NCC (NO)	HIRHAM5	DMI (DK)		×	×

Tab. 5

Zusammensetzung der Modellläufe, die zur Simulation der zukünftigen Klimaentwicklung im Untersuchungsgebiet verwendet werden. Die dem Median des jeweiligen Ensembles ähnlichsten Läufe sind grün markiert. Der insgesamt niederschlagsärmste bzw. niederschlagsreichste Lauf ist rot bzw. blau markiert. ist dies Lauf Nummer 14, für das gemäßigte RCP 4.5 Lauf Nummer 15 und für RCP 8.5 Lauf Nummer 13. Um die Spannweite aller möglichen Entwicklungen abzuschätzen, werden außerdem die hydrologisch extremen Läufe herausgegriffen. Beide Varianten sind in RCP 8.5 zu finden. Der niederschlagsärmste Lauf Nummer 11 simuliert einen Abfall der mittleren jährlichen Niederschlagssumme bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071–2100) auf rund 2.100 mm, während der niederschlagsreichste Lauf Nummer 9 einen Anstieg auf rund 2.900 mm veranschlagt. Dieser der üblichen Ensemble-Betrachtung entgegengesetzte Ansatz wurde gewählt, um die gesamte Spannweite möglicher Entwicklungen abzubilden.

Die Mittelwerte und Trends dieser fünf Läufe im kurzen Beobachtungszeitraum 1995–2020 sind ebenfalls in Tabelle 6 eingetragen. Die Größenordnung der Mittelwerte der Klimaindizes wird von den Modellsimulationen gut getroffen. Die mittlere Anzahl der niederschlagsfreien Tage wird tendenziell leicht um 2–7 % unterschätzt. Bei den SPEI-Werten liegen meist geringe Überschätzungen vor, mit Ausnahme des Sommers, wo etwas zu trockenere Bedingungen simuliert werden. Die mittlere maximale 30-Tagessumme des Niederschlags- und Schmelzwassers wird durchwegs etwas um 3–17 % überschätzt.

Die simulierten Trends der Klimaindizes der letzten zweieinhalb Jahrzehnte sind wie jene aus den räumlichen Beobachtungsdaten großteils gering und statistisch insignifikant. Die beobachtete zugenommene Eintrittswahrscheinlichkeit niederschlagsfreier Tage wird nur vom RCP 2.6-Lauf abgebildet und sogar überschätzt (+24 %). Die Verkürzung der längsten Trockenperiode wird von keinem der Läufe ausreichend reproduziert. Der Trend zu trockeneren SPEI-Werten im Sommer ist in den Modelläufen nur teilweise enthalten, der Trend zu feuchteren SPEI-Werten im Winter wird hingegen durchwegs falsch wiedergegeben. Die insignifikant gestiegene Wahrscheinlichkeit starker Niederschlag-Schmelz-Tage wird nur von einem Lauf abgebildet (+12 %). Auch die simulierten Trends der anderen "feuchten" Indizes stimmen nur bedingt mit der Beobachtung überein. Allerdings muss beachtet werden, dass Trends über 26 Jahre stark von Ausreißern in einzelnen Jahren beeinflusst werden, während sich Klimamodelle zur Wiedergabe mittlerer Klimazustände und nicht von Einzelereignissen eignen.

Tabelle 7 zeigt die simulierten Klimazustände der näheren (2021-2050) und ferneren (2071-2100) Zukunft sowie die Differenzen gegenüber dem simulierten Klima im Beobachtungszeitraum. Daraus geht hervor, dass RCP 2.6 und 4.5 von geringen Änderungen der Anzahl niederschlagsfreier Tage bis 2100 ausgehen, während ihre Anzahl gemäß RCP 8.5 um elf Tage zunimmt. Bei der Dauer der längsten Trockenepisode bilden die betrachteten Modellläufe keine wesentlichen Änderungen ab. Ausnahme ist der niederschlagsarme Ausreißer unter den Läufen, der eine deutliche Verlängerung der Trockenperioden um zwölf Tage veranschlagt. Für den Wasserbilanzindex SPEI werden in der Jahresbilanz grundsätzlich gleichbleibende Bedingungen simuliert. Das gilt nicht für die ungewöhnlich niederschlagsarmen und niederschlagsreichen Modellläufe, die entsprechende und signifikante jährliche Änderungen der SPEI-Mittelwerte (-1,4 bzw. +1,1) bis zum Ende des Jahrhunderts ergeben. Die jahreszeitliche Betrachtung legt den Schluss nahe, dass zukünftige Änderungen der Wasserbilanz eher temperatur- als niederschlagsgetrieben sind. Denn während im Herbst (-0,3 bis +1,1) und Winter (+0,2 bis +0,8) von gleichbleibenden bis feuchteren Bedingungen auszugehen ist, sind im Sommer, und hier vor allem im warmen RCP 8.5, teils signifikant trockenere Bedingungen zu erwarten (-2,2 bis -0,3). Nur im besonders niederschlagsreichen Modelllauf wird der Temperatureffekt auch im Sommer vom Niederschlagseintrag überkompensiert (+1,3).

Bei den Indizes zu starkem Niederschlag bzw. starker Schneeschmelze ist in RCP 2.6 von keinen oder schwach negativen Änderungen auszugehen. RCP 4.5 gibt leichte Zunahmen bis zum Ende des Jahrhunderts wieder. Dem pessimistischen RCP 8.5 zufolge kommt es jedoch zu extremeren Bedingungen bei der Kombination von Niederschlag und Schneeschmelze. Die Anzahl starker Niederschlag-Schmelz-Tage würde um drei Tage, die mittlere Intensität um 1,3 mm und die maximale jährliche Tagessumme des Niederschlags- und Schmelzwassers um 19 mm zunehmen. Der ungewöhnlich niederschlagsreiche Modellauf sieht noch extremere Steigerungen.

Um die Prozesszusammenhänge der möglichen zukünftigen Entwicklungen nachzuvollziehen, werden zwei Indizes mit verhältnismäßig deutlichen projizierten Änderungen herausgegriffen. Es gilt zu beachten, dass bei anderen

Incolory				Mittelv	vert 1995-	-2020			Trend 1995–2020				
Index		obs	2.6_14	4.5_15	8.5_13	8.5_11	8.5_09	obs	2.6_14	4.5_15	8.5_13	8.5_11	8.5_09
rr0	[d]	201	196	191	190	195	187	1,13	1,24	1	0,97	1	1,02
cdd	[d]	17	19	17	16	19	18	<u>–9</u>	3	-2	-3	0	0
spei	[-]	0	-0,1	0,3	0,4	0,4	0,6	-0,6	-1,1	0	0,2	0,5	-0,4
spei.djf	[-]	0	-0,1	0,1	0,1	0,5	0,1	1,2	-1,2	-0,3	-0,3	0,1	-0,4
spei.mam	[-]	0	0,2	-0,1	0,3	0,4	0,2	-0,7	1,1	0,5	0,1	0,5	-0,9
spei.jja	[-]	-0,2	-0,4	-0,1	-0,3	-0,6	0,1	-0,8	-1,0	0	0,1	-2,8	-1,1
spei.son	[-]	0	-0,2	0,4	0,5	0,2	0,3	-1,3	-0,6	-0,1	0,7	0,6	0,9
aw30	[d]	16	14	13	15	17	17	1,12	0,87	0,91	0,92	1,12	0,97
awi	[mm/d]	12	10,9	11,5	11,5	11,9	11,6	-0,3	-0,7	0	0,3	1	-0,9
awx	[mm]	80	80	87	80	80	88	-2	-8	5	16	4	9
awx30	[mm]	409	478	423	430	453	480	-43	-32	0	11	24	-92

Tab. 6.

Beobachtete und simulierte Mittelwerte im Zeitraum 1995–2020 und Trends über den 26-jährigen Zeitraum 1995–2020 von Extremwertindizes zu Trockenheit und starkem Niederschlag bzw. Schneeschmelze. Neben auf Grundlage räumlicher Beobachtungsdaten bestimmter Werte (Spalten "obs") sind simulierte Werte aus fünf ausgewählten Klimamodellläufen gezeigt. Einfache/doppelte Unterstreichung kennzeichnet statistisch signifikante Trends auf dem 95/99 Perzentil-Niveau.

Index			Mittel	wert 2021-2	2050			Differe	nz zu 1995-	-2020	
Index		2.6_14	4.5_15	8.5_13	8.5_11	8.5_09	2.6_14	4.5_15	8.5_13	8.5_11	8.5_09
rr0	[d]	184	188	192	199	174	-12	-3	2	4	-13
cdd	[d]	15	18	17	22	17	-3	0	0	3	-1
spei	[-]	0,8	0,5	0,7	-0,1	1,4	0,9	0,3	0,3	-0,5	0,8
spei.djf	[-]	0,8	0,4	0,4	1	0,7	0,9	0,3	0,3	0,4	0,6
spei.mam	[-]	0,5	0,1	0,5	0,3	0,6	0,2	0,2	0,2	-0,1	0,4
spei.jja	[-]	-0,2	-0,7	-0,4	-1,6	0,7	0,2	-0,6	0	-1,0	0,6
spei.son	[-]	0,5	0,9	0,6	0,3	0,6	0,7	0,5	0,1	0,1	0,3
aw30	[d]	15	16	17	16	21	1	3	2	-1	4
awi	[mm/d]	11,5	11,7	12,1	12	12,5	0,5	0,3	0,5	0,1	0,9
awx	[mm]	73	92	89	92	106	-7	5	8	12	18
awx30	[mm]	526	435	471	450	539	48	13	41	-3	59
Index			Mittel	wert 2071–2	2100			Differe	nz zu 1995-	-2020	
Index	-	2.6_14	4.5_15	8.5_13	8.5_11	8.5_09	2.6_14	4.5_15	8.5_13	8.5_11	8.5_09
rr0	[d]	190	189	202	224	175	-6	-2	11	29	-12
cdd	[d]	18	17	17	31	14	-1	0	1	12	-3
spei	[-]	0,3	0,5	0,3	-1,0	1,7	0,4	0,2	-0,1	-1,4	1,1
spei.djf	[-]	0,4	0,5	0,8	1,2	0,3	0,5	0,4	0,8	0,6	0,2
spei.mam	[-]	0,2	0,2	0,8	-0,3	0,4	0	0,3	0,5	-0,7	0,2
spei.jja	[-]	-0,6	-0,9	-1,7	-2,8	1,4	-0,3	-0,8	-1,3	-2,2	1,3
spei.son	[-]	0,9	0,8	0,6	-0,2	0,7	1,1	0,4	0,1	-0,3	0,4
aw30	[d]	13	16	18	17	25	0	3	3	0	9
awi	[mm/d]	11	11,9	12,8	13,3	14,2	0	0,4	1,3	1,5	2,5
awx	[mm]	73	97	100	99	118	-7	9	19	18	31
awx30	[mm]	469	441	435	464	589	-9	18	6	11	109

Tab. 7.

Simulierte Mittelwerte in den Zeiträumen 2021–2050 (oben) sowie 2071–2100 (unten) und Differenzen gegenüber simulierten Mittelwerten des Zeitraumes 1995– 2020 von Extremwertindizes zu Trockenheit und starkem Niederschlag bzw. Schneeschmelze aus fünf ausgewählten Klimamodellläufen.

Indizes schwächere oder keine zeitlichen Änderungen auftreten (Tab. 7). Unter den Trockenheitsindizes wurde der SPEI des Sommers gewählt. Der zeitliche Verlauf möglicher Zukunftsszenarien ist in Abbildung 22 dargestellt. Die Abbildung zeigt zunächst die hohe Jahr-zu-Jahr-Variabilität der Wasserbilanz aus den Beobachtungsdaten, die von den Medianen der RCP nicht gleichermaßen wiedergegeben wird wie von den tatsächlichen einzelnen Modellläufen. Bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts schwanken die Mediane aller drei Szenarien der Treibhausgaskonzentration um den Referenzwert. Danach beginnen die sommerlichen Wasserbilanzindizes der beiden gemäßigteren Szenarien nur leicht in Richtung trockenerer Bedingungen zu tendieren. RCP 8.5 simuliert jedoch stärkere sommerliche Trockenheit ab der zweiten Hälfte des Jahrhunderts. Dass zunehmende Trockenheit im Sommer und im Mittel des Szenarios mit den höchsten Treibhausgaskonzentrationen zum Problem wird, verweist darauf, dass steigende Lufttemperaturen der Treiber der projizierten Sommertrockenheit sind. Die Spannweiten der einzelnen Modellläufe innerhalb der Szenarien sind jedoch groß. Selbst innerhalb des RCP 8.5 könnten unterschiedliche Entwicklungen der Niederschlagssummen den Temperatureffekt dominieren. Der niederschlagsärmste Lauf tendiert schon in na-



Abb. 22.

Entwicklung des jahreszeitlichen Index der klimatischen Wasserbilanz (SPEI) im Sommer gemäß räumlichen Beobachtungsdaten 1995–2020 (schwarz) und modellierter Szenariendaten 1995–2100 (grün, blau, rot). Von den einzelnen RCP sind jeweils der Median (Linie) und die Spannweite (halbtransparente Fläche) der Jahreswerte dargestellt.



Abb. 23.

Entwicklung der jährlichen Anzahl der starken Niederschlags- und Schmelztage gemäß räumlichen Beobachtungsdaten 1995–2020 (schwarz) und modellierter Szenariendaten 1995–2100 (grün, blau, rot). Von den einzelnen RCP sind jeweils der Median (Linie) und die Spannweite (halbtransparente Fläche) der Jahreswerte dargestellt.

her Zukunft zu merklich verstärkter und gegen Ende des Jahrhunderts zu extremer sommerlicher Trockenheit. Beim niederschlagsreichsten Lauf würde der Temperaturanstieg sogar überkompensiert, was sich in einem eindeutigen Trend zu positiven Wasserbilanzindizes äußert. Die Entwicklung sommerlicher Trockenheit im 21. Jahrhundert wird demnach vorrangig von Ausmaß des Temperaturanstiegs gesteuert, wobei große Unsicherheiten hinsichtlich der Niederschlagsentwicklung zu beachten sind.

Unter den kombinierten Niederschlag-Schneeschmelze-Indizes wurde die jährliche Anzahl der Tage mit starkem Niederschlag- bzw. starker Schneeschmelze gewählt, deren simulierte zeitliche Verläufe in Abbildung 23 gezeigt werden. Das beobachtete mittlere Niveau der Intensität wird im Mittel der einzelnen Szenarien gut erfasst. Im weiteren Verlauf schwanken die Mediane der Szenarien RCP 2.6 und RCP 4.5 bis zum Ende des Jahrhunderts um den aus dem Beobachtungszeitraum bekannten Mittelwert, während der Median des pessimistischen RCP 8.5 etwa zur Mitte des Jahrhunderts beginnt, leicht zu höheren Werten zu tendieren. Während die meisten Läufe mittelfristig innerhalb der Standardabweichung der beobachteten Schwankungen verbleiben, zeigt der extrem niederschlagsreiche Modelllauf einen besonders deutlichen Anstieg hin zu 25 starken Niederschlags- bzw. Schmelztagen im Mittel pro Jahr gegen Ende des Jahrhunderts, was selbst die höchsten Jahreswerte des Beobachtungszeitraums überträfe. Die Frage, ob sich die zumeist schwachen simulierten Anstiege eher auf eine Intensivierung der Niederschläge oder der Schneeschmelze zurückführen lassen, kann ein Blick auf die modellierten Entwicklungen der beiden Einzelprozesse beantworten. Demnach sind die simulierten Anstiege hauptsächlich durch tendenziell intensivere Niederschläge verursacht, während die ohnehin geringe Anzahl an starken reinen Schmelztagen auf niedrigem Niveau verharrt. Generell nimmt der Beitrag des Schmelzwassers zum insgesamt verfügbaren Wassern in den Simulationen ab etwa

2030 kontinuierlich ab. Das Ende der jährlichen Schneeschmelze verlagert sich gemäß den Szenariendaten von Mitte Mai um 1990 auf Mitte April oder, in den warmen Läufen, sogar Anfang März um 2100. Das liegt daran, dass selbst Mittelgebirgslagen wie das Untersuchungsgebiet in einen für den Schneedeckenaufbau zunehmend sensiblen Temperaturbereich gelangen (SCHÖNER et al., 2018; KOT-LARKSI et al., 2022).

Über alle Indizes hinweg lässt sich schlussfolgern, dass die Klimaszenarien bei verstärkten bis moderaten Klimaschutzanstrengungen überschaubare Änderungen der hydrogeologischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet simulieren, während "Fossiler Weg"-Modellläufe sowohl hinsichtlich sommerlicher Trockenheit als auch hinsichtlich extremer Niederschläge deutliche Zunahmen beinhalten, die teilweise am Rand der Spannweite der aus Beobachtungen bekannten Klimabedingungen liegen.

Schließlich sei darauf hingewiesen, dass Klimaprojektionen plausible mögliche Entwicklungen des Klimas unter der Voraussetzung definierter anthropogener Aktivitäten darstellen. Sie sind keine konkreten Vorhersagen des tatsächlichen künftigen Klimageschehens. Dieses kann aufgrund des unvollständigen Erkenntnisstandes über das Klimasystem sowie der Unvollkommenheit von Klimamodellen auch außerhalb der Spannweite der Simulationen liegen. Weiters kann das Downscaling auf die hier ausgewertete lokale Ebene anhand von Bias-Korrektur nicht die auf dieser Skala wirksamen Prozesse oder räumliche Abhängigkeiten berücksichtigen (CHIMANI et al., 2020; MA-RAUN, 2016; MARAUN et al., 2021), sondern beruht auf der statistischen Berücksichtigung räumlicher Beobachtungsdaten. Diese beinhalten ihrerseits nicht vernachlässigbare Unsicherheiten der Messung und Glättungseffekte der Interpolation, die zu systematischen Fehlern in der klimatologischen Häufigkeitsverteilung und somit zu Biases in gängigen Klimaindizes führen (FREI & ISOTTA, 2019; FREI, 2021).

## 5 Hydrogeologie

(D. ELSTER, M. KRALIK, R. HOLZSCHUSTER, C. BISPING, W. JARITZ, V. TUREWICZ & G. HOBIGER)

In diesem Kapitel sollen die hydrogeologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet erläutert werden. Die Ergebnisse und Interpretationen für die Teilbereiche werden in der hydrogeologischen Konzeptvorstellung (Kapitel 5.7) zusammengeführt. Abbildung 24 bietet zudem einen Überblick zu relevanten hydrogeologischen Inhalten, z.B. Messstellenbezeichnungen, auf die im Bericht eingegangen wird.

## 5.1 Verweilzeiten der Grundwässer

(M. KRALIK)

### 5.1.1 Methodik

#### 5.1.1.1 Probenahme

Die Routine-Probenahme für die Sauerstoff-18- und Wasserstoff-2-Isotopen der Oberflächengewässer, der Quellen und der Arteser erfolgte nach ÖNORM EN ISO 5667-1. Für die Untersuchungen von Delta Sauerstoff-18, Delta Wasserstoff-2 (Deuterium) und Tritium wurden von den Mitarbeitern des Untersuchungsteams 0,05–0,1 bzw. 1 Liter Wasserproben (PE-Flaschen) entnommen. Die Probenahme der Edelgase Helium-3/Helium-4 (<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He) und der Spurengase FCKW (CFC-11, CFC-12, CFC-113) bzw. Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) erfolgten mittels Kupferrohren bzw. Edelstahlbehältern mit Spezialventilen. Für die zwei durchgeführten Radiokarbon- (<sup>14</sup>C) und  $\delta^{13}$ C-Messun-

gen wurden 1 L Proben in PE-Flaschen mit Innenstopfen genommen. Die Probenahme für Radon (<sup>222</sup>Rn) erfolgte mit gasundurchlässigen Gaswaschflaschen aus Borosilikatglas mit einer Schliffkupplung, welche mittels eines Glasstopfens radondicht verschlossen und mit einer Schliffsicherungsklammer fixiert wurden. Die Radiokarbon (<sup>14</sup>C)- und Radon-(<sup>222</sup>Rn)-Probenahme erfolgte ohne Luftkontakt unter Wasser.

#### 5.1.1.2 Isotopenanalytik

Die stabilen Wasserisotopen Sauerstoff-18 ( $\delta^{18}$ O) und Deuterium ( $\delta^{2}$ H) der 132 gesammelten Wasserproben und der 92 equilibrierten Porenwasserproben wurden mittels einem Picarro L2140i  $\delta^{18}$ O/ $\delta^{2}$ H Ultra High Precision Isotopic Water Analyser (Institute for Soil Physics and Rural Water Management (SoPhy), Universität für Bodenkultur) analysiert. Die Resultate werden als per Mille (‰) Abweichung vom "Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW)" in Delta ( $\delta$ )-Notierung angegeben. Die analytische Präzision ist für  $\delta^{18}$ O und  $\delta^{2}$ H besser als ± 0,1 und 0,5 ‰.

Tritium (<sup>3</sup>H) wurde teils am Institut für Physik der Universität Bremen mittels der "ingrowth" Methode (<sup>3</sup>H zerfällt zu <sup>3</sup>He) und teils am Wessling Hungary Kft. (Budapest) mittels Anreicherung und in einem Flüssigkeitsszintillationsmessgerät (LSC) gemessen. Die angegebene Aktivitätskonzentration (Tritium-Einheiten) bezieht sich auf die Probe zum Probenahmezeitpunkt.



#### Abb. 24.

Übersicht über das Untersuchungsgebiet, die Profilschnitte sowie Lage der Bohrungen und Quellen.

Sowohl die hier berichteten Edelgase Helium und Neon, sowie deren Isotopenverhältnisse, wurden am Institut für Physik der Universität Bremen analysiert. Die Messgenauigkeit beträgt für <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He- und <sup>4</sup>He/<sup>20</sup>Ne-Verhältnisse 0,4 % und für Isotopenkonzentrationen 0,7 % (2 $\sigma$ -Vertrauensbereich) (SÜLTENFUSS & MASSMANN, 2004).

Die im Rahmen dieser Studie im Grundwasser gelösten Gase wurden im Labor des Instituts für Geosciences der Universität Rennes (AYRAUD et al., 2008) mittels ultra-reinem Stickstoff ausgetrieben und an einer "HaysepD" Falle (10 cm, 1/8e inch diameter) gefangen und die Gasphase in einen Gaschromatographen mit einem "electron-capture" Detektor gemäß der Methode von BULLISTER & WEISS (1988) eingelassen. Die analytischen chromatografischen Säulen und die vorgeschaltenen Säulen sind molekulare Siebe 5A, von 0,53 µm Durchmesser und sind 30 bzw. 2 m lang.

Radiokarbon wurde in einem Accelerator Mass Spektrometer (AMS) untersucht und die stabilen Kohlenstoff-Isotopen-Verhältnisse (<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C) wurden in einem gas bench Isotope Ratio Mass Spectrometer (IRMS) (beide Beta Analytic Inc., Miami, Florida, USA) gemessen. Gelöster anorganischer Kohlenstoff (DIC) besteht aus jeglichem CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> im Grundwasser. Die Entfernung des DIC erfolgt mit Phosphorsäure. Ein Teil des CO<sub>2</sub> wurde mittels IRMS auf  $\delta^{13}$ C analysiert. Das restliche CO<sub>2</sub> wurde in Grafit umgewandelt. Der Grafit wurde im AMS auf <sup>14</sup>C untersucht. Das Resultat wird als Prozent moderner Kohlenstoff (pMC) angegeben.

Die Radon-Analysen wurden gleich nach der Probennahme in Sibratsgfäll mit der Messapparatur (Alpha-Spektrometrie) bestehend aus AquaKIT, AlphaPUMP und Alpha-GUARD PQ 200 PRO durchgeführt (siehe ELSTER et al., 2018).

## 5.1.2 Ergebnisse und Interpretation

Die Mittleren Verweilzeiten (MVZ) von Oberflächen- und Grundwasser in alpinen Gebieten sind generell eine kom-

plizierte Mischung von mehreren, aber zumindest zwei Anteilen von jüngeren und älteren Wasseranteilen. Daher ist es wichtig, in Wässern mehrere Tracer mit unterschiedlichen Halbwertszeiten und zu unterschiedlichen Jahreszeiten zu beproben und zu messen. Da solche Probenahmen und Messungen in der Logistik und Auswertung in Speziallaboren aufwendig sind, können nur eine beschränkte Anzahl von Proben untersucht werden und die Ergebnisse eine Annäherung an die wahren Werte sein.

#### 5.1.2.1 Sauerstoff-18/Wassertoff-2 (δ<sup>18</sup>O/<sup>2</sup>H)

Die monatlichen Niederschlagsproben in Sibratsgfäll weisen einen erhöhten "Deuterium-Excess" (11,1–12,4 ‰) auf, der typisch für erhöhte alpine Niederschlagsstationen ist (FRÖHLICH et al., 2008). Aus Abbildung 25 ist ersichtlich, dass die meisten Oberflächengewässer und die tiefliegenden Quellen wie die Niederschlagswässer in Sibratsgfäll ( $\delta^{18}$ O: –10,59 bis –10,83 ‰) mehr an <sup>18</sup>O angereichert sind als die Hochegg- und Krineggquellen und die Arteser ( $\delta^{18}$ O: –11,26 bis –11,20 ‰). Das ist auf den Höheneffekt zurückzuführen. Stark erhöhte  $\delta^{18}$ O-Werte in den Inklinometerbohrungen bestätigen das unmittelbare Eindringen von Niederschlagswässern.

Da die Hochegg- und Krineggquellen (1.174–1.184 m) relativ nahe dem oberen Rand des orografischen Einzugsgebietes (1.300–1.400 m) liegen, kann die Höhe des Einzugsgebietes relativ gut eingegrenzt werden. Zusammen mit den gewogenen Jahresmittel der Niederschlagsstation Sibratsgfäll (902 m) kann eine gute Höhenbeziehung der Niederschläge angepasst werden. Die daraus errechnete  $\delta^{18}$ O-Abnahme von 0,23 ‰ per 100 Höhenmeter entspricht üblicher alpiner Gradienten (Abb. 26). Daraus ergibt sich, dass die Wässer des tieferen Grundwassers aus den Artesern (KB7/07, KB1/03) und das gespannte Grundwasser (KB6/07) ursprünglich über dem Flysch in eine Höhe zwischen 1.200 bis 1.400 m abgeregnet wurden.

Zur Abschätzung der Verweilzeit wurde die Annäherungsformel von STICHLER & HERMANN (1983) berücksichtigt





#### Abb. 26. $\delta^{18}$ O- vs. Höhenlage von der meteorologischen Station Sibratsofäll und die Flyschquellen Krinegg und Hochegg ca. 100 m unter den oro-grafischen Einzugsgrenzen. Quellwässer von nahegelegenen Quellen wurden auf ähnlichen Niederschlagslinien eingeschätzt (KRALIK, 2015). Die Niederschlagsstationen Schoppernau und Bregenz scheinen auf einer eher abgereicherten Linie zu liegen. Die $\delta^{18}$ O-Abnahme von 0,23 ‰ per 100 Höhenmeter entspricht üblichen alpinen Gradienten.

(KRALIK, 2022). Auch wenn es keine monatlichen Messungen von den Quellwässern gibt und so vielleicht nicht die maximale Amplitude der  $\delta^{18}$ O-Messungen erfasst wurde, können die in Tabelle 8 errechneten Verweilzeiten als Orientierung dienen. Die oberflächlichen Bachwässer, die im oberen Flysch auch von kleineren Quellen gespeist werden, haben die jüngsten Mittleren Verweilzeiten von 1,3 bis 1,9 Jahren. Die Krinegg- und Hocheggquellen (Flysch) und die in den glazio-lakustrischen Sedimenten entspringenden Quellen werden mit 2 bis 3,6 Jahren abgeschätzt. Die Wässer aus den artesischen und gespannten Brunnenbohrungen haben Mittlere Verweilzeiten, die diese Abschätzungsmethode übersteigen.

## 5.1.2.2 Tritium- und Helium-3/Helium-4

Durch die relativ kurze Verweilzeit in den oberflächennahen Grundwässern in glazio-lakustrischen Sedimenten schwankt die Konzentration des Tritiums jahreszeitlich bedingt stärker als in den älteren Grundwässern der Artesern (KB7/07, KB1/03) und dem gespannten Grundwasser (KB6/07). Da Tritium zu dem Edelgas Helium-3 zerfällt, kann man bei der gleichzeitigen Messung beider mit den gleichen "lumped parameter" Modellen für den jüngeren tritiumhaltigen Anteil eine mittlere Verweilzeit berechnen. Dies ergibt für die oberflächennahen Grundwässer in glazio-lakustrischen Sedimenten (SG229, 330) als "piston-flow" Modell sehr kurze Verweilzeiten von 0,5-0,6 Jahren. Die tieferen Grundwässer der Arteser (KB7/07, KB1/03) und dem gespannten Grundwasser (KB6/07) ergeben Modellalter zwischen 19 und 31 Jahren. Da diese jedoch erhöhte Helium-4 und daher wesentlich niedrigere Ne/He-Verhältnisse (2,25-2,74) anzeigen, können diese Verweilzeiten nur für die tritiumhaltigen Anteile gelten und daher die mittleren Verweilzeiten (MVZ) wesentlich höher sein (Abb. 27). Das etwas höhere Modellalter der Grundwasserprobe aus der neuen Bohrung SG535 (KB1-2020) kann als Mischung zwischen den sehr jungen und den alten aufsteigenden Wässern interpretiert werden.

Тур	Probenbezeichnung	Anzahl	А	В	Mittlere Verweilzeit
		(n)	(% VSMOW)	(‰ VSMOW)	(Jahre)
Oberflächenwasser	SG001	4	7,87	0,95	1,3
Oberflächenwasser	SG320	5	7,87	0,66	1,9
Flysch-Quelle	SG310/311	19	7,87	0,63	2,0–3,6
Flysch-Quelle	334	14	7,87	0,51	2,5
Drainage/Quelle	216	5	7,87	0,89	1,4
Drainage/Quelle	225	4	7,87	0,39	3,2
Drainage/Quelle	229	5	7,87	0,47	2,7
Drainage/Quelle	330	5	7,87	0,59	2,1
Brunnen/Bohrung	KB6/07	6	7,87	0,31	> 4
Brunnen/Bohrung	KB1/03	4	7,87	0,16	> 8

Tab. 8.

Abschätzung der Mittleren Verweilzeiten (MVZ) mittels Isotopen ( $\delta^{18}$ O) Amplituden.



Abb. 27.

Ne/He- vs. <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He-Verhältnis der oberflächennahen Quellen in glazio-lakustrischen Sedimenten (SG229-330) und Brunnen von tieferen artesischen und gespannten Grundwässern (KB7/07, KB1/03 und KB6/07). Die neue Bohrung SG535 (KB1-2020) wird als Mischung angesehen.

## 5.1.2.3 CFC-11, CFC-12, CFC-113 und SF<sub>6</sub>

Die Abschätzung der Mittleren Verweilzeit des Quellwassers beruht darauf, dass sich die jeweiligen Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW = CFC)-Konzentrationen in der Atmosphäre in dem versickernden Niederschlagswasser entsprechend der Temperatur und Höhenlage lösen. Bei Kenntnis der Konzentrationsentwicklung, siehe USGS (2019), kann der Zeitpunkt der Einleitung in das Quellwasser abgeschätzt werden. Wenn die gemessenen Konzentrationen nicht nahe der zeitlichen Konzentrationsentwicklung liegen, dann gab es im Einzugsgebiet eine anthropogene Kontamination oder einen mikrobiologischen Abbau in reduzierenden Grundwässern bzw. es kam zur Mischung verschieden alter Grundwässer. Die FCKW-Konzentrationen für CFC-11, CFC-12 sind in der oberflächennahen Quelle SG330 vermutlich durch menschliche Aktivitäten des darüber liegenden Dorfes Sibratsgfäll kontaminiert (Excess!). Die Messungen des Artesers KB1/03 und des gespannten Grundwassers KB6/07 liegt nicht exakt auf der atmosphärischen Entwicklungslinie und CFC-11 könnte geringfügig in den sauerstofffreien Wässern abgebaut worden sein. Die CFC-113 und SF<sub>6</sub>-Konzentrationen zeigen, dass die analysierten Grundwasserproben auf oder nahe einer Mischungslinie von rezenten Werten und den CFC-113- und SF6-freien Anteilen liegen. Es wird dadurch bestätigt, dass die Quelle SG330 vorwiegend junges Wasser schüttet, aber Arteser KB1/03 und das gespannte Grundwasser KB6/07 vorwiegend aus alten CFC-113- und SF6-freien Anteilen besteht (Abb. 28).



#### Abb. 28.

CFC113 und SF<sub>6</sub> gelöst in Wasser (pmol/kg) bei 10 °C und 1.000 m Höhe berechnet nach den Konzentrationsmessungen des USGS (2019) über die Jahre 1940– 2020 und die Konzentration im Sibratsgfäller Grundwasser. Mischungslinie zwischen CFC-freien alten und jungen Wässern. CFC-113 vs. SF<sub>6</sub>.

# 5.1.2.4 Kohlenstoff-13 (δ<sup>13</sup>C) und Radiokarbon (<sup>14</sup>C)

Der Kohlenstoff-13 des anorganischen gelösten Kohlenstoffs (DIC) wird gemessen, um abschätzen zu können, wie viel von dem ursprünglich infiltrierten Kohlenstoff durch die Lösung mit <sup>14</sup>C-freien Karbonatgesteinen verdünnt wird. Vergleichswerte der Grundwässer des Wiener Beckens und der Oberösterreichischen Molassezone deuten darauf hin, dass, je länger die Wässer unterwegs sind (geringere <sup>14</sup>C-Gehalte), desto mehr <sup>14</sup>C-freier Kohlenstoff wird aus den Karbonaten gelöst und die  $\delta^{13}$ C-Werte verschieben sich mehr zu den für marine Karbonate typischen Wert von 0 ‰. Die im Untersuchungsgebiet (KB1/03 und KB1-2020) untersuchten Grundwässer liegen auf einem ähnlichen Trend.

Die Darstellung der Tritiumwerte gegen die Radiokarbonwerte (Prozent modernen Kohlenstoffs), zeigt, dass viele der hier untersuchten Grundwässer des Wiener Beckens und der Oberösterreichischen Molasse eine Mischung aus "jüngeren" tritiumhaltigen Wässern (jünger als 70 Jahre) und einem sehr alten tritiumfreien Grundwasser sind. Nach der \delta13C-Korrektur des Radiokarbonmesswerts von 49.2 % modernen Kohlenstoffs wird eine Verschiebung auf 71 % berechnet. Der korrigierte Wert passt gut zu den Trends der oben erwähnten Grundwassergebiete. Berechnet man eine mittlere Verweilzeit mittels der Korrektur des Typ 1 (HAN & WASSENAAR, 2020) mit einem Radiokarbonwert von 71 % modernen Kohlenstoffs, so kommt man, je nachdem, ob man 80 % oder 100% pMC als Startwert annimmt, auf 950 bis 2.800 Jahre für das artesische Grundwasser KB1/03. Da man durch eine Einzelmessung keine Korrekturen des Typ 2 durchführen kann, werden diese mittleren Modellalter wie häufig etwas zu hoch sein, aber man wird für den alten tritiumfreien Anteil von mindestens ein paar hundert Jahren ausgehen können.

## 5.1.2.5 Radon (222Rn)

Der Rhenodanubische Flysch weist mit 6,0 Bq/l Radon-222 den niedrigsten Medianwert unter den österreichischen Grundwässern auf (BERKA et al., 2014). Die Medianwerte der oberostalpinen Kalkalpen, die vermutlich einen Großteil der glazialen Ablagerungen im Untersuchungsgebiet darstellen, sind mit Medianwerten von 7,6 Bq/l Radon-222 kaum höher. Im Untersuchungsgebiet wurden acht ausgewählte Grundwässer auf Radon untersucht, um Beimischungen von ganz jungen Wässern (wenige Tage) zu prüfen. Es zeigte sich, dass nur die von einer Drainage beeinflusste Entnahme SG216 (1,3 Bq/l) aus den glazio-lakustrischen Sedimenten sehr junges Wasser schüttet. Bei den weiteren beprobten Grundwässern fehlt diese junge Komponente.

# 5.2 Hydrochemie und Feldparameter

(D. ELSTER, M. KRALIK & G. HOBIGER)

## 5.2.1 Hydrochemie

(D. ELSTER, M. KRALIK & G. HOBIGER)

Die Feldparameter Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert und gelöster Sauerstoff wurden sofort gemessen und es kamen folgende Geräte zum Einsatz: WTW pH 330, pH 340i, WTW Multi 3630 IDS, ProfiLine Oxi 3205 und HACH40d. Für die Hydrochemie wurden für die Kationen 50 ml Wasserproben gefiltert (40  $\mu$ m) und mit 10 % HNO<sub>3</sub> angesäuert, für die Anionen wurden 250 ml Wasserproben (nur gefiltert) entnommen. Die Analytik erfolgte an der Geologischen Bundesanstalt (Fachabteilung Geochemie). Die Hauptanionen wurden mit Ionenchromatographie bestimmt (DIONEX-ICS-2000 mit einem analytischen Fehler von ± 3 %), hierbei lag die Bestimmungsgrenze bei 0,05 bis 0,5 mg/l. Es ist anzumerken, dass Hydrogenkarbonat ausschließlich mithilfe der Ionenbilanz bestimmt wurde. Hauptkationen und Spurenelemente wurden mit ICP-MS gemessen, es kam ein AGILENT Technologies Type 7500 mit einem ASX-500 Autosampler zum Einsatz und die Bestimmungsgrenze lag bei 0,01 bis 0,0001 mg/l.

## 5.2.2 Ergebnisse und Interpretation (D. ELSTER & M. KRALIK)

Die im Flysch auf den Höhen von 1.174 und 1.184 m entspringenden Hochegg- und Krineggquellen sind (Median: 7,7 °C) kühl und relativ gering mineralisiert (Median: 294 µS/cm). Die tiefer liegenden Quellen, es handelt sich um oberflächennahes Grundwasser im Kontakt mit feinkörnigen glazio-lakustrischen Sedimenten, weisen im Median eine höhere Mineralisierung (501 µS/cm) auf, die teils auf den Kontakt mit den karbonatischen glazio-lakustrinen Sedimenten, teils auf die Düngung der darüber liegenden Weidewiesen zurückzuführen sind. Die Temperatur der Oberflächengewässer und der relativ tiefliegenden Quellen weisen im Median (13,1-11,1 °C) relativ hohe Temperaturen auf, da sie vorwiegend im Sommerhalbjahr beprobt wurden. Die Arteser bzw. das gespannte tiefere Grundwasser sowie die neue Bohrung KB1-2020 weisen höhere Temperaturen (9,9-9,6 °C) als die Jahresdurchschnittstemperaturen in Sibratsgfäll auf (HOLZSCHUSTER, 2022), was ein klarer Hinweis auf aufsteigende wärmere Grundwässer ist. Der gelöste Sauerstoffgehalt ist überdies in diesen tieferen Grundwässern mit 1,4 bis 2,5 mg/l signifikant abgereichert. Die Messungen in den Inklinometerbohrungen spiegeln durch ihre Art des Ausbaus zwar die leicht erhöhte Grundwassertemperatur (Median: 9,6 °C) wider, aber sind teils unmittelbar durch Niederschlagswasser, teils durch Zementkontakt beeinflusst.

Zwischen 2019 und 2021 wurden 47 hydrochemische Probenahmen an Vorflutern, Oberflächengerinnen, Quellen, Drainagen und Bohrungen durchgeführt. Grundsätzlich handelt es sich um akratische Grundwässer mit Ionensummen zwischen 0,17 und 0,51 g/l vom Typ Kalzium-Hydrogenkarbonat bis Kalzium-Magnesium-Hydrogenkarbonat (Ionenanteile mit mehr als 20 eg%) (Abb. 29). Jene Analysen, die davon abweichen, weisen anthropogene Einflüsse (z.B. KB2/03-, KB2/07-, SG042-Gerinne beeinflusst durch Kläranlage) auf. Über die Anteile von Magnesium lassen sich die Grundwässer differenzieren. Die gespannten tieferen Wässer im Becken zeigen eine Mineralisierung vom Typ Kalzium-Magnesium-Hydrogencarbonat mit leicht erhöhten Natrium- und Sulfatgehalten und Ionensummen im Vergleich zu den Hocheggquellen. So weisen die artesischen Bohrungen im Bereich Mähmoos (KB1/03, KB7/07, KB6/07) erhöhte Magnesiumkonzentrationen (0,37-0,60 mmol) auf. Die für die Wasserversorgung genutzten Hocheggguellen zeigen Konzentrationen zwischen 0,26 und 0,40 mmol und erhöhte Werte treten bei



niedrigen Schüttungsraten auf. Die Krineggquellen weisen hingegen weitgehend unabhängig von der Schüttungsrate niedrigere Werte zwischen 0,05 und 0,20 mmol auf.

## 5.3 Quell- und Oberflächenabfluss

(D. ELSTER & R. HOLZSCHUSTER)

## 5.3.1 Methodik

(D. ELSTER & R. HOLZSCHUSTER)

Im Untersuchungsgebiet wurde bei vier Hauptgerinnen ab November 2019 ein Oberflächenabfluss-Monitoring installiert (siehe 234, 231, 202, 322 in Abbildung 24). Hierbei handelt es sich um Solar betriebene Vegaplus WLS61 Radar Sensoren, die in Kombination mit CR200-Cel2156 Campell Scientific Dataloggern den Wasserstand mit einer Genauigkeit von  $\pm$  5 mm in 10 Minuten-Intervallen messen. Die Standortauswahl erfolgte auf Basis von Bachbettstabilität (Brückenbereiche) und Zugänglichkeit. Mittels Salztracerversuchen wurden Schüttung und Wasserstand bei unterschiedlicher Wasserführung nach dem Potenzgesetz in Beziehung gebracht (Schüttung = empirischer Wert x Wasserstandemp. Wert), Details (Schlüsselkurven etc.) sind dem Projektbericht von HOLZSCHUSTER (2022) zu entnehmen. Hydrografische Analysen umfassten statistische Auswertungen und die Beschreibung der exponentiellen Abnahme der Schüttung der Gerinne mit Trockenwetterfalllinien nach MAILLET (1905).

Über die Abschätzung der mittleren jährlichen Abflussfracht der Hochegg- und Krineggquellen wurden zudem die Einzugsgebietsflächen nach der Methodik des ÖWAV-Regelblattes 205 (ÖWAV, 2017) überschlägig berechnet und mit der angenommenen orografischen Ausweisung verglichen. Zudem wurden die Vorfluter Subersach und Rubach, diese begrenzen das Untersuchungsgebiet gegen Süden und Südwesten, mit Salztracerversuchen auf diffuse Grundwasserzutritte aus dem Talkörper untersucht. Dies erfolgte bei Basisabflussbedingungen im Winter und bei mittlerem Abfluss im Sommer.

## 5.3.2 Ergebnisse und Interpretation

### (D. ELSTER)

Das angenommene gemeinsame Einzugsgebiet der Gerinne weist eine Fläche von 2,58 km<sup>2</sup> auf, wobei die Subeinzugsgebiete von 0,25 bis 1,3 km<sup>2</sup> deutlich variieren (Abb. 24). Die Ausweisung erfolgte grundsätzlich auf Basis der orografischen Einzugsgebiete, die hohe mittlere Schüttung der Hocheggquellen lässt jedoch auf ein größeres Einzugsgebiet von zumindest 30 % im Nordosten schließen. Dies ist auf bevorzugte Wasserwegigkeiten über Klüfte und Störungen zurückzuführen, die mit der Deckengrenze Rhenodanubischer Flysch/Helvetikum in Beziehung stehen dürften.

Im Untersuchungsjahr 2020 herrschte ein sehr milder Winter (Kapitel 4.5) und die gemeinsame Abflussfracht der Gerinne (322, 202, 231 und 234) lag bei 3.483.970 m<sup>3</sup> (im Mittel 110 l/s). Das entspricht rund 52 % vom Jahres-





niederschlag, belegt einen hohen Oberflächenabfluss und ist plausibel für den vorliegenden dichten Untergrund und die Hangneigung. Allerdings ist auf ausgeprägte saisonale Unterschiede von 44 % im Winter (90 Tage aggregiert am 28.02.2020), 51 % im Frühling (90 Tage aggregiert am 31.05.2020), 58 % im Sommer (90 Tage aggregiert am 31.08.2020) und 75 % im Herbst (90 Tage aggregiert am 30.11.2020) hinzuweisen. Die Auswertung der Trockenwetterfalllinien bei den Hauptgerinnen 234 und 322 zeigt auf, dass zumindest zwei Schüttungsregime vorliegen. Der Auslaufkoeffizient a1 beschreibt den schnellen Abfluss nach Niederschlagsereignissen und liegt bei 7 x 10<sup>-1</sup>/ Tag oder höher, das spricht für eine äußerst schnelle Entwässerung. Der Basisabfluss wird mit dem Auslaufquotient a3 beschrieben, hier variiert der Wertebereich zwischen 3 x 10<sup>-2</sup> bis 6 x 10<sup>-2</sup>/Tag und belegt ebenfalls ein geringes Retentionsvermögen. Erst bei Werten von 10-3/ Tag oder kleiner wäre von einer langsamen Entwässerung des Grundwasserspeichers auszugehen. Die resultierende hydrologische Halbwertszeit ( $t_{1/2} = ln2/\alpha_3$ ) liegt im Mittel bei rund 14 Tagen und Abbildung 30 zeigt die angenommene Rezession des Grundwasserspeichers auf Basis der Formel von Maillet:  $Q_t = Q_0 e^{-a(t-to)}$ .

Schüttungsaufzeichnungen der Gemeinde Sibratsgfäll belegen bei den Hocheggquellen eine mittlere Schüttung von 6,5 l/s über den Zeitraum 1995 bis 2020 mit einem Schwankungsbereich von 1,9 bis 16,6 l/s. Bei den Krineggquellen liegt die mittlere Schüttung bei 3,7 l/s bzw. 0,2 bis 8,4 l/s. Demnach weisen die Quellen sehr geringe Schüttungsquotienten (Verhältnis Höchstschüttung zu Niedrigstschüttung) von 0,03 (Krineggguellen) bis 0,1 (Hocheggguellen) auf. Das spricht für ein geringes Retentionsvermögen und ein schnelles Leerlaufen des Aguifers und ist vergleichbar mit Werten bei Karstquellen. Auf Basis einer plausiblen Grundwasserneubildung von rund 500 mm wird für die Hocheggquellen eine Einzugsgebietsfläche von 0,38 km² und für die Krineggquellen 0,24 km² angenommen (Einzugsgebietsfläche = Mittlere jährliche Abflussfracht/Grundwasserneubildung).

## 5.4 Niederschlag-Abfluss-Modellierung (D. ELSTER)

## 5.4.1 Methodik

Zum Verständnis der Dynamik des Oberflächenabflusses an den genannten Gerinnen, siehe Kapitel 5.1, wurde ein Niederschlag-Abfluss-Modell mit den Komponenten Schneespeicher, Bodenspeicher, Gebietsspeicher und Einfluss durch benachbarte Einzugsgebiete erstellt. Hierfür wurde das auch im alpinen Raum bewährte Modell GR4J auf Tagesbasis von PERRIN et al. (2003) gewählt. Die Durchführung erfolgte mit dem airGRteaching package basierend auf der Programmiersprache R (DELAIGUE et al., 2018, 2022). Für die Eingangsparameter Niederschlag, Schneewasseräquivalent und Evapotranspiration wurden die Eingangsdaten, beschrieben in Kapitel 4, verwendet, ein ergänzendes Schneemodul kam deshalb für die Modellierung nicht zum Einsatz. Die frei kalibrierbaren Parameter umfassen die maximale Kapazität des Bodenspeichers, den Wasseraustauschkoeffizienten, die maximale Kapazität des Gebietsspeichers und die zeitliche Verzögerung zwischen Niederschlagsereignis und Abfluss. Für die Kalibrierung wurden neben dem visuellen Fit das Kling-Gupta Effizienzkriterium (KGE) berücksichtigt (GUPTA et al., 2009).

## 5.4.2 Ergebnisse und Interpretation

Die Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung liefern zufriedenstellende Ergebnisse, wobei auf milde Winterbedingungen im Untersuchungszeitraum 11/2019 bis 12/2020 hinzuweisen ist (Kapitel 4.5). Die KGE-Werte liegen zwischen 0,63 und 0,83, wobei ein KGE von 1 einem perfekten Fit entsprechen würde und Werte über 0,5 grundsätzlich anzustreben sind (ROGELIS et al., 2016; KNOBEN et al., 2019). Die Jahresbilanz zwischen dem gemessenen und modellierten spezifischen Abfluss liegt im Beobachtungszeitraum bei 100 bis 104 % und die Dynamik von Spitzenabfluss und Basisabfluss (Abb. 31) wird in der Regel plausibel abgebildet. Allerdings können die Abweichungen in absoluten Zahlen auf kürzeren Zeiträumen bis Monatsbasis erheblich sein und es empfiehlt sich eine Auswertung der Wasserbilanz für die Klimaszenarien und den Zeitraum 1996-2020 für robuste Aussagen auf Jahresbasis (Kapitel 5.5.1, 5.5.2).



## 5.5 Wasserbilanz

(D. ELSTER, R. HOLZSCHUSTER & M. KRALIK)

# 5.5.1 Untersuchungszeitraum und Zeitraum 1996 bis 2020

(D. ELSTER, R. HOLZSCHUSTER & M. KRALIK)

Im Untersuchungszeitraum 2020 lag der Niederschlag im Bereich der Subeinzugsgebiete (Abb. 24) bei rund 2.500 mm. Die Evapotranspiration betrug 807 mm bzw. 32 % vom Jahresniederschlag, der Oberflächenabfluss 1.350 mm bzw. 54 % und die Veränderung des Grundwasserspeichers +332 mm bzw. 13 %. Im Untersuchungszeitraum traten im Vergleich zum Zeitraum 1996 bis 2020 hohe Niederschlagssummen im Februar und Juni auf, sowie geringe im April und November (HOLZSCHUSTER, 2022). Bedingt durch den milden Winter lag das vorübergehend in der Schneedecke gebundene Wasser bei lediglich rund 15 %. Diese Klimaverhältnisse spiegeln sich bei der Veränderung des Grundwasserspeichers wider, so kam es im Winter zu einer Anreicherung des Grundwasserspeichers und im April und Mai zu einem Auslaufen (Tab. 9). Wechselnde Bedingungen führten zu einer geringen Anreicherung von Juni bis September. Der November trat bedingt durch den geringen Niederschlag ein Auslaufen auf, gefolgt von einer erneuten Anreicherung im Dezember.

Im Zeitraum 1996 bis 2020 betrug der Niederschlag durchschnittlich 2.640  $\pm$  341 mm (Abb. 32). In den besonders niederschlagsreichen Jahren 1999, 2012 und 2017 wurden Jahresniederschläge von über 3.000 mm und in den niederschlagsarmen Jahren 2003 und 2018 Werte um 2.000 mm nachgewiesen. Die Evapotranspiration beträgt durchschnittlich 773  $\pm$  35 mm, das entspricht rund 30  $\pm$  5 % vom Jahresniederschlag. Für die niederschlags-

reichen Jahre ist eine niedrigere Verdunstung (21-26 %) typisch und in trockenen Jahren treten Werte um 46 % auf. Der auf Basis der Niederschlag-Abfluss-Modellierung berechnete Oberflächenabfluss lag durchschnittlich bei 1.455 ± 280 mm, das entspricht 55 ± 4 % vom Jahresniederschlag. In den feuchten Jahren lagen Werte von über 60 % vor und in den niederschlagsarmen Jahren Werte um 45 %. Die jährliche Änderung des Grundwasserspeichers liegt durchschnittlich bei +412 ± 86 mm, das entspricht 15 ± 2 % vom Niederschlag. In den feuchten Jahren lagen die Werte bei über +500 mm (15-20 %) und in den trockenen Jahren lediglich bei ca. +200 mm (ca. 10 %). Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Untersuchungszeitraum durch zufällige Ausreißer charakterisiert wird, siehe auch Kapitel 4.5. Der nicht-parametrische Mann-Kendall-Test zeigt zudem auf, dass bei der Änderung des Grundwasserspeichers keine Trends vorliegen.

## 5.5.2 Klimaszenarien

## (D. ELSTER)

In Abbildung 33 wird die jährliche Veränderung des Grundwasserspeichers auf Grundlage der Klimaszenarien und der Niederschlag-Abfluss-Modellierung beschrieben. Hierbei wurden analog zu Kapitel 4.6 die repräsentativen Läufe der RCP-Szenarien berücksichtigt (Lauf 14 für 2.6, Lauf 15 für 4.5 und Lauf 13 für 8.5). Zusätzlich zeigt der in Abbildung 33 dargestellte Differenzbereich die Unterschiede der extremsten Läufe auf (Lauf 11 und 9 innerhalb von RCP 8.5). Der nicht-parametrische Mann-Kendall-Test belegt, dass bei den RCP-Szenarien 2.6 und 4.5 ab 2020 bis 2099 keine Trends vorliegen, hingegen ist bei RCP 8.5 von einer signifikanten Abnahme ( $\alpha = 0,01$ ) des Grundwasserspeichers auszugehen. Noch signifikanter ist der

Veränderung des	Jan.	Feb.	Mär.	Apr.	Mai.	Jun	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
im Jahr 2020 (mm/Monat)	105	164	9	-53	-17	39	-87	77	2	16	-59	136

Tab. 9.

Veränderung des Grundwasserspeichers im Jahr 2020.



negative Trend ( $\alpha = 0,001$ ) bei dem niederschlagärmsten Lauf RCP 8.5 11, hier liegt die Änderung des Grundwasserspeichers teilweise im negativen Bereich, das würde theoretisch einem Auslaufen des jährlichen Grundwasserspeichers entsprechen. Bedingt durch die erheblichen Jahresschwankungen, die Standardabweichung von den Medianwerten liegt bei RCP 8.5 11 bei 72 % und bei den weiteren Läufen um 25 %, sind die absoluten Zahlen grundsätzlich mit Vorsicht zu genießen und sollten nicht überinterpretiert werden. Abschließend ist erwähnenswert, dass bei dem niederschlagsreichsten Lauf 9 in RCP 8.5 kein Trend vorliegt.



## 5.6 Infiltrationsbedingungen im Bereich der Eisseesedimente und deren oberflächennahe Entwässerung

(C. BISPING, D. ELSTER & M. KRALIK)

## 5.6.1 Methodik

Zur Abschätzung der jährlichen vertikalen Infiltrationsraten im Bereich der Eisseesedimente wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für "Soil Physics and Rural Water Management" (BOKU) die H<sub>2</sub>O(liquid)-H<sub>2</sub>O(vapor) Porenwasser Equilibrations-Methode zur Messung der  $\delta^{18}$ O- und  $\delta^{2}$ H-Werte im Porenwasser angewandt, siehe für die Methodenbeschreibung WASSENAAR et al. (2008) und BISPING (2023). Darauf aufbauend wurden die Grundwasserneubildungsraten mit der Peak-Shift-Methode nach BOUMAIZA et al. (2020) abgeschätzt. Die Untersuchungen erfolgten an Probenmaterial von abgeteuften Kernbohrungen und Handbohrungen:

- 1. Im November 2020 wurden zwei Rotationskernbohrungen (KB1-2020 und KB2-2020) durch die Plankel Bohrungen GmbH im Bereich der Eisseesedimente auf 18.5 und 20 m abgeteuft (Abb. 24). Es erfolgte die Beschreibung der Bohrkerne sowie die repräsentative Probenahme des Bohrkernmaterials (HOLZSCHUSTER, 2022). Nach Entfernung der obersten 1-2 cm der Bohrkernränder wurden repräsentative Kernproben (100-200 g) entnommen und luftdicht verpackt. Zunächst erfolgte eine Probenahme pro 10 cm, nach 100 cm eine Probe pro Laufmeter. Weiters wurden an dem Material Untersuchungen zu den Korngrößenverteilungen nach der ÖNORM B 4401 und kf-Wert Bestimmungen nach BEYER (1964) und BIAŁAS & KLECZKOWSKI (1970) durchgeführt. An dem ausgebauten Pegel KB1-2020 wurde zudem ein Grundwassermonitoring umgesetzt.
- 2. Im September 2021 erfolgte zusätzlich die Durchführung von neun Handbohrungen bis auf eine Tiefe von 2 m. Hierbei handelte es sich um Pürckhauer-Kernsondierungen und Probenmaterial wurde alle 10 cm entnommen (BISPING, 2023). Die Standortauswahl erfolgte auf Grundlage von großflächig durchgeführten bodengestützten elektromagnetischen Messungen (Messsystem CMD-Explorer der Firma GF Instruments), siehe JARITZ et al. (2022) für Details. Das Ziel dieser Messungen war, über die Korrelation mit den erwähnten Handbohrungen einen Zusammenhang zwischen spezifischem elektrischem Widerstand und Feinkornanteil bis zu Teufen von maximal 4 m herzustellen.

Im Zuge der sozialwissenschaftlichen Erhebungen (Kapitel 2) bekundete die Bevölkerung großes Interesse an der Evaluierung der bestehenden Dränsysteme im Bereich der weidewirtschaftlich genutzten Flächen. Um Aussagen zu deren Rahmenbedingungen und Funktionstüchtigkeit treffen zu können, wurden von BISPING (2023) im Zuge einer Masterarbeit (Universität Wien) in enger Kooperation mit dem Institut für Bodenphysik und landeskulturelle Wasserwirtschaft der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) ergänzende Untersuchungen durchgeführt. Diese umfassten im Wesentlichen Drainkartierungen an ausgewählten Flächen in Zusammenarbeit mit den Landwirten (siehe "Drainage Walks" in Kapitel 2.3.3), Infiltrationsversuche (Doppelringinfiltrometer-Versuche nach DIN 19682-7, die Bohrlochmethode nach DIN 19682-8 und die umgekehrte Bohrlochmethode nach AMOOZEGAR & WARRICK, 1986).

## 5.6.2 Ergebnisse und Interpretation

Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, werden die Wiesen im Bereich der Eisseesedimente vorwiegend für die Viehwirtschaft genutzt. In der Regel findet eine großflächige seichte Entwässerung der Flächen statt, die viele Jahrzehnte Entwicklungsgeschichte aufweist und dementsprechend unterschiedlich beschaffen ist. Der Gemeinde liegen grundsätzlich detaillierte Pläne der Drainagen vor, es handelt sich um ein dichtes Netz von engmaschigen seichten Drainagen bis maximal 2 m unter GOK. Leider können die Kartendarstellungen im Rahmen dieser Publikation nicht abgebildet werden, Abbildung 34 bietet jedoch einen Überblick zu den drainierten Flächen und ergänzenden Untersuchungen von BISPING (2023). Das Interesse der Landwirte besteht grundsätzlich darin, die Wiesen trocken zu halten, um den Ertrag von Nutzpflanzen (insbesondere Heu für Tierfutter) zu steigern.

Bei den Böden im Bereich der Eisseesedimente handelt es sich nach Feldansprachen und Abgleich mit der österreichischen Bodenkarte (BFW, 2022) vorwiegend um Hanggley-Haftwasserpseudogleye, die aufgrund des ton- und schluffreichen Untergrunds grundsätzlich stauend wirken (BISPING, 2023). Es ist davon auszugehen, dass sich das Sickerwasser bei zunehmender Hangneigung oberflächennahe als Zwischenabfluss (Interflow) hangabwärts bewegt.

Die Ergebnisse der H<sub>2</sub>O(liquid)-H<sub>2</sub>O(vapor) Porenwasser Equilibrationsmethode belegen bei den Kernbohrungen KB1-2020 und KB2-2020 eine signifikante Variation der  $\delta^{18}$ O-Messwerte (5–6 ‰) oberhalb von 5–6 m Tiefe. Unterhalb dieser Tiefe sind bei beiden Bohrungen die Werte konstanter mit einem Median von -9,9 ‰ bei KB1-2020 und -10,7 ‰ bei KB2-2020. Bis zu einer Tiefe von 4-6 m liegt der Wassergehalt bei den Bohrungen bei 73-110 %. In größeren Tiefen kommt es zu einer deutlichen Abnahme, so liegt bei KB1-2020 der Median bei 9 % und bei KB2-2020 bei 19 %. Daraus folgt, dass der jährliche vertikale Wassertransport erhebliche 1 bis 6 m sein kann, bevor der Porenwassergehalt gut gemischt ist. Auch die Ergebnisse der Peak Shift Methode belegen diese Größenordnung, hier wurden Infiltrationsraten zwischen 2,46 und 5,25 mm/Tag bestimmt. Die unterschiedlichen  $\delta^{18}$ O- und δ<sup>2</sup>H-Werte in den Porenwässern der beiden Bohrungen legen den Schluss nahe, dass KB2-2020 einen größeren Anteil des im höheren Flysch abgeregneten Niederschlags enthält. Dieser kann entweder in geringer Tiefe hangparallel oder durch größere Tiefe durch aufsteigende Wässer erfolgt sein. Bei den Porenwässern handelt es sich um eine Mischung zwischen jahreszeitlich abhängiger Verdunstung (Juni:  $\delta^{18}$ O ca. -5 ‰) und rasch im hochgelegenen Flyschbereich versickernden Grundwässern (δ<sup>18</sup>O ca. -11 ‰). Grundsätzlich bestätigen die analog zu den Kernbohrungen durchgeführten Untersuchungen an den Handbohrungen die Ergebnisse. So wurde eine tiefenabhängige Variation der δ<sup>18</sup>O-Messwerte festgestellt, diese liegen zwischen -10,75 und -4,63 ‰.

Weitere Untersuchungen zur Bestimmung der Durchlässigkeiten im Bereich der Eisseesedimente mit unterschiedlichen Methoden zeigen auf, siehe Tabelle 10, dass die



Abb. 34.

Überblick zu den drainierten Flächen im Untersuchungsgebiet, ausgewählten Flächen für Drainkartierungen von BISPING (2023), Standorte von durchgeführten Handbohrungen und Infiltrationsversuchen.

kf-Werte in der Regel zwischen 10<sup>-5</sup> und 10<sup>-8</sup> m/s variieren. Grobklastische silt-sandige Kieslagen weisen deutlich bessere Durchlässigkeiten um 10<sup>-4</sup> m/s auf und dichte tonige Silt- bis Siltton-Ablagerungen haben deutlich geringere Werte in der Größenordnung von 10<sup>-9</sup> bis 10<sup>-12</sup> m/s. Höhere Werte wurden mit den Doppelringinfiltrometerversuchen bei den ersten cm des Bodens festgestellt. Es ist anzunehmen, dass Sickerwasser an Schichtwechseln zu undurchlässigeren Schichten gestaut wird und sich innerhalb der Humusschicht bevorzugt horizontal talwärts bewegt (BISPING, 2023).

In Zusammenarbeit mit Landwirten wurden bestehende Dränsysteme auf deren Funktionstüchtigkeit überprüft, die Untersuchungen fanden an vier ausgewählten Wiesen mit Flächen von jeweils ca. 0,02 bis 0,11 km<sup>2</sup> statt (Abb. 34). Laut den Landwirten treten fast jährlich Vernässungen auf, die auf Probleme mit den Drainagen zurückzuführen sind. Meist kommt es zu Verstopfungen innerhalb der Rohre oder die Drainagen werden durch die Hangbewegung abgerissen oder beschädigt. Die bestehenden Drainagesysteme sind in der Regel über viele Jahrzehnte erstellt, saniert und erweitert worden. Dementsprechend

Methode	kf-Werte (m/s)	Anmerkung
Doppelringinfiltrometerversuche	2E-04 bis 7E-08 Mittelwert 3E-05	13 Versuche
Umgekehrte Bohrlochmethode	1E-06 bis 1E-08 Mittelwert 3E-07	6 Versuche
Kernbohrung KB1-2020	5E-06 bis 1E-09 Mittelwert 6E-07	Auswertung nach Beyer, 9 Teufenbereiche von 0 bis 12,5 m
	7E-04 bis 8E-09 Mittelwert 8E-05	Auswertung nach Białas, 9 Teufenbereiche von 0 bis 12,5 m
Kernbohrung KB2-2020	3E-08 bis 1E-11 Mittelwert 1E-08	Auswertung nach Beyer, 5 Teufenbereiche von 0,5 bis 16,7 m
	4E-08 bis 7E-12 Mittelwert 1E-08	Auswertung nach Białas, 5 Teufenbereiche von 0,5 bis 16,7 m
Substratkonzeptkarten nach TILCH et al. (2022)	1E-05 bis 1E-08 zumeist 1E-06 bis 1E-08	Basiert auf aeroradiometrisch basierten Substrat-Konzeptkarten und deren Validie- rung mittels Bodenradiometrie
H <sub>2</sub> O(liquid)-H <sub>2</sub> O(vapor) Porenwasser Equili- brations-Methode	2E-07 bis 3E-08	Basiert auf Kern- und Handbohrungen

Tab. 10.

Durchlässigkeiten des Bodens und der Eisseesedimente im Bereich der landwirtschaftlich genutzten Flächen, Übersicht zu den kf-Werten nach angewandten Methoden (BEYER, 1964; BIAŁAS & KLECZKOWSKI, 1970).



Abb. 35. Ergebnisse der  $H_2O(li-quid)-H_2O(vapor)$  Porenwasser Equilibrationsmethode bei den Kernbohrungen KB1-2020 und KB2-2020 sowie bei den Handbohrungen.

entwickelten sie sich kontinuierlich über viele Jahre und die Ausführung erfolgte mit unterschiedlichen Rohrmaterialien (historisch: Gräben mit Füllung aus Ästen und Reisig, später Ton-, dann Kunststoffrohre, jeweils verlegt in mit Kies verfüllten Gräben; für Details und Dimensionen siehe BISPING, 2023).

Die Ergebnisse der Versickerungsversuche und Handbohrungen von BISPING (2023) zeigen auf, dass in der Regel kein Grundwasser von den Drainagen erfasst wird. Ein funktionierendes Drainagesystem muss deshalb in der Lage sein, stauendes Hangwasser bis in Tiefen von rund 25 cm effektiv abzuführen. Bei den gegebenen schlecht durchlässigen Bodenbedingungen stellt die Grabenentwässerung zweifelsohne die effektivste Lösung dar (Abb. 36a). Diese kommt teilweise auch zum Einsatz und Gräben sind bei den untersuchten Wiesen zumeist bis 80 cm mit einer Schotterpackung und einer Humusbedeckung ausgeführt. Eine Ausnahme stellt eine Wiese südöstlich von Mähmoos dar, hier wurde im Jahr 2018 von der WLV eine Grabenentwässerung ausgeführt, die weniger, aber deutlich größer dimensionierte Stränge bis 2,5 m Tiefe aufweist, um schnell auftretende große Wassermassen zuverlässig abzuführen.

Bei der gegebenen Hangwasserproblematik ist die Geländeneigung für die erfolgreiche Dränung zu berücksichtigen und die Dränabstände müssen entsprechend angepasst werden. Im Untersuchungsgebiet treten Geländeneigungen ab ca. 1 % auf, wobei 8 % oder größer in 50 % der drainierten Flächen vertreten sind. Im Bereich der Terrasse mit den untersuchten Wiesen liegen sie größtenteils im Bereich zwischen 4 und 12 %. ÖNORM B 2581 bietet einen Überblick von anzustrebenden Dränabständen bei unterschiedlichem Oberflächengefälle bis 8 %. Demnach sollten im flacheren Gelände engere Dränabstände und im steileren Terrain weitere Abstände gewählt werden (Abb. 36b). Die Dränabstände nach ÖNORM B 2581 werden auf den untersuchten Wiesen weit unterschritten (ca. Faktor 10).

Im Untersuchungsgebiet besteht die gängige Praxis, Grabenfilter aus Kies mit Humus zu bedecken, um den Verlust an landwirtschaftlich nutzbarer Fläche möglichst zu reduzieren. Ausschließlich mit Kies verfüllte Gräben führen zudem zu Problemen bei Mäharbeiten. Jedoch besteht insbesondere im Fall der vorliegenden Hanggley-Haftwasserpseudogleye Gefahr durch mechanische Bodenverdichtung, somit kann eine Verdichtung der Humusauflage die Effektivität der Dränsysteme drastisch reduzieren.

Grundsätzlich sollten bodenverbessernde Maßnahmen in Betracht gezogen werden, um eine nachhaltige Lockerung des Bodens zu erreichen. Abgesehen von der Reduktion von Radlasten und Viehtritt wären Kalkung und Maulwurfdränung sinnvolle methodische Ansätze zur Gefügeverbesserung (BISPING, 2023). Diese Maßnahmen wurden der Bevölkerung im Rahmen einer Informationsveranstaltung zu den Projektergebnissen vorgestellt.



Abb. 36.



## 5.7 Hydrogeologische Konzeptvorstellung

(D. Elster, M. Kralik, W. Jaritz, V. Turewicz & R. Holzschuster)

In diesem Kapitel soll auf die konzeptionelle hydrogeologische Modellvorstellung für das Untersuchungsgebiet eingegangen werden, welches die Ergebnisse und Interpretationen aus den vorangehenden Kapiteln zu Geologie, Geophysik, geologischer 3D-Modellierung, Klima und Hydrogeologie zusammenführt. Das Untersuchungsgebiet befindet sich am Nordrand der Kalkalpen in einer Seehöhe von rund 800 bis 1.400 m und umfasst rund 5 km<sup>2</sup>. Das Gebiet ist annähernd orografisch begrenzt und orientiert sich an die Sub-Einzugsgebiete Mähmoosgraben (Wiesalegraben), Nestgraben, Dorfgraben (Tobelbach) und Sägebach im Norden und Nordosten sowie an die Vorfluter Subersach und Rubach im Süden und Südwesten (Abb. 24).

Im nördlichen und nordwestlichen Hangbereich des Untersuchungsgebiets treten anstehende Gesteine des Rhenodanubischen Flyschs auf und im nordöstlichen Hangbereich Gesteine der Feuerstätter Decke (Kapitel 3.1). Der Rhenodanubische Flysch weist lokal Quarz-Glimmersandsteine (Reiselsberger Sandstein) sowie dünnbankige Kalke, Mergelkalke und Schluffkalke (Piesenkopf-Schichten) und nur randlich im Norden grobkörnige Kalksandsteine (Hallritzer Serie) auf. Einheiten mit Kalkkomponenten (Piesenkopf-Schichten und Hallritzer Serie) treten somit ausschließlich am nördlichen Kamm auf und im nordöstlichen Bereich dominieren hingegen Sandsteine (Reiselsberger Sandstein). Die Feuerstätter Decke umfasst lokal ausschließlich massigen Glaukonitsandstein. Für die genannten Einheiten sind grundsätzlich niedrige Durchlässigkeiten mit kf-Werten der Größenordnung 10-8 m/s zu erwarten und es ist von einer bevorzugten oberflächennahen Entwässerung abhängig von der Hangneigung auszugehen. Die Deckengrenze Rhenodanubischer Flysch/Feuerstätter Decke verläuft SW-NE streichend im Bereich des Sägebachs und folgt diesem Verlauf auch im Untergrund des Beckens von Sibratsgfäll. Die tektonischen Verhältnisse dürften die Wegigkeiten des Grundwassers insbesondere im Einzugsgebiet des Sägebachs beeinflussen. So ist aufgrund der hohen Schüttungen der für die Wasserversorgung genutzten Quellen und des Sägebachs das hydrologische Einzugsgebiet um zumindest 30 % größer als das orografische Einzugsgebiet einzuschätzen.

Das Becken von Sibratsgfäll weist mächtige Ablagerungen von eiszeitlichen Lockersedimenten auf, die unterschiedliche hydraulische Eigenschaften aufweisen. Deren komplexe Zusammensetzung ist auf ein glazial beeinflusstes Ablagerungsmilieu zurückzuführen, so führten wechselnde Sedimentationsbedingungen in der letzten Eiszeit zu starken Variationen in Mächtigkeit, Verteilung und Verzahnung der Ablagerungen (Kapitel 3.3). Mit geophysikalischen Methoden wurde im Rahmen des Projekts nachgewiesen (Kapitel 3.2), dass die Sedimente im zentralen Bereich des Beckens eine Mächtigkeit von 200 bis 250 m erreichen, wobei das Untergrundrelief Vertiefungen und Erhebungen im Zehnermeter-Bereich aufweist und eine scharfe Abgrenzung zum Untergrund nicht eruiert werden konnte. Das Becken ist in folgende Bereiche zu differenzieren:

- i. Im Zuge der Vorstoßphase des Gletschers im Würm wurden grobklastische Sand-Kies-Gemische (grobklastische Ablagerungen im 3D-Modell) mit einer Mächtigkeit von bereichsweise über 150 m an der Beckenbasis abgelagert (Kapitel 3.3). Diese Ablagerungen sind im Untersuchungsgebiet ausschließlich mit den Bohrungen KB1/03 und KB1/07 bei Mähmoos aufgeschlossen und aufgrund der relativ groben und homogenen Korngrößenverteilung ist dieser Einheit eine gute Durchlässigkeit mit kf-Werten von 10<sup>-4</sup> bis 10<sup>-6</sup> m/s zuzusprechen.
- ii. Über den grobklastischen Ablagerungen treten Eisseesedimente mit einer Mächtigkeit von bis zu 50 m auf (Kapitel 3.1 und 3.3), die aufgrund des hohen Matrixanteils der Ton-Schluff-Feinsand-Fraktion eine grundsätzlich schlechte Durchlässigkeit mit kf-Werten in der Größenordnung < 10<sup>-8</sup> m/s aufweisen. Allerdings treten auch grobklastischere Lagen (Feinsand-Sand-Fraktion) innerhalb der Eisseesedimente auf, die zumindest lateral zu einer höheren Durchlässigkeit führen können. Aufgrund deren Geringmächtigkeit (meist weniger als 1 m) und anzunehmender Kleinräumigkeit ist eine Erfassung mit geophysikalischen Methoden nicht möglich. Das gilt auch für mögliche Verbindungswege dieser Horizonte. Da die Eisseesedimente mit zahlreichen Bohrungen durchörtert wurden, darunter auch mit den Kernbohrungen KB1-2020 und KB2-2020 (Kapitel 5.6), sind diese grobklastischen Lagen jedoch in zahlreichen Bohrprofilen dokumentiert. Bei der geologischen 3D-Modellierung (Kapitel 3.3) werden die Eisseesedi-

mente vereinfacht als homogene grundwasserhemmende Einheit betrachtet, da detaillierte Geometrien nicht bekannt sind. Zusätzlich sind die Eisseesedimente durch langsame Hangbewegungen in ihrer internen Ablagerungsstruktur gestört.

iii. Am nördlichen Beckenrand verzahnen sich unterschiedliche Sedimentablagerungen, insbesondere matrixreiche und gemischtkörnige Eisrandsedimente mit Schwemmfächerablagerungen (inklusive Wildbachablagerungen und Murstoßablagerungen), siehe dazu Kapitel 3.3 bzw. grobklastische Eisrandterrassen im 3D-Modell. In diesem Bereich liegen stark wechselnde feinkörnige und grobkörnige Ablagerungen (Sand-Kies-Gemische) vor, die zu unterschiedlichen Durchlässigkeitsverhältnissen führen. Bedingt durch die kleinräumige Komplexität, die mit den vorhandenen Informationen aus Geophysik und Bohrprofilen nicht aufzulösen ist, wurde dieser Verzahnungsbereich im 3D-Modell vereinfacht und konzeptionell dargestellt. So orientiert sich die zugeordnete Durchlässigkeit in der Größenordnung von 10<sup>-7</sup> m/s an der Mischung der genannten Ablagerungen (Kapitel 3.3). Über dem Beckenrand bzw. geringmächtige grobklastische Lagen alimentieren Hang- und seichte Grundwässer in tiefere Beckenbereiche. Bedingt durch die grundwasserhemmenden Eisseesedimente steht das tiefere Grundwasser der Vorstoßschotter und der Randzone dementsprechend unter hydrostatischem Druck und es liegen gespannte bis artesische Verhältnisse vor, z.B. Arteser KB1/03 bis 20 m über Geländeoberfläche, die im zentralen Beckenbereich zunehmen dürften.

Untersuchungen zur mittleren Verweilzeit an den artesischen und gespannten Grundwässern der Vorstoßschotter und der Randzone zeigten, dass Grundwasseralter von mindestens 30 bis 40 Jahren vorliegen und alte Grundwasserkomponenten mit einem Alter von zumindest einigen hundert Jahren beteiligt sind, siehe KRALIK (2022) und Kapitel 5.2.2. Zudem belegen Sauerstoff-18-Werte, dass das Einzugsgebiet der Wässer zwischen 1.200 und 1.400 m liegen muss. Da die Wassertemperaturen der tieferen Grundwässer 2,5 bis 3 °C über den Jahresdurchschnittstemperaturen von Sibratsgfäll (ca. 7 °C, HOLZSCHUSTER, 2022) liegen, ist unter Annahme des durchschnittlichen geothermischen Gradienten von 3 °C pro 100 m eine Beteiligung von tiefer zirkulierenden Wässern aus dem Seehöhenbereich der Beckenbasis um 700 m oder tiefer wahrscheinlich. Aufgrund der ungewöhnlich hohen Wasseralter und der erhöhten Wassertemperaturen ist ein tieferer Zufluss über Klüfte im Festgestein des Rhenodanubischen Flyschs und der Feuerstätter Decke anzunehmen, dieser Prozess wird in der Literatur als "Mountain-Block Recharge" (MBR) beschrieben und ist bei vergleichbaren hydrogeologischen Settings bekannt (MARKOVICH et al., 2019). Der guantitative Beitrag von MBR ist allerdings aufgrund nicht bestimmbarer Endglieder für eine Mischungsberechnung nur mit erheblichen Unsicherheiten abzuschätzen. Über die Tritiumwerte der artesischen und gespannten Wässer ist jedoch zu erwarten, dass die ältere Grundwasserkomponente die vermutlich mit MBR zu assoziieren ist - zumindest rund 30 % ausmacht. Das Druckmonitoring bei der artesischen Bohrung KB1/03 weist zudem äußerst geringe Variationen auf, das spricht für relativ stagnierende Bedingungen. Bei dem Pegel KB7-07 im Bereich der Randzone, dort herrschen am Beckenrand verzahnte Einheiten und gespannte Bedingungen vor, ist hingegen bereits ein saisonal geprägtes Druckverhalten erkennbar.

Hydrochemisch lassen sich die gänzlich akratisch mineralisierten Grundwässer (0,17-0,51 g/l) über die Anteile von Kalzium und Magnesium differenzieren (Kapitel 5.2). So weist das Quellwasser der Hocheggguellen einen Kalzium-Magnesium-Hydrogencarbonat-Typ auf, diese Mineralisierung ist auf Sandsteine des Rhenodanubischen Flyschs (Reiselsberger Sandstein) zurückzuführen. Das Quellwasser der Krineggquellen zeigt hingegen einen Kalzium-Hydrogencarbonat-Typ, diese Mineralisierung ist mit der Kalkführung im Einzugsgebiet (Piesenkopf-Schichten und Hallritzer Serie) zu assoziieren. Die gespannten tieferen Wässer im Becken zeigen ebenfalls eine Mineralisierung vom Typ Kalzium-Magnesium-Hydrogencarbonat mit leicht erhöhten Natrium- und Sulfatgehalten sowie Ionensummen im Vergleich zu den Hocheggquellen. Der Sauerstoffgehalt ist zudem abgereichert und es herrschen reduzierende Bedingungen. Es liegt deshalb die Vermutung nahe, dass ein Zufluss inklusive MBR über Sandstein dominierte Einheiten im Rhenodanubischen Flysch und der Feuerstätter Decke über viele Jahre erheblich zur Mineralisierung der Wässer beiträgt.

Natürliche Quellaustritte von oberflächennahen Grundwässern im Bereich der Eisseesedimente, die zumeist mit seichtliegenden Drainagen (maximal 2 m unter GOK) zusätzlich erfasst werden, weisen in der Regel eine kurze Verweilzeit von 0,5 bis 0,6 Jahren auf und sehr junge Grundwasserkomponenten von wenigen Tagen konnten, abgesehen von einer Ausnahme (Drainage/Quelle 216), nicht nachgewiesen werden, siehe KRALIK (2022). Die dynamischen Signaturen von Sauerstoff-18 lassen eine genaue Höheneinstufung nicht zu, dürften aber von einem Einzugsgebiet unter 1.200 m stammen. Bei der Kernbohrung KB1-2020 wurde zudem in einer Tiefe von rund 7 bis 9 m unter GOK in grobklastischen Ablagerungen innerhalb der Eisseesedimente gespanntes Grundwasser angetroffen, bei dem es sich um eine Mischung aus aufsteigendem tieferen Grundwasser und jüngerem lateral zufließenden oberflächennahen Grundwasser aus größeren Höhen handelt. Das Monitoring des Druckspiegels des gespannten Grundwassers belegt zudem eine sehr schnelle Reaktionen auf Niederschlagsereignisse, normalerweise binnen 24 Stunden.

Die Wasserbilanz (Niederschlag = Oberflächenabfluss + Evapotranspiration ± Änderung des Speichervolumens), siehe dazu Kapitel 5.5, wurde für November 2019 bis Dezember 2020 berechnet, in diesem Untersuchungszeitraum wurde ein Monitoring des Oberflächenabflusses implementiert, siehe HOLZSCHUSTER (2022) und Kapitel 5.3. Die Zahlen auf Basis mm bzw. l/m<sup>2</sup> beziehen sich nicht auf das gesamte Untersuchungsgebiet, sondern gelten für die Subeinzugsgebiete der Hauptgerinne über den Radar-Messstationen (siehe Abflussmonitoring-Stationen Sägebach, Dorfgraben, Nestgraben und Mähmoosgraben sowie deren Subeinzugsgebiete in Abbildung 24). Diese Fläche entspricht in der konzeptionellen Vorstellung im Wesentlichen dem Recharge-Bereich für das Becken von Sibratsgfäll und umfasst 1) den Verzahnungsbereich von Eisrandsedimenten und Schwemmfächerablagerungen und 2) den Rhenodanubischen Flysch sowie die Feuerstätter Decke bis zur Begrenzung des Einzugsgebietes

im Norden und Nordosten. Im Bereich der grundwasserhemmenden Eisseesedimente sind hingegen ausschließlich ein oberflächennaher Abfluss und aufsteigende tiefere Grundwässer zu erwarten (Abb. 37). Im Bereich des Talkörpers bzw. der Eisseesedimente kommt es zu einer grundsätzlich oberflächennahen Entwässerung, die durch das dichte Netz an seichten oberflächennahen Drainagen beschleunigt wird (BISPING, 2023). Salztracerversuche an den Bächen Subersach und Rubach entlang der Begrenzung des Untersuchungsgebiets im Sommer 2020 bei Mittelwasser und Winter 2020 bei Basisabfluss zeigten, dass es zu diffusen Zutritten aus dem Talkörper in die beiden Vorfluter kommen dürfte. Unter diffusen Zutritten verstehen die Autoren oberflächennahe Grundwasserzutritte und aufsteigende Grundwässer aus dem gespannten Grundwasserkörper der Vorstoßschotter, die gehemmt und mit großer zeitlicher Verzögerung durch die Eisseesedimente an der Talsohle auf Niveau des Vorfluters austreten. Hinzu kommen geringe Mengen an Oberflächenwässern, die bei Begehungen nicht erfasst werden konnten. Bedingt durch analytische Unsicherheiten bei den Salztracerversuchen sind die diffusen Zutritte nur mit großen Unsicherheiten zu guantifizieren, sie dürften jedoch die Wasserbilanz im Untersuchungsgebiet größenordnungsmäßig ausgleichen (maximal wenige 100 mm/Jahr), siehe HOLZSCHUS-TER (2022).

- i. Niederschlag (siehe Kapitel 4.2 und HOLZSCHUSTER, 2022): Im Untersuchungsjahr 2020 lag die Niederschlagssumme bei ca. 2.500 mm, dieser Wert liegt leicht unter dem Jahressummen-Median von rund 2.600 mm in den letzten 25 Jahren. Auffällig sind erhöhte Werte im Februar und Juni und vergleichsweise wenig Niederschlag im April und November. Bei der Auswertung des Niederschlags auf Tagesbasis wurde das Schneewasseräquivalent bzw. der Auf- und Abbau der Schneedecke berücksichtigt (Kapitel 4.4). Allerdings war das vorübergehend gebundene Wasser im Untersuchungszeitraum mit rund 15 % sehr gering, dies spricht für einen sehr milden Winter.
- ii. Evapotranspiration (Kapitel 4.3): Die Referenz Evapotranspiration lag im Untersuchungsjahr 2020 bei ca.

800 mm, das entspricht rund 32 % vom Niederschlag. Es sei darauf hingewiesen, dass HOLZSCHUSTER (2022) mit weniger komplexen methodischen Ansätzen hinsichtlich der erforderlichen Eingangsparameter deutlich niedrigere Werte (rund 20 % vom Niederschlag) ermittelte. Diese Ansätze dürften die Evapotranspiration im gegebenen alpinen Setting unterschätzen.

- ii. Oberflächenabfluss (siehe Kapitel 5.3 und HOLZSCHUS-TER, 2022): Der Oberflächenabfluss beträgt im Untersuchungszeitraum 2020 rund 1.300 mm bzw. 52 % vom Niederschlag. Dieser hohe Wert ist auf den dichten Untergrund und auf die Hangneigung im Bereich des Rhenodanubischen Flyschs und der Feuerstätter Decke zurückzuführen. Zudem ist auf deutliche saisonale Unterschiede von 44 % im Winter (90 Tage aggregiert am 28.02.2020) bis 75 % (90 Tage aggregiert am 30.11.2020) im Herbst hinzuweisen. Die Auswertung der Trockenwetterfalllinien belegt zudem ein sehr geringes Rückhaltevermögen, das in der Größenordnung jenen von Karstgebieten ähnelt.
- iv. Änderung des Grundwasserspeichervolumens (Kapitel 5.5): Die Änderung des Grundwasserspeichers ergab im Untersuchungszeitraum einen Zuwachs von rund 330 mm bzw. 16 % vom jährlichen Niederschlag. Es ist anzunehmen, dass diese Menge den Grundwasserkörper der Vorstoßschotter und der Randzone alimentiert und auch untergeordnet laterale geringmächtige grobklastische Lagen innerhalb der Eisseesedimente speist. Analog zum hohen Niederschlag im Februar und dem milden Winter kam es zu einer Anreicherung des Grundwasserspeichers im Winter. Bedingt durch die niedrigen Niederschläge im April und die zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossene Schneeschmelze trat ein deutliches Auslaufen des Grundwasserspeichers im April und Mai ein. Hohe Niederschläge im Juni und August resultierten in einer geringen bis moderaten Anreicherung von Juni bis September. Der November war wiederum bedingt durch den geringen Niederschlag durch ein Auslaufen charakterisiert.





65

2:

der

Grundwasserkör-

Vorstoßschotter.

5: Diffuse

Moun-

Anthropogene Einflüsse dürften nur geringfügige Auswirkungen auf die Wasserbilanz haben, wie die Auswertung des Wasserverbrauchs der Gemeinde Sibratsgfäll zeigt (HOLZSCHUSTER, 2022). Die Gemeinde Sibratsgfäll bezieht ihr Trinkwasser von den gefassten Krineggquellen (3,7 l/s mittlere Schüttung) und Hocheggquellen (6,5 l/s mittlere Schüttung), deren Einzugsgebiete sich im Rhenodanubischen Flysch befinden (Kapitel 5.3). Langjährige Aufzeichnungen der Quellschüttungen durch die Gemeinde belegen, dass die Quellen sehr geringe Schüttungsquotienten (Verhältnis Höchstschüttung zu Niedrigstschüttung) aufweisen, das deutet auf ein geringes Retentionsvermögen und schnelles Leerlaufen des Grundwasserkörpers hin und ist von der Größenordnung mit der Dynamik von Karstquellen vergleichbar. Das noch geringere Rückhaltevermögen der Krineggquellen im Vergleich zu den Hochegg Quellen ist höchstwahrscheinlich auf Verkarstungserscheinungen

## in den Piesenkopf-Schichten zurückzuführen. Die mittlere Verweilzeit liegt bei den Quellen zudem bei 2,0 bis 3,6 Jahren auf Basis der Schätzung der Sauerstoff-18-Amplitude und ganz junge Komponenten von wenigen Tagen, ermittelt mit Radonmessungen, konnten nicht nachgewiesen werden.

Über eine Niederschlag-Abfluss-Modellierung auf Basis der Kalibration im Untersuchungszeitraum November 2019 bis 2020 (Kapitel 5.4) konnten grundlegende Aussagen zur Änderung des Grundwasserspeichervolumens über den Zeitraum 1996 bis 2020 getroffen werden. Der jährliche Mittelwert liegt bei rund 400 mm, in niederschlagsarmen Jahren wie 2003 und 2018 (1.800 bis 2.000 mm) kam es zu einem geringen Zuwachs des Grundwasserspeichers in der Höhe von rund 200 mm. Die niederschlagsreichsten Jahre 1999 und 2017 führten jedoch zu einem deutlichen Anstieg auf über 550 mm.

# 6 Numerische 4D-Modellierung

(V. TUREWICZ)

In diesem Kapitel (Arbeitspaket 6) wird die Entwicklung des numerischen 4D-Modells und darauf basierend die Durchführung verschiedener numerischer Simulationen für das Untersuchungsgebiet beschrieben. Dies beinhaltet zum einen die Überführung der Geometrie vom geologischen 3D-Untergrundmodell (Kapitel 3.3) in das numerische Modell und die Kalibrierung auf Basis des hydrogeologischen Konzepts (Kapitel 5.7). Basierend auf diesem Modell werden in weiterer Folge verschiedene Szenarien des vergangenen (1996–2020), gegenwärtigen und prognostizierten Klimas (analog zu Kapitel 4.6) simuliert.

# 6.1 Methodik

## 6.1.1 Modellaufbau

Für die Entwicklung des numerischen 4D-Modells wurde die Simulationssoftware FEFLOW<sup>™</sup> verwendet. Das Finite-Element Programm ist in der Lage, Grundwasserströmungs- sowie Stoff- und Wärmetransportvorgänge im Grundwasser zu modellieren. Die Berechnungen beruhen dabei auf numerischen Verfahren, die partielle Differentialgleichungen lösen und im gesättigten Bereich auf dem Darcy-Gesetz und der Massenbilanzgleichung basieren (DIERSCH & PERROCHET, 2009). Mithilfe dieses Strömungsmodells werden im stationären und instationären Zustand vor allem Grundwasserfließrichtungen, Grundwasserspiegelhöhen und Bilanzgrößen betrachtet.

In einem ersten Schritt wird dabei das 3D-Untergrundmodell in die Simulationssoftware eingespeist. Hierfür werden die Koordinaten von Datenpunkten des Geländemodells und der Schichtgrenzen in das Programm eingelesen. Darüber hinaus werden auch die Koordinaten der Quellen und Bohrungen hinzugefügt. Die Generierung des Finite-Elemente-Netzes in horizontaler Richtung erfolgt mit einigen Modelleingaben (z.B. Anzahl der Elemente) automatisch. Die Bereiche der Abgrenzungen zwischen den Subeinzugsgebieten und lithologischen bzw. geologischen Einheiten, und die Bereiche der Quellen und Bohrungen, erhalten eine feinere Diskretisierung, da hier eine höhere numerische Genauigkeit erfordert wird (DHI-WASY GmbH, 2022). Nach der automatischen Generierung kann die Qualität des Netzes durch Glättungsverfahren verbessert werden. Das zweidimensionale Netz wird daraufhin mithilfe der Koordinaten der Datenpunkte in vertikaler Richtung fortgesetzt sowie eine unterste Schicht als Basis angefügt, wodurch prismatische Elemente entstehen. Zusätzlich werden für eine feinere vertikale numerische Diskretisierung noch weitere Schichten hinzugefügt.

In einem nächsten Schritt werden die strömungsrelevanten Untergrundparameter wie die Durchlässigkeitsbeiwerte (kf) den geologischen/lithologischen Einheiten in allen Raumrichtungen zugewiesen. Für die restlichen Parameter wie dem spezifischen Speicherkoeffizienten und der Porosität werden die von der Software vorgegebenen Werte verwendet. Standardmäßig werden in FEFLOW<sup>TM</sup> Modellen alle Grenzen als undurchlässig angenommen (DHI-WA-SY GmbH, 2022). Um ein Strömungsmodell, wo Wasser in das Modell hinein und aus dem Modell herausfließen kann, zu erhalten, müssen dem Modell an den Gebietsgrenzen, im Bereich der Quellen und der Grundwasserneubildung Randbedingungen zugeordnet werden.

## 6.1.2 Modellkalibrierung

Die Simulationssoftware FEFLOW<sup>™</sup> ist mit dem Modul FePEST (Parameter Estimator) gekoppelt, das der automatischen Kalibrierung von Grundwassermodellen dient (KAISER, 2005). Hierbei werden Parameter wie der Durchlässigkeitsbeiwert (kf) mithilfe von beispielsweise Grundwasserstandsmessungen geschätzt. Die Parameter können dabei entweder räumlich variabel unter Verwendung von Pilotpunkten oder homogen innerhalb von Zonen kalibriert werden. Die Zonen spiegeln typischerweise unterschiedliche geologische/lithologische Einheiten wider. Eine Parameterschätzung ist bei stationären und instationären Strömungssimulationen möglich. FePEST ermöglicht außerdem eine Kalibrierung des gesamten Modells oder nur von Teilbereichen. Wichtig für den Kalibrierungsprozess sind Beobachtungspegel, die in das Modell eingefügt werden, und an denen gemessene und simulierte Wasserstände verglichen werden. Zusätzlich kann FePEST die Parameter mithilfe von gemessenen Durchflussraten an beispielsweise Quellen kalibrieren.

# 6.2 Geometrie, Untergrundparameter und Randbedingungen

Wie bereits erwähnt, wurde in einem ersten Schritt die Geometrie des 3D-Untergrundmodells in die Simulationssoftware FEFLOW<sup>™</sup> eingespeist. Das Modell umfasst dabei das gesamte Untersuchungsgebiet (Kapitel 3.3). Bei dem hier zu modellierenden Untergrund wird der Fokus auf die Fließverhältnisse des tiefen Grundwasserspeichers der Vorstoßschotter bzw. Grobklastika gelegt. Der Grundwasserkörper weist ein Volumen von ca. 0,13 km<sup>3</sup> auf. Die Basis des Modells wurde im Abstand von etwa 30 m zur Basis des Grundwasserkörpers gewählt. Das Modell umfasst somit alle geologischen/lithologischen Einheiten. Im numerischen Modell werden zudem ausschließlich die Subeinzugsgebiete oberhalb der Monitoring-Messstationen als Infiltrationsbereiche betrachtet. Die Durchlässigkeitsbeiwerte (kf) der geologischen/lithologischen Einheiten wurden zu Beginn angenommen und je nach Einheit und Region teilweise in horizontaler und vertikaler Raumrichtung unterschiedlich zugeordnet. Die Werte werden dabei innerhalb der Einheiten als homogen angenommen, da die Datenlage eine detailliertere Differenzierung nicht zulässt. Im Flysch wurde abweichend vom 3D-Modell (Abb. 10 sowie auch Abb. 11) eine weitere Einheit im oberflächennahen Bereich unterschieden, der bis in Tiefen von 5 bis 20 m reicht und hydraulisch durchlässigere Bereiche des Flyschs darstellt. Grund für diese Unterscheidung sind die Hangumlagerungsdecken, die ansonsten im Modell keine Berücksichtigung finden.

In Tabelle 11 werden die kf-Wertebereiche, die für den Kalibrierungsprozess gesetzt wurden und innerhalb derer sich die zu Beginn angenommen kf-Werte befinden, dargestellt:

Die geologische/lithologische Einheit der grobklastischen Ablagerungen bildet laut hydrogeologischem Konzept den tiefen Grundwasserkörper, der als gespannt und isotrop angenommen wird. Dieser wird durch die darüber liegenden geringer durchlässigen Eisseesedimente begrenzt. Im Bereich der Quellen werden zusätzlich sogenannte Diskrete Feature-Elemente hinzugefügt. Diese stellen Finite-Elemente-Objekte mit einer geringeren Dimension dar, denen eine detailliertere Parametrisierung zugeordnet werden kann und somit ein Quellaustritt erzwungen wird.

Wichtig zu erwähnen ist, dass das Modell eine starke Vereinfachung der realen Verhältnisse darstellt. Im Modell werden die Werte innerhalb der Einheiten als homogen angenommen und bilden somit einen groben Mittelwert. In der Realität sind die Ablagerungen stark heterogen zusammengesetzt und bestehen teilweise aus wechselnden fein- und grobkörnigem Material. So ist etwa davon auszugehen, dass im Verzahnungsbereich der Schwemmfächer stark unterschiedliche und wechselnde hydrogeologische Gegebenheiten auftreten (Kapitel 3.3 und 5.7). Die stark heterogenen Verhältnisse der quartären Ablagerungen, sowie des Festgesteinsuntergrundes, können eben aufgrund ihrer hohen Komplexität und der Datenlage im Modell nur stark vereinfacht dargestellt werden.

Das konzeptionelle hydrogeologische Modell bildet die Grundlage für das numerische Untergrundmodell (Kapitel 5.7). Anhand von Messdaten, der Klimadaten der

Geologische/lithologische Einheit	Kf-Wertebereiche (m/s)	Anmerkung
Grobklastische Eisrandterrassen	1E-06 bis 6E-04	Es handelt sich hierbei um Eisrandbereiche, die sich im Infiltrati- onsgebiet befinden. Der hohe Wertebereich wurde aufgrund der grobklastischen Zusammensetzung gewählt.
Schwemmfächer	1E-08 bis 1E-04	Verzahnungsbereich mit stark unterschiedlichen und wech- selnden hydrogeologischen Gegebenheiten. Geringmächtige grobklastische Lagen werden hier z.B. nicht berücksichtigt. Daher muss man von einem geringeren Gesamtwert ausgehen.
Eisseesedimente	1E-10 bis 1E-08 (horizontal)	Es handelt sich hierbei um eine grundwasserhemmende Einheit. Daher wurde grundsätzlich eine schlechte Durchlässigkeit und die vertikale hydraulische Leitfähigkeit um einen Faktor 20 geringer als die Horizontale angenommen: 5E-12 bis 5E-10 (Vertikal). Dies orientiert sich an silt- und tonreiche Ablagerungen.
Grobklastische Ablagerungen	5E-06 bis 5E-04	Es handelt sich hierbei um den Grundwasserleiter, der als gespannt und isotrop angenommen wird. Aufgrund der relativ groben und homogenen Korngrößenverteilung ist dieser Einheit eine gute Durchlässigkeit zuzusprechen.
Flysch (oberflächennah)	1E-07 bis 1E-04	Entspricht den Hangschuttdecken der Flyschgesteine (Kapitel 3.1 und 3.3). Dies sind hydraulisch durchlässigere Bereiche.
Flysch (in tieferen Bereichen)	1E-09 bis 5E-07	Entspricht den Flyschgesteinen, wo grundsätzlich niedrige Durch- lässigkeiten zu erwarten sind (Kapitel 3.1 und 3.3).
Bereich Hocheggquelle Bereich Krineggquelle	1E-05 bis 1E-03	Es handelt sich hierbei um ein Diskretes Feature-Element, dem eine höhere hydraulische Leitfähigkeit als dem umgebenden Ma- terial zugeordnet wird. Dies ermöglicht einen Quellaustritt.

Tab. 11.

Geologische/lithologische Einheiten mit den dazugehörigen kf-Wertebereichen, die für die Kalibrierung angenommen wurden.

GeoSphere Austria und der konzeptionellen Überlegungen wurden die Infiltrations- und Abflussbedingungen zugeordnet. Zu den Messdaten gehören Oberflächenabflussmessungen von den vier Hauptgerinnen (Subeinzugsgebiete: 234, 231, 202, 322) aus dem Monitoringzeitraum zwischen November 2019 und Dezember 2020 (Kapitel 5.3). Die Klimadaten der GeoSphere Austria umfassen Mittelwerte der Gitterdaten für die Parameter Niederschlag, Schneewasseräquivalent und Evapotranspiration für jedes Subeinzugsgebiet (Kapitel 4). Laut hydrogeologischem Konzept fließt der größte Teil des Niederschlages oberflächlich in Richtung Subersach ab (ca. 50 %) und ca. 30 % vom Niederschlag verdunsten. Die Grundwasserneubildungsraten wurden für den Monitoringzeitraum über die Wasserbilanz mithilfe der summierten Mess- und Klimadaten je Subeinzugsgebiet berechnet. Demnach versickern im Mittel ca. 18 % vom Niederschlag in den Untergrund. Wie bereits in Kapitel 5.7 erwähnt, beziehen sich die Zahlen auf Basis mm bzw. I/m<sup>2</sup> nicht auf das gesamte Untersuchungsgebiet, sondern gelten für die Subeinzugsgebiete der Hauptgerinne ab den Radar-Messstationen, welche im Wesentlichen dem Recharge-Bereich entsprechen.

In Abbildung 38 ist das 3D-Modell mit den zugewiesenen Randbedingungen dargestellt. Der nordöstliche Modellrand wird durch den Gebirgskamm und der südwestliche durch den Flusslauf der Subersach gebildet. Der Fluss fließt in südöstliche Richtung und steht laut Konzept mit dem tiefen Grundwasserkörper hydraulisch in Verbindung. Dem höchsten Bereich des Modells im Nordosten wurde eine konstante Druckhöhe ("Hydraulic-head BC"), die der Geländeoberkante entspricht, zugewiesen. Dies er-

möglicht einen Zufluss an der oberen Grenze des Modells. Dem niedrigeren Bereich an der Modellgrenze im Südwesten wurde eine "Fluid-transfer" Randbedingung zugewiesen, wo Wasser aus dem Modell herausfließen kann. Dies entspricht dem diffusen Grundwasserzufluss in die Vorfluter Subersach und Rubach (siehe Kapitel 5.7 für die Definition). Hierfür wird als Referenz der Pegelstand des Flusses (hier vereinfacht die Geländeoberkante), sowie zusätzlich ein Leitfähigkeitsparameter, der dem Untergrund in dem Grenzbereich zugeordnet wird, verwendet. Der Recharge-Bereich befindet sich laut konzeptioneller Überlegungen im Bereich höherer Lagen und wurde als Grundwasserneubildungsrate flächendeckend je Subeinzugsgebiet als Zufluss ("Fluid-flux BC") zugeordnet. Die Grundwasserneubildung wird dabei im numerischen Modell als Randbedingung in der Einheit mm pro Tag zugewiesen. Hierfür wurde zunächst über das Verhältnis zwischen den mittleren Summen der Grundwasserneubildungsrate und dem Niederschlag ein Faktor berechnet (z.B. Mähmoosgraben ein Faktor von 0,14). Dieser Faktor wurde daraufhin mit den Niederschlagswerten in mm pro Tag multipliziert, was die Grundwasserneubildung in mm pro Tag ergibt. Zusätzlich wurde eine Höhenabhängigkeit eingebaut, indem die Werte der Grundwasserneubildungsrate, die sich auf einer Seehöhe über den Quellen befinden, höher sind als die darunter. Damit auch im Bereich der Quellen Wasser aus dem Modell herausfließen kann, wurden hier noch zusätzlich konstante Druckhöhen, die auch der Geländeoberkante entsprechen, zugewiesen. Die restlichen Modellgrenzen werden ohne Zu- oder Abfluss modelliert und erhalten somit eine "no-flow boundary".



Abb. 38.

Screenshot aus FEFLOW™; Darstellung des 3D-Modells mit den zugewiesenen Randbedingungen: Druckhöhe "Hydraulic-head BC" (Symbol: ○), Grundwasserneubildung "Fluid-flux BC" (Symbol: 🌂) und diffuser Grundwasserzufluss in den Bach Subersbach "Fluid-transfer BC" (Symbol: ③). Das 3D-Modell ist überhöht dargestellt (Überhöhungsfaktor 2).



#### Abb. 39. Vergleich zwischen den Werten der Grundwasserstandsmessungen (in Metern) und simulierten Ergebnissen der stationären Kalibrierung.

## 6.3 Modellkalibrierung

Der Kalibrierungsprozess wurde für den Monitoringzeitraum zwischen November 2019 und Dezember 2020 durchgeführt. Die Parameter wurden hauptsächlich über Grundwasserstandsmessungen der Bohrungen im Bereich Mähmoos (KB1/03, KB7/07, KB6/07) und im Bereich Sibratsgfäll (KB2/03), sowie den Quellschüttungsmessungen, kalibriert. Hierfür werden Beobachtungspegel importiert, an denen gemessene und simulierte Grundwasserstände sowie Quellschüttungen verglichen werden können. In den Bohrungen KB1/03 und KB7/07 wurden Datenlogger für Pegelmessungen installiert. In den Bohrungen KB2/03 und KB6/07 wurden im Monitoringzeitraum Stichtagsmessungen durchgeführt. Die Quellschüttungsdaten stammen von Schüttungsaufzeichnungen der Gemeinde Sibratsgfäll und wurden jeweils für die Quelleinzugsgebiete der Hochegg- und Krineggguellen zusammengefasst. Die FePEST-basierte Modellkalibrierung erfolgte mit den acht einstellbaren Parametern aus Tabelle 11, welche die hydraulischen Leitfähigkeiten der lithologischen/geologischen Einheiten und der Diskreten Feature-Elemente im Bereich der Quellen darstellen. Zusätzlich wurde der Leitfähigkeitsparameter im Bereich der Subersach als einstellbarer Parameter hinzugefügt.

Da bei den Grundwasserstandsmessungen kein einheitlich zeitlich aufgelöster Trend beobachtet wurde und die Datenlage hier generell sehr gering ist, erfolgte die Kalibrierung nur im stationären Zustand. Hierfür wurden die Mittelwerte der Grundwasserneubildungsraten des Monitoringzeitraums als Eingangsdaten und die Mittelwerte der gemessenen Grundwasserstände und Quellschüttungen als Beobachtungspunkte verwendet. Vor dem Kalibrierungsprozess wurden erste stationäre Simulationen durchgeführt. Das Modell wurde so mithilfe der Grundwassergleichen und Wasserbilanz auf seine Plausibilität überprüft. Bei starken Abweichungen zwischen den gemessenen und simulierten Werten wurden einzelne Parameter soweit angepasst, dass die Differenz möglichst gering ist. Daraufhin wurde eine automatische Kalibrierung mit FePEST für das gesamte Modell durchgeführt. In Abbildung 39 sind die gemessenen und die simulierten Grundwasserstandswerte der stationären Kalibrierung im Vergleich dargestellt.

In Tabelle 12 sind die gemessenen und simulierten Werte der Grundwasserstands- und Quellschüttungsmessungen sowie die absoluten bzw. relativen Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Werten aufgeführt. Zu erkennen ist, dass bei den Quellschüttungen und in den Bohrungen KB1/03 und KB6/07 mit Werten zwischen 0,3 und 0,8 % die geringsten relativen Abweichungen auftreten. Die Werte der Bohrungen KB2/03 und KB7/07 zeigen mit 1,1 und 2,0 % die höchsten relativen Abweichungen. Insgesamt ergibt sich eine mittlere relative Abweichung von 0,9 %.

Diese Ergebnisse bilden die beste Anpassung und resultieren aus der Parametrisierung in Tabelle 13, wo die hydrau-

Standort	Gemessen	Simuliert	absolute Abweichung	relative Abweichung
KB2/03	894,00 m	903,56 m	9,56 m	1,1 %
KB1/03	923,00 m	930,40 m	7,40 m	0,8 %
KB7/07	956,00 m	936,93 m	19,07 m	2,0 %
KB6/07	933,00 m	938,58 m	5,58 m	0,6 %
Hocheggquelle	580,5 m³/d	579,17 m³/d	2,16 m	0,7 %
Krineggquelle	316,06 m <sup>3</sup> /d	313,84 m³/d	1,83 m	0,3 %

Tab. 12.

Werte der Grundwasserstands- und Quellschüttungsmessungen, der simulierten Ergebnisse aus der stationären Kalibrierung und die absoluten bzw. relativen Abweichungen zwischen gemessenen und simulierten Werten.

Geologische/Lithologische Einheit	Kf-Werte (m/s)
Grobklastische Eisrandterrassen	5,8E-04
Schwemmfächer	5,8E-08
Eisseesedimente	1,2E-10
Grobklastische Ablagerungen	6,6E-06
Flysch (oberflächennah)	2,6E-06
Flysch (in tieferen Bereichen)	2,5E-08
im Bereich Hocheggquelle	5,5E-04
im Bereich Krineggquelle	8,7E-06

Tab. 13.

Die hydraulischen Leitfähigkeitsbeiwerte (kf) der geologischen/lithologischen Einheiten, die durch den stationären Kalibrierungsprozess zugeordnet wurden.

lischen Leitfähigkeitsbeiwerte (kf), die durch den stationären Kalibrierungsprozess zugeordnet wurden, aufgeführt sind.

In Abbildung 40 sind die Grundwasserfließverhältnisse mit den Grundwassergleichen und der Grundwasserfließrichtung der stationären Simulation im 3D-Modell, sowie im Profilschnitt, dargestellt. Demnach fließt das Wasser vom nordöstlichen Modellrand am Gebirgskamm entlang der Höhenschichtlinien Richtung Beckenfüllung zum tiefen Grundwasserkörper und entwässert im Südwesten diffus in die Vorfluter gemäß der konzeptionellen hydrogeologischen Vorstellung. Durch die feinkorndominierten Eisseesedimente werden die Grundwasservorkommen, die eben vom Beckenrand bevorzugt über den Verzahnungsbereich der Eisrandsedimente und Schwemmfächerablagerungen in die tieferen Abschnitte gelangen, eingespannt. Im Profilschnitt ist außerdem der sogenannte Montain-Block Recharge über das Festgestein (Flysch) zu erkennen. Betrachten wir die hydrologischen Bilanzgrößen gibt es im Infiltrationsbereich einen Zufluss in das Modell von insgesamt ca. 2.690 m3/d und im Südwesten fließen ca. 2.525 m<sup>3</sup>/d aus dem Modell heraus.

Das simulierte stationäre Strömungsmodell spiegelt die durchschnittlichen Verhältnisse wider und wird als Startmodell (Anfangsbedingungen) für die in weiterer Folge dargestellten instationären Simulationen verwendet.



Screenshots aus FEFLOW™; Darstellung des 3D-Modells mit den Beobachtungspunkten KB7/07, (KB1/03, KB6/07 KB2/03, Krinegg- und Hocheggquelle) (oben) und Darstellung des Profilschnitts mit den zugeordneten Durchlässigkeitsbeiwerten (unten). Die Grundwasserfließverhältnisse sind mit den Grundwasseraleichen (Isolinien in Metern) und der Grundwasserfließrichtung (blaue Pfeile) der stationären Simulation visualisiert. Das 3D-Modell und der Profilschnitt sind zudem zweifach überhöht dargestellt.

## 6.4 Ergebnisse und Interpretation

Bei der numerischen Modellierung muss grundsätzlich berücksichtigt werden, dass das Modell aufgrund der sehr geringen Datenlage bei den Grundwasserstandsmessungen mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Die Limitierung ist vor allem in der geringen räumlichen und zeitlichen Verteilung der Messwerte gegeben. Eine weitere Unsicherheit entsteht dadurch, dass die Werte innerhalb der Einheiten als homogen angenommen werden und das Modell nur eine starke Vereinfachung der realen Verhältnisse darstellt. Diese Unsicherheiten müssen bei den folgenden Modellrechnungen beachtet werden.

Da die Software jedoch generell in der Lage ist, Grundwasserströmungsvorgänge im Untergrund zu modellieren, dienten die Ergebnisse der numerischen Simulation der groben Validierung der Hydrogeologischen Konzeptvorstellung. Es konnte aufgezeigt werden, dass die Grundwasserfließverhältnisse im Modell grundsätzlich den konzeptionellen Vorstellungen entsprechen. Das heißt, dass mit dem numerischen Modell vor allem qualitative Aussagen getroffen werden können, indem das Verhalten des Grundwasserkörpers in Form von Trends der Grundwasserstände und dem Discharge im Zeitverlauf beobachtet werden.

## 6.4.1 Erste Modellrechnungen

#### 6.4.1.1 Monitoringzeitraum

Die erste instationäre Simulation erfolgte für den Monitoringzeitraum mit tagesaufgelösten Zeitreihen der Grundwasserneubildung als Eingangsdaten. Hierfür wurde der Recharge mithilfe des in Kapitel 6.1 beschriebenen Faktors und der Niederschlagswerte für jeden Tag in mm/d berechnet. Die Zeitreihen wurden noch zusätzlich mithilfe eines Glättungsverfahrens 5. Ordnung geglättet. In Abbildung 41 ist die für alle Subeinzugsgebiete summierte Zeitreihe in Kubikmeter pro Tag (m<sup>3</sup>/d) dargestellt. Zu sehen ist, dass die höchsten Infiltrationsraten im Februar und Juni sowie die niedrigsten im April und November auftreten.

In Abbildung 42 sind die simulierten und gemessenen Grundwasserstände zu sehen. In den Bohrungen KB2/03 und KB6/07 wurden jeweils im Zeitraum zwischen dem 7. November 2019 und dem 18. Juni 2020 drei Stichtagsmessungen durchgeführt. Von den Bohrungen KB1/03 und KB7/07 gibt es jeweils tagesaufgelöste Pegelmessungen vom 14. Juli 2020 bis 13. Dezember 2020. Insgesamt ist zu erkennen, dass die simulierten Grundwasserstände nur geringe Variationen im Monitoringzeitraum aufweisen. So schwanken die Werte z.B. bei der Bohrung KB2/03 nur um 0,1 m und in der Bohrung KB6/07 maximal um 0,4 m. Trotz der geringen Variationen ist mit einer zeitlichen Verzögerung ein saisonal geprägtes Verhalten erkennbar. Dies ist in den Bohrungen im Bereich der Randzone stärker zu beobachten als im Beckeninneren. Bei den gemessenen Grundwasserständen sind in den Bohrungen KB1/03 und KB6/07 ebenfalls nur geringe Variationen zu sehen, was für relativ stagnierende bzw. zumindest stark gehemmte Bedingungen spricht. In der Bohrung KB7/07 sinkt der gemessene Grundwasserstand um etwa 0,7 m. Diese Absenkung ist auch bei den simulierten Werten in einem geringeren Maße (ca. 0,3 m) zu erkennen. Besonders auffällig sind im Vergleich zu den simulierten Werten die starken Schwankungen der gemessenen Grundwasserstände in der Bohrung KB2/03. Wichtig zu erwähnen ist in dem Zusammenhang, dass der Kanaldeckel des Pegels nicht dicht ist und ein Hineinströmen von Regenwasser nicht auszuschließen ist.

Die simulierten und gemessenen Quellschüttungen der Hochegg- und Krineggquellen sind in Abbildung 43 dargestellt. Die Quelleinzugsgebiete befinden sich, wie in Abbildung 40 zu sehen, im Bereich vom Flysch. Im Zeitraum



Für den Monitoringzeitraum summierte Zeitreihe der Grundwasserneubildung in m³/d für alle Subeinzugsgebiete.


zwischen 20. November 2019 und 11. November 2020 gibt es insgesamt neun Schüttungsaufzeichnungen. Es ist zu erkennen, dass die simulierten und gemessenen Schüttungen einen vergleichbaren Trend aufweisen. Dabei sind starke Variationen zu sehen, die stark von der Infiltratiflä

starke Variationen zu sehen, die stark von der Infiltration beeinflusst werden und somit ein saisonales Verhalten aufweisen. Wie auch aus Abbildung 43 zu entnehmen ist, schütten die Hocheggquellen im Mittel 581 m<sup>3</sup>/d und die Krineggquellen 316 m<sup>3</sup>/d.

#### 6.4.1.2 Zeitraum 1995 bis 2020

Die nächste instationäre Simulation erfolgte für den Zeitraum von 1995 bis 2020 mit Zeitreihen der Grundwasserneubildung als Eingangsdaten. Diesmal wurde der Recharge zwar ebenfalls mithilfe des in Kapitel 6.1 beschriebenen Faktors berechnet, jedoch mit Niederschlag- und Evapotranspirationssummen aus diesem Zeitraum, sowie Oberflächenabflusssummen aus der Niederschlag-Abfluss-Modellierung aus diesem Zeitraum auf Quartalsbasis in mm/d. In Abbildung 44 ist die für alle Subeinzugsgebiete summierte Zeitreihe vom Recharge, sowie dem simulierten Discharge in die Vorfluter in m<sup>3</sup>/d dargestellt. Bei dem Discharge handelt es sich ausschließlich um aufsteigende Grundwässer aus dem gespannten Grundwasserkörper. Die geringsten Raten für die Grundwasserneubildung treten im Mai 2003, August 2005 und 2018 auf. Die höchs-







Für den Zeitraum 1995 bis 2020 summierte Zeitreihe der Grundwasserneubildung (Recharge) und dem diffusen Grundwasserzufluss in den Vorfluter (Discharge) in m<sup>3</sup>/d für alle Subeinzugsgebiete.

ten Raten können im Februar 1999 und 2006 beobachtet werden. Vergleichen wir die Werte mit dem Discharge, ist in Abbildung 44 deutlich zu erkennen, dass die Grundwasserzutritte aus dem Grundwasserkörper stark gehemmt und mit großer zeitlicher Verzögerung auftreten.

# 6.5 Klimaszenarien in der numerischen Modellierung

Basierend auf dem kalibrierten stationären Strömungsmodell wurden in weiterer Folge wie in Kapitel 4.7 die repräsentativen Läufe der RCP-Szenarien (Lauf 14 für 2.6, Lauf 15 für 4.5 und Lauf 13 für 8.5) und somit das vergan-

fluss-Modellierung aus diesem Zeitraum berechnet. Aufgrund des langen Zeitabschnitts wurden die Zeitreihen auf mm pro Jahr reduziert. Im Gegensatz zu den vorherigen Simulationen erfolgte die Berechnung und Zuordnung der Grundwasserneubildung nicht je Subeinzugsgebiet, sondern wurde für alle zusammengefasst. In Abbildung 45 sind die Zeitreihen vom Recharge als Eingangsdaten und der simulierte zeitliche Verlauf vom Discharge exemplarisch für die Läufe 2.6 14, 8.5 13, 8.5 11 und 8.5 09 in m<sup>3</sup>/



Diagramme mit den Zeitreihen vom Recharge als Eingangsdaten und dem zeitlichen Verlauf vom simulierten Discharge exemplarisch für die Läufe 2.6 14, 8.5 13, 8.5 11 und 8.5 09.



Abb. 46. Zeitliche Entwicklung des Grundwasserstandes der Bohrung KB2/03 beim niederschlagsärmsten Lauf RCP 8.5 11.

Tag dargestellt. Im Allgemeinen ist eine starke Variabilität der Grundwasserneubildungsraten von Jahr zu Jahr zu erkennen. Der Lauf 2.6 14 weist die geringste mittlere Abweichung zum Median der Modellläufe vom optimistischen Bild auf. Es ist zu erkennen, dass hier keine starken Veränderungen bzw. Trends der hydrogeologischen Bedingungen zu beobachten sind. Der Lauf 8.5 13 weist die geringste mittlere Abweichung zum Median der Modellläufe vom RCP 8.5 auf. Die Läufe 8.5 11 und 8.5 09 sind hydrologisch extreme Läufe und zeigen jeweils die niederschlagsärmste bzw. niederschlagsreichste zukünftige Klimaentwicklung, wenn das Wirtschaftswachstum wie bislang zum Großteil auf der Verbrennung fossiler Energieträger beruhen würde. Beim Lauf 8.5 09 ist ein Anstieg der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zu erkennen. Bei den Läufen 8.5 11 und 8.5 13 ist im Allgemeinen eine stärkere sommerliche Trockenheit ab der zweiten Hälfte des Zeitabschnittes und somit eine Abnahme des Grundwasserspeichers zu beobachten. Die mittlere jährliche Grundwasserneubildung weist besonders beim Lauf 8.5 11 einen deutlichen Rückgang auf. Dies führt folglich auch zu einer Abnahme des Discharge in den Vorfluter und zu einer Abnahme der Grundwasserstände aller Pegel. In Abbildung 46 ist repräsentativ die zeitliche Entwicklung des Grundwasserstandes der Bohrung KB2/03 dargestellt. Es wird also auch hier deutlich, dass die Läufe der Klimaszenarien mit keinen Klimaschutzanstrengungen deutliche hydrogeologische Veränderungen mit sich bringen können.

# 7 Diskussion und Ausblick

(D. ELSTER, S. HOCHLEITHNER, V. TUREWITZ & M. KRALIK)

#### 7.1 Synthese der transdisziplinären Vorgangsweise

(S. HOCHLEITHNER)

Die Aktivitäten im Rahmen des Projekts konzentrierten sich nicht nur auf eine resiliente Wasserbewirtschaftung, sondern auch auf nachhaltige lokale Praktiken im Umgang mit hydrogeologischen Risiken im Zusammenhang mit sich ändernden saisonalen Schwankungen aufgrund des Klimawandels. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, gingen wir zunächst mit einer deduzierten Vorannahme von Risiko, als eine physische aus der hydrogeologischen Dynamik resultierende Gefahr, an den Untersuchungsgegenstand heran. Eine solche Herangehensweise ist Ausdruck einer bestimmten erkenntnistheoretischen Annahme, die "Natur" und "Gesellschaft" als zwei unterschiedliche, allenfalls in gewisser Weise gekoppelte Systeme versteht (RE, 2021). Wie sich jedoch im Laufe der transdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Naturwissenschaftlern (Kapitel 3-6) mit der lokalen Bevölkerung herausstellte, sind hydrogeologische Dynamiken und Ereignisse im Untersuchungsgebiet keineswegs von sozialen und kulturellen Dynamiken losgelöst. Dies zeigt sich besonders deutlich im Kontext der Entwässerungsaktivitäten von Landwirtinnen und Landwirten und der Bedeutung, die Entwässerungen und die damit verbundenen hydrogeologischen Dynamiken für sie haben. Im Rahmen des Projekts musste also ein epistemologischer Wandel stattfinden, der darauf abzielt, "Gesellschaft" und "Natur" nicht als untrennbar miteinander verwoben zu verstehen, wie dies auch in neueren Berichten zur Sozio-Hydrogeologie deutlich gefordert wird (RE, 2021; HYNDS et al., 2018; TROY et al., 2015). Das bedeutet auch, Risiko nicht nur als physische Gefahr zu verstehen, sondern es kontextuell zu definieren: In unserem Fall entlang politischer, sozialer, kultureller und wirtschaftlicher Dimensionen. Für die Anwohnenden des Untersuchungsgebiets wird beispielsweise das Risiko, dass ihr Grundstück als Gefahrenzone kartiert wird, als kulturell, wirtschaftlich und sozial gefährlicher wahrgenommen als die physische Gefahr, die sich durch die Bebauung eines gefährdeten Areals ergibt. Dies kann zu politischen Konflikten und zur Ablehnung wissenschaftlicher Untersuchungen führen. Wir argumentieren daher, dass eine kontextbezogene Definition von hydrogeologischem Risiko für einen transdisziplinären Ansatz im Sinne eines nachhaltigen und resilienten Wasser- und Risikomanagements unerlässlich ist.

Das wichtige Ziel des Projekts, gemeinsam mit lokalen, nicht-wissenschaftlichen Akteurinnen und Akteuren, Wissen über Zusammenhänge zwischen hydrogeologischer Dynamik, den Auswirkungen des Klimawandels und sozialer Dimensionen zu generieren, erfordert eine intensive transdisziplinäre Einbindung lokaler Stakeholder, die ursprünglich durch ein Citizen-Science-Paket umgesetzt werden sollte, in dessen Mittelpunkt die gemeinsame Entwicklung einer Smartphone-App zur Generierung hydrogeologischer Daten stand, die in ein numerisches 4D-Modell (Kapitel 6) des Untersuchungsgebiets einfließen sollten. Bei der Umsetzung des geplanten transdisziplinären Ansatzes sah sich das Projektteam jedoch bald mit einigen entscheidenden Herausforderungen konfrontiert, die sich speziell aus dem kleinräumigen Umfeld eines inneralpinen Tals ergaben.

Zu diesen Herausforderungen gehörten vor allem eine erhöhte Relevanz des Sozialen, eine kleine Anzahl von (potentiellen) Teilnehmenden, die mit einer großen Anzahl von divergierenden Interessen, Bedürfnissen und Anliegen der lokalen Stakeholder zusammentrifft, sowie eine starke Diskrepanz zwischen klassischen, theoriededuzierten Risikovorstellungen und lokalen, kontextuell definierten Risikowahrnehmungen (Kapitel 2.3). Das Herzstück des Ansatzes, ein Citizen-Science-Paket zur Koproduktion von Wissen durch die gemeinsame Entwicklung einer hydrogeologischen Smartphone-App (Kapitel 2.2), lieferte nur begrenzte Ergebnisse in Bezug auf die Generierung hydrogeologischer Daten, erwies sich jedoch als sehr fruchtbar für die Einbindung lokaler Interessengruppen, das Generieren und die Kommunikation von Wissen. Im Rahmen von Reflexions- und Adaptionsprozessen wurden verstärkt qualitative sozialwissenschaftliche Methoden eingesetzt, was zu klareren und detaillierteren Ergebnissen, einer stärkeren Beteiligung lokaler Interessengruppen, einem grö-Beren Bewusstsein und einer stärkeren Unterstützung der gesamten Forschungsaktivitäten führte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Einbeziehung qualitativer sozialwissenschaftlicher Methoden in die hydrogeologische Forschung basierend auf naturwissenschaftlichen Fachdisziplinen (Kapitel 3-6) in kleinräumigen Untersuchungsgebieten fruchtbarer zu sein scheint als die Umsetzung von, in anderen Kontexten durchaus bewährten, transdisziplinären Methoden und Toolkits, wie z.B. quantitative Erhebungen oder Citizen Science über Smartphone-Apps. Die Anpassung von Methoden aus den Sozialwissenschaften, wie z.B. die oben erwähnten Transect Walks, kann in dieser Hinsicht ebenfalls zielführender sein, ebenso wie die "Einbettung" von Sozialwissenschaftlerinnen und Sozialwissenschaftlern in hydrogeologische Feldteams. Die Einbeziehung der Sozialwissenschaften, insbesondere aus Disziplinen mit einem starken qualitativen methodischen Schwerpunkt, wie z.B. der Sozialanthropologie oder der Humangeographie, kann daher für die sozio-hydrogeologische Forschung in kleinräumigen Kontexten von großem Nutzen sein. Weitere Forschungsarbeiten sollten sich auch auf erkenntnistheoretische Aspekte konzentrieren, wie etwa in Bezug auf die Konstruktion(en) von Risiko.

Kleinräumige Untersuchungskontexte bringen im Kontext transdisziplinärer hydrogeologischer Forschung spezifische Herausforderungen mit sich, bieten jedoch auch besondere Potentiale, die sich aus unseren Erkenntnissen ebenfalls ableiten lassen. Wenn sie ernst genommen wird, ermöglicht die transdisziplinäre hydrogeologische Forschung in kleinräumigen Settings eine größere qualitative Tiefe des generierten Materials sowie eine größere Wirkung von Projekten, die auf die Sensibilisierung und Koproduktion von Wissen über nachhaltiges und resilientes Wasserund Risikomanagement abzielen. Abschließend nehmen wir an, dass auch bei deutlich größeren Untersuchungsgebieten mit vergleichbaren alpinen Settings und Bevölkerungsstrukturen qualitative sozialwissenschaftliche methodischen Ansätze zielführend wären.

## 7.2 Unsicherheiten in der Erhebung von Alpiner hydrogeologischer Verhältnissen sowie deren numerischer Modellierung

(D. ELSTER, V. TUREWICZ & M. KRALIK)

Bedingt durch die große geologische und hydrogeologische Komplexität des alpinen Untersuchungsgebiets sind bei den Aussagen mitunter erhebliche Unsicherheiten zu berücksichtigen. Zunächst konnte die konzeptionelle geologische Modellvorstellung (Kapitel 3.3.2) in der 3D-Modellierung nur in einer vereinfachten Form umgesetzt werden. Das betrifft insbesondere den Verzahnungsbereich von Schwemmfächern, Eisrandsedimenten und Eisseesedimenten sowie die interne Inhomogenität dieser Einheiten, die mit angewandten geophysikalischen Methoden nur ansatzweise aufgezeigt werden konnte (Kapitel 3.3.3). Die quantitative Beurteilung der Güte der Daten zu den klimatischen Bedingungen und Klimaszenarien sind gesondert in Kapitel 4.6 beschrieben. Bei der Ermittlung der Evapotranspiration ist zu betonen, dass weniger komplexe Ansätze, siehe HOLZSCHUSTER (2022), Unterschätzungen von zumindest absolut 10 % liefern. Bei den angewandten Methoden zur Ermittlung des Oberflächenabflusses und der Niederschlag-Abfluss-Modellierung (Kapitel 5.3 und 5.4) ist ebenfalls von methodischen Unsicherheiten zwischen 5 und 10 % auszugehen. Während die Betrachtung der Unsicherheiten einzelner Parameter wie Niederschlag, Evapotranspiration, Schneeschmelze, Oberflächenabfluss und diffuse Grundwasserzutritte relativ übersichtlich ist, dürfte die Unsicherheit von kombinierten Parametern in der Wasserbilanz bei zumindest 20 % liegen. Deshalb wurden bei der Auswertung von Klimaszenarien in der Wasserbilanz ausschließlich Langzeittrends auf Jahresbasis berücksichtigt und es wurde auf Aussagen für kürzere Zeiträume (Monate, Saisonen) bewusst verzichtet (Kapitel 5.5.2).

Bei der numerischen Modellierung muss grundsätzlich berücksichtigt werden, dass das Modell aufgrund der sehr geringen Datenlage bei den Grundwasserstandsmessungen mit großen Unsicherheiten behaftet ist (Kapitel 6.3). Die Limitierung ist vor allem in der geringen räumlichen und zeitlichen Verteilung der Messwerte gegeben. Eine weitere Unsicherheit entsteht dadurch, dass die Werte innerhalb der geologischen Einheiten als homogen angenommen werden und das Modell nur eine starke Vereinfachung der realen Verhältnisse darstellt. Diese Unsicherheiten müssen bei den folgenden Modellrechnungen beachtet werden. Da die Software jedoch generell in der Lage ist, Grundwasserströmungsvorgänge im Untergrund zu modellieren, dienten die Ergebnisse der numerischen Simulation der groben Validierung der hydrogeologischen Konzeptvorstellung. Es konnte aufgezeigt werden, dass die Grundwasserfließverhältnisse im Modell grundsätzlich den konzeptionellen Vorstellungen entsprechen. Das heißt, dass mit dem numerischen Modell vor allem gualitative Aussagen getroffen werden können, indem das Verhalten des Grundwasserkörpers in Form von Trends der Grundwasserstände und dem Abfluss im Zeitverlauf beobachtet werden.

## 8 Literatur

AHL, A., BIEBER, G., MOTSCHKA, K., SLAPANSKY, P., WINKLER, E., KLEIN, P., RÖMER, A. & SUPPER, R. (2007): Aerogeophysikalische Vermessung im Bereich Sibratsgefäll/Rindberg Vorarlberg. – Bericht, Bund/Bundesländer-Rohstoffprojekt ÜLG-028/05c, 133 S., Geologische Bundesanstalt, Wien.

AMOOZEGAR, A. & WARRICK, A. (1986): Hydraulic conductivity of saturated soils: field methods. – In: KLUTE, A. (Ed.): Methods of soil analysis, 735–770, American Society of Agronomy, Madison.

APCC (2014): Austrian Assessment Report Climate Change 2014 (AAR14) – Synopsis – Main Findings. – 11 S., Austrian Panel on Climate Change (APCC), Climate Change Centre Austria, Wien (ÖAW). https://www.ccca.ac.at/fileadmin/00\_DokumenteHauptmenue/03\_Aktivitaeten/APCC/summarys/Synopse\_englisch\_finaleversion\_181214.pdf

ASPEN TECHNOLOGY INC. (2022): SKUA-GOCAD – Better field development through true collaboration and geological integrity, Aspen. https://www.pdgm.com/products/skua-gocad AYRAUD, V., AQUILINA, L., LABASQUE, T., PAUWELS, H., MOLENAT, J., PIERSON-WICKMANN, A.C., DURAND, V., BOUR, O., TARITS, C., LECORRE, P., FOURRE, E., MEROT, P. & DAVY, P. (2008): Compartmentalization of physical and chemical properties in hard-rock aquifers deduced from chemical and groundwater age analyses. – Applied Geochemistry, **23**, 2686–2707, Amsterdam (Elsevier). https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.06.001

BARNETT, T.P., ADAM, J.C. & LETTENMAIER, D.P. (2005): Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. – Nature, **438**, 303–309, London. http://dx.doi. org/10.1038/nature04141

BARTHEL, R. & SEIDL, R. (2017): Interdisciplinary collaboration between natural and social sciences – status and trends exemplified in groundwater research. – PLoS One, **12**/1. https://doi. org/10.1371/journal.pone.0170754

BERKA, R., KATZLBERGER, C., PHILIPPITSCH, R., SCHUBERT, G., KOR-NER, M., LANDSTETTER, C., MOTSCHKA, K., PIRKL, H., GRATH, J., DRAXLER, A. & HÖRHAN, T. (2014): Erläuterungen zur Geologischen Themenkarte Radionuklide in Grundwässern, Gesteinen und Bachsedimenten Österreichs 1:500.000. – 109 S., Geologische Bundesanstalt, Wien.

BEYER, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. – Wasserwirtschaft Wassertechnik, **14**/6, 165–168, Berlin.

BFW (Hrsg.) (2022): Digitale Bodenkarte von Österreich eBOD. – Digitale Karte, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft Wien. https://bodenkarte.at

BIAŁAS, Z. & KLECZKOWSKI, A. (1970): Przydatności niektórych wzorów empirycznych dla określenia współczynnika filtracji k. (Deutscher Titel: Über den praktischen Gebrauch von einigen empirischen Formeln zur Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizienten k). – Archiwum Hydrotechniki, **17**/3, 405–417, Warschau.

BÍL, M., HEIGL, F., JANOŠKA, Z., VERCAYIE, D. & PERKINS, S.E. (2020): Benefits and challenges of collaborating with volunteers: Examples from National Wildlife Roadkill Reporting Systems in Europe. – Journal for Nature Conservation, **54**, 125798, Amsterdam. https:// doi.org/10.1016/j.jnc.2020.125798

BISPING, C. (2023): Erstevaluierung von oberflächennahen Drainagesystemen in landwirtschaftlich genutzten Flächen von Sibratsgfäll. – Unveröffentlichter Bericht, 28 S., Geologische Bundesanstalt, Wien.

BOUMAIZA, L., CESNAUX, R., WALTER, J. & STUMPP, C. (2020): Assessing groundwater recharge and transpiration in a humid northern region dominated by snowmelt using vadose-zone depth profiles. – Hydrogeology Journal, **28**, 2315–2329, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/s10040-020-02204-z

BROCK, B.W., WILLIS, I.C. & SHARP, M.J. (2000): Measurement and parameterization of albedo variations at Haut Glacier d'Arolla, Switzerland. – Journal of Glaciology, **46**, 675–688, Cambridge. https://doi.org/10.3189/172756500781832675

BULLISTER, J.L. & WEISS, R.F. (1988): Determination of  $CCl_3F$  and  $CCl_2F_2$  in seawater and air. Deep Sea Research Part A. – Oceanographic Research Papers, **35**/5, 839–853, London. https://doi. org/10.1016/0198-0149(88)90033-7

CHIMANI, B., HEINRICH, G., HOFSTÄTTER, M., KERSCHBAUMER, M., KIENBERGER, S., LEUPRECHT, A., LEXER, A., PESSENTEINER, S., POETSCH, M.S., SALZMANN, M., SPIEKERMANN, R., SWITANEK, M. & TRUHETZ, H. (2016): ÖKS15 – Klimaszenarien für Österreich. Daten, Methoden, Klimaanalyse. – Endbericht, 63 S., Wien. https://www. bmk.gv.at/dam/jcr:7fd75e22-1b88-415f-a4a8-6ea8aa51d575/ OEKS15\_Endbericht\_kleiner.pdf CHIMANI, B., MATULLA, C., HIEBL, J., SCHELLANDER-GORGAS, T., MARAUN, D., MENDLIK, T., EITZINGER, J., KUBU, G. & THALER S. (2020): Compilation of a guideline providing comprehensive information on freely available climate change data and facilitating their efficient retrieval. – Climate Services, **19**, 100179. https://doi. org/10.1016/j.cliser.2020.100179

DELAIGUE, O., THIREL, G., CORON, L. & BRIGODE, P. (2018): airGR and airGRteaching: Two open-source tools for rainfall-runoff modeling and teaching hydrology. – HIC 2018. 13<sup>th</sup> International Conference on Hydroinformatics. – EPiC Series in Engineering, **3**, 541–548. https://doi.org/10.29007/qsqj

DELAIGUE, O., CORON, L. & BRIGODE, P. (2022): airGRteaching: Teaching Hydrological Modelling with GR (Shiny Interface Included). – R package version 0.2.13. https://doi.org/10.15454/W0SS-KT

DEWALT, K.M., DEWALT, B.R. & WAYLAND, C.B. (1998): Participant Observation. – In: BERNARD, H.R. (Ed.): Handbook of Methods in Cultural Anthropology, 259–299, Walnut Creek, California (AltaMira Press).

DHI-WASY GmbH (2022): Simulation package FEFLOW. http://www.feflow.info

DIERSCH, H.-J.G. & PERROCHET, P. (2009): On the primary variable switching technique for simulating unsaturated-saturated flows. – FEFLOW White Papers Vol. I, DHI-WASY GmbH.

DIGGLE, P.J. & RIBEIRO, P.J. (2007): Model-based geostatistics. – 228 S., New York (Springer). https://doi.org/10.1007/978-0-387-48536-2

EGGELSMANN, R. (1981): Dränanleitung für Landbau, Ingenieurbau und Landschaftsbau. – 269 S., Parey-Hamburg. https://doi. org/10.23689/fidgeo-3077

ELSTER, D., FISCHER, L., HANN, S., GOLDBRUNNER, J., SCHUBERT, G., BERKA, R., HOBIGER, G., LEGERER, P. & PHILIPPITSCH, R. (2018): Österreichs Mineral- und Heilwässer. – 448 S., Geologische Bundesanstalt, Wien. https://opac.geologie.ac.at/wwwopacx/wwwopac.ashx?command=getcontent&server=images&value=mineral\_ heilwaesser.pdf

EPTING, J., MICHEL, A., AFFOLTER, A. & HUGGENBERGER, P. (2021): Climate change effects on groundwater recharge and temperatures in Swiss alluvial aquifers. – Journal of Hydrology X, **11**, 100071, Amsterdam. http://dx.doi.org/10.1016/j. hydroa.2020.100071

FINGER, D., HEINRICH, G., GOBIET, A. & BAUDER, A. (2012): Projections of future water resources and their uncertainty in a glacierized catchment in the Swiss Alps and the subsequent effects on hydropower production during the 21st century. – Water Resources Research, **48**, W02521, Washington, D.C. http://dx.doi. org/10.1029/2011WR010733

FREI, C. (2014): Interpolation of temperature in a mountainous region using nonlinear profiles and non-Euclidean distances. – International Journal of Climatology, **34**, 1585–1605, Oxford. https://doi.org/10.1002/joc.3786

FREI, C. (2021): DACH-Empfehlungen zu Unsicherheiten und Interpretation der Gitterpunktwerte von stationsbasierten Gitterdaten. – DACH-Workshop, 25.08.2021. https://www.zamg.ac.at/ cms/de/dokumente/klima/dok\_projekte/grids/Limitierungen\_Gitterdaten\_DACH.pdf

FREI, C. & ISOTTA, F. (2019): Ensemble spatial precipitation analysis from rain gauge data: methodology and application in the European Alps. – JGR Atmospheres, **124**/11, 5757–5778. https://doi. org/10.1029/2018JD030004

FREI, C. & SCHÄR, C. (1998): A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. – International Journal of Climatology, **18**, 873–900, Oxford. https://doi. org/10.1002/(SICI)1097-0088(19980630)18:8<873::AID-JOC255>3.0.CO;2-9

FREI, C. & SCHÄR, C. (2001): Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. – Journal of Climate, **14**/7, 1568–1584, Boston. https://doi. org/10.1175/1520-0442(2001)014%3C1568:DPOTIR%3E2.0. CO;2

FRÖHLICH, K., KRALIK, M., PAPESCH, W., RANK, D., SCHEIFINGER, H. & STICHLER, W. (2008): Deuterium Excess in Precipitation of Alpine Regions – Moisture Recycling. – Isotopes in Environmental and Health Studies, **44**, 61–70. https://doi. org/10.1080/10256010801887208

GLÄSER, J. & LAUDEL, G. (2009): Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse: als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen. – 4. Edition, 347 S., Wiesbaden (Springer).

GMEINDL, M. (2007): The Combination of GIS, Remote Sensing and Hydraulic Transport Modelling for the Investigation of the Landslide Rindberg, Sibratsgfäll, Vorarlberg, Austria. – Unveröffentlichte Dissertation, Universität für Bodenkultur, 210 S., Wien.

GUPTA, H., KLING, H., YILMAZ, K. & MARTINEZ, G. (2009): Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. – Journal of Hydrology, **377**, 80–91, Amsterdam. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003

HAN, L.F. & WASSENAAR, L.I. (2020): Principles and uncertainties of <sup>14</sup>C age estimations for groundwater transport and resource evaluation. – Isotopes in Environmental and Health Studies, **57**/2, 111–141. https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1857378

HARGREAVES, G.H. & SAMANI, Z.A. (1985): Reference crop evapotranspiration from temperature. – Applied Engineering in Agriculture, 1/2, 96–99. https://doi.org/10.13031/2013.26773

HASLINGER, K. & BARTSCH, A. (2016): Creating long-term gridded fields of reference evapotranspiration. – Hydrology and Earth System Science, **20**/3, 1211–1223. https://doi.org/10.5194/hess-20-1211-2016

HIEBL, J. & FREI, C. (2016): Daily temperature grids for Austria since 1961 – concept, creation and applicability. – Theoretical and Applied Climatology, **124**, 161–178. https://doi.org/10.1007/s00704-015-1411-4

HIEBL, J. & FREI, C. (2018): Daily precipitation grids for Austria since 1961 – development and evaluation of a spatial dataset for hydroclimatic monitoring and modelling. – Theoretical and Applied Climatology, **132**, 327–345. https://doi.org/10.1007/s00704-017-2093-x

HILBERG, S. & RIEPLER, F. (2016): Interaction of various flow systems in small alpine catchments: conceptual model of the upper Gurk Valley aquifer, Carinthia, Austria. – Hydrogeology Journal, **24**, 1231–1244, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/s10040-016-1396-9

HOCHLEITHNER, S. (2021): Valley on the Move. A transdisciplinary analysis of the socio-geological situation in Sibratsgfäll, Vorarlberg, with a specific focus on risks connected to hydrogeological Dynamics. – Unveröffentlichter Bericht im Rahmen von EXTRIG, 144 S., Geologische Bundesanstalt, Wien.

HOCHLEITHNER, S. (2022): Endbericht für die sozialwissenschaftliche Gesamtstudie. – Unveröffentlichter Bericht im Rahmen von EXTRIG, 41 S., Geologische Bundesanstalt, Wien. HOLZSCHUSTER, R. (2022): Datenevaluierung für das hydrogeologische Modell von dem Untersuchungsgebiet in Sibratsgfäll. – Unveröffentlichter Bericht, 82 S., Geologische Bundesanstalt, Wien.

HYNDS, P., REGAN, S., ANDRADE, L., MOONEY, S., O'MALLEY, K., DIPELINO, S. & O'DWYER, J. (2018): Muddy waters: refining the way forward for the "sustainability science" of socio-hydrogeology. – Water 2018, **10**/9, 1111, Basel. https://doi.org/10.3390/w10091111

ISOTTA, F., FREI, C., WEILGUNI, V., PERČEC TADIĆ, M., LASSÈGUES, P., RUDOLF, B., PAVAN, V., CACCIAMANI, C., ANTOLINI, G., RATTO, S., MUNARI, M., MICHELETTI, S., BONATI, V., LUSSANA, C., RONCHI, C., PANETTIERI, E., MARIGO, G. & VERTAČNIK, G. (2014): The climate of daily precipitation in the Alps: development and analysis of a highresolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data. – International Journal of Climatology, **34**, 1657–1675, Oxford. https://doi. org/10.1002/joc.3794

JACOB, D., PETERSEN, J., EGGERT, B., ALIAS, A., CHRISTENSEN, O.B., BOUWER, L., BRAUN, A., COLETTE, A., DÉQUÉ, M., GEORGIEVSKI, G., GEORGOPOULOU, E., GOBIET, A., MENUT, L., NIKULIN, G., HAENSLER, A., HEMPELMANN, N., JONES, C., KEULER, K., KOVATS, S., KRÔNER, N., KOTLARSKI, S., KRIEGSMANN, A., MARTIN, E., VAN MEIJGAARD, E., MOSELEY, C., PFEIFER, S., PREUSCHMANN, S., RADERMACHER, C., RADTKE, K., RECHID, D., ROUNSEVELL, M., SAMUELSSON, P., SOMOT, S., SOUSSANA, J.F., TEICHMANN, C., VALENTINI, R., VAUTARD, R., WEBER, B. & YIOU, P. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. – Regional Environmental Change, **14**, 563–578. https://doi. org/10.1007/s10113-013-0499-2

JARITZ, W. (2013): Ingenieurgeologie der Großhangbewegungen Sibratsgfäll und Rindberg. Geotechnische Grundlagen für den Gefahrenzonenplan Sibratsgfäll. – Unveröffentlichte Dissertation, 293 S., Technische Universität, Wien.

JARITZ, W., TUREWICZ, V., OTTOWITZ, D. & SCHATTAUER, I. (2022): Geologische 3D Modellierung von Sibratsgfäll. – Unveröffentlichter Bericht, 42 S., Geologische Bundesanstalt, Wien.

JURGENS, B. (2019): TracerLPM. https://www.usgs.gov/software/ tracerlpm

KAISER, J.C. (2005): Parameter estimation of transient flow problems with PEST in FEFLOW. – FEFLOW White Papers Vol. IV, DHI-WASY GmbH.

KIESLINGER, B., SCHÄFER, T., HEIGL, F., DÖRLER, D., RICHTER, A. & BONN, A. (2017): The Challenge of Evaluation: An Open Framework for Evaluating Citizen Science Activities. – SocArXiv, September 20. https://doi.org/10.31235/osf.io/enzc9

KNOBEN, W., FREER, J. & WOODS, R. (2019): Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling– Gupta efficiency scores. – Hydrology and Earth System Sciences, **23**, 4323–4331, Göttingen. https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019

KOTLARSKI, S., GOBIET, A., MORIN, S., OLEFS, M., RAJCZAK, J. & SMACOÏTS, R. (2022): 21<sup>st</sup> Century alpine climate change. – Climate Dynamics, **60**, 65–86. https://doi.org/10.1007/s00382-022-06303-3

KRALIK, M. (2015): Bestimmung der Mittleren Verweilzeiten ausgewählten Brunnen- und Quellwässern in Vorarlberg mittels Isotopen- und Spurengasanalysen. – Unveröffentlichter Bericht, Amt der Vorarlberger Landesregierung, 70 S., Bregenz.

KRALIK, M. (2022): Bestimmung der Einzugsgebietshöhe und der Wasseralter (Mittlere Verweilzeiten) des Untersuchungsgebiets Sibratsgfäll mittels Isotopenmessungen (<sup>18</sup>O/<sup>2</sup>H, <sup>3</sup>H/<sup>3</sup>He, <sup>14</sup>C, <sup>222</sup>Rn) und Gastracern (FCKW11,-12,-113, SF<sub>6</sub>). – Unveröffentlichter Bericht, 24 S., Geologische Bundesanstalt, Wien.

LIMAYE, S.D. (2017): Socio-hydrogeology and low-income countries: taking science to rural society. – Hydrogeology Journal, **25**/7, 1927–1930, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/s10040-017-1656-3

LINDINGER, H., GRATH, J., BRIELMANN, H., SCHÖNBAUER, A., GATTRIN-GER, I., FORMANEK, C., BROER, M., ROSMANN, T., HOLLER, C. & SZE-RENCSITS, M. (2021): Wasserschatz Österreich. Grundlagen für nachhaltige Nutzungen des Grundwassers. – Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, 122 S., Wien. https:// info.bmlrt.gv.at/dam/jcr:75a703dd-9c25-452a-ac06-5240abbd118a/Bericht\_Wasserschatz.pdf

LIU, F. & MAITLIS, S. (2010): Non-participant Observation. – In: MILLS, A.J., DUREPOS, G. & WIEBE, E. (Eds.): Encyclopedia of Case Study Research, 609–611, Los Angeles (SAGE Publications).

MAILLET, E.T. (1905): Mécanique et physique du globe: essai d'hydraulique souterraine et fluviale. – Mechanics and physiques of the world: an essay of subterranean and fluviatile hydraulics, 218 S., Paris (Hermann).

MARAUN, D. (2016): Bias correcting climate change simulations – a critical review. – Current Climate Change Reports, **2**, 211–220. https://doi.org/10.1007/s40641-016-0050-x

MARAUN, D., TRUHETZ, H. & SCHAFFER, A. (2021): Regional climate model biases, their dependence on synoptic circulation biases and the potential for bias adjustment: A process-oriented evaluation of the Austrian regional climate projections. – Journal of Geophysical Research, **126**/6, e2020JD032824. https://doi.org/10.1029/2020JD032824

MARKOVICH, K.H., MANNING, A.H., CONDON, L.E. & MCINTOSH, J.C. (2019): Mountain-Block Recharge: A Review of Current Understanding. – Water Resources Research, **55**/11, 8278–8304, Washington, D.C. https://doi.org/10.1029/2019WR025676

MASSON, D. & FREI, C. (2014): Spatial analysis of precipitation in a high-mountain region: exploring methods with multi-scale topographic predictors and circulation types. – Hydrology and Earth System Sciences, **18**, 4543–4563, Göttingen. https://doi. org/10.5194/hess-18-4543-2014

MESSER, N. & TOWNSLEY, P. (2003): Local institutions and livelihoods: Guidelines for analysis. – 140 S., Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Moss, R., EDMONDS, J., HIBBARD, K., MANNING, M., ROSE, S., VAN VUUREN, D., CARTER, T., EMORI, S., KAINUMA, M., KRAM, T., MEEHL, G., MITCHELL, J., NAKICENOVIC, N., RIAHI, K., SMITH, S., STOUFFER, R., THOMSON, A., WEYANT, J. & WILBANKS, T. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. – Nature, **463**, 747–756, London. https://doi.org/10.1038/nature08823

OBERHAUSER, R. & RATAJ, W. (1998): Vorarlberg 1:200.000, die Schritte zu einer geologisch-tektonischen Karte. – Jahresbericht der Geologischen Bundesanstalt, **1997** (1998), 26–27, Geologische Bundesanstalt, Wien.

OKTAY, J.S. (2012): Grounded theory. – 173 S., Oxford (Oxford University Press).

OLEFS, M. & KOCH, E. (2013): Projekt APOLIS – Austrian Photovoltaic Information System. – Endbericht, 70 S., Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.

OLEFS, M., SCHÖNER, W., SUKLITSCH, M., WITTMANN, C., NIEDERMO-SER, B., NEURURER, A. & WURZER, A. (2013): SNOWGRID – A new operational snow cover model in Austria. – Proceedings of the international snow science workshop Grenoble – Chamonix Mont-Blanc, 7–11 Oct 2013, 38–45, Grenoble. OLEFS, M., KOCH, R., SCHÖNER, W. & MARKE, T. (2020): Changes in snow depth, snow cover duration, and potential snowmaking conditions in Austria, 1961–2020 – A model based approach. – Atmosphere, **11**, 1330. https://doi.org/10.3390/atmos11121330

PEER, M., DÖRLER, D., ZALLER, J.G., SCHEIFINGER, H., SCHWEIGER, S., LAAHA, G., NEUWIRTH, G., HÜBNER, T. & HEIGL, F. (2021): Predicting spring migration of two European amphibian species with plant phenology using citizen science data. – Scientific reports, **11**/1, 21611. https://doi.org/10.1038/s41598-021-00912-4

PELLICCIOTTI, F., BROCK, B., STRASSER, U., BURLANDO, P., FUNK, M. & CORRIPIO, J. (2005): An enhanced temperature-index glacier melt model including the shortwave radiation balance: development and testing for Haut Glacier d'Arolla, Switzerland. – Journal of Glaciology, **51**, Cambridge. https://doi.org/10.3189/ 172756505781829124

PERRIN, C., MICHEL, C. & ANDRÉASSIAN, V. (2003): Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. – Journal of Hydrology, **279**, 275–289, Amsterdam. http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694%2803%2900225-7

PREUSSER, F., REITNER, J.M. & SCHÜCHTER, C. (2010): Distribution, geometry, age and origin of overdeepened valleys and basins in the Alps and their foreland. – Swiss Journal of Geosciences, **103**, 407–426, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/s00015-010-0044-y

RAEYMAEKERS, T. (2011): Forced Displacement and Youth Employment in the Aftermath of the Congo War: From making a living to making a life. – MICROCON Research Working Paper No. 38. https://doi.org/10.2139/ssrn.1762751

RE, V. (2015). Incorporating the social dimension into hydrogeochemical investigations for rural development: the Bir Al-Nas approach for socio-hydrogeology. – Hydrogeology Journal, **23**/7, 1293–1304, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/s10040-015-1284-8

RE, V. (2021): Socio-hydrogeology and Geoethics – State of the Art and Future Challenges. – Advances in Geoethics and Ground-water Management: Theory and Practice for a Sustainable Development, 372–377, Cham (Springer).

ROGELIS, M., WERNER, M., OBREGÓN, N. & WRIGHT, N. (2016): Hydrological model assessment for flood early warning in a tropical high mountain basin. – Hydrology and Earth System Sciences, discussion paper, Göttingen. https://doi.org/10.5194/hess-2016-30

SCHABENBERGER, O. & GOTWAY, C.A. (2005): Statistical methods for spatial data analysis. – 512 S., New York (Chapman and Hall/CRC).

SCHÖNER, W., KOCH, R., MATULLA, C., MARTY, C. & TILG, A.M. (2018): Spatiotemporal patterns of snow depth within the Swiss-Austrian Alps for the past half century (1961 to 2012) and linkages to climate change. – International Journal of Climatology, **39**, 1589–1603, Oxford. https://doi.org/10.1002/joc.5902

SEIBERL, W., MOTSCHKA, K., HEIDOVITSCH, M., JOCHUM, B., WINKLER, E., SUPPER, R., AHL, A. & PIRKL, H. (2002): Aerogeophysikalische Vermessung im Bereich Sibratsgfäll/Vlbg. – Unveröffentlichter Bericht, Bund/Bundesländer-Rohstoffprojekt Ü-L-G-020/00-1, 46 S., Geologische Bundesanstalt, Wien.

SEIBERT, J., STROBL, B., ETTER, S., HUMMER, P. & VAN MEERVELD, H.J. (2019): Virtual staff gauges for crowd-based stream level observations. – Frontiers in Earth Science, **7.** https://doi. org/10.3389/feart.2019.00070

SHEPARD, D.S. (1984): Computer mapping: The SYMAP interpolation algorithm. – In: GAILE, G.L. & WILLMOTT, C.J. (Eds.): Spatial Statistics and Models, 133–145, Dordrecht (Springer). STICHLER, W. & HERMANN, A. (1983): Application of environmental isotope techniques in water balance studies of small basins. – New Approaches in Water Balance Computations, IAHS, Hamburg, IAHS-148, 93–112, Hamburg.

SÜLTENFUSS, J. & MASSMANN, G. (2004): Datierung mit der <sup>3</sup>He-Tritium-Methode am Beispiel der Uferfiltration im Oderbruch. – Grundwasser, **4**, 221–234. https://doi.org/10.1007/s00767-004-0055-6

SUPPER, R., RÖMER, A., BIEBER, G. & JARITZ, W. (2005): A Complex Geoscientific Strategy for Landslide Hazard Mitigation – Case Study Sibratsgfäll. – Near Surface 2005 – 11<sup>th</sup> European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.13.B011

SWITANEK, M., TROCH, P., CASTRO, C., LEUPRECHT, A., CHANG, H., MUKHERJEE, R. & DEMARIA, E. (2017): Scaled distribution mapping: A bias correction method that preserves raw climate model projected changes. – Hydrology and Earth System Sciences, **21**, 2649–2666, Göttingen. https://doi.org/10.5194/hess-21-2649-2017

TAYLOR, K., STOUFFER, R. & MEEHL, G. (2012): An overview of CMIP5 and the experiment design. – Bulletin of the American Meteorological Society, **93**/4, 485–498, Boston. https://doi. org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1

TILCH, N., MOTSCHKA, K. & WINKLER, E. (2020): Endbericht des GBA-internen Projektes Radio-t. Untersuchung der Korrelation terrestrischer radiometrischer Messdaten mit Daten anderer Untersuchungsmethoden in ausgewählten Untersuchungsgebieten Vorarlbergs. Teilbericht 2: Bodenradiometrische Daten und deren Nutzen im Rahmen der Erstellung einer aeroradiometrisch basierten Substrat-Konzeptkarte für das Untersuchungsgebiet "Sibratsgfäll". – Unveröffentlichter Bericht, 64 S., Geologische Bundesanstalt, Wien.

TROY, T.J., KONAR, M., SRINIVASAN, V. & THOMPSON, S. (2015): Moving sociohydrology forward: a synthesis across studies. – Hydrology and Earth System Sciences, **19**/8, 3667–3679, Göttingen. https://doi.org/10.5194/hess-19-3667-2015

#### 9 Rechtsnormen

DIN 19682-7 (2015): Bodenbeschaffenheit – Felduntersuchungen – Teil 7: Bestimmung der Infiltrationsrate mit dem Doppelring-Infiltrometer.

DIN 19682-8 (2012): Bodenbeschaffenheit – Felduntersuchungen – Teil 8: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit mit der Bohrlochmethode.

ÖNORM B 2581 (1978): Landwirtschaftlicher Wasserbau – Dränung.

ÖNORM B 4401 (2020): Geotechnik – Zusammenhang zwischen Bohrverfahren, Güteklassen von Bodenproben und Probenmengen für geotechnische Laboruntersuchungen. USGS (2019): Atmospheric mixing ratios of CFC-11, CFC-12, CFC-13, CFC-13, and SF6 in North America (NH) compiled by the USGS CFC Lab Age Dating Group. https://water.usgs.gov/lab/ software/air\_curve/

VEREIN BEWEGTE NATUR SIBRATSGFÄLL (2022): Ein Dorf in Bewegung. http://www.bewegtenatur.at

VINCENTE-SERRANO, S.M., BEGUERÍA, S. & LÓPEZ-MORENO, J.I. (2010): A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. – Journal of Climate, **23**/7, 1696–1718, Boston. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

WALPOLE, M.J. & SHELDON, I.R. (1999): Sampling butterflies in tropical rainforest: An evaluation of a transect walk method. – Biological conservation, **87**/1, 85–91, Amsterdam. https://doi. org/10.1016/S0006-3207(98)00037-8

WASSENAAR, L.I., HENDRY, M.J., CHOSTNER, V.L. & LIS, G.P. (2008): High Resolution Pore Water  $\delta^2 H$  and  $\delta^{18}O$  Measurements by H\_2O(liquid)-H\_2O(vapor) – Equilibration Laser Spectroscopy. – Environmental Science and Technology, **42**/24, 9262–9267, Washington, D.C. https://doi.org/10.1021/es802065s

WÖHRER-ALGE, M. (2013): Landslide Management in Austria with Particular Attention to Hazard Mapping and Land Use Planning. – In: MARGOTTINI, C., CANUTI, P. & SASSA, K. (Eds.): Landslide Science and Practice, 231–237, Berlin–Heidelberg (Springer).

YUE, S., PILON, P. & CAVADIAS, G. (2002): Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. – Journal of Hydrology, **259**, 254–271, Amsterdam. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00594-7

ÖNORM EN ISO 5667-1 (2007): Wasserbeschaffenheit – Probenahme – Teil 1: Anleitung zur Erstellung von Probenahmeprogrammen und Probenahmetechniken.

ÖWAV (2017): ÖWAV-Regelblatt 205: Nutzung und Schutz von Quellen in nicht verkarsteten Bereichen. – 72 S., Austrian Standards plus Publishing, Wien.

# Hidden.ice

# Changing debris cover on Eastern Alpine glaciers: Quantification and hydrological impacts

Veränderte Schuttbedeckung auf ostalpinen Gletschern: Quantifizierung und hydrologische Auswirkungen



Blick vom Rußkopf auf den Jamtalferner (Silvretta, Tirol, Österreich; Foto: Kay Helfricht)

Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung Österreichische Akademie der Wissenschaften, Innsbruck.



ÖSTERREICHISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN



Arbeitsbereich für Wasserbau

Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement (IHG) Universität für Bodenkultur Wien

Lehrstuhl für Physische Geographie Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt

Arbeitsbereich Wasserbau Universität Innsbruck

ENVEO – Environmental Earth Observation IT GmbH, Innsbruck.







ABHANDLUNGEN	DER GE	OSPHERE	AUSTRIA

ISSN 2960-4494

ISBN 978-3-903252-15-8

Band 77 Seite 83-129 Wien, Mai 2023

# Veränderte Schuttbedeckung auf ostalpinen Gletschern: Quantifizierung und hydrologische Auswirkungen (Hidden.ice)

KAY HELFRICHT<sup>1</sup>, CLEMENS HILLER<sup>1,2</sup>, SEVERIN HOHENSINNER<sup>3</sup>, FLORIAN HAAS<sup>4</sup>, GABRIELE SCHWAIZER<sup>5</sup>, STEFAN ACHLEITNER<sup>2</sup> & ANDREA FISCHER<sup>1</sup>

46 Abbildungen, 10 Tabellen

Österreichische Karte 1:50.000 BMN / UTM 170 Galtür / NL 32-06-01 Gaschurn

Schuttbedeckte Gletscher Sedimenttransport Fernerkundung Hydromorphologisches Monitoring Landschaftsentwicklung

#### Inhalt

Zu Ab	sammenfassung
1	Einleitung und Motivation (K. HELFRICHT)
2	Projektgebiet (K. HELFRICHT, C. HILLER)
3	Angewandte Methoden und Messverfahren (C. HILLER, K. HELFRICHT, F. HAAS, S. HOHENSINNER, G. SCHWAIZER) 90   3.1 Historische Landbedeckung. 90   3.2 Satellitenfernerkundung 91   3.3 Abflussmessungen 93   3.4 Laserscanning 93   3.4.1 Airborne LiDAR Datenaufnahme 93   3.4.2 Terrestrische LiDAR Datenaufnahme 94   3.4.3 Datenprozessierung 95   3.5 Drohnenaufnahme 95   3.5.1 UAV-Photogrammetrie. 95   3.5.2 Thermalbilder. 97   3.6.1 Zeitraffer-Kameras. 97   3.6.2 Grenzwertpegel 97   3.6.3 In-Situ Messung der Korngrößenverteilung 95
4	Historische Landschaftsentwicklung im oberen Jamtal (S. HOHENSINNER, K. HELFRICHT, G. SCHWAIZER, A. FISCHER). 99   4.1 Analyse der kartografischen Grundlagen 99   4.2 Entwicklung im Jamtalferner-Teileinzugsgebiet 1820–2015 101   4.3 Entwicklung der fluvialen Korridore im proglazialen Gebiet 1820–2015 102   4.4 Zusammenhang Geländeneigung und Entwicklung fluvialer Korridore 1870–2015 103   4.5 Vergleich "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI) und historische Analysen 103
	A 6 Zusammentassung historische Landbedeckung im oberen Jamtal

KAY HELFRICHT, CLEMENS HILLER, ANDREA FISCHER: Österreichische Akademie der Wissenschaften, Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung, Innrain 25, 6020 Innsbruck, Österreich. Kay.Helfricht@oeaw.ac.at, Clemens.Hiller@oeaw.ac.at, Andrea.Fischer@oeaw.ac.at 1

CLEMENS HILLER, STEFAN ACHLEITNER: Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Wasserbau, Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck, Österreich. Clemens.Hiller@uibk.ac.at, 2 Stefan.Achleitner@uibk.ac.at

SEVERIN HOHENSINNER: Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement (IHG), Gregor-Mendel-Straße 33, 1180 Wien, Österreich. 3 Severin.Hohensinner@boku.ac.at

FLORIAN HAAS: Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt, Lehrstuhl für Physische Geographie, Ostenstraße 14, 85072 Eichstätt, Deutschland. Florian.Haas@ku.de GABRIELE SCHWAIZER: ENVEO – Environmental Earth Observation IT GmbH, Fürstenweg 176, 6020 Innsbruck, Österreich. Gabriele.Schwaizer@enveo.at 5

5	Land 5.1	Ischaftsveränderungen im Bereich des Gletschervorfelds des Jamtalferners (F. HAAs)	105 106
	5.2	Hangdynamik	108
		5.2.1 Hangdynamik beeinflusst durch Toteis	108
		5.2.2 Hangdynamik in Abhängigkeit von der Zeit seit Eisfreiwerdung.	108
6	Schu	uttbedeckung auf Gletschern (G. Schwalzer, K. Helfricht)	110
	6.1	Schuttbedeckung am Jamtalferner	110
	6.2	Analyse der Schuttbedeckung in den Stubaier Alpen.	111
	6.3	Veränderungen der Schuttbedeckung auf Gletschern in Osterreich	112
7	Hydr	o-morphologisches Monitoring (C. HILLER, K. HELFRICHT, S. ACHLEITNER)	115
	7.1	Entwicklung des Abflusses	115
	7.2	Kartierung der Gerinnestruktur von Drohnenaufnahmen.	117
	7.3	Überflutungsanalysen aus Zeitraffer-Aufnahmen	117
	7.4	Maximale Wasserspiegellagen im Gletschervorfeld	121
	7.5	Von geometrischer Oberflächenrauheit zu Korngrößenverteilungskarten	122
8	Synt	hese und Ausblick (K. Helfricht, F. Haas, S. Achleitner, S. Hohensinner, C. Hiller, G. Schwaizer, A. Fischer)	124
	8.1	Transdisziplinärer Austausch und interdisziplinäre Arbeiten	124
	8.2	Glazialer und proglazialer Sedimenttransport	124
	8.3	Ausblick	126
Dai	η <b>κ.</b>		127
Lite	eratur.		127

#### Zusammenfassung

Sowohl Klimabeobachtungen als auch Klimaszenarien zeigen weltweit einen Temperaturanstieg. Im alpinen Raum ist dieser Anstieg annähernd doppelt so hoch wie im globalen Mittel, was sich unter anderem in starken Veränderungen auf Gletschern und Permafrostböden in den Alpen bemerkbar macht. Der massive Gletscherrückzug in den vergangenen Jahrzehnten ist die sichtbarste Evidenz des Klimawandels im Hochgebirgsraum, und hat erhebliche Auswirkungen auf Hochgebirgsabflüsse. Mit Gletscherschwund und zunehmender Steinschlagaktivität sammeln sich Schutt und Geröllablagerungen an den gegenwärtigen Gletscherzungen an. Dies reduziert teilweise die Eisablation und begünstigt die Eisspeicherung unter dem Schutt. Es wird angenommen, dass dieser Schutt, sobald er im Gletschervorfeld abgelagert ist, in hohern Maße für den Transport im Gletscherbach zur Verfügung steht, insbesondere bei starken Niederschlagsereignissen und hohern Gletscherschmelzwasserabflusse. Im Allgemeinen sind Gebiete im Übergang von glazialen zu nicht-glazialen Bedingungen sehr instabil und anfällig für Erosion über einen großen Bereich von Abflüssen. Ein erhöhter Sedimenttransport ist vor allem dort von Relevanz, wo Infrastruktur zur Speicherung und Ableitung von Wasser für die Energieerzeugung in Hochgebirgsräumen vorhanden ist. Das Projekt Hidden.ice zielt darauf ab, unser Wissen über die hydrologischen Auswirkungen der zunehmenden Schuttablagerungen in der Übergangszone von Gletschereis zu proglazialen Gebieten zu vertiefen und vorrangig folgende Fragen zu beantworten:

1) Wo und in welchem Ausmaß sind die österreichischen Gletscher mit zunehmenden Schuttablagerungen konfrontiert?

2) Wie ist das supraglaziale Geschiebe mit dem fluvialen Transport verbunden?

3) Wie entwickeln sich die erneute Sedimentbewegung und das Gerinnenetzwerk im proglazialen Bereich eines teilweise schuttbedeckten Gletschers über die Zeit?

In dem Projekt wurde ein interdisziplinärer Ansatz zur Erfassung der Veränderungen und grundlegenden Prozesse in unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen gewählt. Die verschiedenen Fachrichtungen griffen auf gemeinsame Datensätze und Ergebnisse zurück, um aus dieser Kombination heraus die Detailinformation der Gegenwart auf Analysen der Vergangenheit zu übertragen. Aus den Ergebnissen der Vergangenheit wiederum ergibt sich eine Jahrzehnte übergreifende Analyse der Veränderungen, die im transdisziplinären Austausch mit Akteurinnen und Akteuren vor Ort das Prozessverständnis hinsichtlich eigener Beobachtungen fördern können. Dabei greift das Projekt Hidden.ice gezielt auf die fortlaufenden Verbesserungen der zeitlichen und räumlichen Auflösung von Fernerkundungsdaten von verschiedenen Plattformen (Satelliten, Flugzeug-gestützt, UAV-basiert, terrestrisch) und deren Auswertung zurück. Im Rahmen dieser Studie werden insbesondere die kontinuierlichen Beobachtungen am etablierten LTER-Standort (Long Term Ecological Research) Jamtalferner in Wert gesetzt sowie erweitert. Es erfolgte eine Rekonstruktion der historischen Landbedeckung im Jamtal auf Grundlage von Karten aus dem 19. Jahrhundert bis hin zu modernen Geländeinformationen aus Orthofotos und Höhenmodellen, welche ihrerseits die Grundlage für die Interpretation historischer Karten bilden. Vergleiche mit Satellitenaufnahmen zeigen den Zusammenhang zwischen geomorphologischen Aktivitäten und der Vegetationsentwicklung über Dekaden im Gebirgsraum. Seit den 1980er Jahren ermöglichen Satellitendaten die überregionale Analyse der Schuttbedeckung am Eis mit zunehmender Genauigkeit. Die hydrologischen Auswirkungen der Schuttbedeckung und des Sedimenttransports im Gletschervorfeld wurde mit einem Monitoring bestehend aus wiederholten Geländeaufnahmen aus der Luft sowie am Boden und Messungen abflussrelevanter Parameter untersucht. Die Daten und Dokumentationen der hydromorphologischen Prozesse bilden die Grundlage für hydraulische Modellierung des Sedimenttrans

Die Historische Landschaftsentwicklung im oberen Jamtal zeigt eine Zunahme der fluvial geprägten Sedimentflächen zwischen 1820 und 2015 um 126 % aufgrund der Freilegung neuer fluvialer Systeme im Bereich der zurückweichenden Gletscherzunge. Hohe Schmelzwasserabflüsse und extreme Niederschlagsereignisse im Sommer sowie ein ausreichendes Sedimentangebot im Vorfeld des Gletschers (Proglazialbereich) kontrollieren primär dieses neue, hochdynamische System. Etwa die Hälfte der neuen Gewässer, die sich zwischen 1870 und 1921 in den ehemals vergletscherten Gebieten entwickelt hatten, war 2015 noch vorhanden. Fast ein Fünftel der neuen Gewässer wurde wieder unter Schutt begraben und fast ein Drittel wurde von Vegetation besiedelt. Eine Zunahme des alpinen Grünlands um 196 % zeigt die Anpassung der Vegetation an das veränderte Klima sowie eine langfristige Stabilisierung von proglazialem Ödlande. In jüngerer Vergangenheit verläuft der Prozess der Entgletscherung jedoch schneller als die Besiedelung durch die alpine Vegetation. Dementsprechend dehnt sich das Ödland aus und kann den Sedimentnachschub für das fluviale System verstärken.

Eine detaillierte Analyse der Landschaftsveränderungen im Bereich des Gletschervorfelds des Jamtalferners auf Grundlage von Laserscanning-Daten zeigt die unterschiedlichen Dynamiken der geomorphologischen Prozesse und deren Sedimenteintrag in das Gerinne des Gletscherbachs. Die aus den Höhenänderungen erkennbare Hangdynamik der Seitenmoränen lässt mit zunehmendem Abstand zur heutigen Zungenposition erkennbar nach. Generell sind die aktiven Hangbereiche vom Hauptgerinne des Jambachs entkoppelt, speisen also kein Sediment in die fluvialen Systeme ein. Die Gerinnedynamik selbst ist sehr vom Abschnitt des Baches abhängig, stellt sich generell aber als hoch heraus. Maßgebliche Prozesse sind hier die Ablagerung und Umverteilung im unmittelbaren Gletschervorfeld, gefolgt von einer Erosionstrecke im Bereich eines seitlich einmündenden Seitentals und dessen Gletscherbaches. In weiterer Folge sind die in den Gletscherbach seitlich einmündenden episodisch wasserführenden Gerinne als Sedimentzubringer im Falle von Extremereignissen (in erster Linie Muren, zum Teil Lawinen) erkennbar.

Im Vergleich dazu ist der direkte Beitrag der **Schuttbedeckung vom Gletscher** gering. Die Analyse der Oberflächenveränderung von österreichischen Gletschern zeigt aber mehrheitlich eine Zunahme der schuttbedeckten Gletscherflächen. Das dafür verantwortliche Gesteinsmaterial bricht von umliegenden Hängen oder Felsnasen innerhalb der vergletscherten Gebiete ab und kommt auf der vergletscherten Fläche zu liegen. Mit der Eisbewegung wird das Gesteinsmaterial in Richtung Tal transportiert. Auch wenn die schuttbedeckten Gletscherbereiche zum Teil geringe Flächen aufweisen, lassen sich Gebiete mit hohem Sedimenttransport auf und im Eis der Gletscher erkennen. Dabei zeigen sich bestimmte Gebirgsgruppen aufgrund der Rahmenbedingungen (Geologie, Topografie, Zustand der Gletscher) als Hotspots der Zunahme der Schuttbedeckung.

Neue Ansätze des **hydro-morphologischen Monitorings** von Schwemmflächen konnten im Projekt erarbeitet werden. Sie liefern wichtige Eingangsgrößen für die hydraulische Modellierung des Gletschervorfeldes. Zudem dienen die Beobachtungen zur weiteren Validierung der Modellansätze. Die automatisierte Erkennung von überfluteten Flächen aus Kamerabildern gibt eine räumliche Information über die Verteilung der Abflüsse im Gletschervorfeld und damit über die Verteilung von potentiellen Erosions- und Ablagerungsflächen. Ein weiterer Meilenstein zur flächigen Erfassung wichtiger hydro-morphologischer Parameter ist die Ableitung der Korn-größenverteilung aus Berechnungen der Oberflächenrauheit basierend auf Punktwolken, die photogrammetrisch aus Drohnenaufnahmen errechnet wurden. Auf deren Grundlage lassen sich fluvial überarbeitete Flächen von solchen unterscheiden, die nicht vom fluvialen Sedimenttransport erfasst sind. Für alle bereits eisfreien Gebiete zeigen die angewandten Monitoringkonzepte das hohe Potential hinsichtlich der Detektion von maßgeblichen Veränderungen und der dafür verantwortlichen Prozesse. Ein umfängliches Langzeitmonitoring, aufbauend auf einem meteorologischen wie hydrologischen Messnetz sowie flächigen, zeitlich wie räumlich hochaufgelösten Ge-ländeaufnahmen, wie es in LTER-Gebieten möglich ist, bietet die nötige Grundlage, um stetig formende Prozesse von spontanen Ereignissen und deren Auswirkungen getrennt analysieren zu können und damit deren Beitrag für den gesamten Sedimenthaushalt eines solchen Gebietes bestimmen zu können. Der mit den dynamischen Veränderungen der Gletschervorfelder in engem Zusammenhang stehende Geschiebe- und Schwebstofftransport zeigte über die Projektlaufzeit die Bandbreite der zu erwartenden Systemzustände auf. Neben kurzfristigen, sehr intensiven Geschiebe- und Schwebstofftransport zeigte über die Projektlaufzeit die Bandbreite der zu erwartenden Systemzustände auf. Neben kurzfristigen, sehr intensiven Geschieber 2022 beobachtet werden.

Die historische Entwicklung der hochalpinen Geländetopografie, das heißt der Hänge der vergletscherten Moränen und die des Talbodens, ist entscheidend für das Verständnis der potentiellen fluvialen Sedimentfracht, der Murgänge und Stabilisierungsprozesse durch alpine Vegetation. Im Projekt kam es zur interdisziplinären

Zusammenarbeit der Fachbereiche Glaziologie, Hydrologie und Wasserbau, Fernerkundung, Landschafts- und Umweltgeschichte sowie Umweltprozesse und Naturgefahren. Durch die Verschneidung der in den jeweiligen Fachdisziplinen gewonnenen Daten und verwendeten Methoden sowie der gemeinsam erarbeiteten Erkenntnisse konnte eine räumlich wie zeitlich ausgedehnte Untersuchung der maßgeblichen, den Schutt- und Geschiebehaushalt beeinflussenden Prozesse erfolgen. Daraus ergibt sich eine Bandbreite an räumlichen sowie zeitlichen Skalen, auf denen die Änderungen der supra- und proglazialen sowie in weiterer Folge fluvialen Schuttflächen beobachtet wurden. Der interdisziplinäre Austausch im Projekt gewährleistete, dass Erkenntnisse aus historischen Karten in Verbindung mit aktuellen Satellitenaufnahmen gebracht werden konnten, sowie großflächige Analysen auf Grundlage selbiger Aufnahmen mit lokalem, räumlich hochaufgelöstem Prozessmonitoring im Gletschervorfeld. Im transdisziplinären Austausch mit unterschiedlichen Akteurinnen und Akteuren konnte ein lokales Bild der Sedimentdynamik am Beispiel des Hinteren Jamtals erarbeitet werden.

#### Changing debris cover on Eastern Alpine glaciers: Quantification and hydrological impacts (Hidden.ice)

#### Abstract

Both climate observations and modelled scenarios show an increase in global temperatures. In the Alps, this increase is almost twice as high as the global average, which results in rapid changes in glaciers and permafrost. The severe mass loss of glaciers in recent decades is the most visible evidence of climate change in high mountain areas and has a significant impact on the runoff of high mountain streams. With melting glaciers and increasing rockfall activity due to warming permafrost, debris and boulders accumulate on the glacier surface and are transported over time to the front of the glacier, where the material is deposited. Such proglacial sediment storages are expected to act as sediment source during flood events following heavy rainfall or high glacial meltwater runoff. This means an increase in sediment transport, which is particularly relevant in places where those streams are used for energy production.

The Hidden.ice project aims to deepen our knowledge about the hydrological effects of increasing debris deposition in the transition zone from glacial ice to proglacial areas, and addressed these main questions:

1) Where and to what extent are Austrian glaciers exposed to increased debris deposition?

2) How is supraglacial debris linked to fluvial transport?

3) How do sediment transport and channel systems evolve over time in the proglacial area of a partially debris-covered glacier?

In this project, an interdisciplinary approach was adopted to capture the changes and underlying processes at multiple spatial and temporal scales. The various disciplines involved drew on common data sets and results to transfer detailed insights from the present to analyses of the past. In turn, analyses of historical changes over recent decades stimulated by the transdisciplinary exchange with relevant stakeholders promote process understanding of present observations. In this context, the Hidden.ice project benefits from ongoing improvements in the temporal and spatial resolution of remote sensing data from various platforms (satellites, manned and unmanned aircraft systems, terrestrial) and their analysis. Within this study, the continuous monitoring at the established LTER (Long Term Ecological Research) site Jamtalferner adds extended value. We carried out reconstructions of the historical land cover in the Jamtal valley based on maps dating as far back as the early 19<sup>th</sup> century. Modern terrain information from orthophotos and elevation models, in turn, formed the basis for the interpretation of such historical maps. Comparisons with satellite images show the relation between geomorphological activities and vegetation development over decades in the mountainous area. Since the 1980s, satellite data have enabled increasingly accurate areal analysis of debris cover on glaciers. The hydrological effects of debris cover and sediment transport in the glacier forefield were monitored with repeated aerial and ground surveys and continuous measurements of runoff during hydrological summers. The data and documentation of hydro-morphological processes form the basis for hydraulic modelling of sediment transport in these highly variable areas.

Historical landscape evolution in the upper Jamtal valley shows a 126 % increase in fluvially influenced sediment areas between the years of 1820 and 2015 as a result of the exposure of formerly subglacial fluvial systems by the retreating glacier tongue. The recently de-glaciated forefield (proglacial area) is a highly dynamic system, primarily controlled by high meltwater runoff and extreme precipitation events in summer, as well as abundant sediment in its domain. Only about half of the new water bodies that had developed between the years 1870 and 1921 in the once-glaciated areas were still present in 2015. Almost one-fifth of these new waters were reburied by sediments and almost one-third were colonised by vegetation. A 196 % increase in alpine grassland indicates the adaptation of vegetation to the changing climate, as well as a long-term stabilisation of proglacial wasteland. In the recent past, however, the process of deglaciation has been faster than colonisation by alpine vegetation. As a result, the total area of wasteland increasingly augments the sediment supply to the fluvial system.

A detailed analysis of the landscape changes in the glacier forefield of the Jamtalferner based on laser-scanning data reveals the dynamics of the geomorphological processes and their sediment input into the channel of the glacial stream. The intensity of slope dynamics in the lateral moraines, as indicated by elevation changes, decreases noticeably with distance from the present glacier tongue position. In general, the active slope areas are decoupled from the main channel of the Jambach stream and therefore do not contribute to fluvial sediment transport. The dynamics of the channel depend largely on the specific section of the stream but are generally very high. Here, key processes are deposition and redistribution in the immediate glacier forefield, followed by erosion in the confluence area at the lower margin of the proglacial outwash plain. In subsequent sections, lateral tributaries to the glacier stream supply sediment particularly during extreme runoff events.

By comparison, there is only minor direct sediment contribution from the debris cover of the glacier to the total sediment transport. However, an analysis of the surface change of Austrian glaciers reveals an increase in debris-covered glacier areas in most cases. Rockfall debris from surrounding slopes and outcrops from within the catchment accumulates on the glacier surface. The rock material is then transported towards the glacier front by the ice flow. Although some of the debris-covered glacier areas are small, we identified areas with high supra- and englacial sediment transport. Subject to environmental conditions (lithology, topography, glacier condition), certain mountain groups proved to be hotspots for the increase in debris cover.

New approaches for hydro-morphological monitoring of alluvial surfaces were developed in this project and provide crucial input variables for hydraulic modelling of the glacier forefield. In addition, the observations serve to further validate the model approaches. The automated detection of flooded areas from RGB camera images delivers spatial information on the distribution of runoff and thus on the locations of potential erosion and deposition zones. Another milestone for the two-dimensional recording of key hydro-morphological parameters is the derivation of surficial grain size distribution from calculations of the surface roughness. This approach used photogrammetric point clouds calculated from drone imagery, which also allows estimates of the hydraulic roughness in the proglacial outwash plain. These data can be used to distinguish fluvially reworked areas from those that are not or only infrequently affected by fluvial sediment transport. For the already ice-free proglacial areas, the applied monitoring concepts demonstrate a high potential for identifying significant surface changes and the underlying processes. Comprehensive long-term monitoring, based on a meteo-hydrological measurement network, as well as area-wide, high temporal and spatial resolution terrain surveys, as is possible particularly on LTER sites, establishes the necessary basis for analysing continuously forming processes separately from discrete events and their effects. In this way, we can determine their proportional contribution to the total sediment balance in such a study site. The bedload and suspended sediment transport, which is closely related to the dynamic changes in the glacier forefield, displayed the range of system states to be expected in the project period. In addition to short-term but highly concentrated bedload yields triggered by well-defined events, we also observed a generally increased sediment transport over the exceptional melt period of summer 2022.

The historical development of the high alpine terrain, especially the moraine slopes and the valley floor, is crucial for understanding the potential of fluvial sediment yields, debris flows and stabilisation processes by alpine vegetation. This project involved interdisciplinary collaboration of experts in the fields of glaciology, geomorphology, hydrology and hydraulic engineering, natural hazards, remote sensing, as well as landscape and environmental history. The integration of data and methods obtained in the respective disciplines as well as the jointly developed findings made it possible to conduct a spatially and temporally comprehensive investigation of the significant processes influencing the debris and bedload balance. This meant that the changes in the supra- and proglacial and subsequently fluvial surface sediments could be examined in a wide range of spatial and temporal scales. The interdisciplinary exchange in the project ensured that findings from historical maps could be combined with observations from modern satellite images and large-scale analyses of the same with local, high spatial resolution process monitoring in the glacier forefield. Transdisciplinary exchange with relevant stakeholders allowed us to develop a local assessment of sediment dynamics in the Jamtal valley pilot area.

# 1 Einleitung und Motivation

Angesichts der raschen Klimaerwärmung in den Alpen (APCC, 2014) ist der Gletscherrückgang eine der offensichtlichsten Auswirkungen in Hochgebirgslandschaften (z.B. ZEMP et al., 2015). In Österreich haben die Gletscher seit der Kleinen Eiszeit um 1850 im Durchschnitt mehr als 50 % ihrer Gesamtfläche und zwei Drittel Ihres Volumens verloren (FISCHER et al., 2015; HELFRICHT et al., 2019). Dabei nimmt nicht nur die Eisbedeckung ab, sondern es verändern sich auch die Eigenschaften der Eisoberfläche (FISCHER et al., 2021). Mit zunehmender Erwärmung und Auftauen des Permafrostes führen vermehrtes Auftreten von Steinschlag und Felsstürzen sowohl auf den Gletschern als auch in den jüngst von den Gletschern freigegebenen, proglazialen Gebieten zu erhöhten Mengen an Schutt und Sedimenten (z.B. HAEBERLI, 2005; CHIARLE et al., 2007; GRUBER & HAEBERLI, 2007; HUGGEL et al., 2012; KRAUTBLATTER et al., 2013; LANE et al., 2017; VEHLING et al., 2017).

Die Schuttbedeckung spielt wiederum eine wichtige Rolle bei der Entwicklung des Gletscherrückganges, da sie einen großen Einfluss auf die Schmelzraten (COLLIER et al., 2015) und damit auch auf die Hydrologie talauswärts hat. In der Übergangszeit von glazialen zu nicht-glazialen Bedingungen, die auch als "paraglazial" bezeichnet werden (z.B. CHURCH & RYDER, 1972; BALLANTYNE, 1995), kann die geomorphologische Prozessaktivität sehr hohe Raten aufweisen.

Die schwindenden Gletscher legen Bereiche mit losem Schutt und Moränenmaterial frei. Diese Ablagerungen können insbesondere bei Starkniederschlägen in Verbindung mit hohen Gletscherschmelzabflüssen leicht fluvial transportiert werden. Die gesteigerte Effizienz der fluvialen Umformung erhöht zunächst die Sedimentausbeute in den eisfrei gewordenen Gebieten (z.B. SLAYMAKER, 2009, 2011). Zudem kann die Sedimentausbeute zunehmen, wenn der Gletscherrückgang die ehemals eisbegrenzten subglazialen Rinnen durch Bäche ersetzt, welche freier in Ihrer Ausbreitung sind, um innerhalb der proglazialen Gebiete seitlich zu wandern (LANE et al., 2017). Dies setzt sich in Zeiten eines schnellen Gletscherrückzugs in höhergelegene Bereiche fort.

Glaziale Abflussregime sind typischerweise durch starke tägliche und saisonale Zyklen gekennzeichnet, die in den Sommermonaten Abflussspitzen aufgrund der maximalen Eisschmelze nach Mittag verursachen. Dieses saisonal schwankende Abflussregime in alpinen Einzugsgebieten führt dazu, dass nur tageszeitlich abhängig nur eine bestimmte Korngrößenfraktion mobilisiert werden kann. Dabei kann das Verhältnis zwischen Abfluss und Transportrate zeitlich variieren. Eine weitgehend ungelöste Aufgabe ist die Beschreibung der Wirkung der beobachteten Hysterese in der Abfluss-Sedimenttransport-Bewertungskurve. Die Quellentrennung des flussabwärts beobachteten Sedimenttransports und dessen jahreszeitliche Variation zur Zuordnung von Sedimentquellen ist noch Teil der Grundlagenforschung (z.B. MAO et al., 2014). Schutt und Sedimente von Gletschern sind dabei eine kontinuierliche Quelle. Insbesondere bei extremen Niederschlagsereignissen ist der Transport von Schwebstoff und Geschiebe groß, und das während regelmäßiger Gletscherschmelze in proglazialen Gebieten abgelagerte Sediment kann den dann ohnehin erhöhten Geschiebetransport zusätzlich verstärken (z.B. BAEWERT & MORCHE, 2014; HECKMANN et al., 2016). Das Verständnis der Beziehung von Schuttbedeckung und Sedimenttransport in proglazialen Gebieten ist daher ein Schlüssel für die frühzeitige Erkennung potentieller Naturkatastrophen (FISCHER et al., 2019a).

Die Degradation des Permafrosts neben den Gletschern ist eine weitere Auswirkung der Klimaerwärmung, die den Sedimentfluss aus alpinen Hängen im Allgemeinen erhöht (HUGGEL et al., 2012; BENNETT et al., 2013). Dabei kann die vorherrschende Lithologie der Gesteinsmassen Steinschlag und Felsstürze aus bestimmten periglazialen Gebirgszonen erleichtern (ENGL et al., 2008; MESSENZEHL et al., 2018). Insbesondere im Bereich von Kargletschern stammen 80 % des auf Gletscheroberflächen akkumulierten Gesteinsmaterials aus den ersten 20 m direkt über der Gletscheroberfläche (KEUSCHNIG et al., 2016; HART-MEYER et al., 2020). Am Gepatschferner in den Ötztaler Alpen wurde jedoch festgestellt, dass nur ein kleiner Anteil des Gesteinsmaterials aus den Wänden von weniger als 2 % das Gerinnesystem in der proglazialen Zone erreicht (HECKMANN et al., 2016).

Bei einem ausgeglichenen Gletscherzustand wird das auf der Gletscheroberfläche abgelagerte Geschiebe in das Gletschereis eingebaut und zur Zunge transportiert, wo es auftaucht und sich in Form von Moränen anreichert. In Zeiten, in denen die Fließgeschwindigkeiten in den letzten Jahrzehnten stark abgenommen haben (HELFRICHT et al., 2014), wird der Schutttransport verlangsamt, was zu einer verstärkten Ablagerung von Schutt auf den aktuell abflie-Benden Gletscherflächen führt (HAEBERLI et al., 2007). Erreicht die Ablagerung von Schutt eine kritische Tiefe von mehreren Zentimetern, wird die Eisschmelze reduziert, so dass schuttbedecktes Eis in proglazialen Gebieten noch lange nach dem Rückzug des Hauptgletschers bestehen bleibt (z.B. HAEBERLI, 2005; NICHOLSON & BENN, 2013). Hochauflösende optische Satellitendaten der Copernicus Sentinel-2-Satelliten und der Landsat-Satellitenserie werden in großem Umfang zur Erstellung von Gletscherkatastern in Gebirgsregionen weltweit verwendet. Methoden zur Kartierung von Gletschereis- und Schnee-/Firnflächen aus hochauflösenden optischen Satellitendaten sind automatisiert (z.B. PAUL et al., 2016), aber die Identifizierung von schuttbedeckten Eisflächen erfordert immer noch eine manuelle Überarbeitung. Ein automatisierter Ansatz zur Klassifizierung von Gletscherzonen und Schuttbedeckung auf alpinen Gletschern, der auf den spektralen Reflexionsfähigkeiten von wolkenfreien Copernicus Sentinel-2und Landsat-Szenen basiert, wurde von SCHWAIZER et al. (2017) entwickelt und soll im Rahmen des Projektes eine gebirgsübergreifende Anwendung finden.

Die Verwendung von Fernerkundungsansätzen ermöglicht im Allgemeinen kurz- bis mittelfristige Rückschlüsse auf die Flussdynamik und die Landbedeckung (siehe Satellitenfernerkundung). Für die Analyse von langfristigen Veränderungen müssen jedoch historische Karten verwendet werden (HOHENSINNER et al., 2013). Ein erster Versuch, die veränderte Flussmorphologie von Schmelzwasserbächen und Oberläufen alpiner Flüsse in den letzten 200 Jahren zu analysieren, wurde von HOHENSINNER et al. (2021b) für die 143 größten Flüsse der Alpen unternommen. Eine zusammenhängende Langzeituntersuchung der Folgen des Gletscherrückgangs und der damit verbundenen Veränderungen des Abfluss- und Sedimentregimes auf die Flussmorphologie flussabwärts steht jedoch noch aus.

Das übergeordnete Ziel des Hidden.ice-Projektes ist die Untersuchung des Einflusses von supra- und proglazialem Schutt ostalpiner Gletscher auf Hydrologie und den Sedimenttransport. Es untersucht die Verbreitung und Prozesse der Schuttbedeckung im Vorfeld ostalpiner Gletscher, indem es die Fragen stellt:

- (i) Wo und in welchem Ausmaß sind die österreichischen Gletscher mit einer zunehmenden Schuttbedeckung konfrontiert?
- (ii) Wie ist der supra- und proglaziale Schutt mit dem fluvialen Transport verbunden?
- (iii) Wie entwickeln sich die erneuten Sedimentbewegungen und das Gerinnenetz im proglazialen Bereich im Laufe der Zeit?

Abbildung 1 zeigt die verschiedenen Kaskaden des Sedimenttransportes im vergletscherten und proglazialen Gelände, wie sie im Projekt verstanden und zum Teil untersucht werden. Zur Beantwortung der Fragen nutzt das Projekt Hidden.ice die fortlaufende Verbesserung der zeitlichen und räumlichen Auflösung von Fernerkundungsdaten verschiedener Plattformen (Satellit, luftgestützt, UAV-basiert). Für ein vertieftes Monitoring der Konnektivität und des Sedimenttransportes werden zusätzlich zu den laufenden Untersuchungen am LTER-Standort Jamtalferner Abflussmessungen und geomorphologische Untersuchungen durchgeführt.

Als Beitrag zur Wissenslücke wollen wir den proglazialen Bereich des Gletschervorfeldes näher betrachten und die Rolle des Gletschers als saisonal variierende Sedimentquelle identifizieren. Dafür werden über die einzelnen Projektteile eine Vielzahl an räumlichen wie zeitlichen Skalen abgedeckt (Abb. 2). Dabei spielt die Analyse der Korngrößenverteilung der Sedimente auf den Gletscheroberflächen und im Proglazialgebiet eine zentrale Rolle. Die aus

System	Prozess	Treiber	Auswirkung
Steilwand	Steinschlag	Klima, Schwund von Permafrost und Gletscher, Lithologie	Freisetzung von Schutt und Deposition auf Gletscheroberfläche
Gletscher Seitenhänge	Massenbilanz	Klima, Oberflächeneigenschaften (e.g. <mark>Schuttbedeckung)</mark>	Änderungen Oberflächenhöhe und Gletscherfläche, Abfluss
	Eisbewegung	Gletschermasse, Subglaziale Hydrologie	Schutttransport und Deposition in Gletschervorfeld
Paraglaziale Zone Gletschervorfeld Grans Googe Fluviales Gerinne Date Stor NOAA U.S. Navy, NGA CEBOO	Fluvialer Transport	Abfluss, Transportkapazität, <mark>Korngrößen,</mark> Konnektivität	Transport von Schutt and Schwebstoff talauswärts

#### Abb. 1.

Prozesse, deren Auslöser sowie die Wirkung des Sedimenttransportes im glazialen System.



der UAV-gestützten Photogrammetrie berechneten tatsächlichen Veränderungen des Sedimentvolumens werden mit einer Analyse historischer Dokumente über die Entwicklung des Rinnennetzes kombiniert. Die aus der historischen Perspektive gewonnenen Erkenntnisse werden schließlich unser aktuelles Verständnis möglicher zukünftiger Veränderungen in alpinen Flusssystemen vor dem Hintergrund des Klimawandels verbessern.

# 2 Projektgebiet

Die Prozessstudien sowie das Monitoring im Projekt Hidden.ice wurden im hinteren Jamtal (Silvretta, Tirol, Österreich; 46.867°N, 10.162°E; Abb. 3) durchgeführt. Das Jamtal als ein typisches glazial geformtes Alpental und insbesondere der sich rasch zurückziehende Jamtalferner sind seit langem Gegenstand von Umweltuntersuchungen und Teil des LTER-Netzwerks (LTER Jamtal, https:// deims.org/5b93dfb3-906b-4ff4-a5fe-9a4948bda9eb), Referenzgletscher des WGMS und Teil des WMO Programms Global Cryosphere Watch. Im Einzugsgebiet befindet sich eine automatische Wetterstation, welche Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit, Schneetemperaturen, Schneehöhe, ein- und ausgehende kurzwellige und langwellige Strahlung, Niederschlagsmenge, Windgeschwindigkeit und Windrichtung aufzeichnet.

Das Monitoring der Gletscherlänge am Jamtalferner begann bereits 1892, und seit 1988 wird die Massenbilanz des Gletschers gemessen (FISCHER et al., 2016, 2018, 2019b).

Das geologische Grundgebirge besteht aus metamorphen Gesteinen, das heißt vor allem aus verschiedenen Gneisen und Amphiboliten. Das Vorland der Gletscher, von denen der Jamtalferner der größte ist, ist von grobkörnigem und



Überblick über das Untersuchungsgebiet am Talschluss des Jamtals.

blockigem Schutt bedeckt (FISCHER et al., 2019b). Mindestens seit dem Mittelalter werden die Almen im Jamtal in den Sommermonaten für die Viehzucht genutzt, aber die Geschichte der menschlichen Nutzung in diesem Gebiet erstreckt sich über mehrere Jahrtausende (REITMAI-ER et al., 2013). Pollenanalysen und Radiokarbondatierungen von fossilen Bäumen, die in der Nähe der Jamtalhütte gefunden wurden, dokumentieren Veränderungen der alpinen Vegetation und Höhenverschiebungen der Baumgrenze, die durch den Klimawandel und vergangene menschliche Landnutzung verursacht wurden (DIETRE et al., 2014; PATZELT, 2019). Nachdem die Gletscher im Jamtal 1864 ihr LIA-Maximum (Little Ice Age Maximum) erreicht hatten, wurden in den vergletscherten Gebieten verschiedene Bodentypen, wie Syroseme und Ranker, freigelegt. Durch den Rückzug des Gletschers hat sich auch der Lauf des Jambachs seit 1864 kontinuierlich nach oben erweitert. Innerhalb der Gletschermoränen gibt es eine Reihe dynamischer Prozesse, welche zum Sedimenttransport bis zum Gerinne beitragen. Eine größere Schwemmfläche ist im Bereich der seit den 1980er Jahren vom Gletscher freigegebenen Topografie anzutreffen.

Der hier unter dem Gletscher zutage tretende Jambach wird durch das Schmelzwasser des Jamtalferners und in weiterer Folge mehrerer kleinerer Gletscher gespeist. Daher weist der Gebirgsbach ein glazio-nivales Abflussregime auf, mit einem starken Eintrag durch Schneeschmelze sowie großen Tagesgängen in den Sommermonaten. 1950 wurde der Jambach in der Talmitte mit einem Wehr versehen, wo der größte Teil des Abflusses für hydroenergetische Zwecke entnommen wird. Sedimente, die sich direkt vor dem Wehr ablagern, werden ausgebaggert und weiter flussabwärts wieder dem Fluss zugeführt.

#### 3 Angewandte Methoden und Messverfahren

#### 3.1 Historische Landbedeckung

Die Rekonstruktion der historischen Landbedeckung im Jamtal zu fünf Zeitpunkten (1820, 1870, 1921, 1970 und 2015) erfordert es, zahlreiche historische Karten zu georeferenzieren und zu vektorisieren (Tab. 1). Mehrere Orthofotos und ein digitales Höhenmodell (DEM) wurden für die Analyse der Landbedeckung in den Jahren 2015 und 1970 verwendet. Die GIS-Rekonstruktion für das Jahr 1921 stützt sich im Wesentlichen auf drei historischen Karten und Pläne von 1909 bis 1929. Für die Situation im Jahr 1870 wurde die "Dritte Militärische Landesaufnahme" von 1870–1872 (Maßstab 1:25.000) herangezogen, während die ältesten Quellen, das heißt die "Zweite Militärische Landesaufnahme" 1816–1821 (1:28.800) und der "Franziszeische Kataster" 1855–1857 (1:2.880/5.760), die Grundlage für die Rekonstruktion der Landbedeckung im Jahr 1820 darstellten. Die Katasterkarten wurden für die Berechnung der Grundsteuer erstellt und zeigen die Landbedeckung/-nutzungen der einzelnen Grundstücke (FUHR-MANN, 2007). Im Gegensatz dazu konzentrieren sich die Militärvermessungen in erster Linie auf die geografische Lage und Landschaftsstrukturen wie Wasserläufe und Geländetopografie. Neben den in Tabelle 1 dargestellten Karten wurden weitere historische Quellen aus der Zeit zwischen den fünf genannten Zeitschnitten konsultiert, aber

Zeitschnitt	Kartografische Grundlage	Aufnahme*	Maßstab
1820	Zweite Landesaufnahme	1816–1821	1:28.800
1820	Franziszeischer Kataster (Urmappe)	1855–1857	1:2.880/5.760
1870	Dritte Landesaufnahme	1870–1872	1:25.000
1921	Umgebungskarte Jamtalhütte	1909	1:25.000
1921	Karte Unterer Teil Jamtalferner	1921 (1934)	1:10.000
1921	Spezialkarte Österreich	1925–1929	1:75.000
1970	Orthofotos (Grauton)	1970	-
2015	Orthofotos (Farbe, Infrarot)	2015	-
2015	Digitales Geländemodell Tirol (DEM)	2015	5 m
1870-2015	GIS-Datensatz historischer Jamtalferner (FISCHER et al., 2019b)	1864–2015 (2019)	-

Tab. 1.

Die wichtigsten historischen Grundlagen und aktuellen Datensätze für die Rekonstruktion der historischen Landbedeckung im Jamtal (\*in Klammer: Publikationsjahr).

Landbedeckung	Abk.	Beschreibung	
Siedlungsflächen	SF	Gebäude mit angrenzenden Straßen, Plätze, kleinere Gärten, Straßen außerhalb von Siedlungen	
Fließgewässer	FG	Flüsse, kleinere Bäche (ohne Schotter-/Sand-/Schluffbänke)	
fluviale Sedimentflächen	FS	unbewachsene (glazio-)fluviale Sedimentablagerungen	
stehende Gewässer	SG	Seen, Weiher, Teiche	
Feuchtflächen	FF	Sümpfe, Moore, Röhricht	
Grünland	GR	Wiesen, Weiden (Almen), alpines Grasland	
Ackerland	AL	Getreidefelder, Gemüsefelder	
Spärlich bewaldete Flächen	SB	Krummholzzone, Weiden mit verstreuten Gehölzen	
Wälder	WÄ	dicht bewaldete Flächen mit größeren Bäumen	
Ödland	ÖL	unbewachsene Moränen, Schuttfächer, Felsen	
Gletscher	GL	eisbedeckte Flächen	
Tab 2	÷	·	

Landbedeckungsklassen definiert auf Basis historischer und aktueller Grundlagendaten.

nicht im GIS georeferenziert. Die Abgrenzung des Hauptgletschers des Jamtalferners zwischen 1870 und 2015 basierte auf einem bereits veröffentlichten und teilweise adaptierten GIS-Datensatz (FISCHER et al., 2019b).

Auf Grundlage der historischen Quellen wurden 11 Landbedeckungsklassen definiert (Tab. 2). Die größten Flächen wurden/werden im Jamtal von Grünland (hauptsächlich Almen), spärlich bewaldeten Flächen (Krummholz) und Ödland (unbewachsene Moränen, Schuttfächer, Felsen) eingenommen. Obwohl die Orthofotos eine genauere Klassifizierung und Analyse ermöglichen, musste für alle fünf rekonstruierten Zeitschnitte die gleiche Methode angewendet werden. Dies trägt dazu bei, den gleichen Detaillierungsgrad in den resultierenden GIS-Datensätzen zu gewährleisten.

Jede historische Karte wurde mittels ESRI ArcGIS 10.6 auf der Grundlage der aktuellen Orthofotos und des DEM georeferenziert. Die Georeferenzierung wurde auf der Grundlage von 150 bis 300 Referenzpunkten pro Kartenblatt durchgeführt. Um topografische Orientierungspunkte zu verwenden, die sich höchstwahrscheinlich in den letzten 200 Jahren nicht verändert haben, wurden Berggipfel und Bergrücken ausgewählt, die das gesamte Jamtal umrahmen. Darüber hinaus dienten mehrere kleinere Kämme und Gipfel, die das Tal in kleinere Unterbecken unterteilen, sowie felsige Schluchtstrecken am Jambach und Futschölbach sowie die 1882 erbaute Jamtalhütte als Bezugspunkte.

#### 3.2 Satellitenfernerkundung

Hoch aufgelöste optische Satellitendaten erlauben die detaillierte Beobachtung der Erdoberfläche und deren Veränderungen seit Mitte der 1980er Jahre. Die frei verfügbaren Daten der Copernicus Satelliten Sentinel-2A und Sentinel-2B sowie der USGS/NASA Landsat Missionen sind bestens geeignet, um die Veränderung von schuttbedeckten Flächen auf österreichischen Gletschern zu analysieren. Daten von den Sentinel-2 Missionen sind seit Sommer 2015 verfügbar und haben eine räumliche Auflösung von 10 m in dem sichtbaren und dem nahen infraroten Spektralbereich sowie 20 m oder 60 m für spektrale Bänder im nahen bis kurzwelligen Infrarotbereich. Daten der Landsat Erdbeobachtungssatelliten 5 bis 9 sind seit 1985 verfügbar und haben eine räumliche Auflösung von 30 m vom sichtbaren bis zum kurzwelligen Infrarotbereich. Die Instrumente der Landsat-Missionen verfügen zusätzlich über emissive Bänder im thermischen Infrarot, die jedoch bei den Sentinel-2-Instrumenten nicht vorhanden sind. Um eine konsistente Art der Auswertung zu gewährleisten, wurde auf die Verwendung dieser Bänder verzichtet.

Die Satellitenaufnahmen mit dem Prozessier Level L1TP für Landsat und L1C für Sentinel-2-Daten sind bereits radiometrisch kalibriert und beinhalten die spektrale Strahlung der Erdoberfläche in [W/(m<sup>2</sup> sr µm)], welche am Satellitensensor gemessen wurde. Die Daten wurden außerdem mit Hilfe eines Digitalen Geländemodells orthorektifiziert und werden mit den vordefinierten Pixelgrößen für die verschiedenen spektralen Bänder (s.o.) in der Kartenprojektion UTM/WGS84 zur Verfügung gestellt. Von 2020 bis Anfang 2022 wurden alle Landsat-Daten von USGS neu prozessiert unter Verwendung des gleichen Digitalen Geländemodells, das für die Orthorektifizierung von Sentinel-2-Daten verwendet wurde, mit dem Ziel, dass Aufnahmen von den verschiedenen Satelliten über dem gleichen Gebiet exakt übereinanderliegen. Bis dahin war vor allem im Gebirge ein Versatz zwischen Landsat- und Sentinel-2-Daten ersichtlich, welche auch die Analysen, die bis dahin im Rahmen von Hidden.ice gemacht wurden, beeinträchtigten. Daher wurden alle ausgewählten Landsat-Szenen nach Abschluss der neuen Prozessierung (Landsat Collection 2, im Dateinamen durch "02" gekennzeichnet) erneut heruntergeladen und alle darauf basierenden Prozessierschritte, Auswertungen und Analysen wiederholt.

Wolken und Schneebedeckung können die Klassifizierung von schuttbedeckten Gletscherbereichen verhindern. Daher werden bevorzugt Aufnahmen bei wolkenlosem Himmel im Spätsommer verwendet. Die Schuttbedeckung auf den Gletschern stammt meist von Felsregionen rund um oder innerhalb des vergletscherten Gebietes. Felsstürze in diesen Bereichen können eine Ursache für eine vermehrte Schuttablagerung auf der Gletscheroberfläche sein. Die Ausdehnung der schuttbedeckten Gletscherbereiche verändert sich mit der Zeit durch den natürlichen Massenfluss und damit dem Transport des Schutts im und auf dem Gletscher.

Auf dem Jamtalferner in Westösterreich (Tirol) wurde bei Feldmessungen in den letzten Jahren eine Zunahme der Schuttbedeckung auf der Gletscherzunge beobachtet. Um diese Veränderungen mit Hilfe von Satellitendaten zu analysieren, wurde für diese Region eine dichtere Zeitreihe ausgewählt. Die ausgewählten Szenen für das Gebiet rund um den Jamtalferner sind in Tabelle 3 aufgelistet. Für die Hotspot-Analyse auf allen österreichischen Gletschern wurden Perioden von 10 Jahren von 1985 bis 2015 definiert, und zusätzlich der Zeitraum nach 2016 betrachtet. Die ausgewählten Szenen für alle österreichischen Gletscher sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Die ausgewählten Szenen für das Gebiet rund um den Jamtalferner sowie für alle österreichischen Gletscher sind in den Tabellen 2 und 3 aufgelistet. Die Dateinamen definieren jede Landsat-Szene eindeutig über folgende Form:

#### LXSS\_LLLL\_PPPRRR\_JJJJMMTT\_jjjjmmtt\_CC\_TX

Die Bedeutung der verwendeten Variablen ist wie folgt:

LX	Sensor ("C" = OLI/TIRS combined, "E" =
	$ETM+, , T^{*} = TM$
SS	Satellit ("05" = Landsat 5, "07" = Landsat 7,
	"08" = Landsat 8)
LLLL	Prozessier-Level: L1TP = radiometrisch kali-
	briert und mit Hilfe eines digitalen Gelände-
	modells und Kontrollpunkten orthorektifiziert
PPP	"Path" im weltweiten Referenzsystem
RRR	"Row" im weltweiten Referenzsystem
JJJJMMTT	Aufnahmedatum als Jahr, Monat und Tag
jjjjmmtt	Prozessier Datum als Jahr, Monat und Tag
CC	Prozessier Version von USGS (02 = Collecti-
	on 02)
ТХ	Qualitätskategorisierung (T1 = höchste Quali-
	tät)

Für Sentinel-2-Daten sind die Dateinamen ebenfalls eindeutig, die Form ist jedoch etwas anders aufgebaut als für Landsat-Daten:

S2A\_MSIXXX\_JJJJMMTTTHHMMSS\_Nxxyy\_ROOO\_ PPPRRR\_jjjjmmttThhmmss

Die Bedeutung der verwendeten Variablen ist wie folgt:

S2A	Satelliten Mission ("S2A" = Senti- nel-2A)
MSIXXX	Sensor (MSI) und Prozessier-Le- vel: L1C = radiometrisch kalibriert und mit Hilfe eines digitalen Ge- ländemodells und Kontrollpunk- ten orthorektifiziert
JJJJMMTTTHHMMSS	Aufnahmestartzeit als Jahr, Mo- nat, Tag, Stunden, Minuten und Sekunden, in Zeitzone UTC (T)
Nxxyy	Prozessierversion
R000	Relativer Orbit
Txxxxx	Tile ID in vordefiniertem Gitter
jjjjmmttThhmmss	Produktzeit als Jahr, Monat, Tag, Stunden, Minuten und Sekunden, in Zeitzone UTC (T)

Die Messungen von Level 1TP- und Level 1C-Satellitendaten können durch atmosphärische Effekte und im Gebirge durch topografische Effekte wie Schlagschatten beeinträchtigt sein. Um diese Faktoren weitestgehend zu eliminieren, wurde eine atmosphärische und topografische Korrektur auf alle Daten angewandt. Dafür sind zusätzlich zu den Satellitendaten und den angefügten Metadaten atmosphärische Parameter von einem Wettermodell als Input für ein Strahlungstransfermodell sowie ein Digitales Geländemodell in der gleichen Kartenprojektion und mit der

Periode	Satelliten ID, Szenen ID und Aufnahmedatum		
1985–1995	LT05_L1TP_193027_19850813_20200918_02_T1 LT05_L1TP_194027_19860908_20200917_02_T1		
1996–2005	LT05_L1TP_193027_20010825_20200906_02_T1		
2006–2015	LT05_L1TP_193027_20060823_20200831_02_T1 LT05_L1TP_194027_20090806_20200827_02_T1 LC08_L1TP_193027_20150731_20200908_02_T1		
2016–2022	LC08_L1TP_194027_20160825_20200906_02_T1 S2A_MSIL1C_20190904T102021_N0208_R065_T32TNS_20190904T123501		

Tab. 3.

Satellitenszenen über dem Einzugsgebiet des Jamtalferner. Szenen IDs beschreiben die räumliche Position der Aufnahmen. Das jeweilige Aufnahmedatum ist in der Form Jahr-Monat-Tag angegeben.

Periode	Ausgewählte Satellitendaten (Dateiname)	Abdeckung
1985–1995	LT05_L1TP_192027_19890918_20211121_02_T1 LT05_L1TP_193027_19910830_20200915_02_T1	AT Ost AT West
1996–2005	LE07_L1TP_193027_19990913_20200918_02_T1 LT05_L1TP_192027_20030824_20200904_02_T1	AT West AT Ost
2006–2015	LC08_L1TP_192027_201300904_20200913_02_T1 S2A_MSIL1C_20150826T102026_N0204_R065_T32 [TQT TPT TPS TNT TNS]_20150826T102655	AT Ost AT West
2016–2022	LC08_L1TP_193027_20200914_20200919_02_T1 S2A_MSIL1C_20200915T101031_N0209_R022_T32 TQT_20200915T122749	AT West AT Ost

Tab. 4.

Ausgewählte Satellitenszenen, die in Hinblick auf Veränderungen der Schuttbedeckung auf österreichischen Gletschern analysiert wurden.





Abb. 4.

Der Bereich der Abflussmessung bei der Getschnerbrücke während der Einmessung des Gerinnes sowie die aus einer photogrammetrischen Aufnahme reproduzierte Gerinnestruktur. Mit einem roten Rahmen gekennzeichnet ist die berührungslose Abflussmessung (RQ30).

gleichen Pixelgröße notwendig. Das Ergebnis der atmosphärischen und topografischen Korrektur sind die spektralen Reflexionseigenschaften der verschiedenen Erdoberflächen. Diese Information wird mit Gletschergrenzen aus dem Jahr 2015 verschnitten, um die Datenmenge auf die vergletscherten Gebiete zu reduzieren. Das Gletscherinventar von 2015 wurde dabei für alle Jahre verwendet, um die Veränderungen der schuttbedeckten Gletscherflächen besser quantifizieren zu können, ohne auf Änderungen der Gletscherfläche Rücksicht nehmen zu müssen.

Die spektralen Reflexionseigenschaften vom sichtbaren bis zum infraroten Spektralbereich von schuttbedeckten Gletscheroberflächen, blankem Gletschereis und Schnee auf den Gletscherflächen unterscheiden sich meist deutlich und wurden daher zur Unterscheidung dieser Klassen verwendet.

#### 3.3 Abflussmessungen

Im Rahmen des Projektes Hidden.ice wurde das hydrologische Monitoring des Jambaches im Bereich der Getschnerbrücke (46.897121°N, 10.173210°E, 2.010 m) gestartet. Vorteil des Standortes an der Brücke ist der definierte Querschnitt des Gerinnes unter der Brücke (Abb. 4).

Für die Durchflussmessung am offene Gerinne wurde der RQ30 der Firma Sommer Messtechnik (https://www. sommer.at/de/) verwendet. Aufgrund der berührungslosen Radartechnologie ist das Messgerät nicht durch Verschmutzung und Geschiebetransport gefährdet. Der Sensor befindet sich außerhalb des Gefahrenbereichs von Hochwässern und ist damit über viele Jahre wartungsarm. Zu einem misst der RQ30 den Wasserstand anhand der Laufzeit eines Radarsignals. Eine zweite Messung zeichnet gleichzeitig die Strömungsgeschwindigkeit der Wasseroberfläche mittels der Dopplerfrequenzverschiebung auf. Aus beiden Messungen in Kombination mit dem Gerinnequerschnitt kann der Durchfluss nach Kalibrierung des Messstandortes bestimmt werden.

Der RQ30 besitzt einen integrierten Datenlogger und Datenübertragung, gebündelt in einem kompakten Gehäuse. Somit ist eine Remote-Übertragung der Daten möglich.

Für die Kalibrierung wurden über den Projektzeitraum Leitfähigkeitsmessungen mittels Salzverdünnungsmethode durchgeführt. Die talauswärts gemessene Veränderung der Leitfähigkeit in Zusammenhang mit der dem Abfluss zugeführten Salzmenge ergibt einen Abflusswert. Für die Messung wurde das Leitfähigkeitsmessgerät WTW Multi 3430 verwendet.

#### 3.4 Laserscanning

#### 3.4.1 Airborne LiDAR Datenaufnahme

Im Rahmen des Projektes Hidden.ice konnten über die ursprünglich geplanten TLS und Drohnenaufnahmen kostenneutral ALS-Daten für das obere Jamtal in den Jahren 2019 und 2021 aufgenommen werden. Zum Einsatz kam ein VuxSysLR Laserscanner der Firma Riegl, der in einen Helipod integriert ist und über einen Meekermount an einem AS350 B3 Helikopter montiert werden kann. Der Scanner wird über ein Kabel mit dem Strom der Boardelektronik versorgt, die Daten werden in Echtzeit über ein LAN-Datenkabel an ein Notebook im Helikopter übertragen (Abb. 5). Über das Datenkabel können zusätzlich die Einstellungen des Scanners und die ebenfalls im Helipod integrierten Kameras angesteuert werden.

Die Datenaufnahme erfolgte im Jamtal entlang vorher erstellter Fluglinien mit einer mittleren Fluggeschwindigkeit

Abb. 5. Installierter Scanner an AS 350 B3 (links) und Steuerung der Datenaufnahme aus dem Cockpit (rechts).



von 83 km/h (groundspeed) und in einer mittleren Flughöhe von 150 m (Abb. 6, Tab. 5). Da die Datenaufnahme im Anflug für eine Mission in einem anderen Gebiet erfolgte, stand jeweils nur ein begrenzter Zeitrahmen für das Jamtal zur Verfügung (berechnet nach maximaler Flugzeit mit einem Tank!). Da sich die verfügbare Zeit zwischen 2019 und 2021 leicht unterscheidet, variieren auch die geflogenen Flugstreifen und damit die insgesamt mit ALS erfasste Fläche zwischen 2019 und 2021. Bei beiden Flügen konnte aber das für das Projekt Hidden.ice relevante Gebiet des Gletschervorfeldes des Jamtalferners im Bereich des Haupttals bis zum Abflusspegel unterhalb der Jamtalhütte mit einer mittleren Punktdichte von > 10 pts/m<sup>2</sup> erfasst werden.

Punktdichtenunterschiede im Bereich der Gletscher sind in beiden Datensätzen sichtbar und sind eine Folge der Feuchtebedingungen und der Schneebedeckung auf der Gletscheroberfläche, da gerade feuchter Schnee oder ein Wasserfilm nahezu das gesamte Lasersignal absorbieren, wodurch in diesen Bereichen dann keine Messdaten vom Gerät erfasst werden konnten (vgl. Gletscherbereiche in Abbildung 6). Neben der ALS-Daten erfolgte jeweils durch die Arbeitsgruppe Helfricht eine Rohdatenaufzeichnung an einer GNSS Bodenstation direkt im Gebiet, um Korrekturdaten für die Postprozessierung der Trajektorie zur Verfügung zu haben (Abb. 7).

Insgesamt konnten die Datenaufnahmen zu beiden Zeiten erfolgreich durchgeführt werden, so dass großflächig Informationen über Veränderungen im Gletschervorfeld



Abb. 6. 3D-Modell der Befliegungen von 2019 (links) und 2021 (rechts) mit den jeweiligen Fluglinien.

für das Projekt ermittelbar waren. Neben den selbst erhobenen Daten von 2019 und 2021 konnte zusätzlich auf amtlich erhobene ALS-Daten aus dem Jahr 2006 zurückgegriffen werden. Die amtlichen Daten dienten zusätzlich als Referenzdatensatz, um eine Feinreferenzierung der 2019er- und 2021er-Daten durchzuführen.

#### 3.4.2 Terrestrische LiDAR Datenaufnahme

Im Jahr 2019 wurden neben den ALS-Daten zusätzlich im Rahmen einer Geländekampagne TLS-Datensätze aufgenommen. Insgesamt wurden von drei Scanpositionen das Gletschervorfeld sowie stabile Felsbereiche mit einem Riegl VZ4000 Scanner gescannt (Abb. 8). Die Daten waren ursprünglich dazu gedacht, stabile Flächen zu vermessen, um anschließend diese Daten für die Feinreferenzierung



Abb. 7. Topcon GNSS Einheit zur Aufnahme von Korrekturdaten für die Prozessierung der Trajektorie.



Abb. 8. Terrestrischer Laserscanner VZ 4000 im Geländeeinsatz.

der ALS Daten zur Verfügung zu haben. Zusätzlich sollten die Daten eine Art Backup darstellen, falls die ALS-Befliegung wegen schlechten Wetters oder anderer Probleme keine Daten liefert. Letztendlich wurden die Daten dann in Kombination mit den amtlichen 2006er ALS-Daten kombiniert, um die ALS-Blöcke der 2019er- und 2021er-Daten zu stabilisieren.

#### 3.4.3 Datenprozessierung

Die aufgenommenen ALS-Rohdaten wurden mit drei verschiedenen Softwarepaketen prozessiert (Applanix Pospaq, Riprocess, RiscanPro). In einem ersten Schritt wurde die Roh-Trajektorie mit Aplanix PosPaq korrigiert. In diesem Schritt wurden die Rohdaten der IMU und der GNSS Antenne mit den Daten der GNSS Bodenstation der Arbeitsgruppe Helfricht verschnitten. Die korrigierte Trajektorie wurde anschließend in Riprocess importiert und dort in das nötige Format transferiert.

In Riprocess erfolgt dann das Verknüpfen der LiDAR-Rohdaten mit der Trajektorie. Dies erfolgt für jeden Flugstreifen separat, so dass am Ende eine bereits referenzierte Punktwolke für jeden Flugstreifen zur Verfügung stand. In Riprocess erfolgt dann noch eine Feinjustierung der Trajektorien und Punktwolken mit dem Tool Riprecission (Feinanpassung der Trajektorie unter Verwendung der Punktwolken). Im Anschluss konnten die einzelnen Flugstreifen als LAZ-Datei exportiert werden, wobei noch ein Zusatzattribut (Reflektivität) mit angefügt wurde.

Die Daten wurden dann als Punktwolke in RiscanPro importiert. In diesem Softwarepaket erfolgte dann mit dem ICP (inverse closest point) Tool (MultiStation Adjustment) die Feinreferenzierung der 2019er und 2021er ALS-Daten (Streifenbasiert) auf die amtlichen ALS-Daten aus dem Jahr 2006 unter Zuhilfenahme der TLS-Daten aus dem Jahr 2019. Abschließend wurden dann alle Daten als LAZ file exportiert und standen für die weiteren Analyseschritte zur Verfügung. Eine Filterung der ALS-Daten erfolgte nicht, da sich das Gletschervorfeld des Jamtalferners deutlich oberhalb der Baumgrenze befindet. Insgesamt umfasste der Datensatz 21.810.864 Punkte für 2019 und 69.264.360 Punkte für 2021 (Tab. 5).

Die Analyse aller aufgenommenen topografischen Daten (ALS, Orthofotos, Thermalbilder) erfolgte in der Software Laserdata LIS. Hier wurden die Daten sowohl für die Quantifizierung als auch für räumliche Analysen eingesetzt. Die entsprechenden Tools werden dann bei den entsprechenden Analysen genannt.

#### 3.5 Drohnenaufnahmen

#### 3.5.1 UAV-Photogrammetrie

Für die photogrammetrische Aufnahme des Untersuchungsgebietes wurde das in Tabelle 6 zusammengefasste Setup verwendet. Die Topografie im Untersuchungsgebiet wurde mit der Methode Structure-from-Motion mit Multi-View-Stereophotogrammetrie (SfM-MVS) (z.B. WES-TOBY et al., 2012; SMITH et al., 2016; ELTNER & SOFIA, 2020) modelliert. Dabei wurden die Guidelines von JAMES et al. (2019) bei der Planung, Ausführung und Analyse berücksichtigt. Die Befliegungen wurden mit einer unbemannten Drohne vom Typ DJI Phantom 4 Pro mit integriertem, hochauflösendem RGB-Sensor (1" CMOS, 20 Megapixel) durchgeführt (Abb. 9c). Aus den dabei erstellten Serienaufnahmen sind detaillierte topographische 3D-Modelle generiert worden.

Die Flugplanung erfolgte mit der kommerziellen Software UgCS PRO (v 3.4.609 bis v 4.7.685), die es ermöglichte, eine auf die Hardware und Erfordernisse des Untersuchungsgebiets angepasste "Ground Sampling Distance" zu definieren, die maßgeblich die räumliche Auflösung der photogrammetrischen Produkte bestimmte. Der angewendete Flugplan sieht eine systematische Befliegung entlang von effizient angelegten Parallelstreifen vor. Um eine horizontale Bodenauflösung von 1 cm zu erzielen, wurde die durchschnittliche Höhe über dem Boden auf ca. 37 m festgelegt. Die Überlappung der im Rohdatenformat aufgenommenen Fotos betrug vor- und seitwärts 70-80 %, um eine angemessene Erfassung gleicher Bodenpunkte aus möglichst vielen Blickwinkeln und -positionen zu gewährleisten (JAMES et al., 2019). Um systematischen Verzerrungseffekten (engl. "Doming" Deformation oder "bowl effect") in den topografischen Modellen vorzubeugen, wurde ein leicht vom Nadir abweichender Winkel von 5° angewandt (JAMES & ROBSON, 2014).

Zur späteren Georeferenzierung und Steigerung der geometrischen Präzision der Geländemodelle wurden vor jeder Drohnenbefliegung Bodenkontrollpunkte (engl. "Ground Control Points", kurz "GCPs") gleichmäßig über das zu vermessende Gebiet verteilt (SMITH et al., 2016; Abb. 9a). In stabilen Bereichen sind 7 GCPs dauerhaft fixiert, mindestens 7 weitere "mobile" GCPs decken Bereiche mit zu erwartenden topografischen Veränderungen ab. Die geografischen Koordinaten der GCPs wurden mit einem dGPS-Gerät (engl. differential Global Positioning System) unter Einsatz einer Kombination aus Basisstation und Rover-Einheit ermittelt (Abb. 9b). Die Basisstation wurde über einem Referenzpunkt positioniert, dessen Koordinaten ebenfalls mit dGPS und präziser Postprozessierung zu Beginn des Projekts ermittelt wurden.

Die Bilder jeder UAV-Vermessung wurden sorgfältig auf potentielle Fehlerquellen, wie übermäßige Unschärfe, Reflexionen auf Wasseroberflächen, Bilder aus gleicher oder zu ähnlicher Position, untersucht und wenn nötig von der

	Flugzeit im Gebiet (min)	Punktmenge gesamt	Punktdichte (pts/m <sup>2</sup> )	Anzahl Flugstreifen	Flughöhe (m)	Fluggeschwindigkeit (km/h)
ALS 2019	12	21.810.864	11	3	100–150	83
ALS 2021	35	69.264.360	12	9	100–150	83

Tab. 5. Daten zu den ALS Befliegungen.

Plattform &	Quadrocopter (unbemannt)	DJI Phantom 4 Pro		
Sensor	Kameramodell	FC6310, integriert		
	Sensorgröße	1'' CMOS, 20 Megapixel		
	Auflösung	5464 x 3640		
	Brennweite	8,8 mm		
	Pixelgröße	2,42 x 2,42 μm		
	Verschluss	Mechanisch		
Studiendesign	Software Flugplanung	UgCS PRO (v 3.4.609 bis v 4.7.685)		
	Georeferenzierung	Ground Control Points & dGPS		
	Zielbodenauflösung	1 cm		
	nominelle Flughöhe	37 m		
	Flugstrategie	parallele Streifen		
	Bildüberlappung (vor- & seitwärts)	70 bis 80 %		
	Kamerawinkel	Nadir bis 5°		
SfM MVS	Software Photogrammetrie	Agisoft Metashape Pro (v 1.6.3 bis v 1.7.5)		
verarbeitung	Kamera-Kalibrierung	Automatische Schätzung der Kameraresiduen		
	Alignment Parameter	"High Accuracy"; "Exclude stationary tie points"; "Adaptive camera model fitting"; "Fit additional corrections (f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2)"		
	Depth Maps & Dense PC Parameter	"High Quality"; "Moderate Filtering"		
Produkte	Punktwolken	3D-Oberflächenmodell (DOM)		
	Rasterdaten	2D-Oberflächenmodell (DOM)		
		hochaufgelöstes RGB-Orthomosaic		

Tab. 6. Im Hidden.ice-Projekt verwendete Hard- und Software sowie wichtige Kenngrößen des Studiendesigns und der Datenprozessierung für photogrammetrische Anwendungen.



Abb. 9. a) Geo-Referenzierung der Ground Control Points mit b) dGPS im Basis-Rover Setup als präzise Grundlage für c) Drohnen-gestützte photogrammetrische Gelände-vermessungen.

weiteren Analyse ausgeschlossen (ca. 5 % der Gesamtbildzahl). Die verbleibenden Bilder wurden mit dem Bildbearbeitungssystem RawTherapee (v 5.7 bis v 5.8, kostenlose Software) in das unkomprimierte 8-Bit-TIFF-Format konvertiert. Die kommerzielle Photogrammetrie-Software Agisoft Metashape Professional (v 1.6.3 bis v 1.7.5) wurde verwendet, um hochauflösende 3D-Punktwolken der untersuchten Topografie zu erstellen.

Die Originalbilder wurden zuvor um den Faktor 4 hochskaliert. Außerdem wurde eine adaptive Kameramodellanpassung durchgeführt, um eine Divergenz der Kameraparameter zu unterbinden (AGISOFT LLC, 2021). Die resultierende Punktwolke (sparse point cloud) wurde auf Reprojektionsund Rekonstruktionsfehler sowie auf den Grad der Projektionsgenauigkeit hin gefiltert, was zu einem Ausschluss von bis zu 10 % der ursprünglichen Punkte führte. Durch die Zuweisung von GCPs und die anschließende Georeferenzierung, konnte schließlich eine verdichtete Punktwolke (dense point cloud) erstellt werden, bei der das Rauschen durch einen integrierten Filterprozess reduziert wurde. Die resultierende, hochauflösende Punktwolke spiegelt das Untersuchungsgebiet als digitales 3D-Oberflächenmodell (DOM) präzise wider.

#### 3.5.2 Thermalbilder

Als Zusatz zu den RGB-Aufnahmen konnte durch die Arbeitsgruppe Eichstätt im Jahr 2020 eine Befliegung mit einer Drohne mit eingebauter RGB und Thermalkamera realisiert werden. Bei der Aufnahme handelte es sich um einen Testflug, um das System im Geländeeinsatz zu erproben und das Potential der Methodik einschätzen zu können. Zum Einsatz kam eine von der niederländischen Firma DroneExperts modifizierte DJI Phantom 4Pro, die neben der standardmäßig verbauten RGB Kamera mit einer Flir VuePro 640 UAV Thermalkamera ausgestattet ist (Abb. 10).

Beide Kameras können parallel betrieben werden. Wobei die Flir Kamera nicht durch die Fernbedienung der Drohne angesteuert wird, sondern Aufnahmen in einem vorher fix eingestellten Zeitintervall aufnimmt (eingestellt wurde ein 2 Sekunden Intervall). Die Flir Kamera erzeugt radiometrisch kalibrierte Fotos. Während der Kampagne im Sommer 2020 wurden insgesamt 437 Thermalbilder aufgenommen, die dann im Anschluss zu einem Fotomosaik zusammengesetzt wurden.



DJI Phantom 4Pro mit RGB-Aufnahmeeinheit und zusätzlicher Thermalkamera Flir VuePro 640 UAV.

Die Thermalbilder (Abb. 11) wurden mit Hilfe der Software FlirTool auf einen fixen Temperaturwert kalibriert und dann als jpg-Dateien exportiert. Zusätzlich wurde von jedem Thermalbild noch eine CSV-Datei mit den Temperaturwerten exportiert. Aus den jpg-Dateien konnte so ein relatives Temperaturbild der gesamten aufgenommenen Fläche erstellt werden. Eine Prozessierung der Daten zur Erstellung eines Orthofotos mit den absoluten Temperaturwerten ist aktuell nur über den Umweg über die CSV-Files möglich, dieser Prozessierungsschritt ist aktuell gerade in Entwicklung.

## 3.6 Hydromorphologisches Monitoring

#### 3.6.1 Zeitraffer-Kameras

Es wurden hochauflösende Zeitraffer-Aufnahmen von einer stationären, digitalen Spiegelreflexkamera (Nikon D300) für das Monitoring des Gletschervorfeldes benutzt. Die vom Institut für Ökologie der Universität Innsbruck installierte Kamera dient in erster Linie der Untersuchung der Albedo am Gletscher – dem Hidden.ice-Projekt standen die Fotoserien für die Jahre 2018, 2019, 2020 und 2022 zur Verfügung. Die Zeitraffer-Kamera ist in einem wasserdichten Gehäuse auf einem erhöht gelegenen Felsblock in der



Abb. 11. Orthofoto aus Thermalbildern (links) und aus RGB-Bildern (rechts) des Jamtalferners und seines direkten Gletschervorfeldes aus dem Sommer 2020.



Abb. 12.

Aufbau der Zeitraffer-Kameras in der Nähe des Jamtalferners (Blick nach Südwesten) montiert auf erhöht-de-Festgestein mit legenem Blick auf die rot markierte proglaziale Schwemmebene. Die Kamera im Vordergrund 2018 ist seit operativ (Instandhaltung und Service durch Institut für Ökologie, Universität Innsbruck), jene im Hintergrund ist seit 2022 durch den Arbeitsbereich Wasserbau, UIBK, in Betrieb genommen worden und erlaubt ein Verschneiden der Bildinformation beider Zeitraffer-Kameras (Abbildung verändert nach HILLER et al., 2022).

Nähe der untersuchten proglazialen Schwemmebene montiert und blickt sowohl auf diese als auch den dahinter befindlichen Jamtalferner (Abb. 12). Während Blende (f 8.0), Weißabgleich (5560 K), Sensorverstärkung (ISO 200) und Fokus (unendlich) manuell eingestellt wurden, erforderten wechselnde Lichtverhältnisse eine variable Integrationszeit, die von der Kamera automatisch angepasst wird.

Sowohl die Stromversorgung als auch der Auslöser werden von einem Arduino Uno Mikrocontroller gesteuert, der mit einer Echtzeituhr (Modell: DS3231) verbunden ist. Die Stromversorgung erfolgt über ein 100-W-Solarpanel, das eine 12-V-17-Ah-Batterie speist. Basierend auf einer einfachen Schleifenfunktion wird die Kamera eingeschaltet, indem ein Leistungsrelaismodul aktiviert wird, das mit der 12-V-Batterie und einem Spannungsregler verbunden ist, der für eine stabile 9-V-Stromversorgung sorgt. Durch ein 5-V-Signal an den externen Auslöser der Kamera wird folglich ein RGB-Bild aufgenommen. Die Aufnahme wird dann lokal auf einer Compact-Flash-Karte gespeichert, bevor das Relais die Stromversorgung der Kamera wieder unterbricht. Diese Schleife (d.h. Einschalten der Kamera - Aufnahme und Speicherung eines Bildes - Ausschalten der Kamera) ist während der Beobachtungszeiträume täglich in einem stündlichen Intervall aktiv. Die Zeitraffer-Aufnahmen beginnen täglich um 6 Uhr morgens und enden um 20 Uhr abends (beides MEZ), um die Anzahl der in der Regel unterbelichteten Nachtaufnahmen zu reduzieren.

#### 3.6.2 Grenzwertpegel

Die Verwendung von Grenzwertpegel (https://www.ott. com/de-de/produkte/wasserstand-49/ott-grenzwertpegel-71/) (Abb. 13) ist eine kostengünstige und robuste Methode zur Erfassung von Höchstwasserständen, zum Beispiel während außerordentlicher Überflutungen, wenn der Oberflächenabfluss auch außerhalb des Hauptgerinnes stattfindet. Ein Grenzwertpegel besteht aus einem Steigrohr (meist Plexiglas), in dem eine Pegelmesslatte abgehängt ist. An dieser ist ein mit wasserlöslicher Farbe versehener Klebestreifen angebracht. In den senkrecht montierten Grenzwertpegel kann der steigende Wasserspiegel durch die untere Öffnung in das Steigrohr eindringen. Dabei löst sich die auf dem Klebestreifen befindliche Farbe von der Pegelmesslatte. Der maximale Pegelstand im Beobachtungszeitraum ist somit nach Abklingen des Ereignisses durch die neue Unterkante des Farbstreifens zu erkennen. Bei Bedarf, beziehungsweise nach jedem messbaren Wasseranschlag, kann der farbige Klebestreifen getauscht werden.



Abb. 13.

a) Schematische Darstellung eines Grenzwertpegels des Herstellers OTT HydroMet GmbH (https://www.ott.com/de-de/produkte/wasserstand-49/ ott-grenzwertpegel-71/) und b) installierter Grenzwertpegel im Gletschervorfeld des Jamtalferners, befestigt mittels Bohranker und Gewindestangen in unmittelbarer Nähe des Gletscherbaches.



#### Abb. 14.

Anordnung der Beprobungsflächen in der Schotterebene des Gletschervorfelds, markiert mit umweltfreundlichen, wasserbasierten Farben. a) Die Eckpunkte der Analyseraster wurden mit dGPS georeferenziert; b) zeigt einen Beprobungsrahmen mit parallel-gespannten Schnüren (gelb markiert) und noch ungestörten Oberflächensedimenten vor der Einzelkornvermessung.

Dadurch, dass es sich um einen analogen Pegel zur manuellen Ablesung handelt, bestimmt das Ableseintervall die Datendichte. In entlegenen Untersuchungsgebieten, wie dem Gletschervorfeld des Jamtalferners, ist eine Ablesung mit einem höchstens 2-wöchigen Intervall realistisch, so dass Aussagen über die Wasserspiegellagen vor allem für seltenere Starkabflussereignisse getroffen werden können.

Grundsätzlich gibt es zwei Montagevarianten, wobei in diesem Projekt beide zur Anwendung gekommen sind. Sind feste Strukturen, z.B. große Felsblöcke in der Nähe des Gerinnesystems vorhanden, können die Grenzwertpegel mittels Kunststoffschellen über Bohranker und Gewindestangen in Position gebracht werden. Um die Grenzwertpegel auch freistehend in einer Schotterebene installieren zu können, werden diese an Kiesanker befestigt. Diese Anker bestehen aus einem Stahlrohr (L = 1,40 m) mit einem verschweißten Stahlkreuz aus L-Profilen (0.25 x 0.25 m) als Fuß. Der Fuß des Kiesankers wird dabei etwa 0,4–0,5 m im Schotteruntergrund eingelassen und anschließend mit größeren Steinen beschwert. Zum Schluss werden die verbleibenden Zwischenräume mit feinem Sediment eingeschlämmt.

#### 3.6.3 In-Situ Messung der Korngrößenverteilung

Die manuelle Korngrößenanalyse im Gelände bleibt eine wichtige Methode, um die zentralen Parameter der Korngrößenverteilung zu erheben, wenn die Entnahme von Volumenproben für Siebanalysen, zum Beispiel auf Grund der hochalpinen Lage des Untersuchungsgebiets, nicht möglich oder unwirtschaftlich ist. Im Hidden, ice-Projekt wurde die Korngrößenverteilung an der Oberfläche der proglazialen Schwemmebene mit einer Methode ermittelt, welche die Linienzahlanalyse nach FEHR (1987) und die Raster-basierte Beprobung nach BUNTE & ABT (2001) kombiniert. Dabei wurde die Robustheit und Genauigkeit dieser analogen Methoden genutzt, um einen Basisdatensatz für die Kalibrierung und Validierungen von flächenhaften Korngrößenanalysen im Untersuchungsgebiet zu etablieren. Für unsere methodische Adaption der beiden Ansätze verwendeten wir einen 1 x 1 m messenden Rahmen mit fünf parallel-gespannten Schnüren im Abstand von 0,2 m (0,1 m Abstand zum Rahmen (Abb. 14). Damit erhielten wir je beprobten Raster (= 1 m<sup>2</sup>) eine Art fragmentierte Linienzahlanalyse entlang von 5 m. Bei dieser manuellen und destruktiven Analysemethode wurde im Abstand von 0,1 m entlang jeder Schnur ein einzelnes Korn entnommen, um die individuelle b-Achse zu erfassen. Die Zielstichprobe für jedes Raster betrug 100 Körner/m<sup>2</sup>. Die Zuordnung der Einzelkörner in Größenklassen folgte der Methode der Linienzahlanalyse (FEHR, 1987). Entsprechend wurden nur Korngrößen mit einer b-Achse > 1 cm berücksichtigt, da kleinere Klasten bei der manuellen Kornzählung meist unterrepräsentiert sind (RICE, 1995). Die resultierende Korngrößenverteilungskurve ist entsprechend abgeschnitten und nicht direkt mit gesiebten Kurven vergleichbar. Für Beprobungsflächen, bestehend aus Körnern mit b-Achsen von < 10 cm, ist das Analyseverfahren identisch mit der von BUNTE & ABT (2001) beschriebenen Raster-basierten Beprobung.

## 4 Historische Landschaftsentwicklung im oberen Jamtal

#### 4.1 Analyse der kartografischen Grundlagen

Auf Basis der georeferenzierten, historischen Karten erfolgte die manuelle Vektorisierung der Landbedeckung zu den fünf ausgewählten Zeitschnitten nach der in HOHEN-SINNER et al. (2013) beschriebenen "regressiv-iterativen Rekonstruktionsmethode". Ausgehend vom Zustand im Jahr 2015 wurden die Landschaftszustände in den Jahren 1970, 1921, 1870 und 1820 schrittweise rückwärts bis zu der am wenigsten bekannten Situation im Jahr 1820 rekonstruiert (ATZLER, 2021). Dieser chronologische Ansatz ermöglicht eine wesentlich genauere Rekonstruktion der früheren Landschaftsmerkmale als die Analyse des Zustands zu einem einzigen Zeitpunkt. Wenn einer der Zeitschritte abgeschlossen war (z.B. 1970), wurde die nächst ältere Situation (1921) auf der Grundlage der abgeschlossenen Situation (1970) erarbeitet. Das bedeutet, dass jede Struktur (GIS-Merkmal) der Landschaft von 1970 überprüft wurde, um festzustellen, ob sie entweder unverändert blieb, ihr Aussehen veränderte oder verschwand. Wurde eine Veränderung festgestellt, war die nächste Frage, ob dies natürlichen Prozessen, menschlichen Eingriffen oder fehlerhaften Kartierungen geschuldet war. Nach diesen Überlegungen wurde die jeweilige GIS-Struktur für die Situation im Jahr 1921 modifiziert. Nach Abschluss der Rekonstruktion eines Zeitschnittes wurden alle geografischen Strukturen daraufhin überprüft, inwieweit sie die Interpretation der Strukturen in den jüngeren Zeitschnitten (z.B. 1970) beeinflussen. Ein wichtiger Aspekt war dabei, ob sich neue Aussagen über die Zustände der Landschaft in den jüngeren Zeitstufen machen lassen und Korrekturen vorgenommen werden müssen. Nach Abschluss dieser iterativen Korrekturen in allen relevanten Zeitschnitten konnte mit der Rekonstruktion des nächstälteren Schrittes (hier: 1870) begonnen werden. Dieser regressiv-iterative Ansatz erfordert eine permanente kritische Revision der bereits bearbeiteten Zeitschnitte und endet schließlich mit der Rekonstruktion der gesamten Zeitreihe.

Auf der Grundlage der GIS-Rekonstruktionen wurden im nächsten Schritt die Veränderungen der historischen Landbedeckung für das gesamte Jamtal in drei verschiedenen Höhenstufen und für das Obere Jamtal (Teileinzugsgebiet des Jamtalferners) analysiert. Im vormals vergletscherten Gebiet zwischen der maximalen Ausdehnung des Jamtalferners im Jahr 1864 und 2015 wurde die biogeomorphologische Entwicklung der fluvialen Korridore zusätzlich untersucht. Dafür wurden alle Fließgewässer, die zwischen 1820 und 2015 existierten, seitlich 50 m gepuffert und der Wandel der Landbedeckung im Pufferbereich gesondert analysiert. Darüber hinaus wurde die für den Zeitraum 1970-2015 rekonstruierte Landbedeckung mit dem "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI), der auf der Grundlage von Fernerkundungsdaten zwischen 1985 und 2016 berechnet wurde, verglichen (FISCHER et al., 2019b).



Abb. 15. Rekonstruierte Landbedeckung im oberen Jamtal (Jamtalferner-Teileinzugsgebiet) zwischen 1820 und 2015 (die Fließgewässer sind aus Gründen der Sichtbarkeit breiter dargestellt als sie tatsächlich waren/sind; verändert nach HOHENSINNER et al., 2021a).

#### 4.2 Entwicklung im Jamtalferner-Teileinzugsgebiet 1820–2015

Verfolgt man die Veränderung der Landbedeckung im oberen Bereich des Jamtals zwischen den fünf rekonstruierten Zeitschnitten, so erhält man nicht nur detaillierte Einblicke in die Entwicklung des Gletschers, sondern auch in jene der Fließgewässer, des Ödlands und der vegetationsbedeckten Bereiche (Abb. 15). Die Rekonstruktion der Situation im Jahr 1820 ermöglicht es, die letzten Jahrzehnte des Gletscherwachstums am Ende der Kleinen Eiszeit nachzuvollziehen. So stieg die Fläche der vergletscherten Bereiche bis 1870 von 64 auf 70 % bezogen auf die Ausdehnung des Jamtalferner-Teileinzugsgebiets an (Abb. 16 unten links; ATZLER, 2021; HOHENSINNER et al., 2021a). Im Zusammenhang mit dem Gletschervorstoß verringerte sich das vegetationslose Ödland um 5 Flächenprozent. Das Ergebnis bezogen auf das Grünland deutet darauf hin, dass es mit 4 % stabil geblieben war. Das Gletscherwachstum könnte jedoch einige Teile des alpinen Grünlandes vernichtet haben, was in den historischen Quellen nicht ersichtlich ist. Die Rekonstruktion für 1870 liegt sehr nahe an der maximalen Ausdehnung des Jamtalferners am Ende der Kleinen Eiszeit (im Jamtal 1864 laut FISCHER et al.,

2019b). Demnach nahm die Gletscherausdehnung nach 1870 bis 1921 um 14 % ab, während die Ödlandfläche nur um 7 % zunahm (Abb. 16 unten). Dies ist auf die Besiedlung durch die Vegetation zurückzuführen, die zu einer Verdoppelung des alpinen Grünlandes von 4 auf 8 Flächenprozent führte. Im Zeitraum zwischen 1921 und 1970 ist auch ein signifikanter Gletscherschwund ersichtlich, die Vegetationsflächen nahmen allerdings nur sehr wenig zu. Bis zum Jahr 2015 beschleunigten sich diese Prozesse jedoch wieder. Obwohl der Zeitraum 1970–2015 nur 45 Jahre umfasst, verringerten sich die eisbedeckten Flächen um 18 Flächenprozent, das Ödland dehnte sich hingegen um 14 % und das Grünland um 4 % aus. 2015 erreichte Krummholz zum ersten Mal eine nennenswerte Fläche im oberen Jamtal (Abb. 16 rechts unten).

Langfristig gesehen, seit 1820, sind ein Gletscherrückgang von 55 % bezogen auf die Ausdehnung im Jahr 1820 und eine starke Zunahme des Ödlands um 82 % zu verzeichnen (Abb. 16 oben). Die fluvial geprägten Sedimentflächen haben sich um 126 % vergrößert, wobei die Zuwächse bei alpinem Grünland (196 %) und Krummholz (304 %) noch größer waren.



#### Abb. 16.

Veränderung der Landbedeckung im Teileinzugsgebiet des Jamtalferners zwischen 1820 und 2015 (oben) und für einzelne Zeiträume (unten). Oben: Die Prozentwerte am rechten Rand beziehen sich auf die relativen Veränderungen von 1820 bis 2015. Unten: Die Prozentwerte beziehen sich auf die prozentuale Bedeckung (Flächenprozent = F %) bezogen auf die Gesamtfläche des Teileinzugsgebietes. Beispiel unten rechts: Im Jahr 1970 waren 40 % des Gebiets Ödland (ÖL, schwarz/ grau). Davon ging bis 2015 ein deutlicher Anteil in Grünland (GR, grün) über, während sich große ehemals vergletscherte Flächen (GL, blau) zu Ödland (ÖL) entwickelten. Im Jahr 2015 schließlich umfasste das Ödland 54 % des gesamten Teileinzugsgebietes (nur Landbedeckungstypen mit einem signifikanten Flächenanteil sind gekennzeichnet; FG = Fließgewässer, FS = fluviale Sedimente, SB = spärlich bewaldet/Krummholz; verändert nach HOHENSINNER et al., 2021a).

## 4.3 Entwicklung der fluvialen Korridore im proglazialen Gebiet 1820–2015

Die Entwicklung der fluvialen Korridore in ienem Gebiet. das zwischen dem Maximum der Gletscherausdehnung im Jahr 1864 und 2015 durch den sich zurückziehenden Gletscher freigelegt wurde (proglaziale Zone), verdient eine genauere Betrachtung. In diesem Gebiet wurden alle zwischen 1820 und 2015 vorhanden gewesenen Wasserläufe einschließlich eines seitlichen Puffers von 50 m untersucht. Der Gletschervorstoß nach 1820 hat nicht nur Teile des Jambachs, sondern auch mehrere unbewachsene fluvial überformte Sedimentflächen ausradiert (vgl. 1820 und 1870 in Abbildung 15 und 17 unten links). Ödland, das heißt mit Gletscherschutt bedeckte Flächen, verschwanden fast völlig. Bis 1870 wurden 97 % der Fließgewässerkorridore allmählich mit Eis bedeckt. Dieser Zustand kann als ein "Reset" des fluvialen Systems in der untersuchten proglazialen Zone interpretiert werden (HOHENSINNER et al., 2021a).

Der drastische Rückgang der Gletscher zwischen 1870 und 1921 spiegelte sich in der erheblichen Ausweitung der freiliegenden Schutt- und Felsflächen (Ödland) auf 23 % der Gesamtausdehnung der fluvialen Korridore wider. Die von fluvialen Sedimenten bedeckten Flächen, in erster Linie proglaziale Schwemmebenen, nahmen auf 12 % und die von Fließgewässern bedeckten Flächen auf ca. 1 % zu. Bewachsene Flächen, die 1870 kaum vorhanden waren, bedeckten innerhalb von 51 Jahren bereits 4 % der Korridore. Die fortschreitende Deglazialisierung zwischen 1921 und 1970 legte neue Schuttflächen frei, die sich auf insgesamt 40 Flächenprozent ausdehnten (Abb. 17 unten). Die fluvialen Sedimente dehnten sich hingegen nur geringfügig aus, obwohl sich einige ehemals vergletscherte Gebiete in proglaziale Schwemmebenen verwandelten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass einige ältere fluvial geprägte Bereiche durch andere Arten von unverfestigtem Schutt (Ödland) ersetzt wurden. Eine mögliche Erklärung ist, dass das Gelände steiler wird, wenn sich der Gletscher in höhere Lagen zurückzieht. Hier könnten Ablagerungen von den Talseiten und Seitenmoränen ältere fluviale Landformen begraben haben. Dennoch haben sich die Fließgewässer bis 1970 ungefähr verdoppelt und die bewachsenen Flächen um 2 % vergrößert.

Schließlich verwandelten sich bis 2015 fast alle ehemals eisbedeckten Standorte in Ödland oder fluviale Sediment-



#### Abb. 17.

Veränderung der Landbedeckung der Fließgewässerkorridore 1820–2015 im proglazialen Gebiet, das zwischen den maximalen Ausdehnungen der Gletscher 1864 und 2015 vergletschert war (Abb. 15). Die Fließgewässerkorridore beziehen sich auf alle Fließgewässer, die in diesem Gebiet zwischen 1820 und 2015 existierten, einschließlich seitlicher, 50 m breiter Puffer. Oben: Die Prozentwerte am rechten Rand beziehen sich auf die relativen Veränderungen von 1820 bezogen auf die Ausdehnung im Jahr 1820. Unten: Die Prozentwerte beziehen sich auf die prozentuale Bedeckung (Flächenprozent = F%) bezogen auf die Gesamtfläche der Fließgewässerkorridore. Beispiel 1921–1970 unten Mitte: Im Jahr 1921 wiesen 12 % der Flusskorridore fluviale Sedimente auf (FS, orange). Davon ging bis 1970 ein deutlicher Anteil in Ödland (ÖL, schwarz/grau) über. Im Gegenzug entwickelten sich kleinere Anteile ehemaliger Gletscher (GL, blau) und Ödland (ÖL) zu fluvialen Sedimentflächen (FS). Im Jahr 1970 machten fluviale Sedimente 14 % der untersuchten fluvialen Korridore aus (nur Landbedeckungstypen mit einem signifikanten Flächenanteil sind gekennzeichnet; FG = Fließgewässer, GR = Grünland, SB = spärlich bewaldet/Krummholz; verändert nach HOHENSINNER et al., 2021a). flächen proglazialer Schwemmebenen. Ödland war somit 2015 die dominierende Form der Landbedeckung (59 %). Durch die Verlängerung des Flusssystems bergwärts verdoppelten sich die Fließgewässer noch einmal. Die alpine Vegetation profitierte deutlich von den veränderten physischen Bedingungen und nahm von 6 % im Jahr 1970 auf 20 % im Jahr 2015 zu.

Langfristig war das gesamte System der fluvialen Korridore, das sich zwischen 1820 und 2015 in ehemals eisbedeckten Flächen entwickelt hat, durch eine beinahe Verfünffachung der Fließgewässer gekennzeichnet; fluvial geprägte Sedimentflächen wuchsen auf das Sechsfache ihres ursprünglichen Ausmaßes an. Zudem haben sich die ursprünglich kaum vorhandenen bewachsenen Flächen fast verzwölffacht (Abb. 17 oben).

#### 4.4 Zusammenhang Geländeneigung und Entwicklung fluvialer Korridore 1870–2015

Anzunehmen ist, dass die Geländeneigung eine Rolle bei der Entwicklung der Flusskorridore spielt (EICHEL et al., 2018), weshalb diesem Aspekt eine eigene Untersuchung gewidmet wurde. Abbildung 18 zeigt bestimmte Formen des Landbedeckungswandels in Bezug zur Geländeneigung nach der maximalen Gletscherausdehnung zwischen 1870 und 2015. Sie zeigt, dass fluviale Sedimente wie z.B. proglaziale Schwemmebenen vorwiegend ehemals vergletscherte Flächen in flacherem Gelände mit einer medianen Neigung von nur 11° ersetzten (GL–FS in Abb. 18; HOHENSINNER et al., 2021a). An steileren, aber nicht zu steilen ehemals eisbedeckten Standorten konnte sich alpines Grasland entwickeln (GL–GR, mediane Neigung =  $17^{\circ}$ ), und Gletscher in steilerem Gelände wurden weitgehend durch unbegrüntes Ödland ersetzt (GL–ÖL).

In sehr flachem Gelände blieben hingegen die fluvial geprägten Flächen langfristig stabil (FS-FS, mediane Neigung = 4°). In steilerem Gelände mit einer mittleren Neigung von 13° wurden solche Flächen von der Vegetation besiedelt (FS-GR). In sehr viel steilerem Gelände wurden die meisten jedoch bald von Schutt aus den Seitenmoränen oder aus den Talflanken bedeckt oder auch ausgewaschen, sodass das Grundgestein freigelegt wurde (FS-ÖL, mediane Neigung = 19°). Von Vegetation besiedeltes Ödland wiederum wies eine mediane Neigung von 30° auf (ÖL-GR). Etwas steileres Ödland blieb oft vegetationslos (ÖL–ÖL). Da die beiden letztgenannten Fälle eine sehr ähnliche Verteilung aufweisen, könnte die Vegetationsbedeckung ehemaliger Ödlandflächen auch durch andere Faktoren als die in dieser Studie analysierten beeinflusst worden sein.

#### 4.5 Vergleich "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI) und historische Analysen

Die umfangreichen historischen Untersuchungen ermöglichen auch einen Vergleich mit Fernerkundungsdaten aus den letzten Jahrzehnten, wodurch zwei völlig unterschiedliche methodische Ansätze miteinander verschränkt werden können. FISCHER et al. (2019b) berechneten basierend auf Satellitenbildern die Dichte der Bodenbedeckung mit Hilfe des "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI; ROUSE et al., 1974). In der proglazialen Zone des Jamtal-



Abb. 18. Geländeneigung versus Änderung der Landbedeckung in den fluvialen Korridoren im proglazialen Gebiet, das zwischen 1864 und 2015 vergletschert wurde (Abkürzungen siehe Tabelle 2; n = Anzahl der 5 m-Rasterzellen; verändert nach HOHENSINNER et al.. 2021a).



ferners stieg der Gesamt-NDVI mit der Dauer der Exposition seit dem Gletscherrückzug von einem Mittelwert von 0,11 im Jahr 1985 auf 0,27 im Jahr 2016. Die Kombination des rekonstruierten Datensatzes für 1970-2015 mit dem NDVI 1985-2016 zeigt, dass fast alle Flächen, die zwischen 1970 und 2015 Grünland geblieben sind, einen steigenden NDVI aufweisen (siehe GR-GR in Abbildung 19 unten; HOHENSINNER et al., 2021a). Dies bedeutet, dass die Bodenbedeckung auf diesen Flächen zugenommen hat.

Interessanterweise hatten Standorte, die sich von unbewachsenen Flusssedimenten oder Ödland zu Grünland entwickelt hatten (FS-GR und ÖL-GR), 1985 einen höheren NDVI als unbewachsene Standorte, die vegetationslos geblieben waren (FS-FS und ÖL-ÖL, Abb. 19 oben). Dies deutet darauf hin, dass die Umwandlung der Ersteren in Grünland bereits vor 1985 begonnen haben muss. Außerdem nahm die Bodenbedeckung auf solchen neu besiedelten Flächen zwischen 1970 und 2015 stärker zu als auf Standorten, die als Grünland erhalten blieben (Abb. 19 unten). Flächen, die sowohl 1970 als auch 2015 als Flusssedimente identifiziert wurden, wiesen keine signifikante Zunahme der Bodendecke auf (FS-FS, Abb. 19 unten). Anhaltendes Ödland hingegen zeigt eine leichte Zunahme (ÖL–ÖL, Abb. 19 unten). Schließlich zeigen vergletscherte Standorte, die sich zwischen 1970 und 2015 zu fluvial geprägten Flächen entwickelt haben (GL-FS), eine stärkere Zunahme der Bodenbedeckung als solche, die zu Ödland geworden sind (GL-ÖL, Abb. 19 unten).

vom

#### 4.6 Zusammenfassung historische Landbedeckung im oberen Jamtal

Die wichtigsten Erkenntnisse mit besonderem Fokus auf das primär glazial geprägte Gewässersystem im Jamtal zwischen 1820 und 2015/19 sind (HOHENSINNER et al., 2021a):

(1) Zwischen 1820 und 2015 gingen die vergletscherten Flächen um 55 % zurück, was mit einer enormen Zunahme der exponierten Ödlandflächen einherging (Abb. 16 oben). Die fluvial geprägten Sedimentflächen vergrößerten sich um 126 %. Parallel dazu nahm alpines Grünland um 196 % und Krummholz sogar um 304 % zu. Eine detaillierte Analyse der fluvialen Korridore in der proglazialen Zone (Gebiet, das nach dem LIA-Maximum 1864 vergletschert wurde) zeigt, dass neue fluviale Systeme entstanden, die sich nach oben ausdehnten und damit der zurückweichenden Gletscherzunge folgten.

(2) Seit der maximalen Ausdehnung des Gletschers 1864/70 hat sich das Hauptgewässer des Gerinnesystems (Jambach) bis 2019 um ca. 2.740 m (ca. 19 m/Jahr) nach oben ausgedehnt und dabei eine Höhe von 370 m überwunden. Hohe Schmelzwasserabflüsse und extreme Niederschlagsereignisse im Sommer sowie ein ausreichendes Sedimentangebot im Vorland des Gletschers (Proglazialbereich) kontrollieren primär das neue, hochdynamische System. Etwa die Hälfte der neuen Gewässer, die sich zwischen 1870 und 1921 in den ehemals vergletscherten Gebieten entwickelt hatten, war 2015 noch vorhanden. Fast ein Fünftel der neuen Gewässer wurde wieder unter Schutt begraben und fast ein Drittel wurde von Vegetation besiedelt.

(3) Neuere Daten zeigen, dass der Prozess der Entgletscherung viel schneller verläuft als die Besiedelung durch die alpine Vegetation. Dementsprechend dehnt sich das Ödland (unbewachsener Schutt, Felsen) aus und kann den Sedimentnachschub für das fluviale System verstärken. Der Klimawandel verstärkt die Transformation der alpinen Gletscherlandschaft und ihrer fluvialen Systeme, sowohl hydrologisch als auch in Bezug auf die Sedimentzufuhr. In ehemals vergletscherten Gebieten entstehen neue fluviale Systeme, was auch die menschliche Nutzung in tiefer gelegenen, besser nutzbaren Regionen der Alpenlandschaft beeinflusst.

Die Langzeituntersuchung solcher Landschaften zeigt, dass sich die Transformationsprozesse in den letzten Jahrzehnten beschleunigt haben. Die historische Entwicklung der hochalpinen Geländetopografie, das heißt der Hänge der vergletscherten Moränen und des Talbodens, ist entscheidend für das Verständnis der potentiellen fluvialen Sedimentfracht, der Murgänge und der Besiedelungsprozesse der alpinen Vegetation.

# 5 Landschaftsveränderungen im Bereich des Gletschervorfelds des Jamtalferners

Durch die drei ALS-Datensätze können für den gesamten Bereich des Gletschervorfelds des Jamtalferners die Oberflächenveränderungen seit dem Jahr 2006 flächendeckend bestimmt werden. Im Fokus der Untersuchungen standen einerseits die Veränderungen im Bereich des Gletscherbaches, aber auch ein möglicher Sedimenteintrag von den angeschlossenen Hängen, die hauptsächlich als Ufermoränen anzusprechen sind.

Betrachtet man die Oberflächenveränderungen zwischen 2006 und 2021, also über 15 Jahre, dann fällt auf, dass im Gebiet eine hohe Sedimentdynamik zu verzeichnen ist, die sich in größere Erosionsbereiche und größere Akkumulationsbereiche unterteilen lässt (Abb. 20).

Der Gletscherbach des Jamtalferners wurde in zwei Bereiche (Abschnitt I und Abschnitt II) aufgeteilt. Diese Bereiche stellen das direkte und aktive Gletschervorfeld (I) und den daran anschließenden Bereich (II) dar. Beide Flächen sind in erster Linie unbeeinflusst von seitlich einmündenden Einzugsgebieten. Der Bachabschnitt III dagegen ist stark durch Abfluss, aber auch durch Sedimenteintrag von westlich und östlich anschließenden Seitengletschern geprägt, daher wurde hier der Hauptbach des Jamtalferners für die Analysen auf die einmündenden Bachläufe erweitert.

Die an die Bachabschnitte I und II angrenzenden Seitenhänge (Ufermoränen) wurden in die Abschnitte AA, A, B und C unterteilt. Diese Unterteilung erfolgte in erster Linie anhand der sichtbar unterschiedlichen Stärke der Sedimentdynamik, die aber gleichzeitig in gewisser Weise eine Chronologie der Eisfreiwerdung darstellt (AA und A erst vor kurzem entgletschert, B und C schon deutlich länger eisfrei).

Deutlich sichtbar ist, dass die Ufermoränen zwar eine hohe (wenn auch differenzierte) Hangdynamik aufweisen, jedoch diese Hänge allerdings alle vom Hauptgerinne entkoppelt sind, also kein Sediment in den Gletscherbach des Jamtalferners einspeisen. Neben der unterschiedlichen

Abb. 20.

Mittlere jährliche Oberflächenveränderungen (2006–2021) im Bereich des Gletschervorfelds des Jamtalferners und die für eine weitere Analyse separierten Teilbereiche (Gerinnesektionen I–III und Hangbereiche AA–C). Stärke der Oberflächenveränderungen ist zudem deutlich sichtbar, dass an dieser Dynamik unterschiedliche geomorphologische Prozesse beteiligt sind. Im Folgenden sollen sowohl die Gerinneabschnitte als auch die einzelnen Ufermoränen separat untersucht werden.



#### 5.1 Gerinnedynamik

Der Gletscherbach des Jamtalferners wurde ausgehend von der Gletscherstirn (maßgeblich war hier der Gletscherstand zum Zeitraum der ALS-Befliegung 2006) bis knapp oberhalb der Jamtalhütte untersucht. Bereits im Gesamtbild zeigt sich, dass die Dynamik in diesem Gerinnesystem in unterschiedliche Teile gegliedert werden kann, die dann eingehend untersucht wurden. Insgesamt wurde der Gletscherbach in drei Abschnitte unterteilt: Abschnitt I stellt das direkte Gletschervorfeld dar, das durch Sediment führenden Gletscherabfluss geprägt ist; Abschnitt II schließt sich direkt an, in dieser Sektion hat der Gletscherbach einen Teil seines Sediments im direkten Gletschervorfeld der Sektion bereits abgelagert, so dass ausreichend Transportkapazität vorhanden ist, um neues Material aufzunehmen; in Abschnitt III bekommt dann der Gletscherbach über seitliche Zuflüsse einerseits Wasser, aber viel wichtiger noch Material über Murgänge oder fluvialen Gerinnetransport zugeführt.

Abbildung 21 zeigt ein Differenzbild der Gerinnesektion I als langjährige (15 Jahre) mittlere Oberflächenveränderungen (2006–2021). Hieraus wird deutlich, dass ein Großteil des vom Gletscher stammenden Materials bereits nach kurzer Lauflänge (die ersten ca. 150 m) abgelagert wird. Einschränkend ist hier zu erwähnen, dass es sich hier strenggenommen um den Bereich des direkten Gletschervorfelds handelt, der bereits seit 2006 eisfrei ist. Allerdings zeigen die Oberflächenveränderungen zwischen den Datensätzen 2019 und 2021 im eisfreien Gebiet seit 2019 einen ähnlichen Trend, auch wenn hier nur ein zweijähriger Zeitraum abgebildet werden kann. Diese großflächigen Akkumulationsbereiche werden dann von einem Umlagerungsbereich abgelöst, an den sich im weiteren Verlauf eine Erosionsstrecke anschließt.

Diese sehr deutliche Abfolge der Sektion I stellt sich in der Sektion II dann etwas komplexer dar (Abb. 22). Gleichwohl beginnt dieser Abschnitt im Anschluss an die Sektion I mit einer längeren Erosionsstrecke. Hier spielt sicherlich die stärkere Transportkapazität des Gletscherbachs eine wesentliche Rolle, da der Bach hier einen etwas steileren Abschnitt durchläuft. Im Anschluss an diesen Bereich zeigt der Bach einen Wechsel zwischen Erosion und Akkumulation mit sichtbaren Strukturen (Schotterbänke). Diesen Bereich kann man dann als klassischen Umlagerungsbereich ansehen.

Die Sektion III ist geprägt durch die Gerinnedynamik im Bereich des Hauptbaches, gleichzeitig ist sie hochgradig beeinflusst durch die seitlich einmündenden Abschnitte (westlicher Teil durch Mure, östlicher Teil durch Gletscherabfluss eines Seitengletschers). Hier muss klar festgehalten werden, dass die Dynamik damit nicht mehr allein durch den Jamtalferner gesteuert ist, sondern dass die Hauptrolle hier die beiden einmündenden Systeme spielen. Dies wird auch deutlich, wenn man die Sektionen I bis III gemeinsam betrachtet (Abb. 23). Während die gesamte Sektion I im langjährigen Mittel eine leichte Tendenz zur Akkumulation aufweist, ist die Sektion II im Mittel durch eine leichte Erosion geprägt. Es ist davon auszugehen, dass sich diese Tendenz zur Erosion in der Sektion III wei-



Mittlere jährliche Oberflächenveränderungen entlang des Gletscherbaches des Jamtalferners für die Gerinnesektion I

> Abb. 21. Mittlere jährliche Oberflächenveränderungen in der Sektion I des Gletscherbaches des Jamtalferners als Differenzbild und als Boxplot-Diagramm aufgeschlüsselt nach 25 Meter-Fließlängenabschnitten.

Mittlere jährliche Oberflächenveränderungen entlang des Gletscherbaches des Jamtalferners für die Gerinnesektion II



Abb. 22.

Mittlere jährliche Oberflächenveränderungen in der Sektion II des Gletscherbaches des Jamtalferner als Differenzbild und als Boxplot-Diagramm aufgeschlüsselt nach 25 Meter-Fließlängenabschnitten.



ter fortführen müsste, da sich der Gletscher als Sedimentlieferant noch weiter flussaufwärts befindet und der Bach dadurch eher in der Lage sein sollte, Material aus dem Gerinne aufzunehmen. Durch die seitlichen Zubringer allerdings und den hohen Sedimenteintrag entsteht in der Sektion III aber eine klassische Umlagerungsstrecke mit einer


Abb. 24.

Langjährige mittlere Oberflächenveränderungen an den Hängen AA–C im Bereich des proglazialen Raums des Jamtalferners und die Veränderungen der vergletscherten Fläche für einzelne Jahre seit Ende des LIA-Maximalstandes.

im langjährigen Mittel ausgeglichenen Sedimentbilanz. Da die Situation des hohen Sedimenteintrags allerdings sicherlich durch Extremereignisse geprägt ist (hier schlägt sich auch in der langjährigen Datenreihe wohl ein Extremereignis sehr stark nieder), ist davon auszugehen, dass diese Umlagerungsstrecke sich bei ausbleibendem Sedimentnachschub von den Seiten eher zu einer Erosionsstrecke wandeln wird, bis das nächste Extremevent die Situation wieder verändert oder das verfügbare Material auf den Hängen aufgebraucht ist.

#### 5.2 Hangdynamik

Aus Abbildung 24 wird deutlich, dass die Hänge AA, A, B und C zwischen 2006 und 2021 kein Material an das Hauptgerinne des Jamtals abgeben, also als entkoppelt vom Gesamtsystem angesehen werden können. Diese Entkoppelung scheint dauerhaft vorzuliegen, da selbst das (oder die) in den Daten sichtbare(n) Extremevent(s) (vgl. Dynamik in Sektion III mit Muren und starker Gerinneerosion) diese Sedimentdynamik nicht beeinflussen konnte(n). Betrachtet man die einzelnen Hänge im Vergleich miteinander, dann fällt zusätzlich auf, dass auf den Hängen selbst eine unterschiedlich stark ausgeprägte geomorphologische Hangdynamik vorliegt, die ausgehend von den noch nahe am Gletscher liegenden Hängen talauswärts in der Intensität abnimmt.

#### 5.2.1 Hangdynamik beeinflusst durch Toteis

Gerade die Hänge direkt am Gletscher (Abb. 24; AA und A) zeigen sehr starke Oberflächenveränderungen, die allerdings nur schwer einzelnen geomorphologischen Prozessen zugeordnet werden können. Hier sind in erster Linie negative Oberflächenveränderungen zu verzeichnen, die im langjährigen Mittel bis annähernd zwei Meter betragen. Gleichzeitig finden sich an den Hängen oder den Hangfüßen nur sehr vereinzelt Ablagerungsräume, was die Sedimentbilanz auf beiden Hängen stark negativ werden lässt. Da zusätzlich eine Kopplung und damit eine Abgabe des Materials an die Gerinnesysteme auszuschließen ist, können diese stark negativen Veränderungen ohne zugehörige Ablagerungsräume ganz eindeutig austauendem Toteis zugeordnet werden.

Diese Toteisdvnamik findet sich sehr stark ab etwa der mittleren Hanglänge der Flächen AA und A, wobei das Austauen von Toteis im Bereich der Fläche AA deutlich stärker ausgeprägt ist. Diese stärkere Dynamik auf der Fläche AA erklärt sich dadurch, dass der untere Hangbereich der Fläche A schon deutlich länger den Kontakt zum aktiven Gletscher verloren hat, wodurch das Toteis auch schon längere Zeit austauen konnte. Aus den Gletscherständen wird deutlich, dass der Gletscher über einen längeren Zeitraum im Bereich der Fläche AA eine stabile Außengrenze aufwies und seine Position dort zwischen 1895 bis 1969 kaum verändert hat. Durch diesen Umstand stand auch ausreichend Zeit zur Verfügung, das Gletschereis über Hangdynamik (sicherlich in der Kombination mit austauendem Eis) aus dem oberen Hangbereich mit Sediment zu überschütten, was das Austauen durch starke thermische Isolation in der Folge dann auch stark verzögert.

Dieses Austauen von Toteis setzt sich bis in den aktuellen Datensatz fort, wobei (i) die betroffene Fläche offenbar abnimmt und (ii) sich die Intensität des Austauens sowohl im Bereich AA als auch im Bereich A verstärkt, allerdings insgesamt mit deutlich höheren Raten auf der Fläche AA (Tab. 7). Das Phänomen solcher austauenden Toteisbereiche ist auch bei BETZ-NUTZ et al. (2022) ausführlich beschrieben und findet sich häufig in noch nicht lange eisfreien Ufermoränen (vgl. ALTMANN et al., 2020 im Kaunertal).

# 5.2.2 Hangdynamik in Abhängigkeit von der Zeit seit Eisfreiwerdung

Die schon beschriebenen deutlichen Unterschiede in der Hangdynamik zwischen den einzelnen Hangflächen AA bis C werden aus Abbildung 24 klar ersichtlich. Bei den Hangflächen AA und A maskieren die Oberflächenveränderungen durch das Austauen von Toteis andere aktive geomorphologische Prozesse. In den Hangbereichen B und C dagegen werden die Hangveränderungen in erster Linie durch Hangmuren verursacht, wobei am Oberhang Material erodiert und am Unterhang abgelagert wird. Grundsätzlich weisen die Hänge B und C also eine ähnliche Prozessdynamik auf, allerdings ist die Magnitude (eventuell auch die Frequenz), mit der die Murgänge Material verlagern, auf der Fläche B deutlich stärker. Unter der Annahme, dass bei beiden Flächen kein austauendes Toteis mehr beteiligt ist

	Zeitraum	Mittelwert der jährlichen Oberflächenveränderung [m]	Minimum der jährlichen Oberflächenveränderung [m]	Maximum der jährlichen Oberflächenveränderung [m]	Standardabweichung
Fläche AA	2006–2019	-0,12	-0,56	0,24	0,15
	2019–2021	-0,15	-1,90	0,35	0,31
Fläche A	2006–2019	-0,02	-0,51	0,20	0,07
	2019–2021	-0,04	-1,21	0,18	0,13

Tab. 7.

Statistische Werte für die Oberflächenveränderungen auf den Hängen AA und A differenziert für die Zeiträume 2006 bis 2019 und 2019 bis 2021.

(dies kann man anhand der Differenzbilder und der Sedimentbilanz der Hänge, die leicht positiv ist, eigentlich ausschließen), die Hänge ansonsten identischen klimatischen und topografischen Bedingungen ausgesetzt sind (identische Höhenlage, nahezu identische Hangneigungen und Hanglängen), folgt die Hangentwicklung in diesem Beispiel ideal der Modellvorstellung einer paraglazialen Anpassung (vgl. BALLANTYNE & BENN, 1994; BALLANTYNE, 1995; CURRY, 1999; ORWIN & SMART, 2004; CURRY et al., 2006). Diese Modellvorstellung geht davon aus, dass die Hangdynamik im proglazialen Raum mit der Zeit seit Eisfreiwerdung (Entgletscherung) sukzessive abnimmt. Für die beiden Hangbereiche B und C können unterschiedliche Alter der Eisfreiwerdung durch die vorhandenen Gletscherstände zumindest grob abgeschätzt werden (Abb. 25). Während die Fläche C ab etwa 1895 nicht mehr vergletschert war (allerdings ist anzunehmen, dass zu diesem Zeitpunkt eine ähnliche Toteisdynamik zu verzeichnen war, wie dies heute bei den Flächen AA und A zu beobachten ist!) und damit 2006 bereits 111 Jahre eisfrei war, lag der Gletscher noch 1921 in Teilen auf der Fläche B und beeinflusste den Hang damit noch bis vor mindestens 85 Jahren. Damit hatte die Fläche C im Vergleich zur Fläche B mindestens 26 Jahre mehr Zeit, um sich durch Aufwachsen von Vegetation in Verbindung mit Bodenbildungsprozessen zu stabilisieren, was dann in der Folge auch die Prozessdynamik offenbar deutlich beeinflusst hat.

Wenn man versucht, diese Zeiträume der Stabilisierung auf die noch extrem aktiven Flächen AA und A zu übertragen, dann kann man davon ausgehen, dass die sich bereits abschwächende Dynamik der Fläche A (im Vergleich zur noch sehr hohen Dynamik der Fläche AA) weiter abschwächen wird und sich mittelfristig (nächste Jahrzehnte) langsam der Dynamik auf der Fläche B annähern wird. Die Fläche AA wird mittelfristig seine hohe Toteisdynamik verlieren und sich über eine Dynamik der Fläche A dann auch längerfristig an die Dynamik der Fläche B annähern.



Abb. 25.

Langjährige mittlere Oberflächenveränderungen an den Hängen B und C im Bereich des proglazialen Raums des Jamtalferners und die Gletscherstände zwischen LIA und 1954. Insgesamt kann man also für das direkte Gletschervorfeld des Jamtalferners mit einer sukzessiven Abnahme der Hangdynamik rechnen. Da aber bislang alle Hänge (mit Ausnahme der einmündenden Murbahnen und Seitenbäche) vom Hauptbach des Jamtals entkoppelt sind, wird sich diese Veränderung nicht auf die Sedimentdynamik und den potentiellen Sedimentaustrag aus dem Jamtal auswirken. Für die Sedimentdynamik im Haupttal spielt die Abflussdynamik des Gletscherbaches des Jamtalferners in Verbindung mit dem im Gerinne verfügbaren Material, dem Sedimentnachschub durch den Jamtalferner, sowie der Sedimenteintrag durch größere Murbahnen und einmündende Bäche der Seitengletscher die Hauptrolle.

# 6 Schuttbedeckung auf Gletschern

#### 6.1 Schuttbedeckung am Jamtalferner

Die Beobachtungen von Feldmessungen auf dem Jamtalferner, dass sich die schuttbedeckten Flächen auf dem Gletscher deutlich vergrößert haben, können nach der Auswertung der Satellitendaten für den Zeitraum von 1985 bis 2020 bestätigt werden (Abb. 26). Ausgehend von 1985 und bezogen auf die Gletscherflächen von 2015 haben sich die schuttbedeckten Bereiche bis zum Jahr 2001 nur relativ langsam vergrößert. Zwischen 2001 und 2015 gibt es jedoch massive Veränderungen vor allem auf der Gletscherzunge, ausgehend von einem Felsbereich in der Mitte des Gletschers. Auch entlang der Seitenränder sind im Jahr 2015 Schuttablagerungen zu sehen, die im Jahr 2001 noch eindeutig als Gletschereis oder Schnee klassifiziert wurden. In all diesen Bereichen vergrößert oder verdichtet sich im folgenden Jahr die Schuttbedeckung. Die Auswertung für das Jahr 2020 zeigt erneut eine deutliche Zunahme der schuttbedeckten Gletscherbereiche. Bei der Interpretation muss jedoch bedacht werden, dass für die Auswertungen nur die Gletschergrenzen aus dem Jahr 2015 zur Verfügung standen. Einige dieser deutlichen Veränderungen sind daher eher auf den Gletscherrückzug zurückzuführen. Der zentrale Zungenbereich des Jamtalferners hingegen ist tatsächlich ein Beispiel für eine erneute Zunahme der Schuttbedeckung auf dem vergletscherten



Abb. 26. Veränderungen der Oberflächen auf dem Jamtalferner und umliegenden Gletschern in der Silvretta von 1985 bis 2020. Die Gletscherflächen von 2015 sind weiß umrandet.



Abb. 27. Vergleich von schuttbedeckten Bereichen, kartiert von Orthofotos (dunkelbraun und grau) von 2015 und schuttbedeckten Bereichen basierend auf der Analyse der Landsat-Szene vom 31. Juli 2015. Eine Falschfarbenabbildung dieser Szene ist als Hintergrundbild dargestellt Bisuliche Bereiche zeinen

Szene ist als Hintergrundbild dargestellt. Bläuliche Bereiche zeigen Schnee und Eis, Felsen erscheinen bräunlich und Vegetation grünlich.

Gebiet, ausgehend von dem Felsbereich in der Mitte des Gletschers, von dem der Nachschub an Schutt und Geröll offensichtlich stammt.

Der Vergleich mit Analysen der Schuttbedeckung von Orthofotos von 2015 auf dem Jamtalferner zeigt eine hohe Übereinstimmung auf der Gletscherzunge (Abb. 27). Dabei sind feine Details mit einer Größenordnung kleiner als 15 x 15 m aus Landsat-Daten nicht klar nachvollziehbar. Die Unterschiede in den Schuttbedeckungen in den oberen Gletscherbereichen des Jamtalferners können verschiedene Ursachen haben. In der Analyse von dem Orthofoto könnten diese Gebiete nicht mehr als Gletscherfläche eingeschätzt und damit in der Kartierung nicht berücksichtigt werden. Oder es könnten die Gletscheroberflächen zum Aufnahmezeitpunkt des Orthofotos durch Schnee vom letzten Winter oder von einem vorangegangenen Schneefallereignis abgedeckt sein.

#### 6.2 Analyse der Schuttbedeckung in den Stubaier Alpen

Im Rahmen der Ausarbeitung der Masterarbeit von Robert Gleirscher (Universität Innsbruck) wurde auf Grundlage von Orthofotos sowie Höhenmodellen und den Gletschergrenzen eine Kartierung der Schuttbedeckung und deren Veränderung an 117 Gletschern in den Stubaier Alpen für den Zeitraum von 2003 bis 2018 durchgeführt. Die kartierten Flächen wurden unter anderem zu bestehenden Datensätzen der Schuttbedeckung (SCHERLER et al., 2018) verglichen und dienen als Grundlage der Validierung der auf Satellitenaufnahmen gestützten Analysen. Dabei wurden grundlegend drei Typen an Schuttbedeckung unterschieden:

 Klasse1: leichte Schuttbedeckung, vereinzelte Ablagerungen von Gesteinsbrocken oder besonders feinkörnige Schuttauflage, Eisoberfläche ist noch gut erkennbar.

- Klasse 2: mäßige Schuttbedeckung, vollflächige Bedeckung des darunterliegenden Eiskörpers, Eisoberfläche kommt an vereinzelten Stellen zum Vorschein.
- Klasse 3: geschlossene Schuttbedeckung.

Die Aufnahmen der Orthofotos von 2003 und 2018 decken dabei nicht die gesamte Gletscherfläche ab oder Neuschnee verbirgt die Schuttbedeckung. Hier wurde das Jahr 2003 mit Orthofotos von 2009 ergänzt und das Jahr 2018 schließlich mit Informationen aus den Jahren 2015, 2016 und 2017 vervollständigt. Die Schuttbedeckung wurde für folgende Gletschergrößenklassen ausgewertet: Gletscher kleiner als 0,1 km<sup>2</sup> (58 Gletscher); Gletscher zwischen 0,1 und 0,5 km<sup>2</sup> (40 Gletscher); Gletscher zwischen 0,5 und 1 km<sup>2</sup> (9 Gletscher); Gletscher größer als 1 km<sup>2</sup> (10 Gletscher). Zur Analyse der Höhenänderungen wurde die Differenz der zwei Höhenmodelle der Landesbefliegungen 2006 und 2017 herangezogen (https://www.tirol.gv.at/sicherheit/geoinformation/geodaten/laserscandaten/).

Abbildung 28 zeigt deutlich die Zunahme der Schuttbedeckung auf den Gletschern über den Zeitraum von etwa 15 Jahren. Nahezu eine Verdopplung der Schuttbedeckung ist auf den Gletschern über alle Größenklassen hinweg zu finden. Betrachtet man die Eisdickenänderungen über diesen Zeitraum für die einzelnen Schuttbedeckungsklassen (Abb. 29), so fällt auf, dass Bereiche mit einer sehr dünnen Schuttauflage (Schuttbedeckungsklasse 1) deutlich erhöhte Eisdickenverluste gegenüber dem Mittel der Eisdickenänderung (Schuttbedeckungsklasse 0-0) aufweisen. Flächen mit einer geschlossenen Schuttbedeckung (Schuttbedeckungsklasse 3) weisen durchschnittlich niedrigere Eisdickenverluste auf. Es kommt hier unter anderem zu einer Verstärkung der Eisschmelze aufgrund erhöhter Absorption von Strahlung durch das dunkle Gesteinsmaterial.

Ein weiterer Vergleich mit Schuttbedeckungen, welche ebenfalls hauptsächlich basierend auf Orthofotos von 2016 bis 2018 in den Stubaier Gletschern kartiert und





Abb. 29.

Mittlere Eisdickenänderungen zwischen 2006 und 2017 (farbliche Abstufung) innerhalb der kartierten Schuttbedeckungsklassen für die Aufnahmen 2003 und 2018. Die Werte innerhalb der Matrix zeigen die Gletscherfläche in km<sup>2</sup>.

#### Abb. 28.

Prozent der Schuttbedeckung (Summe der Schuttbedeckungsklassen 1 bis 3) als Anteil an der Gesamtfläche der Gletscher (Referenz: Gletscherausdehnung 2017 (GI5). Gezeigt sind die Schuttklassifikation auf Grundlage der Orthofotos von 2018 (GI5, blau) sowie auf den Orthofotos von 2003 (rot) innerhalb der Gletschergrenzen von 2017. Schwarz zeigt die relative Schuttbedeckung für 2003, jedoch innerhalb der Gletschergrenzen 2006.

freundlicherweise von Robert Gleirscher für dieses Projekt zur Verfügung gestellt wurden, zeigen deutliche Unterschiede in der Klassifizierung von Sentinel-2-Daten von 2015 (Abb. 30). Die unterschiedlichen Jahre, für welche die Aufnahmen verfügbar sind, können dabei nur zum Teil die Unterschiede erklären. In einigen Fällen wurden Gletscherflächen in der Analyse von Orthofotos als schuttbedeckt interpretiert, wohingegen die gleichen Gebiete von den Satellitendaten aus als Blankeis klassifiziert werden.

#### 6.3 Veränderungen der Schuttbedeckung auf Gletschern in Österreich

Die Analysen der Satellitendatenzeitreihen zeigen, dass sich der Anteil der schuttbedeckten Flächen auf österreichischen Gletschern bezogen auf die Gletscherflächen von 2015 zwischen Mitte der 1980er Jahre und 2020 stark vergrößert hat. Diese Tendenz ist in allen vergletscherten Gebieten in Österreich ersichtlich. Dabei sind die Veränderungen zwischen 1985 und dem Jahrtausendwechsel geringer als zwischen dem Jahrtausendwechsel und dem Jahr 2015. Die Analysen für den Zeitraum zwischen 2015 und 2020 sind ebenfalls auf die Gletschergrenzen von 2015 bezogen. Die starken Änderungen in den schuttbedeckten Bereichen für diesen Zeitraum sind daher in vielen Fällen eher auf den allgemeinen Gletscherrückgang zurückzuführen. Beispiele aus der Glocknergruppe, der Venedigergruppe und der Ötztaler Alpen sind in den Abbildungen 31 bis 33 dargestellt. Hier zeigen sich die lokalen Besonderheiten innerhalb der jeweiligen Gebirgsgruppen.

Abb. 30

Vergleich von schuttbedeckten Bereichen, kartiert hauptsächlich von Orthofotos (pink) von 2018 im Bereich Daunkogelferner, Schaufelferner und Fernauferner in den Stubaier Alpen, und den schuttbedeckten Bereichen basierend auf der Analyse der Sentinel-2-Szene vom 26. August 2015. Eine Falschfarbenabbildung der Sentinel-2-Szene ist als Hintergrundbild dargestellt. Bläuliche Bereiche zeigen Schnee und Eis, Felsen erscheinen bräunlich und Vegetation grünlich.



Meist sind es einzelne Gletscher, deren ohnehin vorhandene Schuttbedeckung über die Zeit anwächst. Im Gebiet der Glocknergruppe sind das vor allem die Pasterze und das Ödenwinkelkees. Erst für 2020 wurden abseits davon größere Schuttbedeckungen detektiert. In den Ötztaler Alpen sind die größten relativen Veränderungen der Schuttbedeckung auf den kleineren Gletschern zu finden. In den Zillertaler Alpen sind es vor allem die südöstlich gelegenen Gletscher, die eine Zunahme der Schuttbedeckung aufweisen. Die entsprechenden Anteile der verschiedenen Gletscheroberflächenklassen für die definierten Zeiträume bezogen auf die Gletscherflächen von 2015 sind in Abbil-







Schuttbedeckt Teils schuttbedeckt Gletschereis Schnee auf Gletscher Gletschergrenzen

Abb. 31. Veränderung der Gletscheroberflächen von 2003 bis 2020 im Gebiet der Glocknergruppe.







Schuttbedeckt Teils schuttbedeckt Gletschereis Schnee auf Gletscher Gletschergrenzen

Abb. 32. Veränderung der Gletscheroberflächen von 2003 bis 2020 im Gebiet der Venedigergruppe.





Schuttbedeckt Teils schuttbedeckt Gletschereis Schnee auf Gletscher Gletschergrenzen

> Abb. 33. Veränderung der Gletscheroberflächen von 1999 bis 2020 im Gebiet der Ötztaler Alpen.

dung 34 dargestellt und Tabelle 8 zu entnehmen. Bei der Interpretation dieser Werte müssen außerdem die Bedingungen zum Zeitpunkt der Satellitendatenaufnahme berücksichtigt werden. Die allgemeinen Bedingungen in Bezug auf Schneeakkumulation und Schmelze können sich von Jahr zu Jahr stark unterscheiden. Die vorliegenden Daten repräsentieren nur jeweils einen Zeitpunkt aus der gewählten Periode. Für die Periode 1996 bis 2005 wurde beispielsweise für die vergletscherten Gebiete von der Venedigergruppe ostwärts eine Szene von Ende August 2003 analysiert. Der Sommer 2003 ging als Jahrhundertsommer in die Geschichtsbücher ein und die auf den Gletschern verbleibenden Schneeflächen Ende August waren deutlich reduziert im Vergleich zu allen vorangegangenen Jahren, in denen Satellitendaten zur Verfügung standen. Die Auswertungen für die westlichen Gletscherregionen basieren hingegen auf einer Aufnahme von 1999, die ebenfalls am Ende der Schmelzperiode aufgenommen wurde. Jedoch waren die Abschmelzraten in diesem Sommer geringer als im Sommer 2003. Generell zeigt sich, dass für die gesamte Betrachtung nicht nur die Schuttflächen an den Gletscherzungen ausreichend sind. Wandnahe Schuttbereiche können aber durch die saisonale Schneedecke überlagert sein und so je nach Aufnahme nicht erkannt werden.





Anteile der klassifizierten Oberflächen auf Gletschern in den verschiedenen österreichischen Gebirgsregionen analysiert von den ausgewählten Satellitendaten pro Analyseperiode (Tab. 4). Die Gebirgsregionen sind von West (oben) nach Ost (unten) gereiht. Der zeitliche Verlauf pro Region ist jeweils für die Perioden 2016–2021 (oben) nach 1985–1995 (unten) gezeigt.

Gebirgsgruppe	Gletscheroberflächenklasse	1985–1995	1996–2005	2006–2015	2016–2021**
Goldberggruppe, Dachstein,	Schuttbedeckt	1 %	17 %	2 %*	22 %
Ostösterreichische Gletscher	Teils schuttbedeckt	6 %	24 %	6 %*	22 %
	Eis	24 %	54 %	38 %*	47 %
	Schnee	69 %	6 %	54 %*	9 %
Glocknergruppe	Schuttbedeckt	2 %	13 %	6 %	20 %
	Teils schuttbedeckt	2 %	13 %	6 %	14 %
	Eis	19 %	51 %	27 %	35 %
	Schnee	77 %	22 %	61 %	30 %
Venedigergruppe	Schuttbedeckt	0 %	5 %	1 %	14 %
	Teils schuttbedeckt	1 %	7 %	3 %	12 %
	Eis	15 %	60 %	30 %	41 %
	Schnee	85 %	27 %	65 %	33 %
Zillertaler Alpen	Schuttbedeckt	0 %	2 %	8 %	10 %
	Teils schuttbedeckt	2 %	4 %	14 %	19 %
	Eis	98 %	44 %	54 %	47 %
	Schnee	0 %	49 %	24 %	24 %
Stubaier Alpen	Schuttbedeckt	0 %	2 %	10 %	13 %
	Teils schuttbedeckt	1 %	3 %	13 %	19 %
	Eis	97 %	39 %	56 %	53 %
	Schnee	2 %	56 %	22 %	14 %
Ötztaler Alpen	Schuttbedeckt	0 %	1 %	8 %	10 %
	Teils schuttbedeckt	2 %	3 %	11 %	14 %
	Eis	90 %	44 %	53 %	50 %
	Schnee	7 %	53 %	29 %	26 %
Silvretta,	Schuttbedeckt	2 %	2 %	21 %	27 %
Westösterreichische Gletscher	Teils schuttbedeckt	4 %	3 %	16 %	18 %
	Eis	74 %	34 %	55 %	46 %
	Schnee	19 %	61 %	8 %	10 %

Tab. 8.

Kennzahlen der Schuttausdehnung in den österreichischen Gebirgsgruppen.

\*Gebirgsgruppe zum Zeitpunkt der Satelliten-Szenenaufnahme nicht vollständig abgedeckt.

\*\*Analysen beziehen sich auf Gletscherflächen aus dem Jahr 2015. Stark steigende Zahlen in den schuttbedeckten Bereichen sind daher teils auf den allgemeinen Gletscherrückzug zurückzuführen.

# 7 Hydro-morphologisches Monitoring

#### 7.1 Entwicklung des Abflusses

Am 25. Juni 2019 wurde die Abflussmessung (RQ30) an der Getschnerbrücke über dem Jambach installiert. Seitdem liefert sie kontinuierliche Daten für die Abflusssaison vom Beginn der Schneeschmelze im Frühjahr bis zur Stagnation auf dem Niveau des Basisabflusses im Herbst.

Während der vier Sommersaisonen von 2019 bis 2022 wurden 22 Salzverdünnungsmessungen durchgeführt und zur Kalibrierung der standortspezifischen Abflussberechnung aus Fließgeschwindigkeit und Wasserstand verwendet.

Dabei stellte sich die Verwendung einer statistischen Beziehung unter Verwendung von Wasserstand und Oberflächengeschwindigkeit als die geeignetste Variante heraus. Die Resultate sind Abbildung 35 zu entnehmen. Unter Verwendung der mittels Leitfähigkeitsmessungen berechneten Abflüsse ergibt sich folgende Gleichung:

 $Q = a + c1^{*}h + c2^{*}v + c3^{*}h^{*}v$ 

Mit h = Wasserstandhöhe, v = Fließgeschwindigkeit sowie den Konstanten

- a = 0,14372542603231
- c1 = 1,048555694598121
- c2 = 0,12499542969698
- c3 = 1,2158452868302

Der so kalibrierte Abfluss ergibt einen mittleren quadratischen Fehler von 0,21  $m^3s^{-1}$  und einen relativen mittle-



Der kalibrierte Abfluss (+) sowie Wasserstand (rot) und Fließgeschwindigkeit (gelb) zum Zeitpunkt der Leitfähigkeitsmessung.

ren absoluten Fehler von 4,2 % des Abflusses. Die Abdeckung der Bandbreite der gemessenen Abflüsse erscheint gut, wobei die Spitzen über 8 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> nicht beprobt werden konnten.

In Abbildung 36 sind die Abflüsse der vier Messzeiträume über die Projektdauer ersichtlich. Kurz nach Installation der Abflussmessung am 25. Juni 2019 kam es Anfang Juli mit knapp 16 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> zum maximalen Durchfluss, welcher an der Getschnerbrücke über die vergangenen vier Jahre gemessen wurde. Aus dem Winter heraus lag zu diesem Zeitpunkt eine noch beachtliche Schneedecke, die bei den hohen Temperaturen zu einem entsprechend hohen Beitrag der Schneeschmelze führte. Im August 2019 waren vier weitere Abflusspitzen im Bereich von 10 bis 13 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> zu verzeichnen, gefolgt von vier Abflusspitzen Ende August und Anfang September mit etwa 8 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

Der Spitzenwert der Schneeschmelze 2020 lag bei 10 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Im August kam es zu drei Abflussspitzen, welche bis zu 80 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> erreichten, bevor am 28. August mit dem Niederschlag einer Kaltfront ein Abfluss von 14 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> erreicht wurde. Zu Beginn Oktober kam es erneut zu einem hohen Abfluss mit einer Spitze von 11 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

Im Jahr 2021 lag der Spitzenwert des Abflusses zur Schneeschmelze bei 12 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Im August kam es zu drei hohen Abflüssen, welche ebenfalls diesen Wert erreichten, bevor der Abfluss in der letzten Augustwoche auf ein generell niedriges Level für diese Zeit fiel.

Das vor allem in Bezug auf die starke Gletscherschmelze herausstechende Jahr 2022 hebt sich insofern von den anderen Jahren ab, dass der Höhepunkt der Schneeschmelze deutlich eher erreicht wurde, und mit knapp über 8 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> verhältnismäßig gering ausfiel. Aufgrund der anhaltenden Trockenheit kam es im weiteren Verlauf zunächst zu einer deutlichen Reduktion des Abflusses, bevor die Gletscherschmelze einsetzte. Diese ist an den deutlichen Tagesgängen zu erkennen und bleibt bis Anfang September auf einem eher konstanten, wenn nicht hohen Niveau.

Abb. 36. Gemessener Wasserstand (blau), Oberflächengeschwindigkeit (rot) sowie der daraus berechnete Abfluss (schwarz) des Jambachs an der Messstelle Getschnerbrücke für die vier Messzeiträume 2019–2022. Gekennzeichnet als Kreuz sind die Daten der Abflusskalibrierung mittels Salzverdünnungsmessungen. Die vier Jahre zeigen neben den Abflussspitzen aufgrund konvektiver Niederschlagsereignisse vor allem auch den starken Einfluss der Schneebedeckung im Einzugsgebiet. Ist diese entsprechend ausgeprägt und zu Ende Juni noch großflächig vorhanden, so kann es in Kombination mit der für diese Jahreszeit üblichen Strahlungs- und Temperaturwerten zu ähnlich hohen Abflüssen kommen, wie sie sonst durch Starkniederschläge in Kombination mit Eisschmelze verursacht werden. Bei sehr geringer Ausprägung der Schneedecke kommt es gar zu zwischenzeitlichem Absinken der Abflusswerte in den Sommermonaten.

Anhand der Abflussdaten lässt sich nicht nur der Wasserstand und der Durchfluss analysieren, sondern auch der Zusammenhang zwischen Abfluss und Wasserstand im Allgemeinen und während Hochwasserereignissen im Speziellen (Abb. 37). Im Bereich der Messung ist bei niedrigeren



Abhandlungen der GeoSphere Austria, Band 77



Beziehung zwischen Wasserstand und Fließgeschwindigkeit an der Oberfläche am Messstandort Getschnerbrücke. Grau hinterlegt sind alle Messungen, farblich anhand der Punktdichte dargestellt die Messungen des Jahres 2020. Die Grafik zeigt ein Ereignis mit starkem Abfluss Anfang Juli 2020, mit der Trajektorie des anlaufenden (schwarz) und des ablaufenden (rot) Durchflusses. Die Kreuze zeigen Kalibrierdaten mittels Leitfähigkeitsmessung (LV).

Abflusswerten die Beziehung nahezu linear. Ab einem Bereich von etwa 0,75 m Wasserstand verändert sich diese Beziehung auch aufgrund des Gerinnequerschnittes unter der Brücke zu einem stärkeren Anstieg des Wasserstandes bei nur mehr geringerer Zunahme der Fließgeschwindigkeit. Diese Beziehungen wären mit einer Aufzeichnung nur des Wasserstandes schwer abschätzbar und zeigen im Falle von Hochwasserereignissen auch Hysteresen mit anlaufendem und ablaufendem Wasserstand.

Es zeigt sich, dass die Zweikomponentenmessung (Wasserstand und Oberflächengeschwindigkeit) besonders für den gewählten Standort eines zwar definierten, aber unregelmäßigen Gerinnes an einem Gebirgsbach von Vorteil ist. Die an der Getschnerbrücke gewonnenen Abflussdaten bilden die Grundlage für eine Vielzahl von Analysen der hydrologischen und hydraulischen Zustände am Oberlauf des Jambachs. Sie werden in weiterer Folge die Basis für eine hydrologische Modellierung des Einzugsgebietes im Jamtal legen. Auch stellte die Abflussmessung einen wichtigen Schlüssel für den Austausch mit den Verantwortlichen vor Ort dar.

### 7.2 Kartierung der Gerinnestruktur von Drohnenaufnahmen

Die fluvial aktiven Bereiche der proglazialen Schotterebene wurden in den Jahren 2020 und 2021 mehrmals mittels Drohnen-gestützter Photogrammetrie vermessen, wobei eine effektive Bodenauflösung von unter 3 cm/Pixel erzielt wurde. In Abbildung 38 sind für das Jahr 2020 insgesamt sechs (a–f) und für 2021 drei (g–i) Kartierungen aus UAV-Befliegungen dargestellt. Für beide Jahre wurde der abflussstärkste Zeitraum, nämlich Juli bis September, für das Monitoring gewählt. Die resultierenden topografischen 3D-Modelle und Orthofotos zum jeweiligen Aufnahmedatum wurden herangezogen, um das zum Vermessungszeitpunkt benetzte, das heißt abflusswirksame Gerinnesystem zu kartieren. Allen Kartierungen gemein ist die generelle Fließrichtung des proglazialen Abflusses (Abb. 38e), ausgehend von den zwei Gletschertoren im Südwesten des

Untersuchungsgebiets fließen die noch weitgehend gebündelten Bäche Richtung Nordosten, verzweigen sich zunehmend und strömen weiter nach Osten zur Konfluenz im Unterstrom der Schwemmebene, wo der Abfluss wieder gebündelt in eine nachfolgende Steilstufe kanalisiert wird. In den RGB-Orthofotos sind neben der Wasseroberfläche auch weitere hydro-morphologische Charakteristika im Gletschervorfeld erkennbar. So fallen die ausgedehnten Restschneefelder im Frühsommer (Abb. 38a, b, g) auf, die besonders am oberen Rand der Schwemmebene direkten Einfluss auf den Gerinneverlauf haben, in dem sie den Oberflächenabfluss teilweise blockieren und zum Umfließen des Schneefeldes zwingen. Erst durch das komplette Schneefreiwerden kehren die Gletscherbäche in die topografisch vorgezeichneten Gerinne zurück. In Abbildung 38d werden zudem die Konturen des schuttbedeckten Gletschers durch den sommerlichen Neuschnee sichtbar, da sich der Schnee auf der kühleren Gletscheroberfläche länger hält als in den eisfreien Bereichen des Untersuchungsgebietes.

Das UAV-Monitoring des Gerinnesystems über zwei Jahre zeigt, dass der oberstromige Rand der proglazialen Schotterebene, trotz des massiven Zurückschreitens der Gletscherstirn und Gletschertore um etwa 30 m, die stabilste Gerinnegeometrie aufweist. Die konzentrierten Gletscherbäche im oberen Drittel des Untersuchungsgebietes weisen gleichzeitig das größte Gefälle und ein besonders blockiges Sohlmaterial auf. Viel dynamischer zeigt sich hingegen der zentrale Bereich der Schwemmebene, wo das Gefälle bereits deutlich abnimmt und eine feinere Korngrößenverteilung vorzufinden ist. Hier treffen die beiden Gletscherbäche zusammen und formen ein verflochtenes Gerinnesystem, dessen Haupt- und Nebenströme sich im Zuge von Starkabflussereignissen neu organisieren. Die wesentlichste Veränderung in der Gerinnestruktur ist am Übergang vom zentralen Bereich zum in Fließrichtung unteren Drittel der Schwemmebene zu verzeichnen. Ein Abflussereignis zwischen 19. August 2020 (e) und 2. September 2020 (f) hat augenscheinlich dazu geführt, dass das dominierende Gerinne am orografisch rechten Rand der Ebene durch ein deutlich verzweigteres Netz aus mehreren Gerinneästen ersetzt wurde. In Folgejahr haben die erhöhten (Schmelzwasser-) Abflüsse dann zu einer weiteren Reorganisation geführt, bei der der Abfluss zum einen wieder gebündelt und zum anderen auf die orografisch linke Seite verlegt wurde, wo das neue Hauptgerinne zunehmend zu einer lateralen Erosion in ältere Terrassen (gebildet ab den 1980er Jahren) führte. Diese Abfolge von Gerinnekonzentration, Aufbrechen in ein weit verzweigtes Gerinnenetz in Folge von Starkabflüssen und anschließend eine wiederholte Gerinnekonzentration mit neuer Lage der Hauptgerinne im zentralen und unteren Drittel der Schwemmebene lässt sich ebenso in den Überflutungsanalysen aus Zeitraffer-Aufnahmen der Jahre 2018 bis 2020 erkennen. Die jüngsten Beobachtungen im Gelände scheinen dieses Muster auch für das Jahr 2022 zu bestätigen.

#### 7.3 Überflutungsanalysen aus Zeitraffer-Aufnahmen

Das in Abbildung 39 dargestellte System einer stationären Zeitraffer-Kamera diente der halbautomatisierten Bildanalyse von Ausdehnung und Häufigkeit starker Abflussereignisse in der proglazialen Schotterebene des Jamtalfern-



#### Abb. 38.

Evolution des Gletschervorfelds zwischen (a) Juli 2020 und (i) September 2021. Neben der Topografie (als Schummerungskarte dargestellt) sind die benetzten Gerinne und schneebedeckte Flächen zum jeweiligen Aufnahmezeitpunkt kartiert. In (e) sind zudem die Gletschertore im Oberstrom der Schwemmebene, die allgemeine Fließrichtung und die Konfluenz am unteren Rand des Untersuchungsgebietes markiert.

ers. HILLER et al. (2022) zeigt detailliert das Potential dieser Monitoring-Methode zur mehrjährigen Untersuchung der räumlichen und zeitlichen Überschwemmungsmuster in einer hochalpinen Umgebung mit ausgesprochener Datenknappheit. Die Verwendung von terrestrischen Zeitraffer-Bildgebungsplattformen ist ein geeignetes Mittel, die sonst bestehende Monitoring-Lücke zwischen einerseits ausgedehnten, relativ langanhaltenden Hochwasserereignissen, die per Fernerkundung erfasst werden (z.B. REVIL-LA-ROMERO et al., 2015) und andererseits relativ kleinen, begrenzten (urbanen) Gebieten mit hoher Sensordichte und Datenverfügbarkeit, zu schließen (z.B. Lo et al., 2015; MOY DE VITRY & LEITÃO, 2020). Im Zentrum unserer Untersuchung standen die folgenden Forschungsfragen:

- Inwieweit kann die halbautomatische Bildanalyse die Überschwemmung einer aktiven, proglazialen Schwemmebene erfassen?
- Welche Prozesse führen zu den größten beobachteten Überschwemmungsflächen?
- Wie stark verändert sich das Gerinne-Netzwerk im Jahresverlauf und während einzelner Hochwasserereignisse?



Abb. 39.

Die aktive Schwemmebene (durchgezogene dunkelblaue Linie) umfasst ca. 2,8 ha auf 2.410 m Seehöhe. Die nach Südwesten ausgerichtete Zeitraffer-Kamera (Blickfeld schwarz gestrichelt) überblickt die obere Hälfte der untersuchten proglazialen Ebene mit ihren beiden Hauptzuflüssen, die aus der teilweise schuttbedeckten Gletscherzunge austreten. Der in den Zeitraffer-Bildern analysierte Abschnitt ist (durch die gestrichelte rote Linie) hervorgehoben. Bereiche, in denen die Sicht durch topografische Hindernisse behindert wird, sind in Dunkelgrau dargestellt.

Sämtliche verfüg- und brauchbaren RGB-Bilder aus den Jahren 2018 bis 2020 wurden verwendet, um die überschwemmten Flächen zu kartieren und die räumliche und zeitliche Dynamik des Oberflächenabflusses zu quantifizieren. Die halbautomatische Klassifikation des überschwemmten Bereiches wurde mit der Open-Source-Software ImageJ (SCHINDELIN et al., 2012) realisiert. Zu diesem Zweck haben wir in Reihe geschaltete Skripte für ImageJ entwickelt, die in der Lage sind, pixelbasierte Informationen zu extrahieren, um in den Kameraaufnahmen überschwemmte Bereiche von trockenen zu unterscheiden. Die binäre Pixelklassifizierung fand auf Grundlage von Graustufenwerten aus stündlichen Schrägaufnahmen statt. Diese klassifizierten Einzelaufnahmen stehen dann weiteren Analysen - ereignisbezogen oder z.B. für Gesamtjahresbetrachtungen - zur Verfügung, in dem die Einzelfotos zu entsprechenden Bildsätzen kumuliert werden. Die kumulierten Bildserien für die Jahre 2018 bis 2020 wurden über markante Passpunkte im Gelände geo-rektifiziert und als jährliche Überflutungsfrequenzkarten weiterverarbeitet (Abb. 40). Die kumulierte Anzahl der Beobachtungen der benetzten Oberfläche pro Pixel und Jahr kann als Überflutungshäufigkeit interpretiert werden. Zwischen den Jahren variiert die Analysemaske geringfügig, da die seitlichen Schneefelder wo nötig herausgeschnitten wurden.

Für den Zeitraum 2018 (Abb. 40a) ist ein gut definiertes Gerinnenetz mit zwei von der Gletscherzunge ausgehenden Hauptströme zu erkennen. Das nördliche Gerinne teilt sich in zwei Teilgerinne mit annähernd gleicher Benetzungsfrequenz. Die höchste Anzahl an Beobachtungen für die Klasse "überflutet" tritt am Zusammenfluss der Hauptbäche an der östlichen Grenze der Analysemaske auf. Mehrere, seltener überflutete Nebenflüsse sind ebenfalls zu erkennen und zeigen die maximale Ausdehnung des Gerinne-Netzwerks für das jeweilige Jahr. Im Beobachtungszeitraum 2019 (Abb. 40b) wurden ähnliche Gerinnestrukturen wie im Jahr 2018 beobachtet, allerdings blieben weniger häufig überflutete Nebenarme im Herbst 2019 unerkannt. Der dritte Beobachtungszeitraum im Jahr 2020 (Abb. 40c) zeigt, dass sich das Muster der Überflutungsfrequenz gegenüber den beiden Vorjahren verschoben hat. Während die Hauptgerinne über alle drei Jahre hinweg weitgehend stabil geblieben sind, weist das nördlichste Teilgerinne eine deutlich geringere Überschwemmungsfrequenz auf. Im zentralen Bereich der Schwemmebene hat sich hingegen eine höhere Überschwemmungsfrequenz gegenüber 2018 und 2019 eingestellt. In diesem Zusammenhang können die Veränderungen der Überschwemmungsfrequenz zwischen 2018 und 2020 als ein erhöhter Grad der Gerinne-Konzentration beschrieben werden, das heißt, die benetzte Fläche nimmt einen kleineren aktiven Teil der Schwemmebene ein, weist hier aber gleichzeitig eine größere Beobachtungshäufigkeit auf. Die maximale Überflutungsfläche durch ein einziges Abflussereignis nahm etwa 35 % des analysierten Gletschervorfelds ein. Etwa 10 % der beobachteten Fläche wiesen in 60-70 % der analysierten Bilder eine Überflutung auf. Im Gegensatz dazu waren 60-70 % der beobachteten Fläche in weniger als 10 % des analysierten Zeitraums überschwemmt.



#### Abb. 40.

Überschwemmungsfrequenzkarten mit Anzahl der Beobachtungen (rot = häufig überspült; dunkelblau = selten überspült) für die drei Beobachtungszeiträume (a) 2018, (b) 2019 und (c) 2020 in der proglazialen Schwemmebene des Jamtalferners. Die Karten zeigen die Summe der analysierten Bilder, bei denen ein Bereich (Pixel) als überflutet klassifiziert wurde. Die ungefähre Fließrichtung ist mit dem schwarzen Pfeil angegeben. Hinweis: Die Maximalwerte unterscheiden sich zwischen den Jahreskarten aufgrund abweichender Beobachtungszeiträume und variierender Bildverfügbarkeit.

Abbildung 41 zeigt nochmals die Resultate der automatisierten Bildanalyse für den Starkniederschlag am 29. September 2020. Gut zu erkennen sind die weiß abgegrenzten, detektierten Wasserflächen im Gletschervorfeld. Auch sind die Änderungen zwischen den zwei Aufnahmen gut ersichtlich. Deutlich zeigt sich hier, dass der Tageshöchst-





Maximum der klassifizierten Überflutungsfläche zum Starkniederschlagsevent im Jamtal am 29.08.2020. Neben dem Verlauf der meteorologischen Parameter Temperatur, Niederschlag und Globalstrahlung sind die Überflutungsfläche sowie der Abfluss gemessen an der Getschnerbrücke dargestellt. Im oberen Teil der Grafik sind die jeweiligen Kameraaufnahmen sowie die ausgewertete Maske der Überflutungsfläche dargestellt.

Maximalpegel über Sohle (t <sub>Installation</sub> ) [cm]							
GWP#	1	2	3	4	5	6	7
06.07.2022	38	-	42,5	-	36	20	-
27.07.2022	40,5	-	26	14	36	-	-
11.08.2022	-	-	29	16	41	-	-
18.08.2022	-	-	-	-	-	-	-
21.09.2022	-	-	28	-	-	-	-
03.11.2022	29	-	30	15	-	-	-

Tab. 9.

Übersicht der erfassten Wasserspiegellagen relativ zur Sohllage zum Zeitpunkt der Installation. Aufgeführt sind das Datum der Ablesung mit dem dazugehörigen Maximalpegel je GWP. Hervorgehoben sind die Maximalwerte für jeden Pegelstandort für den gesamten Beobachtungszeitraum. Anmerkung: Da das analoge Farbband nicht bei jeder Ablesung getauscht wurde, sind Datenlücken vorhanden, solange der vorherige Pegelwert nicht übertroffen wurde.

wert des Abflusses aus der Eisschmelze (25.08–28.08.) einen deutlich geringeren Teil des proglazialen Schwemmbereiches von maximal 10 % überrinnen.

Neben der räumlichen Kartierung der jährlichen Überflutungsfrequenzen werden die Tagesmaxima der detektierten Überflutungsfläche mit meteorologischen Daten und Abflussmessungen verglichen. Die Abflussereignisse und ihre Intensität ließen sich anhand ihrer Frequenz und räumlichen Ausdehnung quantifizieren und konnten entweder auf eine ausgeprägte Ablation, Starkniederschläge oder eine Kombination aus beidem im vergletscherten Einzugsgebiet zurückgeführt werden. Darüber hinaus wurde über die drei analysierten Jahre eine erhebliche Umstrukturierung des proglazialen Gerinnesystems detektiert, was auf eine anhaltende Sedimentumlagerung durch fluviale Prozesse hindeutet. Die hier vorgestellten Ergebnisse und die Erfahrungen mit der verwendeten Methode haben uns ermutigt, eine weitere Zeitraffer-Kamera, mit einem orthogonal zur ersten Kamera kreuzendem Sichtfeld, in Betrieb zu nehmen. Das Monitoring mit Zeitraffer-Kameras leistet einen entscheidenden Beitrag zum Verständnis der Abflussund Sedimentdynamiken im Vorfeld des sich schnell zurückziehenden Jamtalferners.

#### 7.4 Maximale Wasserspiegellagen im Gletschervorfeld

Das Monitoring von Maximalständen der Wasserspiegellage mittels analoger Grenzwertpegel (GWP) ermöglicht eine Abschätzung von Fließtiefen während extremer Abflussereignisse im Gletschervorfeld. In der 18-wöchigen Messreihe (Tab. 9) sind besonders von Juli bis Mitte August stark erhöhte Wasserspiegellagen festgehalten worden, die auf (meist konvektive) Niederschläge mit starkem Schmelzwasseraufkommen zurückgeführt werden können. Die höchsten Pegelstände wurden erwartungsgemäß am oberen und unteren Rand der Schwemmebene gemessen, da die Gerinne-Topografie hier durch grobblockige, teils steile Ufer begrenzt ist und erhöhte Abflüsse somit durch ein lateral begrenztes Gerinne gezwängt werden. Im stärker verzweigten Gerinnenetz mit weniger definierten Bachverläufen kann ein steigender Abfluss flächig wirksam werden und führt nur zu einer geringfügig erhöhten Wasserspiegellage (Abb. 42). Trotz der unmittelbaren Nähe zu kleineren Nebengerinnen konnten GWP2 und GWP7 gar keine Pegelanschläge verzeichnen. Hingegen wurde der Pegel GWP6 bereits im Juli durch ein offenbar starkes Abflussereignis unterspült und deplatziert.



#### Abb. 42.

Übersichtkarte der Grenzwertpegel (GWP) im Gletschervorfeld des Jamtalferners. GWP1 liegt etwa 20 m im Unterstrom der Konfluenz und dient somit als Hauptpegel für die gesamte proglaziale Schotterebene. Die Pegel GWP3 und GWP5 sind direkt an den Gerinne-Rändern der hier noch separaten Gletscherbäche installiert und erfassen somit den Wasserspiegel am oberen Rand der Schotterebene. Gezeigt werden hier zudem die erfassten Maximalwerte an jedem Pegelstandort zwischen 16. Juni und 3. November 2022. Neben den Wasserspiegellagen konnten auch Sohllagenänderungen dokumentiert werden. Der GWP5 wurde unmittelbar am Rand des orografisch rechten Gletscherbaches mit Bohrhaken an einem größeren Felsen montiert. Der Nullpunkt des Pegels lag dabei 16 cm über der Sohle. Der Bachlauf verlagerte sich jedoch im Zuge der Schneeschmelze um etwa 5 m nach orografisch rechts und somit weg vom Pegel. Dieser wurde zwar bei Starkabflussereignissen weiterhin angesprochen – und zunehmend eingeschottert. Am Ende der Messperiode 2022 befand sich der Pegelnullpunkt 20 cm unter der Sohloberfläche. Die Höhe der Akkumulation von überwiegend feinem Sediment im Bereich des Pegels betrug 36 cm innerhalb von 4,5 Monaten.

Die quantitativen Erkenntnisse über Wasserspiegellagen und Sedimentationsprozesse im Gletschervorfeld, gewonnen aus dem Einsatz der analogen Grenzwertpegel, fließen in die hydro-morphologischen Analysen im Gletschervorfeld ein. Sie dienen grundlegend dem besseren Verständnis der glazio-fluvialen Prozesse, sind aber ebenso wertvoll für die konkrete Kalibrierung und Validierung bei der Detektion von topografischen Oberflächenveränderungen und für die Entwicklung eines numerischen Hydraulikmodells.

#### 7.5 Von geometrischer Oberflächenrauheit zu Korngrößenverteilungskarten

Zu den wesentlichen Randbedingungen in einem numerischen Hydraulikmodell zählen die interdependenten Parameter der geometrischen Oberflächenrauheit und der Korngrößenverteilung. Eine feinkörnige, gut sortierte Sanderfläche wird so zum Beispiel eine geringere geometrische Oberflächenrauheit aufweisen als eine kaum sortierte, mit größeren Blöcken übersäte Grundmoräne. In der untersuchten proglazialen Schwemmebene des Jamtalferners finden wir beide Extreme in direkter räumlicher Nähe zueinander. Hier dominieren Prozesse und Formen der paraglazialen Anpassung im Bereich des sich rasch zurückziehenden, teilweise schuttbedeckten Gletschers und des, aus zwei Gletschertoren entspringenden, verzweigten Gerinne-Netzwerks. Die im Gletschervorfeld abgelagerten und schließlich re-mobilisierten fluvioglazialen Sedimente bilden eine ca. 0,03 km² große Schwemmebene mit einer durchschnittlichen Neigung von 4,8 %. Die vorliegenden Sedimentkorngrößen stammen aus allen Fraktionen von Schluff (> 0,002 mm) bis zu Blöcken (> 630 mm). Der größte Anteil des Sedimentkörpers besteht aufgrund der kurzen fluvioglazialen Transportstrecke aus schlecht sortierten, meist kantigen Klasten. Mit freiem Auge ist jedoch eine zu erwartende, schwache Sortierung entlang der Fließrichtung, mit den feineren Korngrößen im Bereich der Konfluenz, erkennbar.

Diese Untersuchungen mit dem Ziel, flächige Korngrößenverteilungen auf Grundlage der geometrischen Oberflächenrauheit zu bestimmen, basieren auf drei gut verteilten Testflächen mit jeweils zehn innenliegenden Beprobungsrastern (Abb. 43), die das breite Spektrum der Sedimentkorngrößen repräsentieren. Die drei 10 x 10 m großen Testflächen mit einer Fläche von jeweils 100 m<sup>2</sup> sind als T1–T3 bezeichnet. Die Testfläche T1 befand sich im unteren Drittel der Schwemmebene und spiegelt die sedimentären Bedingungen in der Nähe der Konfluenz wider. Die Testflä-



Abb. 43.

Die Abbildung zeigt das verzweigte Gerinnesystem (hellblau) und fluvioglaziale Sedimente (beige) in der aktiven Schwemmebene (durchgezogener schwarzer Umriss, ca. 2,8 ha auf 2.410 m Seehöhe) des Gletschervorfelds. Die drei Analyse-Skalen sind ebenfalls dargestellt: die aktive Schwemmebene, drei Testflächen mit einer Fläche von je 100 m<sup>2</sup> (rote Quadrate, T1– T3) und 30 Beprobungsraster mit je 1 m<sup>2</sup> Fläche (schwarze Kästchen, S1–10), die sich auf die drei Testflächen aufteilen.

Skala	Bezeichnung	n	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Methode	Datentyp	Auflösung
Beprobungsraster	S1–S10	30	1	Manuelle Korngrößenbestimmung	Durchmesser (b-Achse)	$ar{X}$ = 75,1 Körner/m <sup>2</sup>
				SfM-MVS mit Handkamera	3-D Topo-Model	< 0,3 mm/pix
Testfläche	T1–T3	3	100	SfM-MVS mit Drohne und dGPS	3-D Topo-Model	< 1,5 mm/pix
Schwemmebene	SE	1	28.300	SfM-MVS mit Drohne und dGPS	3-D Topo-Model	10,1 mm/pix

Tab. 10.

Analyse-Skalen und Schlüsselparameter zur flächenhaften Bestimmung der Korngrößenverteilung in der proglazialen Schwemmebene. Für jede Skala sind die verwendeten Methoden und die daraus resultierenden Auflösungen aufgeführt.

che T2 umfasste ein Gebiet, das an den orografisch linken Gletscherbach angrenzt, und T3 ein Gebiet neben dem orografisch rechten Bach. Daher repräsentieren T2 und T3 beide das obere Drittel der Schwemmebene. Innerhalb jeder 100 m<sup>2</sup> großen Testfläche wurden zehn weitere 1 x 1 m große Beprobungsraster (S1–S10) festgelegt, um die Varianz der Korngrößenverteilung an der Oberfläche zu erfassen.

In den 30 Beprobungsrastern (S#) wurden die Korngrößenverteilungen der Oberflächenschicht manuell erhoben, wobei die Korngrößen bei einer b-Achse < 1,0 cm nicht berücksichtigt wurden. Dieselben Flächen wurden zuvor mit einer digitalen Handkamera (24,2 MP) aus einer Höhe von 1,5-2 m über dem Boden systematisch abfotografiert. Die Verarbeitung der Bildserien mittels SfM-MVS-Photogrammetrie lieferte eine topografische 3D-Punktwolke für jedes einzelne Beprobungsraster mit einer Bodenauflösung von ~ 0,1 cm. Der statistische Zusammenhang zwischen der, aus den 3D-Punktwolken berechneten, geometrischen Oberflächenrauheit und den manuell erhobenen Korngrößenverteilungen, wurde anschließend getestet. Daraus wurde ein lineares Regressionsmodell entwickelt, um charakteristische Korngrößen (Perzentile) zwischen D16 und D95 auf der Grundlage der geometrischen Oberflächenrauheit vorherzusagen. Das Modell wurde mit einer Leave-One-Out-Cross-Validation (LOOCV) (WOODGET et al., 2018) unter Verwendung der 1 m<sup>2</sup>-Beprobungsraster als Trainings- und Testdaten kalibriert und validiert.

Die drei Testflächen (T#) und die gesamte aktive Schwemmebene (SE) wurde ebenfalls photogrammetrisch vermessen. Auf Grund der größeren Flächen wurde hierbei allerdings eine unbemannte Drohne mit einem hochauflösenden RGB-Sensor (20 MP) verwendet, um detaillierte 3D-Punktwolken der Geländeoberfläche zu generieren (Tab. 10). Die Flughöhe variierte dabei je nach Skala für die Testflächen betrug diese etwa 5,3 m über Grund und für die Befliegung des gesamten Schwemmebene im Schnitt etwa 37,2 m. Die Erhebungen wurden bei geringem bis mittlerem Abfluss in der Sommersaison 2020 und 2021 durchgeführt. Die topografischen 3D-Punktwolken wurden anschließend für die geometrische Analyse der Oberflächenrauheit auf der Grundlage der Diskretisierungsmethode der "best-passenden Ebene" verwendet, welche die zonalen Muster der Oberflächensedimenttextur und -verteilung auf nicht permanent benetzten Schotterflächen zeigt.

Das jeweils robusteste Regressionsmodell wurde verwendet, um hochskalierte, flächenhafte Korngrößenverteilungen für das zu bestimmende Perzentil abzuleiten. In einem Zwischenschritt wurde erst auf die 100 m<sup>2</sup> Testflächen hochskaliert und das Modell später, nach Prüfung dieser ersten Ergebnisse, auf die gesamte proglaziale Schwemmebene ausgeweitet. Die resultierenden Korngrößenverteilungskarten können folglich die gesamte aktive Schwemmebene mit einer Rasterzellengröße von 1 m abdecken (Abb. 44).



#### Abb. 44.

Beispiel einer Korngrößenverteilungskarte [D50] für die gesamte proglaziale Schwemmebene. Für Bereiche mit benetzter Oberfläche (aktive Gletscherbäche während der Drohnenbefliegung) und vereinzelten Schneefeldern konnte keine Korngrößenverteilung bestimmt werden, da hier die Oberflächensedimente zum Aufnahmezeitpunkt verdeckt waren. Es musste davon ausgegangen werden, dass die Kalibrierung des entwickelten Modells empfindlich auf den topografischen Maßstab reagiert, in dem die Eingabeparameter herangezogen wurden. Daher wurde der gewählte Ansatz auf die Sensitivität gegenüber der verwendeten Kernelgröße, der Pixelauflösung oder der Punktwolkendichte getestet und angepasst.

# 8 Synthese und Ausblick

#### 8.1 Transdisziplinärer Austausch und interdisziplinäre Arbeiten

Für das Projekt Hidden.ice stand der Interessensaustausch mit den Akteurinnen und Akteuren vor Ort im Vordergrund. Eine erste Möglichkeit zum Erfahrungsaustausch bot die Installation der Abflussmessung an der Getschnerbrücke am Jambach am 25. Juni 2019. Vertreter der Gemeinde Galtür und der Jamtalhütte sowie des Energieerzeugers Illwerke vkw waren vor Ort. Über die Zeit entwickelte sich ein regelmäßiger Informationsfluss über Besonderheiten und Gegebenheiten im Projektgebiet wie Abflussverhalten, Geschiebetransport und Stand der Messungen am Gletscher wie im Gletschervorfeld. Eine Einordnung der zeitlichen und räumlichen Skalen des Interessenaustausches ist in den Abbildungen 1 und 2 ersichtlich. Es zeichnet sich ein Fokus auf den Ist-Zustand, aktuelle Geschehnisse sowie einzelne Spitzenwerte ab, welche sich vor allem auf den Abfluss sowie das Geschiebeaufkommen im unteren Teil des Einzugsgebietes bezogen. Neben dem Abgleich von Abflusswerten kam es zum Austausch von Informationen über Auffälligkeiten im Geschiebetransport, sei es bedingt durch einzelne Starkniederschlagsereignisse oder einen durch die generelle Witterung hervorgerufenen Zustand wie 2022 mit Geschiebefrachten deutlich über dem mehrjährigen Durchschnitt. Neben dem inhaltlichen Austausch kam es zu praktischen Hilfestellungen der Akteurinnen und Akteure, wie etwa der Installation von Messgeräten während des COVID-19-Lockdowns. Die historischen Analysen ließen sich über das ohnehin verwendete Material hinaus schwer verifizieren. Mit Ablauf der Projektlaufzeit stellte sich vermehrt auch die Frage, was denn in Zukunft für die Entwicklung des Jamtalferners, des Abflusses sowie des Geschiebe- wie Schwebstofftransportes zu erwarten ist. Gerade für letztere Aussagen ist eine gesamtheitliche Betrachtung der Veränderungen im Bereich der Gletscher und des Permafrostes sowie des aktuellen Gerinnes auf Ebene des Einzugsgebietes sowie die Erfassung zur Quantifizierung derzeitiger Geschiebefrachten nötig.

Im Projekt Hidden.ice kam es zur interdisziplinären Zusammenarbeit der Fachbereiche Glaziologie, Hydrologie und Wasserbau, Fernerkundung, Landschafts- und Umweltgeschichte sowie Umweltprozesse und Naturgefahren. Durch die Verschneidung der in den jeweiligen Fachdisziplinen gewonnenen Daten und verwendeten Methoden sowie der gemeinsam erarbeiteten Erkenntnisse konnte eine räumlich wie zeitlich abdeckende Untersuchung der maßgeblichen, den Schutt- und Geschiebehaushalt beeinflussenden Prozesse erfolgen. Daraus ergibt sich eine Breite an räumlichen sowie zeitlichen Skalen, auf denen die Änderungen der supra- und proglazialen sowie in weiterer Folge fluvialen Schuttflächen beobachtet wurden. Der interdisziplinäre Austausch im Projekt gewährleistete, dass Erkenntnisse aus historischen Karten in Verbindung mit aktuellen Satellitenaufnahmen gebracht werden konnten sowie großflächige Analysen auf Grundlage selbiger Aufnahmen mit lokalem, räumlich hochaufgelösten Prozessmonitoring im Gletschervorfeld.

Abbildung 45 zeigt zunächst den Zusammenhang der Informationskette ausgehend von den zeitlich hochaufgelösten In-situ-Messungen im Gletschervorfeld über die Projektlaufzeit als Grundlage für die Erfassung von Veränderungen in der Landbedeckung in der Talschaft bis hin zur Kalibrierung eines neuen Ansatzes zur Schuttdetektion auf Gletschern. Im Rahmen des Projektes konnten so langfristige Änderungen der Gerinnestrukturen oder der Sedimentdynamik im Einzugsgebiet mit einem zeitlich hochaufgelösten Monitoring gemeinsam betrachtet werden. Die Zunahme der Schuttbedeckung ist ein weiterer Schlüssel zum Verständnis der zukünftigen Geschiebedynamiken.

Die Schnittmenge zwischen den Themenbereichen bilden die im Abstand von mehreren Jahren aufgenommenen Orthofotos sowie Geländemodelle, durch welche sich Änderungen der Oberflächeneigenschaften ableiten lassen, die für alle Fachbereiche relevant sind.

In gleicher Weise sind in Abbildung 46 die Überschneidungen aus Daten, Methoden und Themenbereichen in Bezug auf die räumliche Auflösung sowie die Abdeckung der jeweiligen Informationen dargestellt. Dabei zeigt sich die hohe Anforderung an die räumliche Auflösung zum Monitoring der dominierenden Prozesse im Untersuchungsgebiet. Diese liefern dann die notwendigen Rahmenbedingungen für Modellierungen sowie für das Verständnis von im erweiterten Einzugsgebiet beobachtbaren Veränderungen. Wieder stellen die Orthofotos und digitalen Geländemodelle die Bindeglieder zwischen den jeweiligen Themenbereichen dar. Diese regelmäßigen Aufnahmen im Abstand weniger Jahre sind also eine wichtige Basis für die Interdisziplinäre Betrachtung der Dynamik in solchen Hochgebirgssystemen.

### 8.2 Glazialer und proglazialer Sedimenttransport

Im Rahmen des Projektes Hidden.ice wurde die Veränderung der Sedimentdynamik im Übergang von Eisbedeckung zu proglazialen Flächen in einem alpinen Einzugsgebiet untersucht. Neue Methoden der Erfassung der Schuttbedeckung auf Gletscherflächen und deren Änderung wurden auf die vergletscherten Gebirgsgruppen in Österreich angewandt und damit eine Regionalisierung vorgenommen. Aus den Ergebnissen des Projektes kann der proglaziale Raum des Jamtalferners in drei Prozessbereiche unterteilt werden, die maßgeblich an der Sedimentdynamik beteiligt sind:



#### Abb. 45.

Skalen der zeitlichen Auflösung sowie der zeitlichen Verfügbarkeit der wichtigsten, im Projekt verwendeten Daten und Methoden (schwarze Rahmen) sowie deren überschneidende Nutzung in den verschiedenen Themenfeldern (farbig hinterlegt). Der Kernbereich des transdisziplinären Interessensaustausches mit den Akteurinnen und Akteuren im Projekt ist strichliert dargestellt.



#### Abb. 46.

Skalen der räumlichen Auflösung sowie der räumlichen Abdeckung der wichtigsten, im Projekt verwendeten Daten und Methoden (schwarze Rahmen) sowie deren überschneidende Nutzung in den verschiedenen Themenfeldern (farbig hinterlegt). Der Kernbereich des transdisziplinären Interessensaustausches mit den Akteurinnen und Akteuren im Projekt ist strichliert dargestellt. (i) **Gletscherzunge:** Auf den Flächen der noch bestehenden Gletscher kommt es durch einen vermehrten Transport von Felsmaterial auf die Gletscherflächen sowie den Transport von Gesteinsmaterial im Eis selbst und dessen Anhäufung an der Oberfläche beim Ausschmelzen zu einer Zunahme der Schuttbedeckung auf der Eisoberfläche. Dabei zeigen sich bestimmte Gebirgsgruppen aufgrund der Rahmenbedingungen (Geologie, Topografie, Zustand der Gletscher) als Hotspots der Zunahme der Schuttbedeckung.

(ii) **Glaziofluvial geprägter Bereich:** Beim Abschmelzen des Eises im Zungenbereich der Gletscher kommt es in Abhängigkeit von der vorherrschenden Topografie durch den Schmelzwasserabfluss zur Bildung von Umlagerungszonen (Schwemmflächen). Hierbei überlagern die glazifluvial transportierten und deponierten Sedimente zum Teil großflächig die Grundmoräne und die ehemals supraglazialen Moränen des Jamtalferners. Diese Schwemmfläche im Vorfeld des Jamtalferners stellte sich im Rahmen der neu entwickelten Monitoring-Verfahren als zeitlich und räumlich hoch dynamisch heraus.

Der mit den dynamischen Veränderungen der Gletschervorfelder in engem Zusammenhang stehende Geschiebe- und Schwebstofftransport zeigte über die Projektlaufzeit die Bandbreite der zu erwartenden Zustände auf und konnte nicht zuletzt über den Kontakt mit den Akteurinnen und Akteuren vor Ort dokumentiert werden. Hier kam es neben kurzfristigen, sehr intensiven Geschiebemengen im Rahmen eines einzelnen Events auch zu einem generell erhöhten Transport an Geschiebefrachten über die besondere Schmelzperiode im Sommer 2022. Die Geschiebeund Schwebstoffherde sind einerseits im Gletschervorfeld zu suchen, andererseits konnte aber auch ein hoher Sedimentinput von einigen angrenzenden Hängen über Extremereignisse beobachtet werden.

(iii) Proglaziale Hänge: Die proglazialen Hänge im Gletschervorfeld des Jamtalferners zeigen insgesamt eine hohe Dynamik. Gleichwohl zeigen die Analysen der Daten eine hohe Variabilität. So nimmt die Dynamik mit zunehmender Gletscherentfernung in der Tendenz stetig ab, bis sich die Hänge in Verbindung mit zunehmender Vegetationsbedeckung stabilisieren. Unterbrochen wird dieser grundsätzlich zu beobachtende Trend durch Störungen des Systems in Folge von Extremereignissen mit hoher Magnitude und geringer Frequenz (z.B. Muren). Solche Extremereignisse sind dann nicht nur in der Lage die Hänge selbst zu destabilisieren (oder instabil zu halten), sondern führen auch in den angrenzenden Gerinnesystemen zu hohem Sedimentinput und damit in der Folge zu einer hohen Geschiebeverfügbarkeit, die zum Teil dann auch Flächen in Gerinnenähe reaktivieren kann, die eigentlich als stabil anzusehen waren.

In der Zusammenschau aller beobachteten und ausgewerteten Teilprozesse lässt sich folgende Synthese ableiten: Der Verlust an eisbedeckter Fläche legt zunächst überwiegend Ödland frei, welches je nach Topografie und geomorphologischer Prozessdynamik mit Schuttmaterial überdeckt bzw. aufgefüllt wird. In weiterer Folge kommt es dort zu einer Stabilisierung und Ausbildung von Vegetation, wo das Gebiet nicht in Verbindung mit maßgeblichem Abflussgeschehen (Hautgerinne) und Hangdynamik (eventuell in Verbindung mit austauendem Toteis) steht oder eine geringe Neigung aufweist. Im Bereich des bestehenden Gerinnes werden fluviale Sedimente freigelegt und je nach Topografie bilden sich Ablagerungsräume aus, welche besonders in der Nähe der aktuellen Gletscherstirn weiterhin aufgefüllt werden können. Hier bleiben die Sedimentspeicher fluvial aktiv und können entsprechend Geschiebe in das stromabwärts gelegene System einspeisen. Daneben zeigt sich kleinräumig der Einfluss von Geländestrukturen wie Gletschermoränen, die sich aufgrund ihrer Steilheit und Zusammensetzung durch Erosion verändern und zum Teil als Barriere wie auch Geschiebequelle bei Starkniederschlagsereignissen dienen können. Die Schuttbedeckung der Gletscher selbst verzögert zwar das Ausschmelzen des Eises im Bereich der Gletscherzungen, ist im Falle des Jamtalferners aber nur sehr gering mit dem Abtransport in bestehenden Gerinnestrukturen verbunden. Dennoch kommt es lokal und regional zu einer Zunahme der Schuttbedeckung auf Gletschern und damit zu einer Beeinflussung des Abschmelzverhaltens. Inwiefern dieser Schutt dann mit dem Gerinne verbunden ist, hängt sehr stark von der subglazialen Topografie ab und ist somit lokal schwer abschätzbar, da über die gemessenen topografischen Veränderungen die Sedimentlieferung vom Gletscher (über Gletscherbach oder über austauenden Schutt) nicht bestimmt werden kann.

Für alle bereits eisfreien Gebiete zeigen die angewandten Monitoringkonzepte das hohe Potential hinsichtlich der Detektion von maßgeblichen Veränderungen und der dafür verantwortlichen Prozesse. Ein umfängliches Langzeitmonitoring, aufbauend auf einem meteorologischen wie hydrologischen Messnetz sowie flächigen, zeitlich wie räumlich hochaufgelösten Geländeaufnahmen, wie es in LTER-Gebieten möglich ist, bietet die nötige Grundlage, um stetig formende Prozesse von spontanen Ereignissen und deren Auswirkungen getrennt analysieren zu können und damit deren Beitrag für den gesamten Sedimenthaushalt eines solchen Gebietes bestimmen zu können.

### 8.3 Ausblick

Die Ergebnisse des Projektes zeigen, dass sich die Verfügbarkeit von lockerem Gesteinsmaterial mit dem weiteren Verfall der Gletscher erhöht. Besonders in Zeiten mit ungewöhnlich hohen Schmelzraten in Kombination mit starken Niederschlägen aufgrund sich ändernder klimatischer Bedingungen wirkt sich die Verfügbarkeit von leicht mobilisierbarem Geschiebe auch auf den Transport im Gerinne aus.

Im Rahmen von Hidden.ice wurde das Monitoring von Veränderungen der Schwemmflächen in der obersten Kaskade, sprich direkt im Bereich der Gletscherzunge, entwickelt und durchgeführt. Neben Höhenänderungen und damit einem Netto-Budget des Geschiebevolumens dieser Flächen konnten Verlagerungen des Gerinnes sowie die Persistenz der Oberflächenstrukturen analysiert werden. Eine weitere Verfolgung des Geschiebetransportes über die sich stromabwärts anschließenden Kaskaden bis hin zu Siedlungs- und Infrastruktur im Rahmen einer Übertragung der entwickelten Methoden würde die Lücke zur 2D-Langzeit-Information aus historischen Quellen schließen. Die Anwendbarkeit und Übertragung der entwickelten Methodik auf weitere Teilglieder der Sedimentkaskade, sowie die Erstellung eines Sedimentbudgets und Modellierung der Kaskadeneffekte im Einzugsgebiet, stellen eine sinnvolle Erweiterung der bisherigen Arbeiten dar. Dies sollte vorzugsweise dort erfolgen, wo neben allen benötigten Messdaten (Meteorologie, Hydrologie) auch die im Gerinne beförderte Menge an Sedimenten gemessen oder plausibel abgeschätzt werden können, da dieser Teil des Sedimentbudgets über topografische Aufnahmeverfahren (LiDAR, Photogrammetrie) nicht erfassbar ist.

#### Dank

Das Projektteam möchte sich an dieser Stelle nochmals für die gute Zusammenarbeit mit den Akteurinnen und Akteuren vor Ort bedanken, welche mit Auskunft zur Seite standen und die Logistik wie die Messungen unterstützten. Hier sind vor allem OTMAR HAUSER (Illwerke vkw), GOTT-LIEB LORENZ (Hüttenwirt Jamtalhütte) sowie Amtsleiter HEL-MUT PÖLL (Gemeinde Galtür) zu nennen. Wir danken der Firma SOMMER MESSTECHNIK für die Unterstützung in der Montage und dem Betrieb der Abflussmessung. Weiters gilt unser Dank dem HYDROGRAPHISCHEN DIENST DES LAN-DES TIROL für die Bereitstellung von Messdaten im Einzugsgebiet. Wir danken auch AXEL BRONSTERT vom Institut für Umweltwissenschaften und Geographie der Universität Potsdam sowie IRENE HAHN und ANDI BAUER für die Bereitstellung der Trübemessung und Unterstützung bei den stets unterhaltsamen Installationstagen. Für den wissenschaftlichen Austausch zu den Kameraaufnahmen danken wir KLEMENS WEISLEITNER vom Institut für Ökologie der Universität Innsbruck. Weiters gilt unser Dank allen, die im Rahmen ihrer Praktika und Abschlussarbeiten das Projekt durch Mithilfe bei Feldmessungen und der Datenauswertung unterstützt haben. Hier sind allen voran die Abschlussarbeiten von LUKAS WALTER, ROBERT GLEIRSCHER und SEBASTIAN LEITNER zu nennen.

#### Literatur

AGISOFT LLC (2021): Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition. – Version 1.7, St. Petersburg. www.agisoft.com

ALTMANN, M., PIERMATTEI, L., HAAS, F., HECKMANN, T., FLEISCHER, F., ROM, J., BETZ-NUTZ, S., KNOFLACH, B., MÜLLER, S., RAMSKOGLER, K., PFEIFFER, M., HOFMEISTER, F., RESSL, C. & BECHT, M. (2020): Long-Term Changes of Morphodynamics on Little Ice Age Lateral Moraines and the Resulting Sediment Transfer into Mountain Streams in the Upper Kauner Valley, Austria. – Water, **12**/12, 3375.

APCC – AUSTRIAN PANEL ON CLIMATE CHANGE (2014): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014. – 1096 S., Wien (Österreichische Akademie der Wissenschaften).

ATZLER, U. (2021): Historische Veränderung der Landbedeckung im Tiroler Jamtal 1820–2019. – Masterarbeit, Universität für Bodenkultur, 61 S., Wien.

BAEWERT, H. & MORCHE, D. (2014): Coarse sediment dynamics in a proglacial fluvial system (Fagge River, Tyrol). – Geomorphology, **218**, 88–97, Amsterdam.

BALLANTYNE, C.K. (1995): Paraglacial debris-cone formation on recently deglaciated terrain, western Norway. – The Holocene, **5**/1, 25–33, Bern.

BALLANTYNE, C.K. & BENN, D.I. (1994): Paraglacial slope adjustment and resedimentation following recent glacier retreat, Faabergstolsdalen, Norway. – Arctic, Antarctic, and Alpine Research, **26**/3, 255–269.

BENNETT, G.L., MOLNAR, P., MCARDELL, B.W., SCHLUNEGGER, F. & BURLANDO, P. (2013): Patterns and controls of sediment production, transfer and yield in the Illgraben. – Geomorphology, **188**, 68–82, Amsterdam.

BETZ-NUTZ, S., HECKMANN, T., HAAS, F. & BECHT, M. (2022): Development of the morphodynamics on LIA lateral moraines in ten glacier forefields of the Eastern Alps since the 1950. – Earth Surface Dynamics Discussion, preprint. https://doi.org/10.5194/esurf-2022-24 BUNTE, K. & ABT, S.R. (2001): Sampling frame for improving pebble count accuracy in coarse gravel-bed streams. – Journal of the American Water Resources Association, **37**/4, 1001–1014, Boulder.

CHIARLE, M., IANNOTTI, S., MORTARA, G. & DELINE, P. (2007): Recent debris flow occurrences associated with glaciers in the Alps. – Global and Planetary Change, **56**, 123–136, Amsterdam.

CHURCH, M.A. & RYDER, J.M. (1972): Paraglacial sedimentation: a consideration of fluvial processes conditioned by glaciation. – Geological Society of America Bulletin, **83**/10, 3059–3071, Boulder.

COLLIER, E., MAUSSION, F., NICHOLSON, L.I., MÖLG, T., IMMERZEEL, W.W. & BUSH, A.B.G. (2015): Impact of debris cover on glacier ablation and atmosphere–glacier feedbacks in the Karakoram. – The Cryosphere, **9**/4, 1617–1632, Katlenburg-Lindau. https://doi. org/10.5194/tc-9-1617-2015

CURRY, A.M. (1999): Paraglacial modification of slope form. – Earth Surface Processes and Landforms, **24**/13, 1213–1228, Chicester.

CURRY, A.M., CLEASBY, V. & ZUKOWSKYJ, P. (2006): Paraglacial response of steep, sediment-mantled slopes to post-Little Ice Age glacier recession in the central Swiss Alps. – Journal of Quaternary Science, **21**/3, 211–225, Chichester.

DIETRE, B., WALSER, C., LAMBERS, K., REITMAIER, T., HAJDAS, I. & HAAS, J.N. (2014): Palaeoecological evidence for Mesolithic to Medieval climatic change and anthropogenic impact on the Alpine flora and vegetation of the Silvretta Massif (Switzerland/Austria). – Quaternary International, **353**, 3–16, Amsterdam.

EICHEL, J., DRAEBING, D. & MEYER, N. (2018): From active to stable: Paraglacial transition of Alpine lateral moraine slopes. – Land Degradation & Development, **29**, 4158–4172. https://doi.org/10.1002/ ldr.3140 ELTNER, A. & SOFIA, G. (2020): Chapter 1 – Structure from motion photogrammetric technique. – In: P. TAROLLI, P. & MUDD, S.M. (Eds.): Developments in Earth Surface Processes, 1–24, Amsterdam. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00001-1

ENGL, D.A., FELLIN, W. & ZANGERL, C. (2008): Scherfestigkeiten von Scherzonen-Gesteinen – Ein Beitrag zur geotechnischen Bewertung von tektonischen Störungen und Gleitzonen von Massenbewegungen. – Bulletin für Angewandte Geologie, **13**, 63–81, Basel.

FEHR, R. (1987): Geschiebeanalysen in Gebirgsflüssen. – Mitteilung Nr. **92**, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Zürich.

FISCHER, A., SEISER, B., STOCKER-WALDHUBER, M., MITTERER, C. & ABERMANN, J. (2015): Tracing glacier changes in Austria from the Little Ice Age to the present using a lidar-based high-resolution glacier inventory in Austria. – The Cryosphere, **9**, 753–766, Katlenburg-Lindau. https://doi.org/10.5194/tc-9-753-2015

FISCHER, A., HELFRICHT, K., WIESENEGGER, H., HARTL, L., SEISER, B. & STOCKER-WALDHUBER, M. (2016): What Future for Mountain Glaciers? Insights and Implications From Long-term Monitoring in the Austrian Alps. – In: GREENWOOD, G.B. & SHRODER, J.H. JR. (Eds.): Mountain Ice and Water: Investigations of the Hydrologic Cycle in Alpine Environments. – Developments in Earth Surface Processes, **21**, 315–382, Amsterdam.

FISCHER, A., PATZELT, G., ACHRAINER, M., GROSS, G., LIEB, G.K., KELLERER-PRIKLBAUER, A. & BENDLER, G. (2018): Gletscher im Wandel. 125 Jahre Gletschermessdienst des Alpenvereins. – 139 S., Berlin (Springer Spectrum).

FISCHER, A., SCHÖNER, W. & OTTO, J.C. (2019a): Gletschergefahren. – In: GLADE, T., MERGILI, M. & SATTLER, K. (Hrsg.): ExtremA. Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich, 563–578, Wien (Vienna University Press).

FISCHER, A., FICKERT, T., SCHWAIZER, G., PATZELT, G. & GROSS, G. (2019b): Vegetation dynamics in Alpine glacier forelands tackled from space. – Nature Research, Scientific Reports, **9**/1, 13918. http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-50273-2

FISCHER, A., SEISER, B., HELFRICHT, K. & STOCKER-WALDHUBER, M. (2021): High-resolution inventory to capture glacier disintegration in the Austrian Silvretta. – The Cryospher, preprint. https://doi.org/10.5194/tc-2020-376

FUHRMANN, S. (2007): Digitale historische Geobasisdaten im Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) – Die Urmappe des Franziszeischen Katasters. – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, **1**, 24–35, Wien.

GRUBER, S. & HAEBERLI, W. (2007): Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. – Journal of Geophysical Research: Earth Surface, **112**/F2, F02S18 (10 S.), Washington, D.C. https://doi.org/10.1029/2006JF000547

HAEBERLI, W. (2005): Investigating glacier – permafrost relationships in high-mountain areas: historical background, selected examples and research needs. – Geological Society of London, Special Publications, **242**, 29–37, London.

HAEBERLI, W., HOELZLE, M., PAUL, F. & ZEMP, M. (2007): Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps. – Annals of Glaciology, **46**, 150–160, Cambridge.

HARTMEYER, I., DELLESKE, R., KEUSCHNIG, M., KRAUTBLATTER, M., LANG, A., SCHROTT, L. & OTTO, J.-C. (2020): Current glacier recession causes significant rockfall increase: the immediate paraglacial response of deglaciating cirque walls. – Earth Surface Dynamics, **8**, 729–751. https://doi.org/10.5194/esurf-8-729-2020 HECKMANN, T., HILGER, L., VEHLING, L. & BECHT, M. (2016): Integrating field measurements, a geomorphological map and stochastic modelling to estimate the spatially distributed rockfall sediment budget of the Upper Kaunertal, Austrian Central Alps. – Geomorphology, **260**, 16–31, Amsterdam.

HELFRICHT, K., KUHN, M., KEUSCHNIG, M. & HEILIG, A. (2014): Lidar snow cover studies on glaciers in the Ötztal Alps (Austria): comparison with snow depths calculated from GPR measurements. – The Cryosphere, **8**, 41–57, Katlenburg-Lindau.

HELFRICHT, K., HUSS, M., FISCHER, A. & OTTO, J.C. (2019): Calibrated estimates of mean and maximum ice thickness for glaciers of the third Austrian Glacier Inventory (GI3). – PANGAEA, Data Publisher for Earth & Environmental Science. https://doi. org/10.1594/PANGAEA.898642

HILLER, C., WALTER, L., HELFRICHT, K., WEISLEITNER, K. & ACHLEITNER, S. (2022): Flood Flow in a Proglacial Outwash Plain: Quantifying Spatial Extent and Frequency of Inundation from Time-Lapse Imagery. – Water, **14**/4, 590. https://doi.org/10.3390/w14040590

HOHENSINNER, S., SONNLECHNER, C., SCHMID, M. & WINIWARTER, V. (2013): Two steps back, one step forward: reconstructing the dynamic Danube riverscape under human influence in Vienna. – Water History, **5**/2, 121–143. https://doi.org/10.1007/s12685-013-0076-0

HOHENSINNER, S., ATZLER, U., FISCHER, A., SCHWAIZER, G. & HEL-FRICHT, K. (2021a): Tracing the long-term evolution of land cover along glacier streams: the Austrian Jamtal valley (1820–2015). – Frontiers in Environmental Science, **9**, 683397. https://doi. org/10.3389/fenvs.2021.683397

HOHENSINNER, S., EGGER, G., MUHAR, S., VAUDOR, L. & PIÉGAY, H. (2021b): What remains today of pre-industrial Alpine rivers? Census of historical and current channel patterns in the Alps. – River Research and Applications, **37**/2, 128–149. https://doi.org/10.1002/rra.3751

HUGGEL, C., CLAGUE, J.J. & KORUP, O. (2012): Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? – Earth Surface Processes and Landforms, **37**/1, 77–91, Chichester.

JAMES, M.R. & ROBSON, S. (2014): Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. – Earth Surface Processes and Landforms, **39**, 1413–1420, Chichester. https://doi.org/10.1002/esp.3609

JAMES, M.R., CHANDLER, J.H., ELTNER, A., FRASER, C., MILLER, P.E., MILLS, J.P., NOBLE, T., ROBSON, S. & LANE, S.N. (2019): Guidelines on the use of structure-from-motion photogrammetry in geomorphic research. – Earth Surface Processes and Landforms, **44**, 2081–2084, Chichester. https://doi.org/10.1002/esp.4637

KEUSCHNIG, M., KRAUTBLATTER, M., HARTMEYER, I., FUSS, C. & SCHROTT, L. (2016): Automated Electrical Resistivity Tomography Testing For Early Warning in Unstable Permafrost Rock Walls Around Alpine Infrastructure. – Permafrost and Periglacial Processes, **28**, 158–171, Chichester. https://doi.org/10.1002/ ppp.1916

KRAUTBLATTER, M., FUNK, D. & GÜNZEL, F.K. (2013): Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice-mechanical model in time and space. – Earth Surface Processes and Landforms, **38**, 876–887, Chichester. https://doi.org/10.1002/esp.3374

LANE, S.N., BAKKER, M., GABBUD, C., MICHELETTI, N. & SAUGY, J.N. (2017): Sediment export, transient landscape response and catchment-scale connectivity following rapid climate warming and Alpine glacier recession. – Geomorphology, **277**, 210–227, Amsterdam. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.015

Lo, S.-W., Wu, J.-H., LIN, F.-P. & HSU, C.-H. (2015): Visual Sensing for Urban Flood Monitoring. – Sensors 2015, **15**/8, 20006–20029. https://doi.org/10.3390/s150820006 MAO, L., DELL'AGNESE, A., HUINCACHE, C., PENNA, D., ENGEL, M., NIEDRIST, G. & COMITI, F. (2014): Bedload hysteresis in a glacier-fed mountain river. – Earth Surface Processes and Landforms, **39**/7, 964–976, Chichester.

MESSENZEHL, K., VILES, H., OTTO, J.C., EWALD, A. & DIKAU, R. (2018): Linking rock weathering, rockwall instability and rockfall supply on talus slopes in glaciated hanging valleys (Swiss Alps). – Permafrost and Periglacial Processes, **29**/3, 135–151, Chichester.

MOY DE VITRY, M. & LEITÃO, J.P. (2020): The potential of proxy water level measurements for calibrating urban pluvial flood models. – Water Research, **175**, 115669, Amsterdam. https://doi. org/10.1016/j.watres.2020.115669

NICHOLSON, L. & BENN, D.I. (2013): Properties of supraglacial debris in relation to surface energy and mass balance modelling of debris covered glaciers. – Earth Surface Processes and Landforms, **38**, 490–501, Chichester.

ORWIN, J.F. & SMART, C.C. (2004): The evidence for paraglacial sedimentation and its temporal scale in the deglacierizing basin of Small River Glacier, Canada. – Geomorphology, **58**/1–4, 175–202, Amsterdam.

PATZELT, G. (2019): Gletscher – Klimazeugen von der Eiszeit bis zur Gegenwart. – 264 S., Berlin (Hatje-Cantz Verlag).

PAUL, F., WINSVOLD, S., KÄÄB, A., NAGLER, T. & SCHWAIZER, G. (2016): Glacier Remote Sensing Using Sentinel-2. Part II: Mapping Glacier Extents and Surface Facies, and Comparison to Landsat 8. – Remote Sensing, **8**/7, 575. https://doi.org/10.3390/ rs8070575

REITMAIER, T., LAMBERS, K., WALSER, C., ZINGMAN, I., HAAS, J.N., DIETRE, B., REIDL, D., HAJDAS, I., NICOLUSSI, K., KATHREIN, Y., NAEF, L. & KAISER, T. (2013): Alpine Archäologie in der Silvretta. – Archäologie der Schweiz, **36**/1, 4–14, Zürich.

REVILLA-ROMERO, B., HIRPA, F.A., DE POZO, J.T., SALAMON, P., BRAK-ENRIDGE, R., PAPPENBERGER, F. & DE GROEVE, T. (2015): On the Use of Global Flood Forecasts and Satellite-Derived Inundation Maps for Flood Monitoring in Data-Sparse Regions. – Remote Sensing, 7, 15702–15728. https://doi.org/10.3390/rs71115702

RICE, S. (1995): The spatial variation and routine sampling of spawning gravels in small coastal streams. – Ministry of Forests, Working Paper, 06/1995, Victoria, B.C.

ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHEEL, J.A. & DEERING, D.W. (1974): Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. – Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium, **1**, 48–62, Washington, D.C.

SCHERLER, D., WULF, H. & GORELICK, N. (2018): Global assessment of supraglacial debris-cover extents. – Geophysical Research Letters, **45**/21, 11, 798–11, 805. https://doi.org/10.1029/2018GL080158 SCHINDELIN, J., ARGANDA-CARRERAS, I., FRISE, E., KAYNIG, V., LON-GAIR, M., PIETZSCH, T., PREIBISCH, S., RUEDEN, C., SAALFELD, S., SCHMID, B., TINEVEZ, J.-Y., WHITE, D.J., HARTENSTEIN, V., ELICEIRI, K., TOMANCAK, P. & CARDONA, A. (2012): Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. – Nature Methods, **9**/7, 676– 682.

SCHWAIZER, G., NEMEC, J., ROTT, H. & NAGLER, T. (2017): Processing Line For Monitoring Glacier Outlines & Snow Area Extent By Means Of Sentinel-2 Data. – EARSeL LISSIG Workshop, Berne, Switzerland, 7–9 February 2017.

SLAYMAKER, O. (2009): Proglacial, periglacial or paraglacial? – Geological Society of London, Special Publications, **320**, 71–84, London.

SLAYMAKER, O. (2011): Criteria to distinguish between periglacial, proglacial and paraglacial environments. – Quaestiones Geographicae, **30**/1, 85–94, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.

SMITH, M.W., CARRIVICK, J.L. & QUINCEY, D.J. (2016): Structure from motion photogrammetry in physical geography. – Progress in Physical Geography-Earth and Environment, **40**/2, 247–275. https://doi.org/10.1177/0309133315615805

VEHLING, L., BAEWERT, H., GLIRA, P., MOSER, M., ROHN, J. & MORCHE, D. (2017): Quantification of sediment transport by rock-fall and rockslide processes on a proglacial rock slope (Kaunertal, Austria). – Geomorphology, **287**, 46–57, Amsterdam. https://doi. org/10.1016/j.geomorph.2016.10.032

WESTOBY, M.J., BRASINGTON, J., GLASSER, N.F., HAMBREY, M.J. & REYNOLDS, J.M. (2012): 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. – Geomorphology, **179**, 300–314, Amsterdam. https://doi.org/10.1016/j. geomorph.2012.08.021

WOODGET, A.S., FYFFE, C. & CARBONNEAU, P.E. (2018): From manned to unmanned aircraft: Adapting airborne particle size mapping methodologies to the characteristics of sUAS and SfM. – Earth Surface Processes and Landforms, **43**/4, 857–870, Chichester. https://doi.org/10.1002/esp.4285

ZEMP, M., FREY, H., GÄRTNER-ROER, I., NUSSBAUMER, S.U., HOEL-ZLE, M., PAUL, F., HAEBERLI, W., DENZINGER, F., AHLSTRØM, A.P., ANDERSON, B., BAJRACHARYA, S., BARONI, C., BRAUN, L.N., CÁCE-RES, B.E., CASASSA, G., COBOS, G., DÁVILA, L.R., GRANADOS, H.D., DEMUTH, M.N., ESPIZUA, L., FISCHER, A., FUJITA, K., GADEK, B., GHA-ZANFAR, A., HAGEN, J.O., HOLMLUND, P., KARIMI, N., LI, Z., PELTO, M., PITTE, P., POPOVNIN, V.V., PORTOCARRERO, C.A., PRINZ, R., SANGE-WAR, C.V., SEVERSKIY, I., SIGURDSSON, O., SORUCO, A., USUBALIEV, R. & VINCENT, C. (2015): Historically unprecedented global glacier decline in the early 21<sup>st</sup> century. – Journal of Glaciology, **61**/228, 745–762, Cambridge. https://doi.org/10.3189/2015J0G15J017

# PoCo-FLOOD

# Integrated Flood Risk Management in Mountain Areas: Assessing Sectoral Interdependencies, Conflicts and Options for Policy Coordination

Integriertes Hochwasserrisikomanagement in Berggebieten: sektorale Interdependenzen, Konflikte und Möglichkeiten der Politikkoordination



links oben: Stausee Kops (Mathew Herrnegger) links unten: Anteil wertvoller landwirtschaftlicher Flächen in Hochwasserrisikogebieten (Ausschnitt, Bundesanstalt für Agrarwirtschaft und Bergbauernfragen – BAB) rechts oben: Landbedeckung in der Region südlich des Salzachtals (Ausschnitt, Severin Hohensinner) rechts unten: Hochwasser Grein 2013 (Severin Hohensinner) Mitte: Projektlogo PoCo-FLOOD (PoCo-FLOOD Projektteam)

Bundesanstalt für Agrarwirtschaft und Bergbauernfragen

Universität für Bodenkultur Wien, Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement

Universität für Bodenkultur Wien, Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

Universität für Bodenkultur Wien, Department für Raum, Landschaft und Infrastruktur, Institut für Raumplanung, Umweltplanung und Bodenordnung

Universität für Bodenkultur Wien, Department für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Institut für Wald-, Umwelt- und Ressourcenpolitik

Bundesanstalt für Agrarwirtschaft und Bergbauernfragen



IHG <sup>a</sup> Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement



Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft



IRUB Institut für Raumplanung, Umweltplanung und Bodenordnung



INFEK Institut für Wald-, Umwelt- und Ressourcenpolitik

	ABHANDLUNGEN	DER GE	OSPHERE	AUSTRIA
ISSN 2960-4494	ISBN 978-3-903252-15-8	Band 77	Seite 133-191	Wien, Mai 2023

# Integriertes Hochwasserrisikomanagement in Berggebieten: sektorale Interdependenzen, Konflikte und Möglichkeiten der Politikkoordination (PoCo-FLOOD)

Heidelinde Grüneis<sup>1</sup>, Julia Niedermayr<sup>1</sup>, Karin Schroll<sup>1</sup>, Klaus Wagner<sup>1</sup>, Severin Hohensinner<sup>2</sup>, MATHEW HERRNEGGER<sup>3</sup>, GABRIEL STECHER<sup>3</sup>, KATHARINA LEBIEDZINSKI<sup>3</sup>, WALTER SEHER<sup>4</sup>, LENA JUNGER<sup>4</sup>, LUKAS LÖSCHNER<sup>4</sup> & RALF NORDBECK<sup>5</sup>

30 Abbildungen, 2 Tabellen

	Hochwasserrisikomanagement
	Retention
	Wasserkraft
	l andwirtschaft
	Laiventional
	naunpanung
	Inhalt
Zι	Jsammenfassung
Al	bstract
1	Finlaitung (M. Scurp)
'	Linieitung (w. Genen).
	1.1 Ausgaligslage
	1.2 Torsontingsinagen und Frojektzleie
	1.0 Mielinouk 139
	1.5 Authou des PoCo-FLOOD Endberichts 139
2	Analytischer Rahmen (R. NORDBECK)
	2.1 Sektorübergreifende Zielbeziehungen und die Herausforderung der Politikintegration
	2.2 Charakterisierung der sektoralen Herausforderungen der Politikintegration in der Hochwasserpolitik
3	Historische Landnutzung und Fließgewässerkorridore (S. HOHENSINNER)
Ũ	3.1 Methodik 143
	3.2 Fraebnisse 145
	3.2.1 Einzugsgebietsweite Veränderungen der albinen Landbedeckung
	3.2.2 Veränderung der Landbedeckung in albinen Fließgewässerkorridoren
	3.2.3 Höhenzonale Verteilung der albinen Landbedeckung
	3.3 Schlussfolgerungen
4	Hochwasserretention in alpinen Gebieten (M. HERRNEGGER, G. STECHER)
	4.1 Methodik
	4.2 Hochwasserruckhait von Speicherkraftwerken
	4.5 veranderungen des naturnichen wasserrucknaitepotentials
	4.4 Sektorale Koordinationsprozesse in der Wasserkraft
	4.5 Failstudie: wenrbetriebsordnungen als instrument der sektoralen Politikkoordination
	4.6 Schlussfölgerungen

Politikkoordination

HEIDELINDE GRÜNEIS, JULIA NIEDERMAYR (Mitarbeit bis 09/2020), KARIN SCHROLL, KLAUS WAGNER: Bundesanstalt für Agrarwirtschaft und Bergbauernfragen, Dietrichgasse 27, 1030 Wien, Österreich. heidelinde.grueneis@bab.gv.at, karin.schroll@bab.gv.at, klaus.wagner@bab.gv.at Severin Hohensinner: Universität für Bodenkultur Wien, Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement, Gregor-Men-1

<sup>2</sup> 

del-Straße 33, 1180 Wien, Österreich. severin.hohensinner @boku.ac.at Mathew Hersnegger, Gabriel Stecker, Katharina Lebiezinski (Mitarbeit bis 01/2021): Universität für Bodenkultur Wien, Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Muthgasse 18, 1190 Wien, österreich. mathew.herrnegger@boku.ac.at, gabriel.stecher@students.boku.ac.at 3

WALTER SEHER, LENA JUNGER, LUKAS LÖSCHNER (Mitarbeit bis 10/2019): Universität für Bodenkultur Wien, Department für Raum, Landschaft und Infrastruktur, Institut für 4 Raumplanung, Umweltplanung und Bodenordnung, Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien, Österreich. walter seher@boku.ac.at, lena.junger@boku.ac.at

<sup>5</sup> RALF NORDBECK: Universität für Bodenkultur Wien, Department für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Institut für Wald-, Umwelt- und Ressourcenpolitik, Feistmantelstra-Be 4, 1180 Wien, Österreich. ralf.nordbeck@boku.ac.at

5	Lanc	dwirtschaft und Hochwasserrückhalt (H. GRÜNEIS, K. SCHROLL, K. WAGNER)	161
	5.1	Methodik	161
	5.2	Landwirtschaftliche Nutzung in Hochwasserrisikogebieten	162
		5.2.1 Flächendimensionen	162
		5.2.2 Ökonomische Dimension	162
	5.3	Prozesse und Herausforderungen für landwirtschaftliche Akteurinnen und Akteure im Hochwasserrisikomanagement	163
		5.3.1 Politikfelder mit Einfluss auf das Hochwasserrisikomanagement.	163
		5.3.2 Prozesse und deren Akteurinnen und Akteure im Hochwasserrisikomanagement	165
		5.3.3 Entschädigungen für landwirtschaftliche Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer	166
		5.3.4 Barrieren in Prozessen des Hochwasserrisikomanagements aus Sicht landwirtschaftlicher Akteurinnen und Akteure	166
	54	Die Entschädigungsrichtlinie des Bundeslandes Salzburg als Koordinationsinstrument – das Fallbeisniel Gainfeldbach in d	ler
		Stadtgemeinde Bischofshofen	168
	55	Schlussfolgeringen	169
	0.0		100
6	Hoc	hwasserschutz und Raumplanung mit Schwerpunkt auf Restrisikohereichen (L. JUNGER, W. SEHER)	170
Ũ	6 1		171
	6.2	Hochwasserexposition von Siedlungsgebieten im historischen Vergleich	172
	6.3	Der Ilmgang mit Bestrisiken als Interaktion von Schutzwasserwirtschaft und Baumolanung	173
	0.0	6.3.1. Schutzwasserwirtschaft und Baumplanung als Akteurinnen und Akteure	173
		6.3.2 Problemwahrnehmung und Politikziele	174
		6.3.3 Instrumente und Ontionen	175
	64		177
	0.4	6.4.1 Bevision von Gefahrenzonennlägen und örtliche Baumplanung	177
		6.4.2. Verankerung von Bestricika in Baumplann de orlighte Haumplanning	177
	65	Schliesfolgeringen	178
	0.0		170
7	Stak	eholder-Workshop (Pro.ifkttfam)	179
·	7.1	Planung des Stakeholder-Workshops	179
	7.2	Programm des Stakeholder-Workshops	180
	7.3	Errehnisse des Stakeholder-Workshons	181
	1.0		101
8	Vera	leichende Synthese (Projektteam)	182
-	8.1	Problemdruck und Problemstruktur	182
	8.2	Prozess der Politikkoordination	183
	8.3	Performance der Politikkoordination	185
9	Diss	emination (Projektteam)	186
	9.1	Wissenschaftliche Publikationen	186
	9.2	Factsheet	187
	9.3	Präsentationen	187
10	Quel	llenverzeichnis	187
	10.1	Literatur	187
	10.2	Gesetze	191
	10.3	Interviews	191

#### Zusammenfassung

Die Hochwasserereignisse der letzten Jahrzehnte führten zu einem Paradigmenwechsel in der Hochwasserpolitik, vom Hochwasserschutz zum integralen Hochwasserrisikomanagement. Das Hochwasserrisikomanagement ist eine sektorenübergreifende Aufgabe, die durch eine Pluralisierung von Akteurinnen und Akteuren sowie deren Interessen gekennzeichnet ist und demgemäß einen steigenden Bedarf an Politikkoordination an der Schnittstelle von Land und Wasser nach sich zieht. Im Projekt PoCo-FLOOD untersuchten wir die Herausforderungen und Hemmnisse sektoraler Politikkoordination, die aus dem Wandel vom Hochwasserschutz zum Hochwasserrisikomanagement resultieren. Der Schwerpunkt lag dabei auf den jeweiligen Interaktionen der Politikbereiche Wasserkraft, Landwirtschaft und Raumplanung mit dem Hochwasserrisikomanagement. Anhand dieser drei Interaktionsfelder sowie auf Basis einer Analyse der Landnutzungsänderungen in drei österreichischen Einzugsgebieten untersuchten wir die wechselseitigen Abhängigkeiten und Konflikte sowie die entsprechenden Möglichkeiten der Politikkoordination zur Vermeidung bzw. zur Reduktion von Hochwasserrisikom. Die Forschung in PoCo-FLOOD zielte darauf ab, (i) die sektoralen Zusammenhänge im integralen Hochwasserrisikomanagement besser zu verstehen, (ii) das Wissen zu Möglichkeiten und Grenzen der Politikkoordination sowie zu den entsprechenden Interessenkonflikten zu erweitern und schließlich (iii) Optionen für eine koordinierte Hochwasserpolitik in den drei Interaktionsfeldern zu entwickeln.

Die Forschungsaktivitäten in PoCo-FLOOD stützten sich auf folgende methodische Ansätze: Literatur- und Dokumentenanalyse, GIS-basierte Analysetechniken zur Untersuchung von Landnutzungsänderungen und der Exposition von Siedlungsgebieten (aktuell sowie im historischen Vergleich) und Landwirtschaftsflächen, hydrologische Modellierung zur Analyse des Einflusses von Talsperren und Landnutzungsänderungen auf den Hochwasserabfluss, Interviews mit Expertinnen und Experten zur Ausprägung der Politikkoordination in den drei Interaktionsfeldern sowie ein Stakeholder-Workshop als transdisziplinärer Ansatz zur Reflexion der Möglichkeiten und Grenzen der Politikkoordination. In PoCo-FLOOD verstehen wir Politikkoordination als einen von Akteurinnen und Akteuren beeinflussten Prozess über drei Dimensionen: (i) Problemstruktur und Problemdruck, (ii) Prozess der Politikkoordination und (iii) Performance der Politikkoordination. Die sektoralen Zielbeziehungen und die daraus resultierenden Herausforderungen betrachten wir als Rahmen, um die Problemwahrnehmung, das Handeln der sektoralen Akteurinnen und Akteure und die verfügbaren Politikinstrumente und Optionen in den drei Interaktionsfeldern analysieren zu können.

Historische Landnutzung und Fließgewässerkorridore: Neben dem Klima und den wasserbaulichen Maßnahmen hängt das Hochwasserrisiko in alpinen Gebieten auch von der Art der Landbedeckung in den verschiedenen Flusseinzugsgebieten ab. Um diese Veränderung zu untersuchen, wurde die historische Landbedeckung der österreichischen Einzugsgebiete des Rheins, der Salzach und der Drau zwischen 1826 und 1859 basierend auf dem Franziszeischen Kataster (Urmappe) rekonstruiert und mit der aktuellen Situation verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass im Jahr 2016 die Siedlungsflächen sechsmal größer waren als vor 170 Jahren. Die landwirtschaftlich genutzten Flächen gingen um rund 27 % zurück, die Aufgabe von landwirtschaftlichen Flächen in ungünstigen Lagen spiegelt sich in einer Zunahme der Wälder von 37 auf 45 % im gesamten Untersuchungsgebiet wider. Die Gletscher verloren etwa 73 % ihrer früheren Ausdehnung. Die alpinen Flusskorridore, also die bei etwa 300-jährlichen Hochwasserereignissen gefährdeten Gebiete, waren von der Konzentration der menschlichen Landnutzung am stärksten betroffen. Hier vergrößerten sich die Siedlungsflächen um das 7,5-fache, wodurch sich das Potential für Hochwasserschäden stark erhöhte. Im Gegensatz dazu verringerten sich die Fließgewässerflächen um 40 %, und 95 % der ehemals großen Feuchtgebiete verschwanden. Rund 203 km<sup>2</sup> (14 %) der einstigen Flusskorridore gingen verloren, wodurch sich die Hochwasserrückhaltekapazität verringerte. Rückhalteflächen, die bei einem 100-jährlichen Hochwasser überflutet wurden, weisen deutlich größere Flächenverluste auf. Insbesondere intensive menschliche Landnutzungen wie Siedlungsgebiete und Ackerland konzentrieren sich heute in tieferen Lagen als im 19. Jahrhundert.

Hochwasserretention in alpinen Gebieten: Selbst, wenn die Hochwassergefahr in alpinen Gebieten durch die natürlichen Gegebenheiten wie Vegetation, Topografie und hydroklimatische Verhältnisse dominiert wird, wurden durch den Bau von künstlichen Speicherseen für die Wasserkraft neue Möglichkeiten zum Hochwasserrückhalt geschaffen. Daher wurde der Hochwasserrückhalt aller wesentlichen Speicherkraftwerke in Österreich untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass Speicherkraftwerke, obwohl primär zur Stromerzeugung errichtet und genehmigt, einen deutlichen Beitrag zur Reduktion der Hochwassergefahr flussab der Speicherseen leisten und zu einer Verringerung der jährlichen Abflussspitzen führen. Die Reduktion reicht von ca. 96 % bis 48 % an den betroffenen Pegeln in unmittelbarer Nähe der Stauseen bis zu 14,6 % bis 0,1 % an den weiter flussabwärts gelegenen Pegeln. Die Verringerung des Spitzenabflusses nimmt mit zunehmender Größe des Einzugsgebietes und der Entfernung vom Speichersee ab. Hochwasserabflüsse können auch durch eine nachhaltige Landnutzung und durch Maßnahmen zur Verbesserung des Wasserrückhalts in der Landschaft verringert werden. Um zu bestimmen, wie sich Landnutzungsänderungen auf das Wasserrückhaltepotential der Landschaft auswirken, wurde der Wasserretentionsindex (WRI) auf Basis der historischen und aktuellen Landnutzung berechnet. Der Vergleich zeigt, dass das Wasserrückhaltepotential vor allem in alpinen Tälern und tiefen Lagen stark zurückgegangen ist. Dies liegt überwiegend an der Entwicklung von Siedlungsflächen und der damit einhergehenden Trockenlegung von Feuchtgebieten. Eine Erhöhung des Wasserrückhaltepotentials durch die Zunahme von Waldflächen ist vorrangig in höheren Lagen festzustellen. Das wichtigste Instrument der Politikkoordination zwischen den Kraftwerksbetreibern und dem Hochwasserrisikomanagement ist das österreichische Wasserrechtsgesetz. Im Zuge der wasserrechtlichen Bewilligung wird für Wasserkraftwerke eine Wehrbetriebsordnung festgelegt, die das Kerninstrument der Politikintegration zwischen Wasserkraft und Schutzwasserwirtschaft darstellt. Als Folge der Abstimmungen und der Zusammenarbeit zwischen Kraftwerksbetreibern und den Behörden der Schutzwasserwirtschaft besteht in Österreich ein historisch gewachsenes enges Verhältnis zwischen diesen Akteurinnen und Akteuren. Dadurch ergeben sich in diesem Interaktionsfeld starke Synergien, wobei es aber auch zu nachteiligen Auswirkungen auf Dritte kommen kann.

Landwirtschaft und Hochwasserrückhalt: Eine Analyse landwirtschaftlicher Nutzungen in Hochwasserrisikogebieten ergibt, dass in Österreich rund 246.000 ha Agrarflächen (7,7 % der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche) innerhalb dieser Risikogebiete liegen. Die Überlagerung der Hochwasserrisikogebiete mit besonders für die regionale Ernährungssicherung bedeutsamen Flächen zeigt, dass davon etwa 12 % im Hochwasserrisikogebiet liegen, allerdings mit großen regionalen Unterschieden. Besonders in Berggebieten ist die Betroffenheit der Landwirtschaft durch Hochwasserreignisse überdurchschnittlich hoch, da sich hochwertige und auch ökonomisch wichtige Landwirtschaftsflächen hier vorwiegend in Tallagen befinden. Als Rahmenbedingungen sind für den Bereich Hochwasserrisikomanagement und Landwirtschaftsigesetz und die Maßnahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik relevant, welche Bewirtschaftungsmaßnahmen fördern, die zur Verringerung des Hochwasserrisikos beitragen können. Im Rahmen von Hochwasserschutzprojekten wird die Abgeltung nachteiliger Auswirkungen mit den betroffenen landwirtschaftlichen Grundeigentümerinnen und Grundeigentümern im Rahmen privatrechtlicher Vereinbarungen geregelt. Das gesellschaftliche Interesse am Erhalt wertvoller landwirtschaftlicher Flächen wird dadurch aber nicht erfasst. Die Konfliktpunkte zwischen den Sektoren Hochwasserschutz und Landwirtschaft resultieren aus unterschiedlichen Interessen, mangelnder Kommunikation und Koordination, aus Flächenverlusten für die Landwirtschaft infolge von Hochwasser-schutzmaßnahmen, fehlender Transparenz bei Entschädigungen sowie aus dem fehlenden Ausgleich zwischen Ober- und Unterliegern. Die wichtigsten Empfehlungen sind daher, das Bewusstsein um die Bedeutung der landwirtschaftlich genutzten Flächen für die einzelnen Betriebe und die Ernährungssicherung im Rahmen der Instrumente der Wasserwirtschaft und der Raumplanung zu stärken, die Kommunikation und Koordination in Planungsprozessen des Hochwasserisikomanagements zu verbessern, einen fairen Ausgleich zwis

Hochwasserschutz und Raumplanung mit Schwerpunkt auf Restrisikobereichen: Der Anteil der Siedlungsflächen in potentiell hochwassergefährdeten Gebieten hat in den letzten 150 Jahren signifikant zugenommen. Diese Entwicklung ist auch auf technische Hochwasserschutzmaßnahmen zurückzuführen, welche die bauliche Nutzung von ehemaligen Überschwemmungsgebieten ermöglicht, dadurch aber auch das Schadenspotential bei extremen Hochwasserereignissen erhöht haben. Diese

Zusammenhang wird als Dammeffekt beschrieben, der aus einer Interaktion von Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung resultiert. Nach der Errichtung von Hochwasserschutzanlagen passen die Behörden der Schutzwasserwirtschaft die Hochwassergefahrenzonen, auf denen die Entscheidungen der Raumplanung aufbauen, an die verringerte Hochwassergefährdung an. Die Raumordnungsgesetzgebung in Österreich legt im Hinblick auf Restrisiken aber nur vereinzelt Widmungsrestriktionen fest. Eine flächendeckende Anwendung dieser Widmungsrestriktionen wird als nicht durchsetzbar angesehen und mit dem begrenzten Angebot an siedlungsgeeigneten Flächen in alpinen Regionen begründet. Diese Ergebnisse machen deutlich, dass der räumliche Kontext für die bauliche Nutzung von Restrisikogebieten von Bedeutung ist. In Instrumenten der Schutzwasserwirtschaft und der Raumplanung werden zum Umgang mit Restrisiken Maßnahmen mit Empfehlungscharakter formuliert, die auf eine Berücksichtigung von Hochwasserrestrisiken in der Raumplanung und im Baurecht hinauslaufen. Hier ist die inhaltliche Koordination der Politikfelder Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung weit fortgeschritten. Als geeignete Maßnahmen zur Vermeidung von Hochwasserrestrisiken abseits von Widmungsrestriktionen gelten Bewusstseinsbildung, die bauliche Anpassung an Hochwasserereignisse und der Katastrophenschutz. Besonders die bauliche Anpassung an Hochwasserreignisse erfordert eine Intensivierung der Koordination zwischen Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung. Dies unterstreichen Interviewergebnisse, wonach der Umgang mit Restrisiken in der örtlichen Raumplanung ein Thema mit untergeordneter Bedeutung ist. Aufbauen kann eine intensivere Koordination zwischen Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung im Umgang mit Restrisiken auf die engen operativen Kontakte zwischen den Akteurinnen und Akteuren aus diesen beiden Politikbereichen.

#### Integrated Flood Risk Management in Mountain Areas: Assessing Sectoral Interdependencies, Conflicts and Options for Policy Coordination (PoCo-FLOOD)

#### Abstract

Major flood events in the last decades led to a paradigm shift in flood policy, from flood defence to integrated flood risk management. Flood risk management is a multi-sectoral effort, characterised by a pluralisation of actors and interests, consequently entailing an increasing need for policy coordination at the interface of land and water. In the research project PoCo-FLOOD, we analysed the challenges and obstacles of policy coordination resulting from the transformation from flood defence to flood risk management. We were focussing on the respective interactions of three policy fields – hydropower, agriculture and spatial planning – with flood risk management. Based on these fields of interaction and on an historical analysis of land use changes in three Austrian catchments, we investigated the mutual dependencies and conflicts as well as the corresponding possibilities for policy coordination in order to avoid or reduce flood risks. The aim of research in PoCo-FLOOD was (i) to better understand the sectoral interdependencies in integrated flood risk management, (ii) to increase the knowledge on possibilities and limits of policy coordination as well as on the corresponding conflicts of interest, and finally (iii) to develop options for a coordinated flood policy in the three fields of interaction.

Research activities in PoCo-FLOOD were based on the following methodological approaches: Literature and document analysis, GIS-based analysis techniques to study land use change and the exposure of settlement areas (current as well as in historical comparison) and agricultural land, hydrological modelling to analyse the influence of hydropower dams and land use change on flood runoff, interviews with experts on the characteristics of policy coordination in the three fields of interaction, and a stakeholder workshop as a transdisciplinary approach to reflect on the possibilities and limitations of policy coordination. In PoCo-FLOOD, we understand policy coordination as a process influenced by stakeholders across three dimensions: (i) problem structure and problem pressure, (ii) process of policy coordination, and (iii) performance of policy coordination. We consider the sectoral goal relationships and the resulting challenges as a framework to analyse problem perception, the actions of sectoral actors, and the available policy instruments and options in the three fields of interaction.

**Historical Land Use and Fluvial Corridors:** Beside climate and structural flood defence measures, flood risk in alpine areas also depends on the type of land cover in the respective river catchment. To analyse this change, the historical land cover in the Austrian catchments of the rivers Rhine, Salzach and Drava between 1826 and 1859 was reconstructed based on the maps of the "Franziscean Cadastre" and compared to the current land cover situation. The results show that in 2016 the settlement areas were six times larger than 170 years ago. Agricultural land decreased by about 27 %. The abandonment of agricultural land in unfavourable locations is reflected by an increase in forests from 37 to 45 % throughout the study area. Glaciers lost about 73 % of their former extent. The fluvial corridors in alpine areas, i.e., the hazard areas of an approximately 300-year flood event, were most affected by the concentration of human land use. Here, residential areas increased by the factor 7.5, significantly rising the potential for flood damage. In contrast, the area of running waters decreased by 40 %, and 95 % of formerly large wetlands disappeared. Approximately 203 km<sup>2</sup> (14 %) of former fluvial corridors were lost, reducing flood retention capacity. Flood retention areas that were inundated by a 100-year flood show a significantly higher reduction in area. In particular, intensive anthropogenic land uses such as residential areas and farmland are now concentrated at lower elevations than it was the case in the 19<sup>th</sup> century.

**Flood Retention in Alpine Areas:** Even though flood risk in alpine areas is strongly influenced by natural conditions such as vegetation, topography and the hydroclimatic situation, the construction of artificial reservoirs for hydropower has created new possibilities for flood storage. Therefore, the flood retention capacity of all major storage hydropower plants in Austria was analysed. The results show that storage hydropower plants, although primarily built and licensed for electricity generation, make a significant contribution to flood hazard reduction downstream of the reservoirs and lead to a decrease in annual peak discharges. The reduction ranges from over 96 % to 48 % at affected gauges directly downstream of reservoirs, and from 14.6 % to 0.1 % at gauges further downstream at receiving rivers. The reduction in peak discharge decreases with increasing watershed size and distance from the reservoir. Flood runoff can also be reduced by sustainable land use and by measures to improve natural water retention. To determine how land use changes affect the natural water retention potential, the Water Retention Index (WRI) was calculated based on historical and current land use data. The comparison shows that the water retention potential has decreased significantly, especially in alpine valleys and low elevation areas. This is predominantly due to the development of settlement areas and the associated drainage of wetlands. An increase in water retention potential due to the extension of forests can be observed primarily in higher elevated areas. The main instrument of policy coordination between hydropower plant operators and flood risk management stakeholders is the Austrian Water Act. In the course of licensing according to this act, weir operation regulations are established for hydropower plants, representing the core instrument of policy coordination between the fields of hydropower and flood risk management. As a result of the coordination and cooperation between hydropower plant operators and fl

Flood Storage on Agricultural Land: An analysis of agricultural land uses in flood hazard areas shows that in Austria about 246,000 ha of agricultural land (7.7 % of total agricultural land) are located within these hazard areas. Overlaying the flood hazard areas with areas of particular importance for regional food security shows that about 12 % of these areas are located within flood hazard zones, however with substantial regional differences. Particularly in mountain areas, agriculture is affected by flood events to an above-average extent, since high quality and thus economically important agricultural land is predominantly located in valley areas. As framework conditions for the policy fields of flood risk management and agriculture, the Agriculture Act and Common Agricultural Policy measures are particularly relevant, both promoting management measures that are able to contribute to the reduction of flood risks. In the context of structural flood defence projects, compensation for adverse effects is regulated within the framework of agreements under private law involving affected agricultural landowners and flood risk management stakeholders. However, these agreements do not cover the social interest in preserving valuable agricultural land. Conflicts between the flood risk management and the agricultural sector result from different interests, lack of communication and coordination, loss of agricultural land as a result of flood defence measures implemented, lack of transparency

in compensation, and lack of balance between upstream and downstream riparians. The most important recommendations are therefore to raise awareness of the importance of agricultural land for individual farms and food security within the framework of water management and spatial planning instruments, to improve communication and coordination in flood risk management planning processes, to enable fair compensation between upstream and downstream riparians, and to create attractive conditions for agricultural landowners that enable sustainable management of their land.

Flood Protection and Spatial Planning with a Focus on Residual Risks: In Austria, the share of settlement areas in potentially flood-prone areas increased significantly over the past 150 years. Largely this expansion is caused by structural flood defence measures, which enabled development in former floodplains, but thereby also increased potential damages in the case of extreme flood events. This relationship is described as "levee effect", resulting from an interaction of flood risk management and spatial planning. After completing structural flood defence, flood risk management authorities usually adjust flood hazard maps according to the reduced flood hazard. Decisions of spatial planning are based on flood hazard information provided by hazard maps. However, with regard to residual flood risks, spatial planning laws in Austria provide zoning restrictions for building land only in exceptional cases. A nationwide application of zoning restrictions is considered unenforceable which for alpine regions is argued with the limited amount of land suitable for housing. These results clearly illustrate the importance of the spatial context for zoning decisions in residual risk areas. Flood risk management and spatial planning instruments provide recommendatory measures for dealing with residual flood risks, aiming at a consideration of residual flood risks in spatial planning and building approval procedures. Regarding this, the coordination of the policy fields of flood risk management and spatial planning is well advanced. Apart from zoning restrictions, awareness raising, flood proofing of buildings and flood emergency measures are considered suitable for preventing and reducing residual flood risks. In particular, flood proofing of buildings requires intensified coordination between flood risk management and spatial planning stakeholders. This is underlined by expert interview results, according to which dealing with residual risks can build on close operational contacts between the stakeholders from these t

# 1 Einleitung

#### 1.1 Ausgangslage

Hochwasserereignisse zählen weltweit zu den häufigsten Naturgefahren und führen regelmäßig zu erheblichen Schäden (CRED/UNISDR, 2015). Aufgrund seiner topografischen und klimatischen Bedingungen ist der alpine Raum in besonderem Ausmaß gegenüber Flusshochwasser und Überschwemmungen von Wildbächen exponiert (BMLFUW, 2009). Der Einfluss des Klimawandels auf den Wasserkreislauf in Form von steigenden Temperaturen und des Anstiegs der Schneefallgrenze wird die Häufigkeit und Intensität von Hochwasserereignissen in den Alpen voraussichtlich weiter erhöhen (APCC, 2014). Der begrenzte Dauersiedlungsraum in alpinen Regionen hat zudem eine Konzentration von vulnerablen Landnutzungen (insbesondere Siedlungsgebiete und Infrastrukturanlagen) in den hochwassergefährdeten Bereichen, das sind die Talräume sowie die Schwemmkegel der Wildbäche, zur Folge. Die hohe Dichte an APSFR-Flächen (Flächen mit potentiell signifikantem Hochwasserrisiko, die in Umsetzung der EU-Hochwasserrichtlinie ausgewiesen werden) im österreichischen Alpenraum verdeutlicht das ausgeprägte Hochwasserrisiko (BMLRT, 2021).

Die Hochwasserereignisse der letzten Jahrzehnte, in Österreich insbesondere in den Jahren 2002, 2005 und 2013, haben zu einem Paradigmenwechsel in der Hochwasserpolitik vom Hochwasserschutz zum integrierten Hochwasserrisikomanagement geführt (SAMUELS et al., 2006; LÖSCHNER, 2018). Der traditionelle Ansatz des Hochwasserschutzes war geprägt von der Überzeugung, Flüsse durch technische Maßnahmen, wie Begradigungen, Eintiefungen oder Hochwasserschutzdämme, zu kontrollieren. Für den Hochwasserschutz in diesem Verständnis war der Wasserbau verantwortlich, der insbesondere die Aufgabe hatte, das Wasser von Siedlungsgebieten, Infrastrukturanlagen und wertvollen Landwirtschaftsflächen fernzuhalten. Der Ansatz des integrierten Hochwasserrisikomanagements, der wesentlich durch die Umsetzung der Hochwasserrichtlinie der Europäischen Union (EU-HWRL 2007) befördert wurde, ist durch ein Bündel von strukturellen und nicht-strukturellen Maßnahmen charakterisiert, das auf die Vermeidung neuer und die Reduktion bestehender Hochwasserrisiken bei bestmöglicher Beherrschung von Restrisiken abzielt (MERZ, 2006). Mit diesem Ansatz verlagert sich der Schwerpunkt des Umgangs mit Hochwasser auf den flächigen Hochwasserrückhalt sowie auf eine hochwasserangepasste Landnutzung. Das Hochwasserrisikomanagement wird damit zu einer sektorenübergreifenden Aufgabe, die durch eine Pluralisierung von Akteurinnen und Akteuren sowie deren Interessen gekennzeichnet ist (NORDBECK, 2014; THALER, 2015; LÖSCHNER, 2018) und demgemäß einen steigenden Bedarf an Politikkoordination an der Schnittstelle von Land und Wasser nach sich zieht.

### 1.2 Forschungsfragen und Projektziele

Im Projekt PoCo-FLOOD untersuchten wir die Herausforderungen und Hemmnisse sektoraler Politikkoordination, die aus dem paradigmatischen Wandel in der Hochwasserpolitik vom Hochwasserschutz zum integrierten Hochwasserrisikomanagement resultieren. PoCo-FLOOD legte dabei den Schwerpunkt auf die jeweiligen Interaktionen der Politikbereiche Wasserkraft, Landwirtschaft und Raumplanung mit dem Hochwasserrisikomanagement. Alle drei Sektoren sind für das Hochwasserrisikomanagement in alpinen Räumen von erheblicher Bedeutung.

**Wasserkraft:** Die Hochwassergefährdung im alpinen Raum wird sowohl durch die natürlichen als auch die anthropogenen Möglichkeiten des Hochwasserrückhalts im Oberlauf beeinflusst. Die natürlichen Möglichkeiten des Hochwasserrückhalts kommen im Wasserretentionsindex (WRI) zum Ausdruck, der das potentielle Wasserretentionsvermögen einer Landschaft darstellt. Im Hinblick auf die anthropogenen Möglichkeiten des Hochwasserrückhalts wurden mit dem Bau von Wasserkraftwerken große Stauseen geschaffen, die ein bedeutendes Potential zur Reduktion von Abflussspitzen bei Hochwasserreignissen bieten. Die Nutzung der Wasserkraft ist für die österreichische Energiewirtschaft traditionell von großer Bedeutung, was den Anlagenbetreibern eine einflussreiche Position verleiht. In Österreich sind derzeit etwa 70 Speicherkraftwerke in Betrieb, die potentiell einen hohen Prozentsatz der Abflussmenge eines Jahres speichern können (WESE-MANN et al., 2018). Im Falle eines extremen Hochwassers kann die Öffnung von Staumauern aber auch die Überschwemmungen flussabwärts verschärfen.

Landwirtschaft: Für den Hochwasserabfluss und den Hochwasserrückhalt sollten bevorzugt Flächen mit geringem Schadenspotential herangezogen werden. Als Folge der gestiegenen Bedeutung des flächigen Hochwasserrückhalts wird insbesondere von der Landwirtschaft erwartet, die dafür benötigten Flächen zur Verfügung zu stellen. Hochwasserereignisse haben jedoch nachteilige Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion, wie Ernteausfälle, Bodenerosion und Bodenkontamination (KLAGHOFER, 2003; NEUWIRTH & WAGNER, 2010). Maßnahmen zur Mobilisierung landwirtschaftlicher Flächen für Hochwasserabfluss und Hochwasserrückhalt sind zudem mit Eingriffen in bestehende Eigentumsrechte verbunden. Die Erwartungen an die Landwirtschaft stellen auch deshalb eine Herausforderung für die Hochwasserpolitik dar, da landwirtschaftlich genutzte Flächen bis in die 1960er Jahre durch Gewässerregulierungen und Hochwasserschutzanlagen vor Hochwasserereignissen mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit geschützt und durch begleitende Meliorationsmaßnahmen günstige Bedingungen für die landwirtschaftliche Produktion geschaffen wurden (WAG-NER et al., 2009).

Raumplanung: Die Errichtung von technischen Hochwasserschutzanlagen wie Dämme und Retentionsbecken ermöglicht auch die Nutzung ehemals hochwassergefährdeter Flächen für Wohn-, Gewerbe- und Industriegebiete. Dieser sogenannte ,Dammeffekt' hat steigende Schadenspotentiale in Bereichen zur Folge, für die aufgrund der begrenzten Schutzwirkung der Anlagen ein Hochwasserrestrisiko verbleibt (CUTTER et al., 2018; DI BALDASSARRE et al., 2013). Aufgrund der räumlich begrenzten Entwicklungsmöglichkeiten in den alpinen Talräumen Österreichs können diese Restrisikobereiche in den meisten Bundesländern ohne Restriktionen als Siedlungsgebiete genutzt werden. Vor dem Hintergrund eines möglichen klimawandelbedingten Anstiegs von Hochwasserwahrscheinlichkeit und Hochwasserintensität und dem damit im Zusammenhang stehenden Versagen von Schutzbauten (LÖSCHNER et al., 2017) stellt der Umgang mit Restrisiken in der Raumplanung eine Herausforderung für das Hochwasserrisikomanagement dar. Die Diskussion um die Berücksichtigung von Hochwasserextremereignissen in der Raumplanung steht im Gegensatz zu historischen Landnutzungsstrategien, in denen der technische Hochwasserschutz die Grundlage für die Entwicklung ehemals hochwassergefährdeter Siedlungsgebiete lieferte (EBERSTALLER et al., 2004).

Die Nutzung potentiell hochwassergefährdeter Gebiete und der Umgang mit Hochwasserrisiken im alpinen Raum haben sich im Lauf der Zeit signifikant verändert. In Po-Co-FLOOD wurden daher die historische Landnutzung und die Flussmorphologie in den von Hochwasser beeinflussten Bereichen der österreichischen Einzugsgebiete des Rheins, der Salzach und der Drau anhand von Landbedeckungsdaten rekonstruiert und der aktuellen Landbedeckung in diesen Gebieten gegenübergestellt. Die Ergebnisse dieser vergleichenden Analyse flossen in die drei Interaktionsfelder ein, um dort ein besseres Verständnis der Problemstruktur und des Problemdrucks in einem historischen Kontext zu gewährleisten.

Anhand der drei Interaktionsfelder Wasserkraft, Landwirtschaft und Raumplanung sowie auf Basis der historischen Analyse untersuchten wir in diesem Projekt die wechselseitigen Abhängigkeiten und Konflikte sowie die entsprechenden Möglichkeiten der Politikkoordination zur Vermeidung bzw. Reduktion von Hochwasserrisiken. Erkenntnisleitend war die folgende übergeordnete Forschungsfrage:

Wie verändert der Wandel hin zu einem integrierten Hochwasserrisikomanagement in Berggebieten die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Politikbereichen und inwieweit führt dieser Wandel zu einem wachsenden Bedarf an Koordination zwischen diesen Politikbereichen und den zuständigen Verwaltungsebenen?

Die nachstehenden vier Forschungsfragen detaillieren die übergeordnete Forschungsfrage für die drei Interaktionsfelder:

- Wie hat sich die Notwendigkeit einer koordinierten Politik in den drei Interaktionsfeldern in einer historischen Perspektive entwickelt?
- Worin bestehen die empirischen Evidenzen für die Politikkoordination in den drei Interaktionsfeldern?
- Welche Auswirkungen der Politikkoordination lassen sich in den drei Interaktionsfeldern festmachen?
- Warum gibt es Unterschiede in der Politikkoordination und im sektoralen Zusammenspiel in den drei Interaktionsfeldern?

Der Aufbau der Projektteile basiert auf dem Verständnis von Politikkoordination als ein wesentlich von Akteurinnen und Akteuren beeinflusster Prozess über drei Dimensionen (CANDEL & BIESBROEK, 2016):

- Problemstruktur und Problemdruck als Motive f
  ür die Politikkoordination,
- Prozess der Politikkoordination zum besseren Verständnis des Koordinationsprozesses im Hochwasserrisikomanagement sowie
- Performance der Politikkoordination zur Bewertung der Effektivität im Hinblick auf eine Vermeidung bzw. Verringerung von Hochwasserrisiken.

Beiträge zur Problemstruktur und zum Problemdruck liefern die historische Analyse und die drei Interaktionsfelder, der Prozess der Politikkoordination sowie die Performance der Politikkoordination werden nur für die Interaktionsfelder analysiert. Die Entwicklung eines operationalisierbaren analytischen Rahmens zur Analyse des Prozesses der Politikkoordination war als eigener Projektschritt vorgesehen. Die diesbezüglichen Resultate werden daher im Ergebnisteil dargestellt (Kap. 2).

Als Ergebnis der Analyse der Politikkoordination in den drei Interaktionsfeldern sollen im Projekt PoCo-FLOOD die folgenden Forschungsziele erreicht werden:

• ein besseres Verständnis der sektoralen Zusammenhänge im integrierten Hochwasserrisikomanagement,

- erweitertes Wissen zu Möglichkeiten und Grenzen der Politikkoordination sowie zu den Interessenkonflikten, die einer kohärenteren Hochwasserpolitik entgegenstehen, und
- Optionen für eine sektoral koordinierte Hochwasserpolitik in den drei Interaktionsfeldern.

### 1.3 Methodik

Die in diesem Projekt angewendeten Methoden werden an dieser Stelle nur überblickshaft angeführt. Eine genauere Darstellung der jeweiligen Methoden erfolgt aufgrund des besseren Verständnisses des Zusammenhanges von Methoden und Ergebnissen getrennt nach den thematischen Blöcken dieses Endberichts (Analytischer Rahmen, Historische Landnutzung und Fließgewässerkorridore, Interaktionsfelder und Synthese).

Die Forschungsaktivitäten in PoCo-FLOOD stützten sich auf folgende methodische Ansätze: Literatur- und Dokumentenanalyse, GIS-basierte Analysetechniken zur Untersuchung von Landnutzungsänderungen und der Exposition von Siedlungsgebieten (aktuell sowie im historischen Vergleich) und von Landwirtschaftsflächen, hydrologische Modellierung zur Analyse des Einflusses von Talsperren und Landnutzungsänderungen auf den Hochwasserabfluss, Interviews mit Expertinnen und Experten zu den drei Dimensionen der Politikkoordination in den Interaktionsfeldern sowie ein Stakeholder-Workshop als transdisziplinärer Ansatz zur Reflexion der Möglichkeiten und Grenzen der Politikkoordination.

### 1.4 Advisory Board

Für PoCo-FLOOD wurde ein Advisory Board eingerichtet, das zusätzlichen inhaltlichen Input liefern und komplementäre Erfahrungen und Perspektiven, insbesondere aus der Praxis, in die Projektarbeit einbringen soll. Das Advisory Board setzt sich aus 19 Expertinnen und Experten zusammen, von denen acht dem Bereich Hochwasserrisikomanagement, vier dem Bereich Wasserkraftnutzung und Hydrologie, vier dem Sektor Landwirtschaft sowie drei dem Bereich Raumplanung zuzurechnen sind. Aufgrund der politischen Relevanz der Forschung umfasst das Advisory Board vor allem fachlich zuständige Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger aus der Praxis des Hochwasserrisikomanagements und der drei sektoralen Politikfelder, die über langjährige Erfahrung in diesen Fachbereichen verfügen. Die Aufgabe des Advisory Boards besteht darin,

- auf Aspekte in der Projektbearbeitung hinzuweisen, die andernfalls übersehen werden könnten,
- die Zwischenergebnisse des Projekts im Rahmen von Diskussionen mit dem Projektteam zu validieren und

 transdisziplinäre Forschungsschritte im Projekt zu unterstützen.

Ein Workshop mit dem Advisory Board fand am 17. Juni 2021 statt. Aufgrund der zu diesem Zeitpunkt geltenden COVID-19-Bestimmungen musste der Workshop als Online-Veranstaltung abgehalten werden. Neben dem gesamten Projektteam nahmen zehn Mitglieder des Advisory Boards teil. Sämtliche Themenfelder des Projekts waren durch Teilnehmende aus dem Advisory Board vertreten. Im ersten Teil des Workshops wurden die Zwischenergebnisse aus dem historischen Teil und den drei Interaktionsfeldern präsentiert und von den Mitgliedern des Advisory Boards kritisch reflektiert. Der zweite Teil widmete sich der Planung der Stakeholder-Workshops, insbesondere, was die Zielsetzung, die Themen, die Organisation und den Nutzen für die Teilnehmenden betrifft. Die themenspezifischen Ergebnisse des Advisory Board-Workshops wurden in den jeweiligen Ergebnisberichten (Kap. 4-6) berücksichtigt, die Rückmeldungen zum Stakeholder-Workshop und die daraus resultierenden Projektmodifikationen werden in Kapitel 7 dargestellt.

# 1.5 Aufbau des PoCo-FLOOD Endberichts

In Kapitel 2 wird mit den sektorübergreifenden Zielbeziehungen und den sektoralen Herausforderungen der Koordination in den drei Interaktionsfeldern der Analytische Rahmen dieses Forschungsprojekts vorgestellt. Kapitel 3 stellt die Ergebnisse der Analyse der historischen und der aktuellen Landbedeckung und der Veränderung der Flussmorphologie in drei alpinen Einzugsgebieten in Österreich dar. Kapitel 4 präsentiert mit dem Hochwasserrückhalt durch Speicherkraftwerke, dem natürlichen Wasserrückhaltepotential in alpinen Einzugsgebieten und den Koordinationsprozessen der Wasserkraft mit dem Hochwasserschutz die Ergebnisse des Interaktionsfelds Hochwasserretention in alpinen Gebieten. Kapitel 5 widmet sich dem Interaktionsfeld Landwirtschaft und Hochwasserrückhalt und beinhaltet die Ergebnisse einer Analyse zur aktuellen landwirtschaftlichen Nutzung in Hochwasserabflussgebieten sowie die Prozesse und Herausforderungen für landwirtschaftliche Akteurinnen und Akteure im Hochwasserrisikomanagement. In Kapitel 6 werden die Resultate einer Untersuchung der Hochwasserexposition von Siedlungsgebieten im historischen Vergleich und der Koordinationsprozess zwischen Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung im Umgang mit Restrisiken als Ergebnisse des Interaktionsfeldes Hochwasserschutz und Siedlungsentwicklung dargestellt. Kapitel 7 widmet sich der Konzeption, der Organisation und den Ergebnissen des Stakeholder-Workshops. Kapitel 8 führt in einer abschließenden Synthese die Resultate der historischen Analyse und die Ergebnisse zur Politikkoordination in den drei Interaktionsfeldern zusammen. Kapitel 9 gibt einen Überblick über die Publikationen, die aus PoCo-FLOOD entstanden sind, Kapitel 10 schließt den Projektbericht mit dem Quellenverzeichnis ab.

# 2 Analytischer Rahmen

### 2.1 Sektorübergreifende Zielbeziehungen und die Herausforderung der Politikintegration

In der Literatur über integriertes Hochwasserrisikomanagement findet sich immer wieder eine klare, aber zugleich oft vereinfachende Aussage: je mehr sektorale Integration, desto besser. Diese Position geht davon aus, dass Politikintegration, das heißt die Abstimmung von Akteurinnen und Akteuren, Institutionen und politischen Zielen zwischen mehreren Politikfeldern, zu besseren Ergebnissen bei der sektorübergreifenden Problemlösung führt (BOLOGNESI et al., 2021; TOSUN & LANG, 2017). Die praktischen Erfahrungen mit integrierter Hochwasserpolitik zeichnen jedoch ein eher ambivalentes Bild. Einige Studien schlagen optimistische Töne an und kommen zu dem Schluss, dass es einen spürbaren Trend zu einer verstärkten sektorübergreifenden Zusammenarbeit gibt (AVOYAN & MEIJERINK, 2021; LÖSCH-NER & NORDBECK, 2020; METZ et al., 2020). Andere Studien sind eher skeptisch, was die Aussichten einer integrierten Hochwasserpolitik angeht. Sie verweisen auf etablierte Koalitionen von Akteurinnen und Akteuren, ein institutionelles Design, welches auf das traditionelle Paradigma des Hochwasserschutzes ausgerichtet ist, und die "sunk cost" der in der Vergangenheit getätigten Hochwasserschutzinvestitionen (GRALEPOIS et al., 2016). Andere Autoren heben die traditionelle institutionelle Trennung zwischen Wasserwirtschaft und Raumplanung und das Aufeinandertreffen unterschiedlicher Governance-Modi in diesen politischen Teilsystemen als Hauptfaktoren hervor und begründen damit, warum die Integration der Hochwasserpolitik oft schwer zu erreichen ist (SCHOLTEN et al., 2020).

Die Literatur zur Politikintegration hat mehrere Kategorien von Treibern und Hindernissen für eine erfolgreiche Politikintegration identifiziert, darunter politische, organisatorische und kognitive Faktoren sowie Ressourcen, Zeitplanung und die Merkmale des jeweiligen Integrationsproblems (BIESBROEK et al., 2013, RUNHAAR et al., 2018). Für unser Forschungsprojekt von zentralem Interesse waren die Merkmale des Integrationsproblems, definiert als die Art und Weise, wie das Integrationsziel formuliert und mit sektoralen Zielen verknüpft ist, einschließlich komplementärer und konfligierender Zeitpläne (RUNHAAR et al., 2018). Dieser Faktor wurde als einer der am häufigsten genannten Treiber der Politikintegration identifiziert. Gleichzeitig gehören Interessenkonflikte - ein mögliches Ergebnis der Integration verschiedener sektoraler Ziele - zu den am häufigsten genannten Barrieren für die Politikintegration (RUNHAAR et al., 2018). In Anbetracht dessen scheint es notwendig, die spezifischen Herausforderungen sektorübergreifender Probleme und ihre potentiellen Auswirkungen auf den Prozess der Politikintegration näher zu beleuchten. Wie mehrere Autoren festgestellt haben, kann die Art des Problems einige Integrationshindernisse hartnäckiger machen, andere Barrieren verstärken und/oder das Entstehen neuer Barrieren auslösen (RUNHAAR et al., 2012; BIESBROEK et al., 2013). Daher ist es sehr wichtig, die sektorspezifische Integrationsherausforderung zu verstehen, da sie von einem sektoralen Kontext zum anderen variiert (CUMISKEY et al., 2019).

Die institutionelle Landschaft des Hochwasserrisikomanagements (HWRM) in den meisten europäischen Ländern, darunter auch Österreich, ist typischerweise eher fragmentiert. Ein breites Spektrum von Akteurinnen und Akteuren ist für verschiedene Aspekte des Hochwasserrisikomanagements verantwortlich. Abbildung 1 veranschaulicht potentielle Bereiche für die Integration der Hochwasserpolitik angesichts unterschiedlicher Hochwasserrisikomanagementstrategien und sektorspezifischer Politikbereiche. Die meisten Politikbereiche können zu mehr als einer HWRM-Strategie beitragen. So kann beispielsweise die Raumplanung dazu beitragen, künftige Risiken zu vermeiden und Restrisiken zu managen, indem sie die Entwicklung von Gebäuden und Infrastrukturen regelt; die Landwirtschaft kann durch die Bereitstellung von Hochwasserrückhalteflächen die Risikominderung und Risikovermeidung unterstützen. Diese sektoralen Überschneidungen oder Kombinationen davon können iedoch zu Problemen bei der politischen Integration führen. In der Pra-



xis können bestimmte sektorale Integrationsaufgaben aufgrund der Art des Hochwasserrisikos, der institutionellen Zuständigkeiten oder der Dringlichkeit aufgrund der jüngsten Hochwasserereignisse Vorrang vor anderen haben. In Anbetracht des breiten Spektrums an Herausforderungen der Politikintegration in den verschiedenen Sektoren und den unterschiedlichen Strategien für das Hochwasserrisikomanagement ist es wichtig, die spezifischen Integrationsherausforderungen im jeweiligen sektoralen Kontext zu verstehen. Politikfelder mit einer hohen Kongruenz mit den Hochwasserrisikomanagementstrategien stellen eine geringere Herausforderung für die Politikintegration dar als Politikfelder mit einer nur teilweisen Kongruenz (Abb. 1). Eine detailliertere, sektorbezogene Bewertung ist daher notwendig und hilft, die vorherrschenden Interessen und die Bereitschaft der betroffenen Akteurinnen und Akteure zur Politikintegration im Hochwasserschutz besser zu verstehen sowie potentielle Hindernisse für spezifische Integrationsprobleme genauer zu definieren.

Die Integration der Hochwasserpolitik zielt darauf ab, verschiedene sektorübergreifende Probleme zu lösen – zum Beispiel den Hochwasserrückhalt auf landwirtschaftlichen Flächen, den sozioökonomischen Druck zur Entwicklung von Überschwemmungsgebieten oder die Nutzung der Speicher von Wasserkraftwerken für den Hochwasserrückhalt. Die Merkmale des sektorübergreifenden Problems beeinflussen die Fähigkeit der Regierungen, das Problem überhaupt anzugehen, die Formulierung gemeinsamer politischer Ziele sowie das Spektrum der geeigneten politischen Instrumente. Das zugrundeliegende sektorübergreifende Problem bildet somit den Rahmen für die Herausforderung der sektoralen Integration:

- Es werden die Sektoren und Akteurinnen und Akteure definiert, die von der spezifischen Integrationsherausforderung betroffen sind;
- (ii) auf Basis der bestehenden sektoralen Politikziele schafft das sektorübergreifende Problem entweder eine harmonische oder eine konfliktreiche Ausgangssituation;
- (iii) die Ausgangssituation ("Zielbeziehung") hat einen erheblichen Einfluss auf den sich entfaltenden Prozess der Politikintegration.

Sektorübergreifende Zielbeziehungen können als Interdependenzen definiert werden, die entstehen, wenn Instrumente, die zur Erreichung bestimmter sektoraler Ziele eingesetzt werden, zu Nebeneffekten führen, welche die Erreichung sektoraler Ziele in anderen Politikbereichen beeinflussen. Im Zusammenhang mit formalen Zielbeziehungen werden drei Varianten unterschieden (Tab. 1).

Die Zielbeziehungen zwischen den Politikbereichen können von Komplementarität über Neutralität bis hin zu Konkurrenz reichen. Die sektoralen Ziele können sich gegenseitig unterstützen, neutral sein oder einander widersprechen. Daraus ergeben sich unterschiedliche institutionelle Rahmenbedingungen, die sich nachteilig auf den Prozess der Politikintegration auswirken können. In einer komplementären Situation werden die sektoralen Interessenvertreterinnen und Interessenvertreter in einer freundlichen Atmosphäre und eher in einem informellen Rahmen mit vielen direkten persönlichen Kontakten, aber ohne einen formellen organisatorischen Rahmen, wie eine interministerielle Kommission oder Arbeitsgruppe, miteinander verhandeln. Die Politikintegration wird durch weiche Instrumente vorangetrieben, um die bereits bestehenden Synergien zwischen den betroffenen Politikbereichen zu unterstützen. Eine neutrale Situation ist auch durch eine freundliche Atmosphäre zwischen den Beteiligten, einen formelleren organisatorischen Rahmen und eine Konzentration auf anreizbasierte Instrumente zur Förderung der Politikintegration gekennzeichnet. Die Konfliktsituation ist für den Prozess der Politikintegration am problematischsten. Die Beteiligten werden sich über widersprüchliche Politikziele streiten und verhandeln müssen. In dieser Situation ist ein formeller Organisationsrahmen zu erwarten. Jeder Fortschritt bei der Politikintegration ist weniger sicher. Mögliche Vereinbarungen werden so festgelegt, dass sie für alle Beteiligten rechtlich bindend sind, so dass in diesem Fall eine Bevorzugung von regulativen Instrumenten zu erwarten ist.

#### 2.2 Charakterisierung der sektoralen Herausforderungen der Politikintegration in der Hochwasserpolitik

Das Hauptziel des Hochwasserrisikomanagements ist es, die Risiken für Menschenleben, Siedlungsflächen und Wirtschaftsgüter zu minimieren. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es notwendig, die Wahrscheinlichkeit und Intensität von Hochwasserereignissen zu verringern oder das Schadenspotential bzw. die Vulnerabilität zu reduzieren. Dies

Zielbeziehung	Definition	Potentielle Auswirkung auf den Prozess der Politikintegration			
Zielkomplementarität	Die sektoralen Ziele arbeiten harmonisch miteinander und unterstützen sich gegenseitig. Wenn ein sektorales Ziel erreicht wird, zahlt sich dies für die Erreichung anderer sektorübergreifender Ziele aus.	<ul> <li>Harmonische Verhandlungen</li> <li>Informeller Rahmen</li> <li>Weiche Instrumente zur Förderung von Synergien</li> </ul>			
Zielneutralität	Die sektoralen Ziele beeinflussen sich nicht gegenseitig. Sie verhalten sich neutral und/oder indifferent.	<ul><li>Harmonische Verhandlungen</li><li>Formeller Rahmen</li><li>Fokus auf anreizbasierte Instrumente</li></ul>			
Zielkonflikt	Die sektoralen Ziele widersprechen sich. Wenn ein Ziel er- reicht wird, behindert dies die Erreichung anderer sektoraler Ziele.	<ul><li>Konflikthafte Verhandlungen</li><li>Formeller Rahmen</li><li>Harte regulative Instrumente</li></ul>			
Quelle: aufbauend auf HUMMEL (2007).					

Tab. 1.

Sektorübergreifende Zielbeziehungen und Politikintegration.

kann durch strukturelle und nicht-strukturelle Maßnahmen wie Dämme, Rückhaltebecken, Gefahrenkartierung oder schadensarme Hochwasserabflüsse erreicht werden. Das Haupthindernis in dieser sektoralen Perspektive ist die begrenzte Verfügbarkeit von Land für Hochwasserschutzbauten, Hochwasserrückhalt und Hochwasserabfluss. Aus dieser Sicht können andere Politikbereiche bestimmte Aufgaben im Hochwasserrisikomanagement übernehmen, da sie nützliche Dienste leisten können: (i) Verbesserung der Hochwasserrückhaltekapazität im Oberlauf (Wasserkraft), (ii) Gewährleistung des Hochwasserrückhalts auf landwirtschaftlichen Flächen (Landwirtschaft) und (iii) Sicherung von Flächen für Hochwasserrückhalt und Hochwasserabfluss (Raumplanung). Die Perspektive des Hochwasserrisikomanagements kann jedoch im Widerspruch zu den Hauptzielen der drei Politikbereiche stehen, die ihre eigenen Vorstellungen über die Nutzung der begrenzten Landund Wasserressourcen haben, nämlich für die Erzeugung einer stetigen Energieversorgung, für die landwirtschaftliche Produktion und für die Siedlungsentwicklung. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die sektoralen Ziele des Hochwasserrisikomanagements und jeden dieser drei Politikbereiche.

Wasserkraft: Das Hochwasserrisiko in alpinen Gebieten wird durch die natürlichen und vom Menschen geschaffenen Möglichkeiten des Wasserrückhalts in den oberen Einzugsgebieten beeinflusst. Mit dem Bau von Wasserkraftwerken in alpinen Einzugsgebieten, beginnend mit Anfang/ Mitte des 20. Jahrhunderts, wurden große künstliche Stauseen geschaffen, die heute ein bedeutendes Potential zur Dämpfung von Abflussspitzen bei extremen Hochwassern bieten. Die Nutzung der Wasserkraft ist für die österreichische Energiewirtschaft traditionell von großer Bedeutung (WAGNER et al., 2015), was den Anlagenbetreibern eine starke und mächtige Position verleiht. Derzeit sind rund 70 Speicherkraftwerke in Betrieb, was die Bedeutung für die Stromerzeugung, aber auch die Relevanz des potentiellen Hochwasserrückhalts durch künstliche Stauseen unterstreicht, da sie potentiell einen hohen Prozentanteil der Abflussmenge eines Jahres speichern können (PIRKER, 2005; WESEMANN et al., 2018). Das Verhältnis zwischen Schutzwasserwirtschaft und Anlagenbetreibern wurde von mehreren Befragten als sehr freundschaftlich beschrieben (Interview 2 (I2), I3, I4). Beide Seiten sehen die sektorale Beziehung als potentiell synergetisch an, das heißt, dass Wasserkraftwerke einen positiven Nettoeffekt auf die Hochwassergefahren haben (I3, I4, I5). "Die Synergien sind aus meiner Sicht klar: Speicherkraftwerke können zum Hochwasserrückhalt beitragen, ganz klar" (I7). Die Herausforderung der politischen Integration wird als sehr überschaubar angesehen: "Grundsätzlich sehe ich ein großes Potential, beide Ziele, Wasserkraft und Hochwasserschutz, zu verbinden. Dafür gibt es viele praktische Beispiele" (I5). Andere Interviewpartner stimmten dem Synergiepotential zu, waren aber eher skeptisch, ob sich dieses in der Praxis realisieren lässt (I1, I8, I9). Insgesamt wird die sektorale Zielbeziehung entweder als komplementär oder neutral und die Integrationsherausforderung als gering oder moderat eingeschätzt.

Landwirtschaft: Hochwasserrückhalt wird idealerweise in Gebieten mit geringem Schadenspotential realisiert. Die Landwirtschaft kann den dringend benötigten Raum zur Verfügung stellen, um Überschwemmungen abzumildern, was auch zunehmend von ihr erwartet wird (MORRIS et al., 2016). Der Rückhalt von Hochwasser auf landwirtschaftlichen Flächen ist jedoch mit Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion (z.B. Ernteausfälle, Bodenerosion oder Bodenkontamination) und Eingriffen in bestehende Eigentumsrechte verbunden (KLAGHOFER, 2003; NEUWIRTH & WAGNER, 2010). Die Mobilisierung von Flächen in Privatbesitz für Dienstleistungen zur Risikoreduktion stellt daher eine große Herausforderung für die Hochwasserpolitik dar. Die aktive Funktion der Landwirtschaft für den Hochwasserschutz steht heute in krassem Gegensatz zu früheren Hochwasserschutzmaßnahmen und Flussbegradigungen, als landwirtschaftliche Flächen vor Hochwasser geschützt wurden, um günstige Bedingungen für die landwirtschaftliche Produktion zu gewährleisten (WAGNER et al., 2009). Aufgrund dieses bedeutenden Wandels in der Hochwasserpolitik kann das Zielverhältnis zwischen Landwirtschaft und Hochwasserrisikomanagement heute als widersprüchlich angesehen werden, was zu einem erheblichen Bedarf an politischer Integration führt. Darüber hinaus unterscheiden sich die Perspektiven der relevanten Akteurinnen und Akteure hinsichtlich des Verhältnisses der beiden Politikbereiche erheblich. Während die Akteurinnen und Akteu-

	Politikfelder Ziele des Hochwassermanagements		Restriktive sektorale Ziele	Zielbeziehungen
	Wasserkraft	<ul> <li>Bereitstellung von Kapazitäten für Hochwasserrückhalt in Stauseen</li> <li>Anpassung der Wehrbetriebsordnungen an den Rückhaltebedarf</li> </ul>	<ul> <li>Bewirtschaftung der Speicherkapazitäten zur Maximierung der Stromerzeugung</li> <li>Verantwortung für Hochwasserschutz begrenzen</li> </ul>	<ul> <li>Ziele komplementär oder neutral</li> <li>Politintegration nur geringe Herausforderung</li> </ul>
	Landwirtschaft	<ul> <li>Hochwasserrückhalt auf land- wirtschaftlichen Flächen vergrößern</li> <li>Verfügbarkeit von landwirtschaftlichen Flächen sicherstellen</li> </ul>	<ul> <li>Minimierung der Hochwasserschäden für die landwirtschaftliche Produktion</li> <li>Keine Beschränkung der Landnutzung und der privaten Eigentumsrechte</li> </ul>	<ul> <li>Ziele im Konflikt</li> <li>Politikintegration als hohe Herausforderung</li> </ul>
	Raumplanung	<ul> <li>Hochwasserexposition von Gebäuden und Infrastruktur minimieren</li> <li>Flächen für Hochwasserretention und Hochwasserabfluss sichern</li> </ul>	<ul> <li>Koordination der Flächennutzungen da Mangel an geeignetem Bauland</li> <li>Entwicklung von ehemals hochwassergefährdeten Grundstücken</li> </ul>	<ul> <li>Ziele im Konflikt</li> <li>Politikintegration als hohe Herausforderung</li> </ul>
A I.	h 0			

Sektorübergreifende Zielbeziehungen zwischen Hochwasserrisikomanagement und Wasserkraft, Landwirtschaft und Raumplanung (verändert nach NORBECK et al., 2023: Fig. 1).

re der Schutzwasserwirtschaft die sektorale Beziehung als gleichberechtigt beschreiben, sehen die Vertreter der Landwirtschaft sie als hierarchisch und von der Schutzwasserwirtschaft dominiert an. Einige Befragte haben festgestellt, dass die Kommunikation zwischen den Wasserbehörden und den landwirtschaftlichen Akteurinnen und Akteuren oft unzureichend ist (I16, I17): "Ich würde mir eine bessere Diskussionsgrundlage wünschen" (I15). Zielkonflikte treten häufig in landwirtschaftlich hochproduktiven Gebieten auf und können zu verhärteten Fronten führen. Ein Interviewpartner berichtet, dass "Landbesitzern ein schlechtes Gewissen gemacht wird und ihnen mit rechtlichen Schritten gedroht wird", was die Situation weiter verschlechtert (I16).

Raumplanung: Der technische Hochwasserschutz hat die Kernfunktion, Hochwasserrisiken für Menschen, Siedlungen und andere Sachwerte zu reduzieren. Technischer Hochwasserschutz ermöglicht aber auch die Nutzung von ehemals hochwassergefährdeten Flächen für die Siedlungsentwicklung. Dieser sogenannte "Dammeffekt" führt oft zu einer Akkumulation von Schadenspotentialen in "geschützten" Gebieten (CUTTER et al., 2018; DI BALDASSAR-RE et al., 2013). In alpinen Regionen ist diese Interdependenz aufgrund der Konzentration anfälliger Landnutzungen in den Tälern, die aus den dort begrenzten Entwicklungsmöglichkeiten resultieren, besonders ausgeprägt (ARE et al., 2005; I28, I32, I35, I36). Die Minderung des künftigen Anstiegs des Hochwasserrisikos und die Entwicklung hochwasserangepasster Flächennutzungen stellen eine zentrale Herausforderung für das Hochwasserrisikomanagement dar, insbesondere im Hinblick auf die Wahrscheinlichkeit eines klimabedingten Anstiegs der Hochwasserabflüsse und die Risiken im Zusammenhang mit der Überflutung und/oder dem Versagen von Hochwasserschutzanlagen (LÖSCHNER et al., 2017). Diese Berücksichtigung von Extremereignissen und "Restrisiken" ist ein recht neues Phänomen, das im Gegensatz zu historischen Landnutzungsstrategien steht, bei denen der technische Hochwasserschutz bewusst zur Entwicklung ehemals hochwassergefährdeter Gebiete beiträgt, und sich auch von der bisherigen Planungspraxis einer meist uneingeschränkten Entwicklung in Restrisikogebieten unterscheidet (SEHER & LÖSCHNER, 2018a). Die Hochwassermanager wünschen sich, dass die Entwicklung in ehemaligen Gefahrenzonen entweder gänzlich gestoppt wird oder zumindest weitere Maßnahmen zur Minimierung der damit verbundenen Hochwasserrisiken umgesetzt werden (BM-LRT, 2021; I25, I27, I31, I32). Allerdings sind die Akteurinnen und Akteure der Schutzwasserwirtschaft eindeutig auf die Bereitschaft der Raumplanung angewiesen, sich mit dieser Problematik auseinanderzusetzen: "Der Wasserwirtschaft fehlt beim Restrisiko die Schnittstelle zur Raumplanung und zum Baurecht" (I28). Aufgrund des gegenwärtigen Zielkonflikts ist der Bedarf an Politikintegration hoch. In Bezug auf die institutionellen Beziehungen sind die Politikbereiche Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung strukturell getrennt und agieren gleichberechtigt.

Die obige Charakterisierung der sektoralen Integrationsherausforderungen mit Blick auf die Wasserkraft, die Landwirtschaft und die Raumplanung ist der erste Schritt, um die Rahmenbedingungen zu verstehen, unter denen sich die Integrationsprozesse in den drei Politikfeldern vollziehen. Das Verständnis der sektoralen Zielbeziehungen ist dabei von zentraler Bedeutung für die Problemwahrnehmung, das Handeln der sektoralen Akteurinnen und Akteure und die verfügbaren Politikinstrumente und Optionen. Die konkreten Auswirkungen dieser Zielbeziehungen auf die sektoralen Integrationsprozesse im Detail zu analysieren ist Gegenstand der folgenden Kapitel.

### 3 Historische Landnutzung und Fließgewässerkorridore

#### 3.1 Methodik

Im Rahmen des Projekts wurden die historische und die aktuelle Landbedeckung in den österreichischen Einzugsgebieten des Rheins im Bundesland Vorarlberg, der Salzach (Salzburg) und der Drau (Osttirol und Kärnten) innerhalb des von der Alpenkonvention festgelegten Gebiets mittels eines Geoinformationssystems (ArcGIS 10.6) ermittelt (Abb. 3).

Die wichtigste historische Quelle für die Studie war der Franziszeische Kataster (Maßstab 1:1.440/2.880/5.760), der im untersuchten Gebiet zwischen 1826 und 1859 erstellt wurde (FUHRMANN, 2007). Für das obere Einzugsgebiet der Drau in Osttirol standen die originalen Katasterkarten für die GIS-Rekonstruktion jedoch nicht zur Verfügung, weshalb auf die sogenannte Kulturenskelettkarte des Tiroler Landesarchivs zurückgegriffen werden musste. Dieses Kartenwerk aus der Zeit um 1875 ist eine Reproduktion der Original-Katasterkarten im größeren Maßstab 1:36.000. Es fehlen daher Details zu kleinen Parzellen und einzelnen Gebäuden. Da der Kataster im hochalpinen Bereich, das heißt im Ödland und bei Gletschern oberhalb von ca. 3.000 m (alle Höhenangaben in Meter über Adria), weniger genau ist, wurde zusätzlich die vom späteren k. k. Militärgeographischen Institut zwischen 1807 und 1836 erstellte Franziszeische Landesaufnahme im Maßstab 1:28.800 verwendet. Sie war für militärische Zwecke bestimmt und konzentriert sich daher vor allem auf die geografische Lage und Landschaftsstrukturen wie Wasserläufe und Geländetopografie. Beide Kartenwerke ergänzen sich optimal.

Überraschenderweise war es fast einfacher, die Datenquellen für die historische Landbedeckung zusammenzustellen als für den aktuellen Zustand. Eine Sentinel-2 basierte Landbedeckungskarte mit einer Auflösung von 10 m, die im Rahmen des "Land Information System Austria" (LISA) erstellt wurde, stellt die Hauptquelle für die aktuelle Situation der Landbedeckung dar (GEOVILLE IN-FORMATION SYSTEMS, 2017). Allerdings kann im LISA-Datensatz nicht eindeutig zwischen Acker und Grünland unterschieden werden, weshalb er mit dem sehr detaillierten INVEKOS-Datensatz ("Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem") kombiniert wurde (BMLFUW & BAB, 2017). Die aktuellen Ausdehnungen der Gletscher wurden aus BUCKEL & OTTO (2018) abgeleitet. Die Fläche mittelgroßer Flüsse und kleinerer Teiche wurde aus OpenStreetMap als


Abb. 3.

Untersuchungsgebiete (rot) in den österreichischen Alpen einschließlich der Einzugsgebiete von Rhein, Salzach und Drau. Das Jamtal im Bundesland Tirol wurde im Detail analysiert, um die Rekonstruktion der historischen Landbedeckung zu validieren (gelbes Rechteck: siehe Detail in Abbildung 5; Hintergrund: Reliefkarte Österreichs (2018) von Tschubby – CC BY-SA 3.0; verändert nach HOHENSINNER et al., 2021a).

GIS-Shapefiles hinzugefügt (RAMM, 2019). Schließlich wurden kleinere Flüsse und Bäche aus einem Datensatz des Projekts "Strategische Planung für alpine Flussökosysteme" (MUHAR et al., 2018) integriert. Der daraus resultierende Datensatz entspricht etwa der Landbedeckung im Jahr 2016.

Für die Abgrenzung der Flusskorridore wurden verschiedene Hochwassergefahrendatensätze verwendet. Ein GIS-Datensatz mit den hochwassergefährdeten Gebieten bei extremen 300-jährlichen Hochwassern wurde vom BM-LFUW zur Verfügung gestellt. Da Daten für einzelne Flüsse fehlten, wurde der Datensatz mit GIS-Daten der "Österreichischen Hochwassergefahrenkarte" (HORA) für 200-jährliche Hochwasser ergänzt (BMLFUW, 2014). Künstliche Lücken zwischen den verschiedenen räumlichen Datensätzen wurden manuell bereinigt. Weiterführende 3D-Analysen wurden auf Basis eines digitalen Höhenmodells (DEM) mit einer Auflösung von 10 m (data.gv.at – Open Data Austria) durchgeführt. Der resultierende Datensatz der Flusskorridore bzw. historisch/aktuell hochwassergefährdeten Gebiete beinhaltet größtenteils (ehemalige) Überschwemmungsgebiete in breiteren Talsohlen, integriert aber auch sehr schmale Flusskorridore steiler Wildbäche und schmale bis breite überschwemmungsgefährdete Bereiche an den Talflanken.

In Übereinstimmung mit den Anforderungen für spätere Niederschlag-Abfluss-Modellierungen wurden die historischen und aktuellen Landbedeckungen zu 11 Klassen aggregiert (Tab. 2).

Die georeferenzierten historischen Katasterkarten wurden manuell mit ESRI ArcGIS 10.6 vektorisiert (BOZZETTA, 2022; KOFLER, 2021; RAPOTTNIG, 2021; STERLE, 2021). Um die Datenaufbereitung in einem vertretbaren zeitlichen Rahmen zu halten, wurden Flurstücke mit einer mittleren Breite < 10 m nicht separat abgegrenzt. Ebenso wurden kleine Fließgewässer mit einer Gerinnebreite von weniger als 5 m (inkl. Schotterbänke) nicht vektorisiert. Das resultierende Gewässernetz umfasst alle Fließgewässer mit Ein-

Landbedeckung	Beschreibung	
Siedlungsflächen	Gebäude mit angrenzenden Straßen, Plätze, kleinere Gärten, Straßen außerhalb von Siedlungen	
Fließgewässer	Flüsse, kleinere Bäche (mit Schotter-/Sand-/Schluffbänken)	
stehende Gewässer	Seen, Weiher, Teiche	
Feuchtflächen	Sümpfe, Moore, Röhricht	
Grünland	Wiesen, Weiden (Almen), alpines Grasland	
Ackerland	Getreidefelder, Gemüsefelder, große Gemüsegärten	
Weingärten	kleinere und größere Weinanbauflächen	
spärlich bewaldete Flächen	Krummholzzone, Obstbaumwiesen, Weiden mit verstreuten Gehölzen	
Wälder	dicht bewaldete Flächen mit größeren Bäumen	
Ödland	unbewachsene Schuttflächen, Felsen, Schotter-/Sandgruben	
Gletscher	eisbedeckte Flächen	

Tab. 2.

Landbedeckungsklassen definiert auf Basis historischer und aktueller Grundlagendaten.

zugsgebieten > 10 km<sup>2</sup>. Es wurden aber auch Fließgewässer in kleineren Einzugsgebieten berücksichtigt, wenn ihre historische Gerinnebreite mehr als 5 m betrug. Um eine methodisch fundierte Vergleichsanalyse mit dem Ist-Zustand zu ermöglichen, enthält der Datensatz für 2016 nur jene Fließgewässer, die im historischen Datensatz ausgewiesen sind. Zur Validierung der Genauigkeit des historischen Datensatzes diente das Jamtal im Bundesland Tirol als Detailuntersuchungsgebiet (Abb. 3). Im Rahmen des ESS-Forschungsprojekts "Changing debris cover on Eastern Alpine glaciers: quantification and hydrological impacts" (Hidden.ice) wurden die Landbedeckungsveränderungen in diesem Tal sehr detailliert rekonstruiert (ATZLER, 2021; HOHENSINNER et al., 2021b).

Die aktuellen Ausdehnungen der hochwassergefährdeten Gebiete bei ca. 300-jährlichen Hochwassern dienten als Grundlage für die Annäherung an die historischen Fließgewässerkorridore, das heißt die bei extremen Hochwassern überschwemmten Talböden, Wildbäche und Abflussrinnen an Talhängen. Für alle Fließgewässer wurden die Höhen der Wasserlinie entlang der aktuellen Überschwemmungsgebiete mit Hilfe eines 10 m-DEM ermittelt. In einem nächsten Schritt wurde untersucht, ob das an die Wasserlinie angrenzende Gelände seit dem frühen 19. Jahrhundert durch Straßenbau, Flussbau, Eisenbahnlinien oder neue Siedlungsgebiete künstlich angehoben wurde. Dazu wurden der Franziszeische Kataster, das DEM, aktuelle Orthofotos und zusätzlich Google Earth verwendet. In den Fällen, in denen die Daten auf ein aktuell höheres Gelände als vor mehr als 170 Jahren hinwiesen, wurde die potentielle historische Wasserlinie außerhalb des aktuellen Überschwemmungsgebiets ermittelt. In den meisten Fällen zeigten die historischen Landnutzungen in den Katasterkarten deutlich die seitliche Ausdehnung der ehemaligen Uberschwemmungsgebiete. An einigen größeren Flüssen führten intensive Flussbegradigungen zu erheblichen Eintiefungen der Gerinnesohlen und damit zu Absenkungen der Wasserspiegel bei Hochwasser (HOHENSIN-NER et al., 2021c). Wenn aus den Katasterkarten und den Orthofotos klar hervorging, dass die Höhe des ehemaligen Wasserspiegels höher und die Aue breiter gewesen sein muss, wurde ebenfalls ein historisch breiteres Überschwemmungsgebiet angenommen. Die Ausdehnungen der ehemaligen Überschwemmungsflächen lassen jedoch keine konkreten Aussagen über die zugehörige Hochwasserjährlichkeit zu, das heißt, ob sie unter den klimatischen und hydrologischen Bedingungen in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts einem 100-, 300- oder 500-jährlichen Hochwasser entsprachen. Man kann jedoch feststellen, dass die rekonstruierten Überschwemmungsgebiete bei Hochwassern mit ähnlichen Wasserständen wie heute potentiell überflutet waren.

In einem letzten Schritt wurde das 10 m-DEM mit den einzugsgebietsweiten Datensätzen verschnitten. Daraus ergaben sich Höhenverteilungen für jede historische und aktuelle Klasse der Landbedeckung bzw. Landnutzung.

# 3.2 Ergebnisse

## 3.2.1 Einzugsgebietsweite Veränderungen der alpinen Landbedeckung

Zwischen 1826 und 1859 nahmen die Wälder in den österreichischen Einzugsgebieten von Rhein, Salzach und Drau mit 37 % die größte Fläche ein (Abb. 4; HOHENSIN-NER et al., 2021a). Während die verschiedenen Formen des Grünlands 22 % ausmachten, betrug der Anteil der Ackerflächen nur die Hälfte davon. Wenig bewaldete Flächen, die meist als Weideflächen genutzt wurden, machten 16 % des gesamten Untersuchungsgebietes aus. Dementsprechend wurde nur rund ein Fünftel der gesamten landwirtschaftlichen Fläche für den Getreide- und Gemüseanbau genutzt. Offenbar waren viele Flächen in steileren und höheren Lagen als Ackerland ungeeignet. Mit Ausnahme von Ödland spielten alle anderen untersuchten Landbedeckungstypen nur eine untergeordnete Rolle.



Anteile der Landbedeckungstypen und Landnutzungstypen in den österreichischen Einzugsgebieten von Rhein, Salzach und Drau in % (linke Säulen: 1826–1859, rechts: 2016; verändert nach HOHENSINNER et al., 2021a). Bis 2016 ist eine erhebliche Ausweitung der bewaldeten Flächen (von 37 auf 45 % des Untersuchungsgebiets) zu verzeichnen (Abb. 4). Auch das Grünland nahm von 22 auf 33 % erheblich zu, während die Ackerflächen einen deutlichen Rückgang auf nur mehr 3,4 % im Jahr 2016 erfuhren. Ein ähnlicher Rückgang ist bei spärlich bewaldeten Flächen ersichtlich, der auf eine anthropogene Umwandlung in Grünland oder Wälder hindeutet. Es überrascht nicht, dass sich die Siedlungsflächen seit der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts enorm vergrößert haben. Heute sind sie sechsmal größer. Flüsse und kleinere Bäche wurden durch Flussbegradigungen und Gerinneeinengungen um 40 % verringert. Feuchtgebiete, das heißt Sümpfe, Moore und Schilfgebiete, sind nahezu verschwunden. Ähnlich verhält es sich mit den vergletscherten Flächen: Sie sind von 2,6 auf 0,7 % des gesamten Untersuchungsgebiets stark zurückgegangen. Der dramatische Rückzug der Gletscher ließe eine deutliche Zunahme der Ödlandflächen erwarten. Im Jahr 2016 wiesen sie jedoch sogar einen etwas geringeren Flächenanteil auf als zwischen 1826 und 1859. Das bedeutet, dass große Flächen ehemaligen Ödlandes bis heute von Vegetation besiedelt wurden.

Abbildung 5 veranschaulicht die für das gesamte Untersuchungsgebiet festgestellten Veränderungen im Detail. Seit 1826–1859 hat sich die Region um Österreichs höchste







Abb. 6

Räumliche Verteilung der alpinen Fließgewässerkorridore bei etwa 300-jährlichen Hochwassern zwischen 1826 und 1859 (blau) innerhalb des Untersuchungsgebiets (rot) (Hintergrund: Reliefkarte Österreichs (2018) von Tschubby – CC BY-SA 3.0; verändert nach HOHENSINNER et al., 2021a).

Gipfel in den Zentralalpen stark gewandelt. Am augenfälligsten ist der umfassende Rückzug der größten Gletscher Österreichs wie der Pasterze am Großglockner. Parallel dazu drangen alpines Grünland und teilweise spärliche bewaldete Flächen (z.B. Krummholz) in höhere Lagen vor. Der Talboden der Salzach nördlich der Gletscher war ursprünglich durch ausgedehnte Sümpfe und Röhrichte gekennzeichnet (Abb. 5a). Im Jahr 2016 sind sie weitgehend verschwunden. Dies ging mit einer enormen Ausdehnung der Siedlungsflächen einher (Abb. 5b). Darüber hinaus sind neue stehende Gewässer, z.B. Stauseen, die nach dem Zweiten Weltkrieg für die Energieerzeugung angelegt wurden, heute ein dominierendes Landschaftsmerkmal. Einige von ihnen haben ehemalige alpine Feuchtgebiete ersetzt. Zudem wurden im Salzachtal ehemalige Ackerflächen in Grünland umgewandelt.

## 3.2.2 Veränderung der Landbedeckung in alpinen Fließgewässerkorridoren

Die Veränderungen der Landbedeckung und Landnutzung in den Korridoren der Fließgewässer, das heißt in Gebieten, die bei einem 300-jährlichen Hochwasser überschwemmungsgefährdet waren/sind, spiegeln die Entwicklung im gesamten Einzugsgebiet wider (Abb. 6, 7). Einige Arten der Bodenbedeckung in solchen Gebieten – von denen sich die überwiegende Mehrheit in den breiteren Talsohlen befindet – haben sich sogar stärker verändert.

Historisch gesehen machte hier, im Gegensatz zum gesamten Untersuchungsgebiet, das Grünland den größten Flächenanteil aus, gefolgt von Ackerland (29 bzw. 22 %; Abb. 7; HOHENSINNER et al., 2021a). Zwischen 1826 und 1859 waren nur 15 % dieser Korridore von (Au-)Wäldern



bedeckt. Im Vergleich zu den stehenden Gewässern dominierten die Fließgewässer mit 13 % eindeutig die Talböden. Kein Wunder, dass der Flächenanteil der Feuchtgebiete (7,3 %) deutlich höher war als im gesamten Untersuchungsgebiet. Auch die Siedlungen beanspruchten in den Fließgewässerkorridoren deutlich höhere Flächenanteile. Wie in Abbildung 5 dargestellt, war die Entwicklung der Siedlungen eng mit den Flusskorridoren verbunden. Im Jahr 2016 nahmen sie 7,5 Mal größere Flächen ein als zwischen 1826 und 1859 (Abb. 7).

Der Rückgang der Fließgewässer war geringer, als man angesichts der systematischen Regulierungsprogramme erwarten könnte (HOHENSINNER et al., 2021a). In dieser Hinsicht war vor allem der Bau großer Stauanlagen an der Drau in Kärnten dafür verantwortlich, die enormen Flächenverluste durch die Regulierung der Flüsse teilweise zu kompensieren. Im Gegensatz dazu wurden die Feuchtgebiete um 95 % ihrer früheren Ausdehnung beschnitten. In engem Zusammenhang mit dieser starken Schrumpfung der Feuchtgebiete steht die Zunahme der Grünlandflächen von 29 auf 45 % der Flusskorridore. Die neu gewonnenen Flächen wurden jedoch teilweise auch für den Anbau von Feldfrüchten genutzt. Dennoch wurde auch die Ackerfläche entlang der Flüsse um ein Drittel reduziert. Die Aufgabe der landwirtschaftlichen Nutzung in ehemals spärlich bewaldeten Flächen (Obstbaumwiesen und teilweise bewaldete Weiden) sowie im Grünland spiegelt sich in der Zunahme des Waldanteils von ehemals 15 auf 20 % im Jahr 2016 wider.

Neben der seit dem 19. Jahrhundert veränderten Zusammensetzung der Landbedeckung in den Fließgewässerkorridoren wurde auch die Gesamtausdehnung der potentiellen Überschwemmungsgebiete durch menschliche Eingriffe beeinflusst. Im Jahr 2016 betrugen die Überschwemmungsflächen bei etwa 300-jährlichen Hochwassern im gesamten Untersuchungsgebiet 1.247 km². Dieser Wert ist als Minimum zu betrachten, da für zahlreiche kleinere Bäche keine Daten über die zugehörigen Überschwemmungsgebiete vorliegen. Bei Hochwasserständen, die mit dem heutigen 300-jährlichen Hochwasser vergleichbar sind, waren die Überflutungsgebiete in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts deutlich größer (1.450 km<sup>2</sup>). Seitdem wurden sie für die Gewinnung von besser nutzbaren Flächen und im Rahmen von Hochwasserschutzmaßnahmen um 203 km<sup>2</sup> oder 14 % verkleinert.

## 3.2.3 Höhenzonale Verteilung der alpinen Landbedeckung

Die dreidimensionale Analyse der einzelnen Landbedeckungstypen gibt weitere Einblicke in ihre räumliche Organisation im historischen und aktuellen Zustand. Historisch gesehen erstreckte sich der Gradient zunehmender Höhenlagen von den Siedlungsgebieten als niedrigste bis zu den Gletschern als höchste (Abb. 8; HOHENSINNER et al., 2021a). Zwischen 1826 und 1859 lag die mittlere Höhe der Siedlungsgebiete bei 599 m. Bis 2016 ist dieser Wert deutlich auf 498 m gesunken, da sich die Siedlungsgebiete vor allem in tief gelegenen Talböden ausbreiteten (vgl. Salzachtal in Abbildung 5). Gleichzeitig stießen kleinere Siedlungen und größere Straßen in höhere Alpenregionen vor. Auch das Ackerland befand sich vor allem in den tiefer gelegenen Talböden. Seit dem 19. Jahrhundert ist die mittlere Höhenlage von ehemals 698 auf 513 m im Jahr 2016 gesunken. Der Boxplot in Abbildung 8 zeigt, dass sich die Ackerflächen heute weitgehend auf etwa 500 m konzentrieren. Die nächsthöhere Landbedeckungsklasse sind Wälder, deren Medianwert nur geringfügig von 1.149 auf 1.167 m angestiegen ist. Dennoch reichen die Wälder heute an einigen Orten in höhere Lagen.

Spärlich bewaldete Flächen – darunter die alpine Krummholzzone – als nächsthöhere Landbedeckungsart wiesen in der Vergangenheit eine mittlere Höhe von 1.399 m auf. Heute liegt dieser Wert deutlich höher (1.609 m; Abb. 8). Das Grünland verdient eine genauere Betrachtung, da es in den letzten 170 Jahren einen gegenläufigen Trend zeigte. Ausgehend von einem historischen Mittel von 1.588 m Seehöhe liegt der vergleichbare aktuelle Wert hingegen mit 1.291 m deutlich niedriger. Diese Werte spiegeln die Außernutzungsstellung alpiner Weiden und Wiesen in ungünstigen Hochlagen und die Umwandlung von Ackerland in Grünland in tiefer gelegenen Talböden wider.

Das alpine Ödland hat sich zu Beginn des 21. Jahrhunderts deutlich um 173 m von ehemals 2.286 auf 2.459 m verschoben (Abb. 8). In ähnlicher Weise haben sich die Gletscher seit etwa 1860 erheblich zurückgezogen. Ihre mittlere Höhe stieg um 187 m von ehemals 2.729 auf 2.916 m an.

# 3.3 Schlussfolgerungen

Basierend auf den neu erstellten Datensätzen zur historischen und aktuellen Landbedeckung in den österreichischen Alpen lassen sich folgende Erkenntnisse im Hinblick auf das alpine Hochwasserrisiko ableiten (HOHENSINNER et al., 2021a):

(1) Die Einzugsgebiete von Rhein, Salzach und Drau in Österreich erfuhren seit Beginn der Industrialisierung eine umfassende Transformation. Im Jahr 2016 war die Siedlungsfläche sechsmal größer als vor 170 Jahren. Die landwirtschaftlich genutzten Flächen gingen um rund 27 % zurück, wobei die Ackerflächen sogar um 69 % reduziert wurden. Die Aufgabe von landwirtschaftlichen Flächen in ungünstigen Lagen spiegelt sich in einer Zunahme der Wälder von 37 auf 45 % im gesamten Untersuchungsgebiet wider. Die Gletscher verloren etwa 73 % ihrer früheren Ausdehnung.

(2) Die alpinen Flusskorridore, das heißt hochwassergefährdete Gebiete bei ca. 300-jährlichen Hochwassern, spiegeln die Konzentration der menschlichen Landnutzung direkter wider als die einzugsgebietsweite Perspektive. Hier hat sich die Besiedlung um das 7,5-fache ausgedehnt, wodurch sich das Potential für Hochwasserschäden stark erhöht. Im Gegensatz dazu verringerte sich die gesamte Fläche der Fließgewässer um 40 % und 95 % der ehemals großen Feuchtgebiete wurden in landwirtschaftliche Flächen, Wälder oder Siedlungsgebiete umgewandelt. Bis 2016 gingen rund 203 km<sup>2</sup> oder 14 % der ehemaligen Flusskorridore verloren, wodurch sich die Hochwasserrückhaltekapazität verringerte. Retentionsflächen, die bei einem 100-jährlichen Hochwasser überflutet werden, weisen wahrscheinlich deutlich größere Flächenverluste auf, konnten aber im Rahmen der vorliegenden Studie nicht quantifiziert werden.



Höhenverteilung von Siedlungsgebieten, Ackerland, Wäldern, spärlich bewaldeten Gebieten (Krummholz), Grünland, Ödland und Gletschern in den österreichischen Einzugsgebieten des Rheins, der Salzach und der Drau (verändert nach HOHENSINNER et al., 2021a).

(3) Die Konzentration intensiver menschlicher Landnutzungsformen in tieferen Lagen einerseits und die Verschiebung weniger intensiver, naturnaher Nutzungen in höhere Lagen andererseits führte langfristig sowohl zu einer räumlichen als auch zu einer vertikalen Separation der alpinen Landschaftselemente (Abb. 9). Insbesondere Siedlungsflächen und Ackerland konzentrieren sich heute in tieferen Lagen als noch im 19. Jahrhundert. Wärmere Temperaturen als Folge des Klimawandels könnten die bereits festgestellten Verlagerungen der alpinen Vegetation bergwärts noch verstärken. Diese Studie zeigt, dass die veränderten landschaftlichen Rahmenbedingungen einer Zunahme der Hochwasserrisiken in den alpinen Tallagen generell Vorschub leisten. Menschliche Eingriffe im alpinen Raum spiegeln sich in Veränderungen der Landbedeckung wider, die entweder das Hochwasserrisiko erhöhen (Siedlungsausweitung, Urbarmachung ehemaliger Gewässerflächen und Feuchtgebiete usw.) oder das Risiko vermindern (Aufgabe von landwirtschaftlichen Flächen, Aufforstung usw.). Dabei ist aber zu beachten, dass der Einfluss von Landbedeckungsänderungen auf das Hochwasserregime in kleineren, flussauf-



Abb. 9.

Höhenverschiebungen (Y-Achse) und Veränderungen der Flächenausdehnung (X-Achse) ausgewählter Typen der Landbedeckung/Landnutzung zwischen 1826-1859 und 2016. Die Höhenwerte beziehen sich auf die Medianwerte der Höhenlagen: die Kreisgröße spiegelt die relativen Veränderungen der Flächenausdehnung wider (Pfeile: Entwicklung von 1826-1859 bis 2016; verändert nach Hohensinner et al., 2021a).

wärts gelegenen Einzugsgebieten in der Regel größer ist als in breiteren, tiefer gelegenen Tälern, in denen sich die meisten größeren Siedlungen befinden. Hier wirken sich der Klimawandel, Hochwasserschutzeinrichtungen und Flussregulierungen stärker auf das Hochwasserrisiko aus (VIGLIONE et al., 2016; BLÖSCHL, 2020). Um die Rolle von Landbedeckungsveränderungen für das alpine Hochwasserrisiko genauer zu bestimmen, sollen die präsentierten Daten für weitere Analysen mittels räumlich expliziter Niederschlag-Abfluss-Modelle verwendet werden.

# 4 Hochwasserretention in alpinen Gebieten

Hochwasserrisiko setzt sich aus der Hochwassergefährdung und der Hochwasserexposition zusammen. Vereinfacht bedeutet dies, dass es eine Gefahr (z.B. Überflutungen durch einen über das Ufer tretenden Fluss) und entsprechend gefährdete Werte (Häuser, Infrastruktur, Menschen) benötigt, dass ein Hochwasserrisiko besteht. Die Hochwassergefahr in alpinen Gebieten wird von den natürlichen Gegebenheiten wie der Vegetation, Topografie und den hydroklimatischen Verhältnissen bestimmt. Gleichzeitig wurden mit dem Bau von ersten großen Wasserkraftwerken in Österreich, am Beginn des 20. Jahrhunderts (z.B. Speicher Wiestal) (WAGNER et al., 2015), mit großen künstlichen Stauseen Möglichkeiten zum Hochwasserrückhalt in den Quellgebieten geschaffen, die ein erhebliches Potential zur Abminderung von Abflussspitzen und zur Reduktion der Hochwassergefährdung bereitstellen.

Abbildung 10 zeigt die Abflussdaten des Zemmbachs (Zillertal) von 1956 bis 2017, in dessen Oberlauf der Stausee Schlegeis der Kraftwerksgruppe Zemm-Ziller liegt. Es ist eine deutliche Veränderung der Abflusscharakteristik nach der Errichtung des Speichers im Jahr 1971 erkennbar. Das mittlere jährliche Abflussmaximum (MJHQ) von 1971 bis 2017 ist mit 16,8 m3/s im Vergleich zum MJHQ vor 1971 mit 54,8 m3/s um 69 % geringer. Dieses Beispiel zeigt sehr deutlich, wie alpine Speicher Spitzenabflüsse reduzieren und das gesamte Abflussregime verändern können. Gleichzeitig ist das primäre Ziel dieser Anlagen die Energieerzeugung. Explizite Absenkungen für den Hochwasserschutz oder generell ein Speicherbetrieb im Sinne des Hochwasserrisikomanagements sind bis auf wenige Ausnahmen nicht vorgesehen. Die bisher durchgeführten Analysen, welche die Auswirkungen von Speicherseen auf Hochwasserspitzen in Österreich untersuchten, fokussier-



ten sich größtenteils auf einzelne Hochwasserereignisse (z.B. LAUFFER, 1975; KUGI & WEISSEL, 1986; GANAHL, 1988; PIRCHER, 1990; HOFER et al., 2013).

Der Kraftwerksbetrieb und die Öffnung von Wehren kann aber gleichzeitig die Hochwassergefahr flussabwärts erhöhen und beeinflussen. Nach Hochwasserereignissen mit Überflutungen im Unterlauf sehen sich Wasserkraftunternehmen in Österreich häufig dem Vorwurf ausgesetzt, dass die Stauseen unzureichend bewirtschaftet wurden, um die Hochwassergefahr zu reduzieren (z.B. Donau 2013, Drau 2012 oder Kamp 2002; vgl. BMLFUW, 2016a). Ungeachtet des Potentials zur Reduktion der Hochwassergefahr besteht in der Regel für die Betreiber von Wasserkraftwerken keine gesetzliche Verpflichtung zur Übernahme von Verantwortung im Hochwasserrisikomanagement, da ihr primäres Ziel die Stromerzeugung ist (WAGNER et al., 2015).

Neben der Erhöhung des Rückhaltepotentials durch künstliche Speicher haben menschliche Aktivitäten wie Veränderungen der Landnutzung und Bodenbedeckung im Zusammenhang mit der Forstwirtschaft (Forststraßen/Abholzung/ Aufforstung) oder der Infrastruktur- und Siedlungsentwicklung in den Talböden, aber auch die Intensivierung des Tourismus, z.B. durch den Bau von Skipisten, das natürliche Hochwasserrückhaltepotential reduziert und gleichzeitig die Hochwasserexposition erhöht (BMLFUW, 2007; LÖSCHNER et al., 2017; TASSER et al., 2007; WESEMANN et al., 2017). In den alpinen Gebieten Österreichs kam es seit Mitte des 19. Jahrhunderts zu einer umfangreichen Veränderung der Landnutzung (Kap. 3.1). Diese Veränderungen führten zu einem allgemeinen Anstieg des Hochwasserrisikos in alpinen Talschaften (HOHENSINNER et al., 2021a). Grundsätzlich sind die Auswirkungen der Landnutzungsänderung auf Hochwasserregime in kleineren Kopfeinzugsgebieten stärker. In größeren Einzugsgebieten sind andere Faktoren wie Flussbegradigungen, der Verlust von Überschwemmungsgebieten und Veränderungen der atmosphärischen Bedingungen dominanter (VIGLIONE et al., 2016). Numerische Simulationen zeigen beispielsweise, dass Hochwasserspitzen in kleinen Kopfeinzugsgebieten durch Forststraßen um 75 % erhöht werden können (WESEMANN, 2021). Angesichts der starken Änderung der Landnutzung kommt es auch zu Verschiebungen im natürlichen Wasser-Retentionsvermögen der Landschaft und dadurch auch beim Hochwasserrisiko. Am Beispiel des Lechtals wurde auf der Grundlage von verschiedenen Landnutzungsänderungsszenarien für die nahe Zukunft (2030) ermittelt, dass es in Abhängigkeit vom gewählten Szenario zu keiner Hochwasserbetroffenheit oder bis zu einem maximalen Anstieg von 159 % der von Hochwasser betroffenen Wohngebiete kommen kann (CAMMERER et al., 2013). Durch Anpassungen von nicht strukturellen Maßnahmen, wie strengere Landnutzungsvorschriften oder private Initiativen (z.B. Bauverbote in gelben und roten Zonen, erhöhte Hochwasserrisikokommunikation) kann das Hochwasserrisiko im Lechtal gleichzeitig um bis zu 30 % reduziert werden (THIEKEN et al., 2016). Diese Arbeiten zeigen potentielle Verbesserungen, aber auch Verschlechterungen des Hochwasserrisikos, die durch die Veränderung der Landnutzung entstehen können. Eine sehr starke Rolle spielt die Umwandlung von landwirtschaftlichen Flächen zu Siedlungs- und Industriegebieten, sowie Verkehrsflächen und Freizeiteinrichtungen, in den ohnehin schon sehr limitierten Flächen, die in den Österreichischen Alpen für Siedlungsentwicklungen zur Verfügung stehen (JUNGER et al., 2022). Im Zeitraum von 2018 bis 2020 wurden die produktiven Böden in Österreich im Durchschnitt um 42 km<sup>2</sup> pro Jahr verringert. Davon wurden rund 41 % (ca. 15– 20 km<sup>2</sup> pro Jahr) versiegelt, was einen dauerhaften Verlust der Böden und der Bodenfunktionen (z.B. Bodenneubildung, Zerschneidung von Lebensräumen, erhöhtes Hochwasserrisiko) bedeutet (UMWELTBUNDESAMT, 2022).

Um die sektoralen Zusammenhänge zwischen Hochwasserrückhalt in alpinen Gebieten und Hochwasser zu beurteilen, erfolgt eine Problemanalyse durch die Untersuchung (i) des Hochwasserrückhaltevermögens von Speicherkraftwerken in Österreich und (ii) der Veränderungen des natürlichen Wasserrückhalts im Vergleich zwischen der historischen und aktuellen Landnutzung und Landbedeckung. Im Anschluss erfolgt die Darstellung der sektoralen Politikkoordination im Interaktionsfeld Wasserkraft, bei dem mittels Experteninterviews mit verschiedenen Akteurinnen und Akteuren Synergien und Konflikte zwischen Wasserkraftwerksbetreibern und dem Hochwasserrisikomanagement analysiert werden. Anhand einer Fallstudie wird aufgezeigt, wie die zur Verfügung stehenden Instrumente der Koordination im Interaktionsfeld Wasserkraft angewandt und umgesetzt werden.

## 4.1 Methodik

Die vorliegende Problemanalyse zum Hochwasserrückhaltevermögen von Speicherkraftwerken zielt darauf ab, den Einfluss von Speicherkraftwerken auf das Hochwassergeschehen zu untersuchen. Die Problemanalyse umfasst (i) die Quantifizierung des potentiellen Hochwasserrückhalts durch Speicherkraftwerke und die Auswirkungen entlang des beeinflussten Unterlaufs, (ii) eine Abschätzung der möglichen Hochwasserrisikominderung durch die Beurteilung der jeweiligen Ereignisjährlichkeit, sowie (iii) die Bewertung der Beziehung zwischen der geschätzten Hochwasserscheitelreduzierung und den Eigenschaften des Einzugsgebiets und des Stausees. Analysiert werden dabei nicht nur ausgewählte Extremereignisse, wie dies in der Vergangenheit der Fall war. Vielmehr erfolgt eine systematische Analyse der jährlichen maximalen Abflussspitzen aus langjährigen Abflussaufzeichnungen mit verschieden Jährlichkeiten und Wiederkehrperioden, was bereits von WIDMANN (1988) gefordert wurde. Untersucht werden sowohl die wesentlichen alpinen Speicherkraftwerke und Kraftwerksgruppen in Österreich, als auch die Staukette am Kamp mit Einzugsgebietsgrößen von 955 km<sup>2</sup> bis 9.310 km<sup>2</sup> (Abb. 11). Diese Wasserkraftwerke produzieren einen Großteil der Energie aller Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke in Österreich (ICOLD, 2021; WAGNER et al., 2015).

Bestehende internationale und nationale Untersuchungen analysierten die Auswirkungen von Stauseen auf Hochwasserereignisse, indem sie (i) Abflussdaten stromauf- und stromabwärts von Stauseen (GRAF, 2006), (ii) Abflussdaten vor und nach der Errichtung der Stauseen (KONDOLF & BA-TALLA, 2005; MEI et al., 2017) oder (iii) eine umfassendere Datenbasis, wie Zu- und Abflüsse zu den Stauseen, Informationen zum Speicherbetrieb oder zu Zu- und Ableitungen, für detaillierte ereignisbasierte Analysen verwenden (GANAHL, 1988; HOFER et al., 2013). Für die vorliegende Studie sind diese Ansätze keine Option, da diese Daten für





die meisten analysierten Speicherkraftwerke nicht frei verfügbar sind. Es wird ein Ansatz verwendet, bei dem beobachtete und beeinflusste Abflussspitzen einem geschätzten, natürlichen Abflusswert (ohne Kraftwerkseinfluss) gegenübergestellt werden. Um - als Referenz - die natürlichen, von Speicherkraftwerken unbeeinflussten, maximalen Jahresabflüsse flussab der Staumauern zu schätzen, werden Abflussaufzeichnungen von anthropogenen unbeeinflussten Einzugsgebieten herangezogen. Es wird dabei angenommen, dass hydroklimatische und hydrogeologische Verhältnisse in nahen beieinanderliegenden Einzugsgebieten ähnlich und daher die Hochwasserreaktionen vergleichbar sind (MERZ & BLÖSCHL, 2005). Unter Berücksichtigung der entsprechenden räumlichen Nähe, der Einzugsgebietsfläche und der vorherrschenden Niederschlagsverhältnisse werden die Jahresabflussspitzen von unbeeinflussten Einzugsbieten auf die von Speicherkraftwerken beeinflussten untersuchten Pegel übertragen und mit diesen in Relation gesetzt. Die Entfernung zwischen den beeinflussten und den unbeeinflussten Pegeln liegt dabei zwischen 6,6 km und 39,1 km. Eine detailliertere Erläuterung der Methodik und der Ergebnisse findet sich in STECHER & HERRNEGGER (2022) und wird daher hier nicht wiederholt.

Die Problemanalyse zur Veränderung des natürlichen Wasserrückhaltepotentials wurde auf Basis der in Kapitel 3 beschriebenen historischen und aktuellen Landnutzungsdaten durchgeführt. Im Allgemeinen zielt integriertes Hochwasserrisikomanagement darauf ab, die Intensität von und die Anfälligkeit für Überschwemmungen auf der Grundlage eines Portfolios von Ansätzen, die strukturelle und nicht-strukturelle Maßnahmen umfassen (VAN HERK et al., 2015), zu reduzieren. Wie auch in der EU-Hochwasserrichtlinie (EU-HWRL 2007) beschrieben, kann die Förderung nachhaltiger Flächennutzung als auch die Verbesserung des Wasserrückhalts und die kontrollierte Überflutung bestimmter Gebiete im Falle eines Hochwasserreignisses in Hochwasserrisikomanagementpläne miteinbezogen werden. Daher spielt die Flächen- bzw. Landnutzung

٧

eine wesentliche Rolle im Integrierten Hochwasserrisikomanagement. Diese verändert sich laufend und beeinflusst dadurch die Hochwassergefährdung und das Hochwasserrisiko.

HOHENSINNER et al. (2021a) haben die Landnutzungsänderungen in Österreich mit Schwerpunkt auf alpinen Gebieten umfassend und in sehr hoher Auflösung analysiert (Kap. 3.1). Um zu ermitteln, wie sich die Landnutzungsänderung von der Mitte des 19. Jahrhunderts bis zur Gegenwart auf den natürlichen Wasserrückhalt der Landschaft auswirkt, wurde der Wasserretentionsindex (Water Retention Index - WRI) auf Basis der historischen und heutigen Landnutzung berechnet. Der WRI ist ein gualitativer Indikator, der das potentielle Wasserretentionsvermögen der Landschaft auf einer relativen Skala von 0 bis 10 darstellt. Der Index wurde von VANDECASTEELE et al. (2018) entwickelt, um die Fähigkeit der Landschaft zur Wasserregulierung und damit auch zur Verringerung des Risikos von Hochwasser, aber auch von Dürreperioden abzubilden. Der Indikator zielt darauf ab, die physikalischen Prozesse der Interzeption, Infiltration sowie Wasserspeicherung und Wasserretention im Boden, der Versickerung in das Grundwasser und der Wasserspeicherung in fließenden und stehenden Oberflächengewässern anhand von Proxydaten darzustellen. Als zusätzliche Daten, die das Wasserretentionspotential beeinflussen, wird die Hangneigung und der Anteil der versiegelten Fläche bei der Berechnung des Indikators berücksichtigt (VANDECASTEELE et al., 2018). Im vorliegenden Fall wurde der WRI für alpine Gebiete in Österreich in einer Auflösung von 100 x 100 m berechnet. Das Untersuchungsgebiet umfasst die österreichischen Einzugsgebiete von Rhein, Salzach und Drau. Der abgedeckte Bereich entspricht dabei den Analysen in HOHENSINNER et al. (2021a) (Kap. 3.1), von denen die Landnutzungsdaten stammen. Der WRI wird als gewichtete Summe verschiedener flächiger Parameter, die Elemente im Hochwasserrückhalt der Landschaft darstellen, berechnet:

$$VRI = (R_{gw} * w_{gw} + R_s * w_s + R_v * w_v + R_{sI} * w_{sI} + R_{wb} * w_{wb}) * (1 - \frac{R_{SS}}{100})$$
(Gleichung 1)

**R**<sub>aw</sub> wurde anhand des Datensatzes von HUSCROFT et al. (2018), welcher die Durchlässigkeit des festen und lockeren Bodens angibt, abgeleitet. Die Durchlässigkeit gibt an, wie viel Wasser potentiell in das Grundwasser versickern und gespeichert werden kann. Zur Ableitung des Indikators R<sub>s</sub>, der die Infiltrations- und Retentionskapazitäten des Bodens widerspiegelt, wurden die Bodenwasserspeicherinformationen von ZEITFOGEL et al. (2021) verwendet. Der potentielle Rückhalt durch die Vegetation wird durch den Parameter R<sub>v</sub> dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass die Fähigkeit der Vegetation, Wasser aufzunehmen und zurückzuhalten, linear mit dem Blattflächenindex (LAI) zusammenhängt. Deshalb wurde zur Ableitung dieses Parameters der mittlere Blattflächenindex von 2014 bis 2020 herangezogen (ESA GLOBAL LAND SERVICES, 2021). Der Neigungsparameter  $R_{sl}$  wurde aus dem für Österreich frei verfügbaren digitalen Höhenmodell abgeleitet (data. gv.at). Die Parameter Rwb und Rss, die den Anteil der Gewässer (stehende/fließende Gewässer) inklusive Feuchtgebiete bzw. versiegelte Fläche darstellen, wurden auf Basis

des aktuellen Landnutzungsdatensatzes aus HOHENSINNER et al. (2021a) abgeleitet. Da die räumliche Auflösung der für die Berechnung verwendeten Datensätze unterschiedlich ist bzw. diese nicht als Rasterdaten vorliegen, wurden alle Datensätze zu Rasterdatensätze mit einer konsistente Auflösung von 100 m transformiert. Die Parameter **R**<sub>wb</sub> und **R**<sub>ss</sub> wurden aus den Landnutzungsdaten abgeleitet und stellen den prozentualen Anteil der Wasserflächen bzw. der versiegelten Fläche pro Rasterzelle dar. Mit Ausnahme des Parameters der versiegelten Fläche (Rss) wurden alle Parameter von 0 bis 10 neu skaliert. Der Parameter R<sub>st</sub> wurde invers zwischen 0 und 10 skaliert, um steilen Hängen niedrige Werte und flachen Gebieten hohe Werte zuzuordnen. Die einzelnen Parameter sind in Abbildung 12 dargestellt. Auch aufgrund der relativ hohen Auflösung lässt sich ein klares räumliches Muster erkennen. Der alpine Charakter der Untersuchungsgebiete mit den großen Tälern und hohen Gebirgszügen ist in mehreren Parametern, darunter  $R_{gw}$ ,  $R_s$ ,  $R_{sl}$  und  $R_{ss}$ , deutlich zu erkennen.



Parameter des Wasserretentionsindex (WRI).

Die Gewichtungen der einzelnen Parameter in Gleichung 1 wurde mit Hilfe des COMPOSITE INDICATOR ANALYSIS AND OPTIMIZATION TOOL (CIAOv.2) (LINDEN et al., 2018) durchgeführt. Die Optimierung der Parametergewichte zielt darauf ab, dass jeder Parameter zu gleichen Anteilen zur Gesamtvarianz des WRI beiträgt (VANDECASTEELE et al., 2018).

Für die Berechnung des historischen WRI wurden die Parameter  $R_{wb}$  und  $R_{ss}$  aus dem historischen Landnutzungsdatensatz direkt abgeleitet. Um die Veränderung der Landnutzung im historischen Vegetationsparameter  $R_v$  darzustellen, wurden für die jeweiligen Landnutzungsklassen und Einzugsgebiete des *LamaH Datensatzes* (KLINGLER et al., 2021) mittlere Werte des aktuellen Vegetationsparameters  $R_v$  auf die entsprechenden historischen Landnutzungsklassen und Einzugsgebiete übertragen. Durch das Miteinbeziehen der Einzugsgebietsgliederung können räumliche Abhängigkeiten bei der Übertragung berücksichtigt werden. Die übrigen Parameter wurden für die Berechnung des historischen WRI unverändert beibehalten.

Für die Analyse der sektoralen Politikkoordination im Interaktionsfeld Wasserkraft wurden eine Literatur- und Dokumentenanalyse sowie zehn Interviews mit Experten und Expertinnen durchgeführt. Die betrieblichen Anforderungen und Auswirkungen von Wasserkraftwerken sind Gegenstand kontroverser Sichtweisen und Erzählungen, wenn es um den Hochwasserrückhalt geht. Eine Sichtweise ist, dass der Bau von Wasserkraftwerken zu einem Verlust von Retentionsraum durch Kanalisierungsmaßnahmen führt und damit eine natürliche Hochwasserdämpfung unmöglich macht (WWF, 2009). Eine andere Perspektive argumentiert, dass Stauseen die Wasserretentionskapazität innerhalb des Tals, in dem sie sich befinden, deutlich erhöhen können (SCHÖBERL, 2003) und in der Lage sind, die Hochwasserspitze zu reduzieren (HAUENSTEIN, 2009; STECHER & HERRNEGGER, 2022). Um diese potentiellen Konflikte als auch Synergien durch die Nutzung von Speicherkraftwerken zu analysieren, wurden daher Interviews durchgeführt. Die Interviewpartner vertraten dabei verschiedene Organisationen bzw. Bereiche: Bundesministerien, Wasserbauverwaltungen der Länder, Kraftwerksbetreiber, Wissenschaft und Umweltverbände. Anhand der durchgeführten Interviews wurden die verschiedenen Formen der Zusammenarbeit als auch mögliche Kontroversen zwischen Akteurinnen und Akteuren analysiert, die im Hochwasserrisikomanagement beteiligt sind. Die Interviews konzentrieren sich auf die Anforderungen und Spannungen zwischen der Energie- und Wasserwirtschaft. Zu diesem Zweck wurden verschiedene potentielle Interviewpartner aus verschiedenen Bereichen und Ebenen für Interviews angefragt. Um die Interviews in einem konsistenten und nachvollziehbaren Rahmen durchzuführen, wurde hierfür ein Interview-Leitfaden erstellt. Folgende Bereiche wurden dabei abgedeckt: (i) Eröffnungsfrage, (ii) Rechtliche Grundlagen/ Prozesse, (iii) Hemmnisse und Fördernde Faktoren, (iv) Klimawandel und (v) Beispielprojekte. Die Interviewdauer betrug zwischen 45 und 90 Minuten. Alle Interviews wurden vollständig transkribiert und mit Hilfe des Softwareprogrammes MAXQDA 2020 systematisch im Rahmen einer qualitativen Datenanalyse ausgewertet.

Die Fallstudie dient zur Bewertung der Wirksamkeit von sektoraler Politikkoordination anhand eines ausgewählten Falles, in dem ein sektorübergreifender Ansatz zwischen Wasserkraftwerksbetreiber und Hochwasserrisikomanagement gezielt umgesetzt wurde. Als Fall haben wir die Änderung der Wehrbetriebsordnungen für die Kraftwerkskette an der Drau (Kärnten) nach dem Hochwasserereignis 2012 ausgewählt. Für die Einzelfallstudie wurde methodisch ebenfalls eine Literatur- und Dokumentenanalyse mit Interviews von Expertinnen und Experten kombiniert. Die Interviews wurden mit Personen und Institutionen geführt, die in den Koordinationsprozess direkt involviert waren. Der Interview-Leitfaden deckte folgende inhaltlichen Bereiche ab: (i) Hintergrund und Hochwasserereignis 2012, (ii) Prozess zur Änderung der Wehrbetriebsordnungen bis 2014, (iii) Behördliche Anordnung der Stauseeabsenkung in 2018 und 2019 und (iv) Bewertung der Koordination. In diesem Sinne waren die Interviews aus einer prozessorientierten Sicht sehr nützlich, um aufzuzeigen, welche Koordinationsinstrumente verwendet wurden und wie diese Instrumente eingesetzt wurden. Alle Interviews wurden transkribiert und mittels MAXQDA 2020 ausgewertet.

# 4.2 Hochwasserrückhalt von Speicherkraftwerken

Abbildung 13 zeigt den Einfluss der Speicherseen auf Jahreshochwasser für Pegel flussab der untersuchten Speicherkraftwerke. Am Kopf jeder Grafik ist der Zeitraum der analysierten Zeitreihe angegeben. Im Oberlauf der Ziller und der Drau befinden sich mehrere Stauseen an verschiedenen Zubringern. Die Auswirkungen der Stauseen entlang dieser Zubringer sind einzeln dargestellt und die Lage des Zusammenflusses ist in den entsprechenden Darstellungen mit einem Stern gekennzeichnet.

Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse eine deutliche Hochwasserscheitelreduktion an allen Pegeln. Diese Reduktion nimmt entlang der Fließstrecke, mit zunehmender Einzugsgebietsgröße, ab. Im Durchschnitt ist die Verringerung der Hochwasserspitze an den ersten Pegeln flussabwärts eines Stausees am stärksten und beträgt im Mittel 63 %. An den zweiten Pegeln flussab der Stauseen sinkt die mittlere Hochwasserscheitelreduktion auf 26,5 %. Weiter flussabwärts schwächt sich die Reduktion weiter ab. Verglichen mit der Gesamtanzahl (n = 838) der analysierten Hochwasserereignisse an allen Pegeln zeigen etwa 5.5 % der Ereignisse (n = 46) einen Anstieg des jeweiligen maximalen jährlichen Abflusses. Dies entspricht einem Anstieg des beeinflussten Abflusses im Vergleich zum geschätzten natürlichen Abfluss. Zusätzlich sind auch die Jährlichkeiten der analysierten Ergebnisse, basierend auf GUMBEL (1958) dargestellt. Im Allgemeinen weisen Hochwasser mit niedrigeren Jährlichkeiten (< HQ<sub>5</sub>), die also häufiger auftreten, die größte Scheitelreduktion auf. Diese Ereignisse werden im Mittel um über 35 % reduziert. Hochwasserabflüsse zwischen einem  $HQ_5$  und  $HQ_{10}$  werden im Durchschnitt um 31 % abgedämpft. Weiters konnte festgestellt werden, dass Ereignisse mit einer geringeren Auftrittswahrscheinlichkeit (HQ10-HQ30) mit einer mittleren Reduktion von 23 % am wenigsten reduziert werden. Extremere Ereignisse (> HQ<sub>30</sub>) hingegen erfuhren eine stärkere Hochwasserscheitelreduktion von rund 33 %. Der Großteil der Ereignisse, bei denen die Ergebnisse eine Zunahme der Hochwasserspitzen zeigen, weisen eine Jährlichkeit von < HQ<sub>5</sub> und stellen daher eine vernachlässigbare Hochwassergefährdung dar. Nur zwei Ereignisse, die eine Jähr-



Abb. 13.

Hochwasserscheitelreduktion [%] aufgrund der Speicherkraftwerke für verschiedene Pegel und Flussgebiete in Österreich, inklusive Jährlichkeit der untersuchten Jahreshochwasser.

lichkeit größer  $HQ_{30}$  aufweisen, zeigen eine Zunahme der Hochwasserspitzen von lediglich –0,7 % und –0,4 % auf.

Die angewandte Methodik zur Abschätzung von unbeeinflussten Jahreshochwassern und ihre Annahmen sind klarerweise mit Unsicherheiten behaftet. Dies betrifft in erster Linie die Übertragung von Hochwasserwerten der unbeeinflussten Gebiete auf die Einzugsgebiete mit Wasserkraftwerken. Gleichzeitig zeigt der Vergleich der vorliegenden Ergebnisse mit früheren Untersuchungen (z.B. WIDMANN, 1988) eine gute Übereinstimmung der möglichen Hochwasserscheitelreduktion durch Speicherkraftwerke. Obwohl die österreichischen Speicherkraftwerke primär der Stromerzeugung dienen und meist kein gesetzlicher Auftrag zur Verbesserung der Hochwassersituation besteht, zeigen die Ergebnisse eine eindeutige Hochwasserscheitelreduktion und somit eine Reduktion der Hochwassergefahr in den Unterliegergebieten. Es kann erwartet werden, dass ein noch höheres Potential zur Verringerung von Hochwasserspitzen vorhanden ist. Dies wäre der Fall, wenn entsprechende Betriebsvorschriften vorgesehen wären, was aber den derzeitigen (bescheidmäßig festgelegten) Betriebsordnungen mit dem Ziel der Optimierung und Maximierung der Energieproduktion widersprechen würde.

# 4.3 Veränderungen des natürlichen Wasserrückhaltepotentials

Die räumliche Verteilung des WRI beider Berechnungszeiträume (1826–1859 vs. 2016) zeigt ein klares räumliches Muster (Abb. 14). Im Allgemeinen sind die Werte in Tallagen und eher flachen Gebieten, wie im Rheintal, entlang der Drau oder im Osten des analysierten Gebiets, höher als in Gebieten, die von einer steilen Topografie und alpiner Vegetation geprägt sind. Dies weist darauf hin, dass die Wasserretention in den Tallagen stärker ausgeprägt ist als in steilen Kopfeinzugsgebieten. Diese Charakteristik ist in beiden untersuchten Zeiträumen vergleichbar und die grundlegenden räumlichen Muster haben sich nicht verändert.

Der Vergleich bzw. die Differenz zwischen dem historischen und aktuellen WRI (Abb. 14 unten) zeigt jedoch eine moderate bis starke Abminderung des Retentionspotentials vor allem in den Tälern und tiefen Lagen bzw. auch entlang von Fließgewässern. Dies erklärt sich größtenteils durch die Ausweitung und Entwicklung von Siedlungsgebieten und der damit einhergehenden Flächenversiegelung. Hinzu kommen noch der Verlust und die Trockenlegung von Feuchtgebieten und die Abholzung von Waldflächen in tieferen Lagen. Zusätzlich spielt noch der Faktor der Flussbegradigungen eine Rolle, welcher Flüsse und deren Flussbett in Ihrer Retentionswirkung nennenswert einschränken kann. Im Gegensatz dazu gibt es aber auch Bereiche, in denen ein Anstieg des Wasserretentionsindex ersichtlich ist. Dies sind in erster Linie höher gelegene Flächen, bei denen es zu einer Zunahme von Waldflächen und zu einer Transformation von Ödland zu Grünland gekommen ist. Zudem sind durch alpine Speicherkraftwerke neue künstliche Wasserflächen hinzugekommen, was sich positiv auf das Retentionspotential auswirkt.

An den Beispielen rechts unten in Abbildung 14 wird die Veränderung des Wasserretentionsindex im Salzachtal (a) und östlich von Klagenfurt (b) detaillierter dargestellt. Im Salzachtal ist zu erkennen, dass der WRI durch die Landnutzungsänderung nennenswert abgenommen hat. Gleichzeitig zeigt sich, dass sich das Retentionspotential entlang der Talflanken in höher liegenden Gebieten verbessert hat. Im Bereich von Klagenfurt und nördlich entlang der Glan ist es zu einer starken Reduktion des WRI gekommen. Dies ist zu einem großen Teil auf die großräumige Entwicklung von Siedlungsgebieten zurückzuführen.

Abbildung 15 zeigt Verschiebungen des WRI zwischen dem historischen und aktuellen Zustand. Dafür wurden die kontinuierlich berechneten WRI-Werte in fünf Klassen in die Kategorien sehr niedrig (0–2), niedrig (2–4), moderat (4–6), hoch (6–8) und sehr hoch (8–10) aggregiert. Hier zeigt sich, dass es in 94,9 % des untersuchten Gebiets zu keinen Klassenverschiebungen gekommen ist. In lediglich 5,1 % des analysierten Gebiets kommt es zu einer Klassenverschiebung zwischen dem historischen und aktuellen WRI. Diese Verschiebungen sind in Abbildung 15 dargestellt. Zusätzlich sind die absoluten Flächen und die relativen Anteile am Gesamtgebiet angegeben.

Abbildung 15 zeigt, dass es zu einer über 9-fachen Zunahme an Flächen mit sehr niedrigem WRI (0–2; rot) gekommen ist. Landnutzungsänderungen haben ebenfalls zu einer starken Reduktion von Flächen mit hohen und sehr hohen WRI (6–10; hell- und dunkelblau) geführt. Im Vergleich zwischen historischem und aktuellem Zustand zeigt sich, dass sich Flächen mit sehr hohen WRI Werten (8–10; dunkelblau) um das 13-fache verringert haben. Bei historisch niedrigen WRI Werten (2–4; gelb) ist es im Gegensatz dazu vielfach zu einer Verbesserung und Verschiebung zu moderaten WRI Werten (4–6; grün) gekommen. Dies ist in erster Linie mit der Zunahme der Waldflächen in höher gelegenen Gebieten zu erklären.

Zusammengefasst ergeben die Analysen des historischen und aktuellen Wasserretentionsindex, dass es in rund 95 % des Gebietes nur zu geringfügigen Änderungen im WRI gekommen ist. Allerdings zeigen Flächen, bei denen es zu einer Klassenverschiebung gekommen ist, auch deutliche Verschlechterungen des aktuellen natürlichen Wasserretentionsindex im Vergleich zum historischen Zustand. Diese Verschlechterungen treten vor allem in den Tallagen und Ballungszentren auf und zeigen, dass es sowohl zu einer Veränderung der Hochwassergefährdung, als auch zu einer Erhöhung der Hochwasserexposition in diesen Bereichen gekommen ist.

# 4.4 Sektorale Koordinationsprozesse in der Wasserkraft

Die Einbindung der Wasserkraft in das Hochwasserrisikomanagement ist für eine vielfältige Gruppe von Akteurinnen und Akteuren von besonderem Interesse, darunter Kraftwerksbetreiber, Bundes- und Landesbehörden, Gemeinden und Anrainer, Nichtregierungsorganisationen und andere Wirtschaftsunternehmen. Aus den Anforderungen dieser unterschiedlichen Interessengruppen können sich sowohl Synergie- als auch Konfliktpotentiale ergeben. Eine zuverlässige Stromversorgung und Netzstabilität, auch bei Hochwasser, hat oberste Priorität und verbindet die verschiedenen Interessen.

Trotz ihres Potentials für den Hochwasserschutz sehen die Betreiber von Wasserkraftwerken in Österreich das Hochwasserrisikomanagement nicht in ihrer Verantwortung. Ihr Hauptziel sei die Stromerzeugung. Aus Sicht der Wasserkraft ist das Hochwasserrisikomanagement ein rele-



Wasserretentionsindex historisch (1826-1859) und aktuell (2016) und Differenzen.

vantes, aber sekundäres Problem. Das wichtigste Instrument zur Integration der sektoralen politischen Ziele der Stromerzeugung aus Wasserkraft und des Hochwasserrisikomanagements ist das österreichische Wasserrechtsgesetz (WRG 1959), das eine Bewilligungspflicht für Wasserkraftanlagen vorsieht. Die Bewilligung darf nicht erteilt werden, wenn die Wasserkraftanlage öffentliche Interessen oder bestehende Rechte (z.B. Eigentumsrechte) verletzt (I6). Allerdings verlangt das Wasserrechtsgesetz keine Verbesserung der Hochwassersituation nach dem Bau einer Wasserkraftanlage, sondern verbietet klar eine Verschlechterung (I6, I9). Im Rahmen des Bewilligungsverfahrens muss der Anlagenbetreiber Wehrbetriebsordnungen vorschlagen, welche die Betriebsregeln einer Wasserkraftanlage sowohl für den Normalbetrieb als auch für Hochwasserereignisse festlegen. Die Wehrbetriebsordnung wird von den Behörden genehmigt. Dies ist im Grunde das Kerninstrument für die politische Integration. Betroffe-



Abb. 15. Verschiebungen des Wasserretentionsindex zwischen historischem (1826-1859; links) und aktuellem (2016: rechts) Zustand. Der WRI wurde dafür in fünf Klassen mit den Kategorien sehr niedrig, niedrig, moderat, hoch und sehr hoch eingeteilt. Die dargestellten Veränderungen beziehen sich auf 5,1 % des Gesamtgebiets, bei denen es zu Klassenverschiebungen gekommen ist.

ne Dritte können während des Bewilligungsverfahrens zur Wahrung ihrer Rechte eine schriftliche Stellungnahme einreichen. Die bewilligten Wehrbetriebsordnungen können nachträglich vom Betreiber oder den Behörden angepasst werden, nicht aber von Dritten. Kleinere Anpassungen sind durchaus üblich: "Die Wehrbetriebsordnung [...] ist aufgrund der Erfahrungen bei den letzten Hochwassern immer wieder angepasst worden" (I9). Zusätzlich könnte die Behörde, wenn das öffentliche Interesse nicht hinreichend geschützt ist, eine Abänderung der Bewilligung aufgrund einer Anpassung an die wasserwirtschaftlichen Verhältnisse, zur Erreichung dieses Schutzes in Auftrag geben. Dies wurde in Österreich noch nie angewandt (15). Im Falle eines außergewöhnlichen Hochwasserereignisses kann die Wehrbetriebsordnung außer Kraft gesetzt werden und der Kraftwerksbetrieb wird durch einen behördlich eingerichteten Krisenstab (Katastrophenschutz) kontrolliert. Die Betreiber größerer Wasserkraftwerke können diesem Team angehören (I3, I4, I7). In Abbildung 16 sind die aus den Interviews hervorgegangen Interaktionsbereiche dargestellt.

Die enge Abstimmung zwischen Behörden und Kraftwerksbetreibern, insbesondere bei den größeren Kraftwerken, ist historisch gewachsen und hat in Österreich zu einem synergetischen Verhältnis und einem eher geschlos-

senen Netzwerk geführt. Ein Interviewpartner fasst dies so zusammen: "Wir treffen uns recht oft. Nicht nur zum Thema Hochwasserschutz, sondern auch zum nationalen Wasserwirtschaftsplan. Es gibt eine Reihe von Themen, die wir austauschen. Und wir kennen die beteiligten Personen gut und Sie kennen uns. Das funktioniert also gut" (I8). Diese enge sektorale Beziehung bringt bestimmte Vorteile für die politische Integration mit sich, insbesondere direkte persönliche Kontakte, die im Falle eines extremen Hochwasserereignisses schnelle und informelle Entscheidungswege ermöglichen. Darüber hinaus tauschen Behörden und Anlagenbetreiber Daten (z.B. über den Abfluss oder Prognosen), Fachwissen und Zuständigkeiten aus und betreiben auch Hochwasservorhersagemodelle gemeinsam. Die enge Vernetzung kann aber auch Defizite mit sich bringen, wenn sie den Anlagenbetreibern eine Vormachtstellung gegenüber anderen Akteurinnen und Akteuren verschafft. Ein Vergleich von zehn Wehrbetriebsordnungen verschiedener Wasserkraftwerke entlang der Donau zeigte einige Unterschiede zwischen den operativen Regelwerken (RECHNUNGSHOF, 2016). Nur sehr wenige enthielten Regelungen zu den Rechten von Land- und Waldbesitzern und zu Mechanismen zur Abwicklung von Schadensersatzansprüchen. Darüber hinaus haftet der Anlagenbetreiber in der Regel für alle Schäden, die durch den rechtlichen



Bestand der Wasserkraftanlage verursacht werden, es sei denn, die Beeinträchtigung wurde durch höhere Gewalt verursacht. Dementsprechend argumentierten Anlagenbetreiber in vielen Gerichtsverfahren erfolgreich mit höherer Gewalt und damit, dass sie sich an die genehmigten Wehrbetriebsordnungen hielten, um nicht für Hochwasserschäden haftbar zu sein.

Zusammenzufassend kann festgehalten werden, dass es starke Synergien zwischen Wasserkraftwerksbetreibern und den Behörden gibt, welche sich positiv auf die politische Koordination auswirken. Dies spiegelt sich vor allem im informellen Netzwerk zwischen den beiden Akteurinnen und Akteuren wider, wo Prozesse aufeinander abgestimmt und Entscheidungen zeitnah und unkompliziert gefällt werden können. Hierdurch kann es allerdings möglicherweise zu Nachteilen für Dritte, also im Ereignisfall betroffene Akteurinnen und Akteure kommen.

# 4.5 Fallstudie: Wehrbetriebsordnungen als Instrument der sektoralen Politikkoordination

Nach Hochwasserereignissen mit Überflutungen im Unterlauf sehen sich Wasserkraftunternehmen in Österreich häufig dem Vorwurf ausgesetzt, dass der Betrieb der Wehranlagen und das Stauraummanagement während des Hochwassers zu einer Erhöhung der Hochwassergefahr im Unterlauf geführt hat. Dies war beispielsweise bei den Hochwasserereignissen am Kamp 2002, an der Donau 2013 oder an der Drau 2012 der Fall.

Im Rahmen des Projektes wurde die Drau als Fallstudie näher untersucht, da die Prozesse der sektoralen Politikkoordination rund um das Hochwasser 2012 (und weitere Hochwasser 2018 und 2019) vielschichtig und interessant sind. Starker Niederschlag und verhältnismäßig hohe Temperaturen, die zu einem "Regen auf Schnee"-Ereignis auch in höheren Lagen geführt haben, waren Auslöser des Hochwassers 2012. Das Ereignis in Kärnten am 5. November 2012 entsprach einem 30- bis 100-jährlichen Ereignis. Aufgrund der generellen Wetterlage war die Vorhersage des Hochwassers schwierig und die Schwere wurde in den anfänglichen Prognosen stark unterschätzt. Es kam zu Uberflutungen und in weiterer Folge zu Klagen und Schadensersatzforderungen des Landes Kärnten, von Gemeinden, von Privatpersonen und weiteren Betroffenen aus Slowenien gegen die Verbund AG als Kraftwerksbetreiber. Der Vorwurf lautete, dass die Betriebsweisen der Kraftwerke während des Hochwassers zu einer Verschärfung der Überflutungen geführt haben. Die darauffolgenden Gerichtsprozesse zeigten jedoch, dass die Wehrbetriebsordnungen eingehalten wurden.

Das erste Kraftwerk an der Drau wurde in den Jahren 1939 bis 1943 in Schwabeck errichtet. Bis 1988 wurden mit dem letzten errichteten Kraftwerk Paternion insgesamt zehn Laufkraftwerke an der Drau errichtet. Die Kraftwerke erhielten jeweils Einzelbewilligungen und es fehlte ein gesamtheitliches Konzept für die Wehrbetriebsordnungen (WBO) der gesamten Kraftwerkskette. Ziel dieser Einzelbewilligungen war der Schutz der Kraftwerksanlagen. Eine Berücksichtigung der Unterlieger war nicht vorgesehen. Erste Absichten zu einem Gesamtkonzept und zu zulaufgesteuerten Wehrbetriebsordnungen erfolgten 2009, waren aber bis zum Hochwasser 2012 noch nicht bewilligt. Herausfordernd war dabei die Implementierung der Berücksichtigung von Abflussprognosen und die Diskussion, welche Prognose (Verbund AG, Land Kärnten) maßgeblich sei. Ein wesentlicher Streitpunkt der aktualisierten Wehrbetriebsordnungen war die Festlegung von Abstaukurven. Abstaukurven definieren das Ausmaß von Vorabsenkungen der Speicher bei gewissen prognostizierten Durchflüssen. Einerseits kann eine Vorabsenkung Retentionsvolumen für eine Kappung von Hochwasserwellen bereitstellen, andererseits führen hohe Absenkungsraten und Absenkungsvolumen zu ökologischen und naturschutzrechtlichen Problemen (Fischerei) und potentiellen Problemen mit Hangrutschungen und Böschungsbrüchen, also der Betriebssicherheit. Absenkungen führen auch zum Verlust an Produktionsmitteln und zu Einbußen in der Stromproduktion. Die Steuerung der Absenkungen ist weiters nicht trivial, da sie von Zuflussprognosen abhängt und diese mit nennenswerten Unsicherheiten verbunden sind, gerade wenn der Prognosezeitpunkt weiter in der Zukunft liegt.

Nach dem Hochwasserereignis vom November 2012 wurde die Verbund AG vom zuständigen Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) aufgefordert, die betreffenden Abstauregelungen aufgrund der Erfahrungen mit dem Hochwasser zu überarbeiten und zur wasserrechtlichen Bewilligung einzureichen. Bis zum Vorliegen einer endgültigen Abstauregelung wurde vom BMLFUW im Juni 2013 eine temporäre Abstauregelung befristet bewilligt.

In den Wasserrechtsverhandlungen zur Überarbeitung der WBO hatten Unterliegergemeinden, Fischereiberechtigte, Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer sowie das Land Kärnten Parteienstellung. Im August 2014 stellte die Verbund AG einen Antrag auf Erteilung einer finalen wasserrechtlichen Bewilligung sowohl für die Abstauregelung (Wehrbetriebsordnung - WBO) als auch für die Betriebsund Überwachungsordnungen (BÜO) der Kraftwerkskette. In den mündlichen Verhandlungen argumentierten sowohl das Land Kärnten als auch die Unterliegergemeinden, dass Vorabsenkungen nennenswertes Retentionspotential zum Kappen von Hochwasserwellen haben und zum verbesserten Schutz von Unterliegergebieten führen würden. Die eingebrachten Argumente wurden jedoch im Bescheid des Bundesministeriums für die konsolidierte WBO vom Dezember 2014 nicht im gewünschten Maße berücksichtigt. Auch Einsprüche beim Landesverwaltungsgerichtshof Kärnten änderten dies nicht. Ein Grund dürfte hier sein, dass das bestehende Wasserrechtsgesetz (WRG) ausschließlich ein Verschlechterungsverbot der Hochwassersituation durch die zu bewilligende Anlage im Unterlauf vorsieht. Ein Verbesserungsgebot ist im WRG nicht vorgesehen. Die verhandelten WBOs waren schließlich ein Kompromiss, in dem geringfügige, prognosebasierte Vorabsenkungen bei Prognosen, die festgelegte Durchflüsse überschreiten, vorgesehen sind, die gleichzeitig aus ökologischer Sicht vertretbar waren und welche die Betriebssicherheit der Anlagen nicht gefährdeten. Ein Interviewpartner fasste den Prozess so zusammen: "Sicherlich ein notwendiger Prozess, der für alle Beteiligten, sei es für die Betreiber, die Behörden, die beteiligten Gemeinden und die Bürger notwendig und auch sinnvoll war, und schlussendlich Vorteile gebracht hat [...], das muss man positiv sehen" (147).

Vom 28. bis 31. Oktober 2018 ereignete sich an der Drau, der Möll, der Gail und ihren Zubringern ein 10bis 120-jährliches Hochwasser, das auch zu großflächigen Überschwemmungen führte. Hier kamen die neuen Wehrbetriebsordnungen zum Einsatz. Laut der Hochwasserprognose wurde für Lavamünd ein 30- bis 100-jährliches Hochwasser prognostiziert, was verheerende Überschwemmungen zur Folge gehabt hätte. Daher wurden von den Bezirkshauptmannschaften Wolfsberg, Völkermarkt und Klagenfurt-Land, die im Krisenfall die obersten Behörden sind, zusätzlich einstweilige Verfügungen erlassen, um verschiedene Stauräume weiter abzusenken als in der neuen WBO festgelegt wurde. In diesem Fall wurden erstmals die Stauräume Annabrücke und Ferlach um 2,5 m abgesenkt. Zusätzlich wurde der Speicher Edling über die normale Absenkgrenze hinweg um 4 m abgesenkt. Dies verhinderte weitgehende Überflutungen. Die Vorabsenkungen wurden im Landeskrisenstab besprochen, in dem alle Lageinformationen der verschiedenen Beteiligten zusammenkommen. Die Mitglieder des Krisenstabs haben aus den Erfahrungen des Hochwassers 2012 sehr viel gelernt und der Krisenstab wird von allen Beteiligten als sehr professionell und wichtig eingeschätzt.

Im November 2019 kam es dann zu einem weiteren Hochwasser an der Drau. Hier wurde für den Ort Lavamünd ein 10- bis 30-jährliches Hochwasser prognostiziert. Dabei wurde wieder eine einstweilige Verfügung durch den Bezirkshauptmann des Bezirks Völkermarkt erlassen, in der das Kraftwerk und der Stauraum Edling liegt. In der einstweiligen Verfügung wurde eine massive Stauraumabsenkung in Edling verordnet, die deutlich über jene in der neuen WBO festgelegten Absenkung im Hochwasserfall hinausging. Der Schritt des Bezirkshauptmanns war der Grund, warum es flussab und in der Gemeinde Lavamünd in der Folge zu keinen größeren Überschwemmungen gekommen ist.

Die sektorale Koordination zwischen Schutzwasserwirtschaft und Wasserkraft sowie den betroffenen Interessengruppen nach dem Hochwasser 2012 war ein mehrjähriger Lern- und Abstimmungsprozess, der rückblickend von allen Beteiligten als sehr positiv beurteilt wird. Die Verhandlungen zur temporären und dann finalen WBO waren zum Teil schwierig, aber am Ende ein erfolgreicher Prozess für den Hochwasserschutz an der Drau. Die Ereignisse rund um die Hochwasser 2018 und 2019 sind insofern interessant, als dass mit dem zusätzlichen Instrument der einstweiligen Verfügung Maßnahmen gesetzt wurden, die zu einer nennenswerten Reduktion der Hochwassergefahr geführt haben. Ironischerweise entsprechen diese Maßnahmen im Wesentlichen den Forderungen, die das Land Kärnten und die Gemeinde Lavamünd bereits im Wasserrechtsverfahren zur Änderung der Wehrbetriebsordnungen gefordert hatten. In diesem Sinne könnte man abschließend kritisch anmerken, dass die Anliegen von Unterliegern im Wasserrechtsverfahren bei der Bewilligung von Kraftwerken noch zu wenig berücksichtigt werden. Auch sind weitergehende Fragen bezüglich weiterer potentieller Retentionsflächen entlang der Drau im Fall eines mehr als 100-jährlichen Hochwasserereignisses nicht besprochen worden, da diese Anliegen nicht Teil der wasserrechtlichen Verhandlung zur Wehrbetriebsordnung sind.

## 4.6 Schlussfolgerungen

Die künstlich angelegten Stauseen in hochalpinen Tälern führen zu einer starken Erhöhung des Hochwasserrückhalts. Die Ergebnisse der Problemanalyse zum Hochwasserrückhaltevermögen von Speicherkraftwerken zeigen auf, dass die Stauseen der Kraftwerke die Hochwasserspitzen deutlich reduzieren, obwohl die Kraftwerke primär zur Stromerzeugung errichtet und genehmigt wurden. Speicherabsenkungen oder ein Speicherbetrieb im Sinne eines integrierten Hochwasserrisikomanagements sind bis auf wenige Ausnahmen (z.B. Speicher Klaus) nicht vorgesehen. Allerdings wird die Hochwassergefahr durch die errichteten Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke entlang des Unterlaufs, aber auch in Vorflutern reduziert. Ungeachtet, dass die Speicherseen einen Beitrag zur Reduzierung der Hochwassergefahr leisten, besteht in der Regel für die Betreiber von Wasserkraftwerken keine gesetzliche Verpflichtung zur Übernahme von Verantwortung im Hochwasserrisikomanagement.

Neben der eindeutigen Reduzierung der Hochwassergefahr durch Speicherseen haben menschliche Aktivitäten, wie die Veränderung der Landnutzung, das natürliche Hochwasserrückhaltepotential und dadurch die Hochwasserexposition erhöht. Da das Ziel eines integrierten Hochwasserrisikomanagements die Reduktion der Auswirkungen von Überschwemmungen durch strukturelle und nicht-strukturelle Maßnahmen ist, spielt die Land- und Flächennutzung eine wesentliche Rolle. Dies wird auch in der EU-Hochwasserrichtlinie (EU-HWRL 2007) dargestellt. Die Veränderung der Landnutzung beeinflusst dadurch die Hochwasserexposition und das Hochwasserrisiko. In Österreich werden jährlich zwischen 15 und 20 km<sup>2</sup> der produktiven Böden dauerhaft versiegelt. Das bedeutet, dass seit dem Jahr 2000 etwa die Fläche von Wien (415 km<sup>2</sup>) an produktiven Böden und deren Funktionen dauerhaft verloren gegangen sind (z.B. Bodenneubildung, Wasserretention, Biodiversität). Die Problemanalyse zur Veränderung des natürlichen Wasserrückhaltepotentials aufgrund von Landnutzungsänderungen zwischen dem 19. Jahrhundert und heute zeigt auf, dass sich das Wasserrückhaltepotential vor allem in den Tälern und tiefen Lagen stark reduziert hat. Dies ist zu einem sehr großen Teil auf die erhebliche Zunahme von Siedlungsgebieten und Ballungszentren zurückzuführen. Hinzu kommt noch der Verlust von Feuchtgebieten durch Trockenlegungen und die Abholzung von Waldflächen, um diese Flächen landwirtschaftlich zu nutzen. Im Gegensatz dazu gibt es aber auch Bereiche, in denen ein Anstieg des Wasserrückhaltepotentials ersichtlich ist. Dies sind in erster Linie höher gelegene Flächen, bei denen es zu einer Zunahme von Waldflächen und zu einer Transformation von Ödland zu Grünland gekommen ist. Diese Veränderung der Landnutzung führt daher zu einer Veränderung der Hochwassergefahr und zu einer Erhöhung der Hochwasserexposition in Tallagen.

Neben den Veränderungen des Hochwasserrisikos in den letzten Jahrzenten und Jahrhunderten durch menschliche Aktivitäten sind auch die sektorale Koordination und die zur Verfügung stehenden Instrumente ein wesentlicher Faktor im Hochwasserrisikomanagement. Das wichtigste Instrument der Politikkoordination zwischen den Kraftwerksbetreibern und dem Hochwasserrisikomanagement ist das österreichische Wasserrechtsgesetz (WRG 1959). Dies regelt die Genehmigungen und Bewilligungen von Wasserkraftanalagen. Im Zuge einer Bewilligung wird eine Wehrbetriebsordnung definiert, welche das Kerninstrument der Politikintegration darstellt. Im Bewilligungsverfahren können betroffene Dritte eine schriftliche Stellungnahme einreichen. Nachträgliche Änderungen der Bewilligung können nur von den Betreibern oder den Behörden angeregt werden. Dadurch kann es allerdings zu Nachteilen für Dritte, möglicherweise betroffene Akteurinnen und Akteure kommen. Durch das historisch gewachsene synergetische Verhältnis zwischen Kraftwerksbetreibern und Behörden werden mögliche Abstimmungen eher in einem geschlossenen Netzwerk durchgeführt. Dies ermöglicht den Verantwortlichen bei einem Hochwasserereignis schnelle und auch informelle Entscheidungen zu treffen. In Extremfällen kann die Wehrbetriebsordnung von den Behörden außer Kraft gesetzt werden und die Steuerung der Anlage durch einen Krisenstab kontrolliert werden. Dadurch ergeben sich gewisse Vorteile für die sektorale Koordination im Hochwasserrisikomanagement. Gleichzeitigt bedeutet die enge sektorale Beziehung zwischen Anlagenbetreibern und dem Hochwasserrisikomanagement, dass es im Ereignisfall möglicherweise zu Benachteiligungen von betroffenen Dritten durch Schäden kommen kann.

Um die Wirkungen der Politikintegration und der ausgewählten Instrumente zwischen der Wasserkraft und dem Hochwasserrisikomanagement detailliert zu analysieren, wurde im Rahmen einer Fallstudie an der Drau der sektorale Koordinationsprozess anhand der Änderung einer Wehrbetriebsordnung in Folge des Hochwasserereignisses 2012 untersucht. Im Jahr 2018 wurden aufgrund der Hochwasserprognose des Kraftwerksbetreibers erstmals drei Stauräume vorübergehend um 2,5 m von den Kraftwerksbetreibern abgesenkt. Dies wurde in der neuen geänderten Wehrbetriebsordnung nach den Erfahrungen vom Hochwasser 2012 geregelt. Während der Hochwasser 2018 und 2019 wurde durch den Krisenstab und die Bezirkshauptmannschaften eine zusätzliche Absenkung der Stauräume verordnet. Zusätzlich wurden noch weitere lokale Schutzmaßnahmen angeordnet. Bei dem Ereignis 2018 wurde der Speicher des Kraftwerks Edling durch eine einstweilige Verfügung über die normale Absenkgrenze hinaus um 4 m abgesenkt. Diese Maßnahmen spiegeln Instrumente der sektoralen Politikkoordination im Hochwasserrisikomanagement zwischen dem Kraftwerksbetreiber und der Schutzwasserwirtschaft wider, welche im Ereignisfall zusätzlich zur Anwendung kommen können.

# 5 Landwirtschaft und Hochwasserrückhalt

Die Rolle der Landwirtschaft im Politikfeld Hochwasser hat sich in den letzten Jahrzehnten stark verändert. Wurden früher landwirtschaftliche Flächen vor wiederkehrenden Überflutungen geschützt, so stellen diese heute eine wichtige "Ressource" für den Hochwasserrückhalt und die Reduzierung der Abflussspitzen dar. Damit gehen unterschiedliche Erwartungshaltungen einher, welchen Beitrag die Landwirtschaft im Hochwasserrisikomanagement zu leisten hat. Aus diesem Spannungsfeld ergeben sich die folgenden konkreten Ziele der Bearbeitung des Interaktionsfeldes Hochwasserrückhalt – Landwirtschaft:

- Schärfung des Bewusstseins für die räumlichen Dimensionen und die differenzierte Vulnerabilität der landwirtschaftlichen Gebiete gegenüber Hochwasserereignissen.
- Darstellung und Analyse derzeitiger rechtlicher Rahmenbedingungen und Instrumente.
- Identifizierung und Darstellung der Grundstruktur des Koordinationsprozesses und der Art der Einbindung, Vernetzung und Koordination landwirtschaftlicher Akteurinnen und Akteure und ihrer Rolle bei der prozessualen Umsetzung von Hochwasserschutzprojekten mit den anderen Beteiligten.
- Aufzeigen von Optionen zur verbesserten Einbindung landwirtschaftlicher Akteurinnen und Akteure in die Politikkoordination im Rahmen des Hochwasserrisikomanagements (HWRM).

In Kapitel 5.1 werden die verwendeten Daten und Methoden beschrieben. Darauf folgen in Kapitel 5.2 die Ergebnisse der räumlichen Analysen an der Schnittstelle von landwirtschaftlicher Landnutzung und Hochwasserrisikogebieten. Die Verfahrensabläufe bei der Umsetzung von Hochwasserschutzprojekten auf landwirtschaftlichen Flächen und die damit zusammenhängenden Herausforderungen für landwirtschaftliche Beteiligte werden in Kapitel 5.3 behandelt und beinhalten eine Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen und Instrumente im Interaktionsfeld, eine Beschreibung und Analyse der Prozesse und Beteiligten, die Entschädigungspraxis anhand eines Fallbeispiels sowie eine Analyse der identifizierten Barrieren in Prozessen des HWRM und Lösungsvorschläge zur Überwindung dieser Barrieren. Daraus resultierende Schlussfolgerungen werden in Kapitel 5.4 gezogen.

## 5.1 Methodik

Das Untersuchungsgebiet im landwirtschaftlichen Teilprojekt umfasste das gesamte österreichische Bundesgebiet mit einem speziellen Fokus auf die Alpenregion nach der Abgrenzung der Alpenkonvention (Abb. 17).

Um die räumlichen Zusammenhänge zwischen Landwirtschaft und HWRM darzustellen, erfolgten GIS-Analysen der detaillierten landwirtschaftlichen Flächennutzung (IN-VEKOS, landwirtschaftlich genutzte Flächen von Betrieben, die an Maßnahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik teilnehmen; BMLRT, 2018) und Überlagerungen mit der Hochwasserrisikozonierung für ein 300-jährliches Hochwasser (beinhaltet Gefahrenzonen bzw. Überflutungsflächen der Bundeswasserbauverwaltung (BWV), der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) und HQ200-Flächen von HORA, Stand Anfang 2020), wie sie für die historische Analyse der Flächennutzung im Arbeitspaket "Historische Landnutzung und Fließgewässerkorridore" entwickelt wurde (HO-HENSINNER et al., 2021a). Zusätzliche Informationsquellen waren die Österreichische Bodenkarte (BFW, 2018) und



#### Abb. 17.

Österreichisches Gebiet der Alpenkonvention sowie Hochwasserrisikozonierung als Basis der räumlichen Verschneidung mit landwirtschaftlichen Flächennutzungen (Quelle: Darstellung BAB mit Daten von BEV, Alpine Convention, HOHENSINNER et al., 2021a)

Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt "Bodenbedarf für die Ernährungssicherung in Österreich" (HASLMAYR et al., 2016) sowie Standardoutputkoeffizienten für die Landwirtschaft (BAB, 2020), die den durchschnittlichen Geldwert der Bruttoagrarerzeugung einzelner Kulturen wiedergeben. Um die gegenwärtigen politischen Rahmenbedingungen zu verstehen, wurden Richtlinien, Gesetze, Maßnahmen und Instrumente mit Einfluss auf das Spannungsfeld Landwirtschaft - HWRM hierarchisch dargestellt. Die Erfahrungen der landwirtschaftlichen Beteiligten (überwiegend Expertinnen und Experten der Landwirtschaftskammern (LK) und der Behörden der Schutzwasserwirtschaft) wurden mit Hilfe von 14 strukturierten gualitativen - telefonischen bzw. persönlichen - Interviews erfasst und mittels der Software MAXQDA ausgewertet. Darüber hinaus wurde die Thematik der Entschädigungen für landwirtschaftliche Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer im Rahmen einer Fallstudie eingehender anhand von weiteren Recherchen und drei Interviews untersucht.

## 5.2 Landwirtschaftliche Nutzung in Hochwasserrisikogebieten

Die folgenden Ergebnisse der Überlagerung von landwirtschaftlichen Flächen und Hochwasserrisikogebieten zeigen das Ausmaß der räumlichen Verflechtung zwischen Landwirtschaft und HWRM und spezifische Vulnerabilitäten landwirtschaftlicher Gebiete gegenüber Hochwasserereignissen.

## 5.2.1 Flächendimensionen

Eine Überlagerung der Hochwasserrisikogebiete (HQ300) mit den INVEKOS-Daten 2018 für ganz Österreich ergibt, dass rund 246.000 ha (= 7,7 % der gesamten IN-VEKOS-Flächen) innerhalb dieser Hochwasserrisikogebiete liegen. Die Anteile sind naturgemäß regional sehr unterschiedlich und können in einzelnen alpinen Gemeinden 50 und mehr Prozent der landwirtschaftlichen Flächen erreichen.

Insgesamt werden beispielsweise 57.200 ha der Landwirtschaftsflächen in HQ300-Gebieten als intensives Grünland genutzt, 36.000 ha sind mit Futtermais (Körnermais und Corn-Cob-Mix) sowie 25.000 ha mit Winterweichweizen bebaut. Jeweils rund 11.000 ha machen Sojabohnen und Silomais aus. Ölkürbis und Zuckerrüben sind mit jeweils rund 4.000 ha vertreten. Nur auf das Alpengebiet bezogen (Abb. 18), verschieben sich die Nutzungsanteile hin zu Grünland- und Feldfutter- sowie Futtergetreidenutzungen. Brotgetreide und andere Ackerfrüchte, Hack- und Ölfrüchte sind nur in geringem Ausmaß vertreten.

## 5.2.2 Ökonomische Dimension

Eine Betrachtung der Bodeneigenschaften der Landwirtschaftsflächen in den Hochwasserrisikogebieten zeigt, dass in Österreich ein beträchtlicher Anteil dieser Agrarflächen in den Hochwasserrisikogebieten auf hochwertige Ackerflächen (77.000 ha) bzw. hochwertige Grünlandflächen (78.000 ha) entfällt und damit von besonderer Wichtigkeit für die landwirtschaftlichen Betriebe ist. Die große Spannweite der Standardoutputkoeffizienten (SO-



Häufigste Landnutzungsarten in Hochwasserriskogebieten (HQ300) im Gebiet der österr. Alpenkonvention, 2018

#### Abb. 18.

Landwirtschaftliche Nutzung in Hochwasserrisikogebieten im österreichischen Alpengebiet (Quelle: Darstellung BAB, eigene Berechnungen und Bearbeitung nach Daten von Alpenkonvention, BMLRT HORA, INVEKOS).

Abb. 19. Anteil wertvoller landwirtschaftlicher Flächen (Projekt BEAT) je Kleinproduktionsgebiet, die innerhalb von Hochwasserrisikogebieten liegen (Quelle: Darstellung BAB; eigene Berechnungen und Bearbeitung nach Daten von BAB, BEV, Alpine Convention, BMLRT HORA und HASLMAYR et al., 2016).



KO, 2020 für die Beispielregion Kärnten, Indikator für den Geldwert der landwirtschaftlichen Erzeugung als Durchschnittswert über mehrere Jahre in Euro/ha/Jahr) für einzelne Feldfrüchte weist auf die ökonomisch sehr differenzierte Bedeutung der jeweiligen Flächen in den HQ300-Gebieten hin. Während für intensiv genutztes Grünland mit einem SO-KO von 340 €/ha und Jahr gerechnet wird, liegt dieser Wert beispielsweise für Silomais bei 760 €, für Winterweizen bei 800 €, für Körnermais bei 1.640 € und für Zuckerrüben bei 2.120 €.

Das Projekt "Bodenbedarf für die Ernährungssicherung in Österreich" (HASLMAYR et al., 2016), weist 1,3 Mio. ha – und damit mehr als ein Drittel der landwirtschaftlich genutzten Fläche Österreichs (INVEKOS 2018: 3,2 Mio. ha) - als wertvoll für die landwirtschaftliche Nutzung und damit für die Ernährungssicherung aus. Dafür wurde neben den natürlichen Eigenschaften zur landwirtschaftlichen Produktion und des sich daraus ergebenden Produktionspotentials auch unter Klimawandelbedingungen - zusätzlich die regionale Verteilung auf Ebene der landwirtschaftlichen Kleinproduktionsgebiete berücksichtigt. Darauf aufbauende, im Projekt PoCo-FLOOD durchgeführte GIS-Überlagerungen ergeben, dass in Österreich 12 % (insgesamt 157.200 ha) der als wertvoll ausgewiesenen Produktionsflächen in HQ300-Hochwasserrisikogebieten liegen. Auf Ebene der landwirtschaftlichen Kleinproduktionsgebiete betrachtet (Abb. 19), zeigt sich besonders in den alpinen Regionen, dass tendenziell ein größerer Anteil (bis zu 56 %) der als für die Ernährungssicherung wichtig ausgewiesenen Böden in Hochwasserrisikogebieten liegt. In etlichen alpinen Gemeinden in Kärnten liegt dieser Wert bei über 70 % bis maximal 91 % und zeigt die hohe Vulnerabilität der wichtigen Landwirtschaftsflächen und damit der regionalen Ernährungssicherung speziell in alpinen Gebieten.

# 5.3 Prozesse und Herausforderungen für landwirtschaftliche Akteurinnen und Akteure im Hochwasserrisikomanagement

Bei der Umsetzung des HWRM sind verschiedene Beteiligte vor dem Hintergrund unterschiedlicher Politiken und Gesetze gefordert, eine gemeinsam umsetzbare Lösung zu finden. Neben der Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen spielen für die landwirtschaftlichen Akteurinnen und Akteure die benötigten landwirtschaftlichen Flächen sowie Entschädigungen für deren Nutzungen eine wichtige Rolle. Folgend werden ein Überblick über die relevanten rechtlichen Rahmenbedingungen und bestehenden Instrumente gegeben, der Prozess des HWRM und seine Beteiligten vorgestellt, die Entschädigungsmöglichkeiten für Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer allgemein sowie anhand eines Fallbeispiels beschrieben. Abschließend werden die resultierenden Barrieren in Prozessen des HWRM genauer beleuchtet.

## 5.3.1 Politikfelder mit Einfluss auf das Hochwasserrisikomanagement

Im Rahmen einer Literaturrecherche zu den bestehenden rechtlichen Rahmenbedingungen wurden die Disziplinen Wasserrecht und Schutzwasserwirtschaft, Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Raumplanung als die wichtigsten Einflussbereiche an der Schnittstelle von HWRM und Landwirtschaft identifiziert. Abbildung 20 zeigt einen Überblick über diese Politikfelder, ihre Instrumente, räumlichen Wirkungsebenen und ihr Zusammenspiel (gekennzeichnet durch Pfeilverbindungen).

Die Landwirtschaft soll laut österreichischem Landwirtschaftsgesetz den Schutz vor Naturgefahren unterstützen (LWG 1992). Die landwirtschaftliche Praxis selbst ist stark von der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU (GAP) geprägt. Sie wird in hohem Maße durch Subventionen gelenkt, die es ermöglichen, die Landnutzung im Hinblick auf gesellschaftliche Interessen zu beeinflussen. Da die Bewirtschaftungspraxis zur Verringerung des fluvialen und pluvialen Hochwasserrisikos beitragen kann (durch die Reduktion des Oberflächenabflusses, die Erhaltung der In-



Rechtliche Rahmenbedingungen und Instrumente mit Relevanz im Interaktionsfeld HWRM und Landwirtschaft (Darstellung BAB).

filtrations- und Wasserspeicherkapazität und durch Retentionsflächen), kommt der Landwirtschaft als einer der größten Flächennutzer im HWRM eine wichtige Rolle zu (BMLRT, 2021; ZISCHG et al., 2012). Die bestehenden GAP-Fördermaßnahmen (Periode 2014-2022), die im Bereich des Hochwasserschutzes Wirkung entfalten, sind im Nationalen Hochwasserrisikomanagementplan (RMP) genannt und zielen vor allem auf die Reduktion des Oberflächenabflusses, die Erhaltung der Bodenstruktur und der Wasserspeicherkapazität der Böden sowie auf die Verhinderung von Bodenerosion ab (BMLRT, 2021; AMA, 2020). Sie wurden seit dem RMP 2015 weiterentwickelt (BML-RT, 2021). Zum Teil handelt es sich bei den Maßnahmen um Mindestvorgaben (Cross Compliance) beim Bezug von Direktzahlungen, die fast flächendeckend umgesetzt werden (z.B. Begrünungsvorgaben, Verbot von Bodenbearbeitung in einem Mindestabstand zu Gewässern, kein Maschineneinsatz auf wassergesättigten Böden, Anbau quer zum Hang unter bestimmten Bedingungen), und zum Teil um Maßnahmen im Rahmen des Greening (z.B. Flächen mit Zwischenfruchtanbau), des ÖPUL (z.B. Mulchund Direktsaat) oder der LE-Projektförderung im Rahmen der Ländlichen Entwicklung (z.B. Förderung für Maßnahmen zur Verbesserung des Wasserhaushaltes). Im neuen

GAP-Strategieplan, der für die Programmperiode 2023– 2027 gelten wird, gibt es Neuerungen in der Umweltarchitektur. Maßnahmen im Bereich Gewässerschutz, effiziente Wassernutzung und Schutz vor Naturgefahren werden dabei in weiterentwickelter Form fortgeführt werden (BMLRT, 2021). Während das österreichische Forstgesetz den Erhalt von Waldflächen festschreibt und Umwidmungen nur unter sehr strengen Kriterien ermöglicht sowie die gesetzliche Grundlage für die Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) und ihre Gefahrenzonenplanung bildet, verfügt das österreichische Landwirtschaftsgesetz im Gegensatz dazu weder über Instrumente zum Schutz landwirtschaftlicher Flächen selbst, noch enthält es konkrete Vorgaben für das HWRM (FORSTG 1975; LWG 1992).

Die Raumplanung nimmt flächendeckende Landnutzungszuweisungen vor und unterscheidet sich zwischen den Bundesländern stark in ihren Vorgaben zu HWRM und Landwirtschaft. Im Bereich der landwirtschaftlichen Flächen gehen die Bundesländer Tirol, Steiermark und Niederösterreich auf die Notwendigkeit ein, qualitativ hochwertige landwirtschaftliche Böden in Bezug auf Größe, Struktur und Anordnung zu erhalten. Auf lokaler, regionaler und landesweiter Ebene gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, Flächen für die Landwirtschaft zu sichern. Die Steiermark und Tirol ermöglichen beispielsweise die Ausweisung von Vorrangzonen für die Landwirtschaft auf überörtlicher Ebene (StROG 2010; TROG 2016). Die Bundesländer Burgenland und Tirol bieten die Möglichkeit, landwirtschaftliche Interessensvertretungen – die Landwirtschaftskammern – bei der Erstellung von überörtlichen und örtlichen Programmen, Konzepten und Plänen anzuhören oder einzubeziehen (TROG 2016; BGLD. RPG 2011). In den meisten Bundesländern müssen die Gefahrenzonenpläne der Bundeswasserbauverwaltung und der Wildbach- und Lawinenverbauung in der Flächenwidmungsplanung berücksichtigt werden, um Gefahrenbereiche von baulichen Nutzungen freizuhalten. Diese Regelungen variieren stark, sind in einigen Bundesländern sehr präzise, in anderen nur allgemein definiert.

Im Wasserrechtsgesetz ist der Nationale Hochwasserrisikomanagementplan (RMP) als nationale Leitlinie zur Umsetzung der EU-Hochwasserrichtlinie verankert. Darin sind Gebiete mit potentiell signifikantem Hochwasserrisiko (APSFR) ausgewiesen, für die Hochwassergefahrenkarten sowie Hochwasserrisikokarten erstellt werden. Zur Bewertung des Risikos werden die Schutzgüter menschliche Gesundheit, Umwelt, Kulturerbe und wirtschaftliche Tätigkeiten herangezogen. Ziele des RMP sind die Vermeidung neuer und die Reduktion bestehender Risiken und nachteiliger Folgen während und nach einem Hochwasserereignis sowie die Stärkung des Risiko- und Gefahrenbewusstseins. Dafür werden Maßnahmen zu verschiedenen Sektoren definiert, unter anderem Landwirtschaft (Maßnahmen siehe obigen Absatz Landwirtschaft) und Raumplanung. Der RMP schlägt zudem vor, bestehende Hochwasserschutzmaßnahmen für landwirtschaftliche Flächen gegebenenfalls zu entfernen, um zusätzlichen Retentionsraum für zukünftig häufigere Hochwasserereignisse bereitzustellen. Im Maßnahmenteil Raumordnung und Raumplanung wird der fortschreitende Bodenverbrauch thematisiert und auf die nachteiligen Folgen hinsichtlich der Lebensmittelversorgungssicherheit durch den Verlust produktiver Böden hingewiesen, da Bodenverbrauch meist auf landwirtschaftlich genutzten Böden stattfindet (BML-RT, 2021). Als rein wasserrechtliches Instrument zur Flächensicherung steht das Wasserwirtschaftliche Regionalprogramm zur Verfügung. Dieses kann zum Zwecke der Verringerung hochwasserbedingter Auswirkungen in jeder individuell definierten Region auf der Grundlage der Gefahrenkartierung verordnet werden, um Flächen rechtsverbindlich zu schützen. Es wurde aber für den Hochwasserschutz bisher selten genutzt (SEHER & LÖSCHNER, 2018b).

Zuständig für die Schutzwasserwirtschaft sind – abhängig vom Gewässer – die Landesbehörden der Bundeswasserbauverwaltung, die Wildbach- und Lawinenverbauung oder die Österreichische Wasserstraßengesellschaft. Die Finanzierung von Projekten der Schutzwasserwirtschaft ist das wichtigste Steuerungsinstrument und wird nach dem Wasserbautenförderungsgesetz und den dazugehörigen technischen Richtlinien (WBFG 1985; RIWA-T, 2016; RI-WA-T-BWS, 2010; TRL-WLV, 2015) gewährt. Die technischen Richtlinien legen fest, dass höherwertige Nutzungen wie Siedlungen und wichtige Wirtschafts- und Verkehrseinrichtungen vor Hochwasser geschützt werden, während landwirtschaftliche Flächen für den Hochwasserrückhalt genutzt werden sollen (RIWA-T, 2016). Voraussetzung für eine Förderung ist das Vorhandensein eines GE-RM (Gewässerentwicklungs- und Risikomanagementkonzept) im jeweiligen Einzugsgebiet oder Gewässerabschnitt. Dieses vergleichsweise neue Instrument der Schutzwasserwirtschaft versucht, alle Anspruchsgruppen und deren Interessen zusammenzuführen, um breit akzeptierte und nachhaltige Maßnahmen auf Ebene von Gewässerabschnitten oder Einzugsgebieten zu entwickeln. Dabei werden bestehende Regelungen der Raumplanung integriert und landwirtschaftliche Interessengruppen in den Beteiligungsprozess einbezogen. Für die Bearbeitung regionaler Projekte der Schutzwasserwirtschaft können sich Gemeinden zu Wasserverbänden nach den Bestimmungen des Wasserrechtsgesetzes (WRG, 1959) zusammenschließen. Für die Realisierung eines Hochwasserschutzprojektes werden Grundflächen sowohl für Bauwerke als auch für den Wasserrückhalt im Ereignisfall benötigt. Die Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer müssen für die Nutzung ihrer landwirtschaftlichen Flächen sowie für die entstandenen Beeinträchtigungen im Schadensfall entschädigt werden. Die Bedingungen dafür werden zivilrechtlich ausgehandelt und mit privatrechtlichen Vereinbarungen und Verträgen zwischen den Grundeigentümerinnen und Grundeigentümern und den Wasserverbänden/Wassergenossenschaften geregelt.

## 5.3.2 Prozesse und deren Akteurinnen und Akteure im Hochwasserrisikomanagement

Im Planungsprozess eines HWRM-Projektes sind unterschiedliche Akteurinnen und Akteure involviert, die in Abbildung 21 zu sehen sind. Die Landwirtschaftskammer (LK) wird dabei fallweise, aber nicht zwangsweise eingebunden.

Die folgende Abbildung 22 zeigt eine Grundstruktur, wie solche Prozesse typischerweise unter besonderer Berücksichtigung des Wasserrechts-, Naturschutz- sowie des Raumordnungsgesetzes ablaufen. Eine betroffene Gemeinde tritt als Initiator (Interessent) eines Hochwasserschutzprojektes auf. Im Bedarfsfall kann die Gemeinde in Kooperation mit anderen Gemeinden einen Hochwasserschutzverband gründen, um ein gemeinsames Projekt zum Hochwasserschutz regional zu planen. In die Projektpla-



Abb. 21.

Hauptakteurinnen und -akteure im Prozess von Hochwasserrisikomanagement-Projekten in Bezug zur Landwirtschaft (Darstellung BAB).



nung ist von Beginn an die Abteilung Schutzwasserwirtschaft des jeweiligen Bundeslandes (sie setzen Agenden der Bundeswasserbauverwaltung in den jeweiligen Bundesländern um) bzw. die zuständige Gebietsbauleitung der Wildbach- und Lawinenverbauung miteinbezogen, diese spielen eine wichtige Rolle als Beraterinnen und Begleiterinnen der Gemeinde bzw. des Verbandes. Dabei empfehlen sie geeignete Maßnahmen für einen Hochwasserschutz und beraten Gemeinden/Verbände, wie solche unter Einhaltung der geltenden Förderrichtlinien in die Praxis umgesetzt werden können. Dafür wird eine detaillierte Projektstudie erstellt, die oftmals auch weitere Expertinnen und Experten, z.B. aus der Wissenschaft, miteinbezieht. In einem weiteren Schritt werden die vorwiegend landwirtschaftlichen Grundeigentümer über die geplanten Schritte auf ihren Flächen informiert. Es folgen Verhandlungen zu Verkäufen bzw. Nutzungsvereinbarungen und deren finanzielle Abgeltung. Dabei wird oft auch die Landwirtschaftskammer als gesetzliche Vertretung der Landwirtinnen und Landwirte involviert. Deren Vertreter beraten diese rechtlich und leisten einen allgemeinen Beistand sowie Beratung bei Verhandlungen. Nach einer Einigung aller involvierten Beteiligten kann eine Ausschreibung der Planung durch ein Zivilingenieurbüro erfolgen, daraufhin folgt der Bau als finaler Schritt.

## 5.3.3 Entschädigungen für landwirtschaftliche Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer

Für ein Hochwasserschutzprojekt werden Flächen sowohl für Bauwerke, als auch für die Hochwasserretention im Ereignisfall benötigt. Die Nutzung dieser im Normalfall landwirtschaftlichen Böden muss den Grundeigentümerinnen und Grundeigentümern entsprechend entschädigt werden. Die Grundlage für die Entschädigung bildet ein Gutachten, das den Basispreis der Fläche ermittelt, welcher aufgrund der Verkehrswerte der letzten Jahre errechnet wird. Abb. 22. Grundstruktur des Prozessablaufes (Darstellung BAB).

Entschädigungen sind gemäß Wasserbautenförderungsgesetz 1985 förderfähig, vorausgesetzt, dass diese den im Gutachten ermittelten Wert nicht übersteigen. Darüber hinaus können Gemeinden/Verbände den Eigentümerinnen und Eigentümern einen Toleranzzuschlag bezahlen, der jedoch nicht aus den öffentlichen Geldern stammen darf.

Es gibt prinzipiell drei Möglichkeiten der Entschädigungen (Abb. 23): 1. Einrichtung einer Dienstbarkeit, 2. Ankauf der Fläche oder 3. Tausch gegen eine andere Fläche.

## 5.3.4 Barrieren in Prozessen des Hochwasserrisikomanagements aus Sicht landwirtschaftlicher Akteurinnen und Akteure

Nutzungskonflikte um landwirtschaftliche Böden nehmen allgemein zu und führen auch im Hochwasserrisikomanagement zu Problemen. Es gibt österreichweit einige Hochwasserschutzprojekte, in denen seit Jahren Konflikte schwelen und eine Umsetzung weit entfernt scheint. Im Rahmen der Untersuchungen haben sich einige besonders problematische Punkte gezeigt, die als Barrieren für die Umsetzung von Hochwasserschutzprojekten auftreten und zu Konflikten führen können.

#### **Unterschiedliche Interessen**

Für die Umsetzung eines HWRM-Projektes braucht es Vereinbarungen zwischen den betroffenen Akteurinnen und Akteuren, die in der Landwirtschaft in erster Linie landwirtschaftliche Flächen und die Entschädigungen für deren Inanspruchnahme betreffen. Lösungen zu finden, die von allen Beteiligten akzeptiert werden, ist in der Praxis oft ein schwieriges Unterfangen. Landwirtinnen und Landwirte sehen mit dem Verkauf bzw. der Beeinträchtigung ihrer Flächen oft die Existenzgrundlage ihrer Betriebe bedroht. Für sie ist ein Ausgleich dieser Verluste daher wesentlich und hat "angemessen" zu sein, weshalb sich einzelne Eigentümerinnen und Eigentümer auch weigern, eine

Dienstbarkeit/Servitut	Ankauf von Flächen	Tauschflächen
<ul> <li>Finanzielle Abgeltung der Duldung - Dienstbarkeitsvertrag (kann auch zwangsrechtlich eingeräumt werden)</li> <li>Finanzielle Abgeltung von Schäden für Ernteverluste, Räumung, Entsorgung <ul> <li>einmalig oder</li> <li>im Ereignisfall</li> </ul> </li> </ul>	<ul> <li>Flächen für Bauwerke werden angekauft</li> <li>häufig überschwemmte Flächen (bis HQ 5) werden angekauft</li> <li>auch andere Retentionsflächen können angekauft werden</li> <li>für passiven Hochwasserschutz</li> </ul>	<ul> <li>benötigte Flächen werden gegen gleichwertige landwirtschaftliche Flächen getauscht</li> </ul>
Abb. 23. Formen der Entschädigung für Retentionsflächen (Da	etallung RAR)	

Beeinträchtigung ihrer Flächen zu dulden. Behördenvertreterinnen bzw. Behördenvertreter treten ihnen gegenüber oft sehr hoheitlich auf, sie berufen sich dabei auf bestimmte Gesetze (v.a. Wasserrechts-, Raumplanungs-, Naturschutzgesetz), die sie vertreten und drohen auch mit der Umsetzung dieser mittels Enteignungsverfahren und Zwangseinräumungen von Dienstbarkeiten. Alle involvierten Beteiligten treten mit starken Eigeninteressen ihres Fachgebietes auf.

#### Fehlende Kommunikation und Koordination

Die Wahrnehmungen der beteiligten Akteurinnen und Akteure hinsichtlich der Verhandlungsprozesse in den wasserrechtlichen Verfahren unterscheiden sich sehr deutlich voneinander. Während seitens der Schutzwasserwirtschaft das sektorale Verhältnis als gleichberechtigt beschrieben wird, erleben die landwirtschaftlichen Eigentümer diese Verfahren oft als hierarchisch und von der Schutzwasserwirtschaft dominiert. Obwohl sich die meisten Beteiligten darin einig sind, dass eine ausreichende Kommunikation essentiell ist, wird diese seitens der Landwirtschaft oft als unzureichend erlebt. Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer werden oft erst zu einem späten Zeitpunkt involviert, wo Pläne bereits fertiggestellt sind und kaum mehr Handlungsspielräume bestehen. Sie fühlen sich oft nicht ausreichend informiert und können dadurch auch viel Unsicherheit erleben.

#### Widerstandsgruppen

Besonders bei geplanten Großprojekten gibt es in einigen Fällen Widerstand gegen geplante Hochwasserschutzmaßnahmen und die damit verbundenen Veränderungen. Vor allem landwirtschaftliche Grundeigentümer wollen ihre Flächen aus unterschiedlichen Gründen oft nicht verkaufen oder auch keine Einschränkungen dulden. Widerstandsgruppen bilden und stärken sich häufig mithilfe diverser Social-Media-Kanäle und können Projekte stark verzögern oder sogar verhindern.

#### (Un)Faire Entschädigungen

Ein besonders heikler und oft problematischer Punkt im Prozess sind die Entschädigungen, die Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer für die Nutzung ihrer Flächen erhalten sollen. Prinzipiell wird im Rahmen eines Gutachtens ein Basispreis für die benötigte Fläche festgelegt, der die Grundlage für jegliche Entschädigung bildet. Dieser Basispreis wird von Grundeigentümerinnen und Grundeigentümern oft als zu niedrig empfunden, da sich dessen Ermittlung auf vergangene Verkehrswerte bezieht. Es ist daher häufig nötig, dass die Gemeinde oder der Verband zusätzlich noch einen Akzeptanzzuschlag bezahlen, um eine Zustimmung zu erlangen. Diese Variante kann aber keine Lösung für alle Projekte sein, da nicht alle Gemeinden/Verbände über entsprechende finanzielle Mittel verfügen. Die Besteuerung einer Entschädigung kann ebenfalls problematisch werden, da laut landwirtschaftlicher Vertretung nicht ausreichend geregelt ist, ob diese zu versteuern ist. Die einmalige Auszahlung der durch Hochwasser entstehenden Schäden an Flächen wird von den meisten Wasserbaubehörden präferiert, da die Abwicklung der Förderungen unbürokratischer ausfällt. Aus landwirtschaftlicher Sicht wird diese jedoch oft als unfair empfunden, da zukünftige Entwicklungen unsicher sind und die Landwirtinnen und Landwirte damit Risiken alleine tragen müssten (z.B. Kosten für zukünftige Bewirtschaftungsauflagen).

#### Flächenverlust

Bei der Umsetzung eines Hochwasserschutzprojektes kommt es in jedem Fall zu Verlusten oder Beeinträchtigungen von landwirtschaftlich nutzbaren Flächen. Vor allem vor dem Hintergrund des Rückganges von Agrarflächen in Österreich stellen sich landwirtschaftliche Beteiligte die Frage, ob landwirtschaftlich hoch produktive Flächen als Retentionsflächen dienen sollen. Für Landwirtinnen und Landwirte selbst sind diese Flächen oft von großer Bedeutung, um ihren Betrieb aufrechterhalten zu können. Der Tausch von Flächen, der Verluste abwenden könnte, ist in vielen Fällen aufgrund der Flächenknappheit in einigen Regionen Österreichs nicht oder kaum möglich. Aufgrund des starken Preisdrucks für landwirtschaftliche Produkte sehen viele Landwirtinnen und Landwirte längerfristige betriebliche Überlebenschancen nur in der Mehrproduktion, die jedoch mit weniger Fläche schwierig zu bewerkstelligen ist.

#### Fehlender Ausgleich zwischen Ober- und Unterlieger

Der steigende Bedarf an Siedlungs- und Industriegebieten führt zu Umwidmungen von meist landwirtschaftlich genutzten Flächen. Da Flächen für Wohnsiedlungen und Industrie in Österreich ausreichend vor Hochwassern geschützt werden müssen, führen solche neuen Widmungen auch des Öfteren zu einem höheren Bedarf an Hochwasserschutzmaßnahmen, wo abermals landwirtschaftliche Flächen als Retentionsräume gebraucht werden. Mit der Umwidmung, z.B. von landwirtschaftlicher Nutzung auf Industriegebiet, geht auch eine Wertsteigerung dieser Fläche einher. Die Entschädigungen für Retentionsflächen erhöhen sich dadurch jedoch nicht. Das heißt, dass Unterlieger sowohl von einer Umwidmung und entsprechender Wertsteigerung, als auch von einer verbesserten Hochwassersituation profitieren, während Oberlieger Flächen für den Hochwasserschutz zur Verfügung zu stellen haben, deren Entschädigungen auf dem Verkehrswert der letzten fünf Jahre basieren. Diese Situation der ungleichen Verteilung von Vor- und Nachteilen empfinden viele landwirtschaftliche Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer als ungerecht. Dieses Empfinden kann dazu führen, dass diese kaum Verständnis für Hochwasserschutzmaßnahmen und den damit verbundenen Bedarf an Retentionsflächen aufbringen können. Der fehlende Ausgleich zwischen Oberund Unterliegern führt daher immer wieder zu Widerständen und Konflikten.

# 5.4 Die Entschädigungsrichtlinie des Bundeslandes Salzburg als Koordinationsinstrument – das Fallbeispiel Gainfeldbach in der Stadtgemeinde Bischofshofen

Die Landwirtschaftskammer Salzburg tritt in HWRM-Projekten immer wieder sowohl als Sachverständige, als auch als Interessensvertretung für landwirtschaftliche Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer auf. Das Thema der Entschädigungen zeigte sich dabei immer wieder als essentiell für das Zustandekommen solcher Proiekte. In den Jahren 2020 und 2021 wurde von der Landwirtschaftskammer Salzburg in Abstimmung mit der Wildbach- und Lawinenverbauung eine Grundlage für privatrechtliche Übereinkünfte bei Hochwasserschutzprojekten sowie eine Muster-Vereinbarung erstellt. Diese sollen Dienstbarkeit und Entschädigung sowie sonstige Rahmenbedingungen für landwirtschaftliche Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer regeln. In der Unterlage werden Regelungen für die Dauer der Bauzeit, für die Betriebsphase sowie für ein Hochwasserereignis genau erläutert. In der vertraglichen Vereinbarung zwischen Genossenschaft bzw. Gebietskörperschaft und landwirtschaftlichem Grundeigentümer wird Folgendes geregelt: 1. Vertragsgegenstand, 2. Entschädigung, 3. Regelungen für die Dauer der Bauzeit, 4. Regelungen für die Dauer der Betriebsphase, 5. Regelungen im Anlassfall, 6. Kaution, 7. Schadenersatz und Haftung, 8. Meistbegünstigtenklausel, 9. Kosten und Gebühren sowie 10. Sonstige Bestimmungen. Diese Unterlage samt Muster-Vertragsvereinbarung wurden seit der Erstellung schon mehrmals angewandt (z.B. bei Projekten in Bischofshofen und Bad Hofgastein).

Für das Stadtzentrum von Bischofshofen stellen große Wildholz-, Geschiebe- und Hochwassermengen aus dem rund 12,5 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiet des Gainfeldbaches (Abb. 24) eine erhebliche Bedrohung für Bauten und Verkehrswege dar. Auf Grund der großen Gefährdung sollten mittels baulicher Maßnahmen – geplant von der Wildbach- und Lawinenverbauung – Geschiebeherde abgesichert, Schadgeschiebe und Wildholz zurückgehalten sowie Hochwasserspitzen gedrosselt werden.

Für das Projekt wurden Gesamtkosten von 5,2 Mio. € veranschlagt, wovon 60 % vom Bund, 15 % vom Land Salzburg sowie 25 % von den Interessenten zu tragen sind. Die



Abb. 24. Fallbeispiel Projekt Gainfeldbach in der Stadtgemeinde Bischofshofen (Quelle: Darstellung BAB nach Daten von basemap.at, Umweltbundesamt).

Kosten der Interessenten werden zu 60 % (750.000 €) von der Gemeinde Bischofshofen und zu 40 % (500.000 €) von der Wassergenossenschaft Gainfeldbach finanziert. Der Anteil der Wassergenossenschaft wird unter allen Liegenschaftseigentümerinnen und -eigentümern aufgeteilt, die sich laut Gefahrenzonenplan in der gelben oder roten Zone befinden.

Nachdem es bereits seit 2010 Versuche für die Umsetzung eines Projektes gab, welche jedoch aufgrund von Widerständen scheiterten, wurde 2019 ein neuer Versuch unternommen. Bei diesem gab es Bestrebungen, die Abwicklungen des Projektes fairer zu gestalten. Der Gefahrenzonenplan musste überarbeitet werden, was dazu führte, dass die Gefahrenzonen ausgeweitet wurden und damit die Kosten für die einzelnen Grundeigentümer erheblich gesenkt werden konnten. Noch im selben Jahr konnte die Wassergenossenschaft Gainfeldbach gegründet werden. Die landwirtschaftlichen Grundbesitzer, deren Flächen durch die baulichen Maßnahmen beeinträchtigt sind, wurden von der Wildbach- und Lawinenverbauung gemeinsam mit der Landwirtschaftskammer (LK) Salzburg kontaktiert. Diese wurden durch die Wildbach- und Lawinenverbauung über die konkreten Vorhaben und etwaige Benachteiligungen informiert. Darüber hinaus fanden gemeinsame Begehungen der betroffenen Flächen statt, die auch die Grundlage für die Flächenberechnungen bildeten. Darauf aufbauend wurde von der LK eine gutachterliche Stellungnahme erarbeitet und im Rahmen einer vertraglichen Vereinbarung konnten sowohl Entschädigungssummen als auch inhaltliche Details mit den Grundbesitzerinnen und Grundbesitzern geregelt werden. Diese waren mit den inhaltlichen Regelungen auf Basis der Entschädigungsrichtlinie zufrieden und nahmen diese ohne Nachverhandlungen an. Der geplante Baubeginn 2021 musste aufgrund einer Beschwerde des Fischereiberechtigten und Erstellung eines diesbezüglichen Gutachtens auf 2022 verschoben werden.

# 5.5 Schlussfolgerungen

Die Flächenbilanzen zeigen, dass signifikante Anteile der landwirtschaftlich genutzten Flächen Österreichs in Hochwasserrisikogebieten liegen. Umso mehr in alpinen Regionen, wo zudem die hochwertigsten und für die Landwirtinnen und Landwirte und die Ernährungssicherung wertvollsten Böden in oft engen Tallagen hochwassergefährdet sind. Deshalb sollte das Bewusstsein um die Bewahrung hochwertiger landwirtschaftlicher Flächen gesteigert werden. Im Hochwasserrisikomanagement sollte jedenfalls eine differenzierte ökologische und ökonomische Bewertung der Landwirtschaftsflächen erfolgen, damit die regionale Ernährungssicherung und die ökonomische Tragfähigkeit für die Landwirtschaft in alpinen Bereichen auch in Klimawandelszenarien berücksichtigt und bewahrt bleiben.

Es wurde aufgezeigt, dass das österreichische Landwirtschaftsgesetz beim Schutz landwirtschaftlicher Flächen vor Landnutzungsänderungen kaum greift, da es keine spezifischen Instrumente zur Flächensicherung bietet. Ein gewisser Schutz landwirtschaftlicher Flächen wird indirekt über politische Instrumente der Raumplanung (unterschiedliche Möglichkeiten in Bundesländern) und der Wasserwirtschaft (Wasserwirtschaftliches Regionalprogramm) gewährt, aber es mangelt an Durchsetzungskraft und Nutzung. Während die Bereitstellung von Flächen für ein bestimmtes Hochwasserschutzprojekt auf der Ebene privater Verträge erfolgt, bei denen die Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer ihre persönlichen Interessen vertreten, ist das gesellschaftliche Interesse am Erhalt landwirtschaftlicher Flächen in diesem Prozess nicht vertreten. Der RMP (BMLRT, 2021) thematisiert im Maßnahmenkapitel der Raumplanung den steigenden Bodenverbrauch und die damit einhergehenden landwirtschaftlichen Flächenverluste, mit negativen Folgen für die Ernährungssicherheit und steigendem Hochwasserrisiko. Landwirtschaftliche Flächen ohne bauliche Veränderungen werden in der Risikobewertung des RMP selbst nicht als Schutzgut gesehen, sondern als Retentionsraum bzw. Flächen für Hochwasserschutzmaßnahmen, weil sie im Vergleich von zu schützenden "höherwertigen Nutzungen" ein geringeres Schadenspotential aufweisen. Da höherwertige Nutzungen an Fläche zunehmen, während die Ausdehnung landwirtschaftlicher Flächen abnimmt (JUNGER et al., 2022), wächst das Spannungsfeld zwischen Anbietern und Nutznießern von Hochwasserschutzmaßnahmen. Neue Instrumente gehen in Richtung eines integrativen Landnutzungsmanagements auf regionaler Ebene - wie das Gewässerentwicklungsund Risikomanagementkonzept (GE-RM), das als Fördervoraussetzung für Hochwasserschutzprojekte erstellt werden muss. Die Umsetzung des GE-RM befindet sich erst in der Anfangsphase, der interdisziplinäre Ansatz und die regionale flussgebietsbezogene Perspektive dieses Instruments scheinen jedoch geeignet zu sein, die Landwirtschaft umfassend in den Prozess des HWRM einzubeziehen.

Die landwirtschaftliche Bewirtschaftungspraxis beeinflusst kumulativ den Wasserabfluss im Einzugsgebiet (ZISCHG et al., 2012). Im Rahmen der GAP bestehen Fördermaßnahmen für Bewirtschaftungsformen, mit denen das Hochwasserrisiko in einem gewissen Ausmaß beeinflusst werden kann, wobei dieser Einfluss in alpinen Bereichen und engeren Tallagen geringer ist (BMLRT, 2021). Die Maßnahmen sind mit dem Nationalen Hochwasserrisikomanagementplan RMP abgestimmt und sollen als Kooperation weitergeführt und weiterentwickelt werden (BMLRT, 2021).

Befragte Akteurinnen und Akteure berichten von zunehmenden Konflikten im Rahmen von Projekten zum Hochwasserschutz. Unterschiedliche Interessen der Involvierten und entstehende Widerstände sollten dabei ernst genommen werden, um erfolgreiche Lösungen für das HWRM zu schaffen. Prozesse können nur dann langfristig erfolgreich sein, wenn alle relevanten Akteurinnen und Akteure rechtzeitig einbezogen werden und die Möglichkeit haben, ihre Bedürfnisse und Befürchtungen bezüglich eines geplanten Projekts zu äußern. KENYON et al. (2008) bezeichnen die Einbeziehung des Agrarsektors in das HWRM als entscheidend, doch die derzeitige Situation hinkt dieser Forderung hinterher. Aktuelle politische Dokumente, wie der Nationale Hochwasserrisikomanagementplan und das GE-RM, fordern eine Beteiligung aller betroffenen Akteurinnen und Akteure. Landwirtschaftliche Grundeigentümerinnen und -eigentümer und die Interessen des gesamten Agrarsektors in regional- bzw. volkswirtschaftlicher Sicht sollten dabei als relevante Akteurinnen und Akteure im Prozess anerkannt werden und dürfen nicht nur als Flächenanbieter gesehen werden. Da der Ausgleich sehr unterschiedlicher Landnutzungsinteressen ein schwieriges Unterfangen ist, erscheint eine neutrale Prozessmoderation als eine wesentliche Voraussetzung für die Überwindung von Barrieren im HWRM. Vor dem Hintergrund der sehr hohen Kosten für die Planung und Umsetzung von Hochwasserschutzbauten würden zusätzliche Kosten für eine neutrale und professionelle Prozessbegleitung nur wenig ins Gewicht fallen und wären sicherlich sinnvoll eingesetzt.

Aus den zuvor erläuterten Problemfeldern ergeben sich drei wesentliche Lösungsansätze, die von den landwirtschaftlichen Akteurinnen und Akteuren als sinnvoll erachtet werden, um Barrieren zu überwinden und Prozesse des HWRM erfolgreicher zu gestalten.

# Attraktive Konditionen für Grundeigentümerinnen und Grundeigentümern

Für landwirtschaftliche Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer sind angemessene Konditionen essentiell, damit Projekte auch zustande kommen. Für die Höhe der Entschädigung wird ein Basispreis für Flächengründe vergangenheitsorientiert errechnet - das ist oft ein Hindernis, weil Eigentümer sehen, dass Flächenpreise aktuell höher sind. Die Lösung dafür ist in der Praxis oft eine zusätzliche Auszahlung von Akzeptanzzuschlägen durch Gemeinden, Verbände oder Genossenschaften. Die landwirtschaftliche Vertretung plädiert daher für eine Aufstockung des Projektbudgets für Entschädigungen und eine zukunftsorientierte Bewertung der Flächen, wo aktuelle und zukünftige Wertsteigerungen berücksichtigt werden. Als wichtig wird dabei auch eine transparente Abwicklung angesehen, wo alle Flächeneigentümer dieselben Konditionen erhalten. Ein Konfliktthema sind oft auch die Kosten auf landwirtschaftlichen Flächen, die im Ereignisfall anfallen (z.B. für Ernteausfälle, Sanierungen). Dabei wird die anlassbezogene Auszahlung von landwirtschaftlicher Seite als fairer empfunden, da Landbewirtschaftenden damit garantiert ist, dass alle tatsächlich anfallenden Kosten übernommen werden. Ein weiteres Thema ist die steuerliche Behandlung von Entschädigungen, die derzeit unklar ist. Als Vorbild dafür könnte das Abzugssteuermodell im Leitungsbau sein, wo der Projektwerber im Vorhinein einen fixen Prozentsatz an Steuern abliefert. Die von der LK Salzburg erarbeitete Entschädigungsrichtlinie kann ebenfalls dazu beitragen, dass Konditionen für landwirtschaftliche Grundeigentümer umfangreicher und transparenter geregelt werden. In dem Mustervertrag werden vielfältige Themen, wie z.B. Schadenersatz. Haftung oder Flächensanierung geregelt, sodass bei zukünftigen Hochwasserereignissen mehr Rechtssicherheiten für die Eigentümer bestehen und die Bedingungen nicht immer in eigener Verantwortung neu verhandelt werden müssen.

#### Ausgleich zwischen Oberliegern- und Unterliegern

Wie bereits erläutert, sind die Vor- und Nachteile zwischen Ober- und Unterliegern im Fall eines Hochwasserschutzes ungleich verteilt. Solange es dazu keine rechtlichen Lösungen gibt, sind vor allem Wasserverbände und Wassergenossenschaften gefragt, Maßnahmen für einen Ausgleich zu setzen. Ein Vorschlag eines Interviewten wären jährliche Zahlungen von Unterliegern, die von Maßnahmen profitieren, in einer Art Versicherungsmodell. Es könnten auch richtungsweisende Fallbeispiele als Beispiele der guten Praxis dienen, wie z.B. die Gemeinde Bischofshofen, wo alle von den Schutzmaßnahmen Profitierenden einen finanziellen Beitrag leisten, der unter anderem für Kompensationszahlungen an Flächeneigentümerinnen und -eigentümer verwendet wird. In der Gemeinde wurde das Projekt erst akzeptiert, nachdem in einem zweiten Anlauf alle vom Projekt Profitierenden (Unterlieger) miteinbezogen wurden und damit die finanziellen Summen für Einzelne verringert werden konnten. Relevante Akteurinnen und Akteure könnten auch selbst gemeinsam in einem (begleiteten) Prozess Lösungen erarbeiten, die auf einen Ausgleich zwischen Ober- und Unterliegern abzielen. Diese könnten stark zur Akzeptanz und somit auch Umsetzbarkeit von HWRM-Projekten beitragen.

#### Verbesserte Koordination und Kommunikation

Für eine aute Koordination von Prozessen und Kommunikation innerhalb dieser sollten entsprechende zeitliche, finanzielle und personelle Ressourcen zur Verfügung gestellt werden. In den Interviews wurde immer wieder darauf hingewiesen, dass Kommunikation entweder "nicht auf Augenhöhe" passiere oder prinzipiell unzureichend stattfinde. Obwohl Bewusstsein für die Bedeutung einer guten Kommunikation vorhanden ist, werden kaum eigene Mittel dafür in HWRM-Projekten eingeplant. Im Rahmen der Interviews wurde eine neutrale Prozessmoderation vorgeschlagen. Moderatorinnen und Moderatoren könnten Diskussionen professionell leiten, dafür sorgen, dass alle eingebundenen Beteiligten gleich und fair behandelt werden, sowie, dass ausreichend Raum für die Äußerung von Bedürfnissen und Ängsten vorhanden ist. Moderierte Prozesse könnten darüber hinaus helfen, mehr Vertrauen und gemeinsames Verständnis zu entwickeln und damit potentielle Konflikte vorab zu entschärfen.

# 6 Hochwasserschutz und Raumplanung mit Schwerpunkt auf Restrisikobereichen

Die Überlagerung von potentiellen Siedlungsgebieten mit Gefahrengebieten bzw. jenen Flächen, die für Hochwasserabfluss und Hochwasserrückhalt benötigt werden, stellt eine Herausforderung für die Koordination zwischen Raumplanung und Hochwasserschutz dar. Trotz Fortschritten bei der Eindämmung des Anstiegs der Hochwasserexposition von Menschen und Sachwerten bleibt die Siedlungsentwicklung ein wesentlicher Treiber des Hochwasserrisikos (ELMER et al., 2012; LÖSCHNER et al., 2017). Hohe Risiken treten verstärkt in baulich intensiv genutzten Gebieten mit mittlerer bzw. geringer Hochwassergefährdung auf, insbesondere auch in Restrisikobereichen, in denen technische Hochwasserschutzmaßnahmen eine bauliche Nutzung auf ehemals gefährdeten Flächen ermöglichen (NACHTNEBEL & APPERL, 2015). Der Anstieg des Schadenspotentials als Folge der Siedlungsentwicklung in Restrisikobereichen wird in der Literatur als Dammeffekt beschrieben (vgl. u.a. BURBY, 2006; CUTTER et al., 2018; DI BALDASSARRE et al., 2018). Wir betrachten den Dammeffekt nicht als unweigerliche Konseguenz der Errichtung von technischen Hochwasserschutzmaßnahmen, sondern als Auswirkung einer Interaktion von Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung (SEIFERT, 2012; WOLTER-KRAUTBLATTER et al., 2016) und damit als Thema der Politikkoordination. Das Verständnis von Restrisiko in diesem Projektteil basiert auf den Technischen Richtlinien der Bundeswasserbauverwaltung (RIWA-T), nach denen sich das Restrisiko aus dem akzeptierten Risiko, dem unbekannten Risiko und dem Risiko aufgrund ungeeigneter Maßnahmen zusammensetzt (BMLFUW, 2015). Für das Zusammenspiel von Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung ist besonders das akzeptierte Risiko von Relevanz. Die Akzeptanz von Restrisiken nach der Errichtung technischer Hochwasserschutzmaßnahmen bringt zum Ausdruck, dass vor allem aus wirtschaftlichen Gründen nicht alle Risiken vermieden werden können

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich das Interaktionsfeld Hochwasserschutz und Siedlungsentwicklung

- mit der Exposition von Siedlungsbereichen gegenüber Hochwassergefahren im historischen Vergleich als Aufarbeitung des Problems, das die Motivation für die Politikkoordination in diesem Interaktionsfeld darstellt;
- mit dem Prozess der Politikkoordination anhand der Abstimmung von Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung zu diesem Themenfeld sowie mit dem Umgang mit Restrisiken in den Raumplanungsinstrumenten und -prozessen und
- mit bestehenden Ansätzen und Optionen der Politikkoordination in diesem Interaktionsfeld zur Bewertung der Effektivität der Politikkoordination im Hinblick auf eine Vermeidung bzw. Verringerung von Hochwasserrisiken.

# 6.1 Methodik

Die in diesem Interaktionsfeld angewendeten Methoden umfassen eine GIS-basierte Analyse und Auswertung zur Darstellung der (Veränderung der) Hochwasserexposition von Siedlungsbereichen im historischen Vergleich (Expositionsanalyse), Literatur- und Dokumentenanalyse sowie Interviews mit Expertinnen und Experten zur Analyse des Prozesses der Politikkoordination zwischen Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung sowie zur Untersuchung eines bestehenden Ansatzes der Politikkoordination mittels einer Fallstudie im oberösterreichischen Machland. Eine zweite Fallstudie zur Revision von Gefahrenzonenplänen und zum raumplanerischen Umgang mit Restrisiken in alpinen Gemeinden Vorarlbergs wurde als Masterarbeit im Zuge von PoCo-FLOOD am Institut für Raumplanung, Umweltplanung und Bodenordnung der Universität für Bodenkultur Wien durchgeführt (FELLINGER, 2020). Die in dieser Arbeit verwendeten Methoden werden am Ende des Methodenkapitels gesondert dargestellt.

Für die Expositionsanalyse wurde mithilfe der GIS-Software ArcGIS die Siedlungsentwicklung im Hochwasserabflussgebiet zwischen 1826 und 1859 (die Zeitspanne ergibt sich aus den Jahren, in denen die historischen Datengrund-

lagen jeweils erstellt wurden) und 2016 analysiert. Die Daten zu den Siedlungsflächen und den Hochwasserabflussgebieten stammen aus dem Arbeitspaket "Historische Landnutzung und Fließgewässerkorridore' (vgl. Kap. 3.1 und HOHENSINNER et al., 2021a). Für die Analyse wurde die historische Siedlungsfläche mit der aktuellen Siedlungsfläche überlagert. Die Differenz der beiden Datensätze stellt die Siedlungsentwicklung im jeweils untersuchten Zeitraum dar. Die historischen und aktuellen Siedlungsflächen wurden im nächsten Schritt jeweils mit der ermittelten Hochwasserabflussfläche überlagert. Diese Hochwasserabflussfläche stellt eine Umhüllende der räumlichen Ausdehnung aktueller Hochwasserextremereignisse (zumeist HQ300) aus verschiedenen Datengrundlagen dar, die sowohl für die Ermittlung der aktuellen als auch der historischen Hochwasserexposition verwendet wurde (Kap. 3.1). Diese Überlagerung erfolgte, um die Siedlungsentwicklung innerhalb und außerhalb des Hochwasserabflussgebietes zu ermitteln. Die Resultate der Überlagerung wurden in MS-Excel bearbeitet, um auch die relative Entwicklung der Siedlungsflächen analysieren zu können. Dafür wurde die aktuelle durch die historische Siedlungsfläche (jeweils innerhalb und außerhalb der Hochwasserabflussfläche) dividiert und ein Faktor ermittelt, der das Ausmaß der relativen Siedlungsentwicklung beschreibt. Zusätzlich zur zeitlichen Analyse wurden die Ergebnisse zur Siedlungsentwicklung nach Gemeinden (bezogen auf heutige Gemeindeflächen) aufgeschlüsselt und so auch die räumliche Verteilung der Hochwasserexposition untersucht.

Die Analyse des Prozesses der Koordination zwischen Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung und die Fallstudie im oberösterreichischen Machland basieren auf den Ergebnissen von Literatur- und Dokumentenanalysen sowie auf Interviews mit Expertinnen und Experten. Mittels Literaturanalyse wurden wissenschaftliche Beiträge zu den Themen dieses Interaktionsfelds ausgewertet. Die Dokumentenanalyse beinhaltet die Untersuchung von facheinschlägigen Gesetzen, Richtlinien, Konzepten, Planungsempfehlungen, Maßnahmenplänen und Planungsinstrumenten auf den Ebenen von Bund, Bundesländern und Gemeinden. Zur Analyse des Koordinationsprozesses wurden 21 leitfadengestützte Interviews mit 25 Expertinnen und Experten aus den Bereichen Schutzwasserwirtschaft (auf Bundes- und Landesebene sowie international), Raumplanung (auf Landesebene und international), Versicherungswirtschaft und Zivilschutz geführt. Für die Fallstudie im oberösterreichischen Machland wurden drei Bürgermeister zum Themenbereich Hochwasserschutz und örtliche Raumplanung und ein Vertreter der Machlanddamm GmbH zum Katastrophenschutz auf der Grundlage von Interviewleitfäden befragt. Die Interviews wurden mit einer Ausnahme (das Interview wurde nur protokolliert) aufgenommen, transkribiert, inhaltlich kodiert und mit Hilfe der Software MAXQDA analysiert. Als Grundlage für die inhaltliche Auswertung wurde die strukturierte Inhaltsanalyse nach MAYRING (2015) herangezogen.

Die Ergebnisse der als weitere Fallstudie für dieses Interaktionsfeld herangezogenen Masterarbeit "Revision von Gefahrenzonenplänen und ihre Wirkung auf die örtliche Raumplanung – die Wechselwirkung zwischen technischen Schutzmaßnahmen, Gefahrenzonen und räumlicher Entwicklung in alpinen Regionen am Beispiel Vorarlberg' (FELLINGER, 2020) basieren zum einen auf einer Analyse von Gesetzen, Richtlinien, Bescheiden und Planungsdokumenten (v.a. Gefahrenzonenpläne und Flächenwidmungspläne). Weiters wurden in vier Gemeinden in Vorarlberg die Auswirkungen von technischen Schutzmaßnahmen auf die Flächenwidmung und die weitere Siedlungsentwicklung anhand von GIS-basierten Analysen und von leitfadengestützten Interviews mit Expertinnen und Experten untersucht. Die Interviews wurden mit Vertreterinnen und Vertretern der untersuchten Gemeinden, der Wildbach- und Lawinenverbauung Sektion Vorarlberg und mit einem Planungswissenschaftler geführt, transkribiert und mittels der qualitativen Inhaltsanalyse nach MAYRING (2015) ausgewertet.

## 6.2 Hochwasserexposition von Siedlungsgebieten im historischen Vergleich

Der Vergleich der Siedlungsfläche im Zeitschritt 1826-1859 mit der Siedlungsfläche im Jahr 2016 macht deutlich, dass im Untersuchungsraum eine erhebliche Ausweitung der besiedelten Bereiche stattfand. Der Anstieg der Siedlungsfläche variiert zwischen den untersuchten Alpenregionen und fällt besonders im Bundesland Vorarlberg erheblich aus. Starke Zuwächse zeigen auch Salzburg und Kärnten, während der Anstieg der Siedlungsfläche in Osttirol vergleichsweise gering ausfällt (Abb. 25). Innerhalb der einzelnen Regionen nimmt die Siedlungsfläche in den größeren Talräumen, wie dem Vorarlberger Rheintal, in den Beckenlagen sowie in den Städten und deren Umland stärker zu. In den eigentlichen Berggebieten fällt die Expansion der Siedlungsgebiete deutlich geringer aus.

Neben der Siedlungsentwicklung insgesamt ist der Anteil jener Flächen von Bedeutung, die innerhalb der für diese Expositionsanalyse herangezogenen Hochwasserabflussfläche (Abb. 25) liegen. Der Anteil potentiell hochwasserbetroffener Flächen (bezogen auf das gesamte Untersuchungsgebiet) variiert in den Untersuchungsregionen zwischen 3 % in Osttirol und 10 % in Vorarlberg. Die Unterschiede im Anteil der hochwasserbetroffenen Siedlungsfläche wurden innerhalb der Untersuchungsregionen auf der räumlichen Grundlage der Gemeinden untersucht. Es zeigt sich dabei, dass sich die Topografie wesentlich



auf das Ausmaß der Siedlungsfläche im Hochwasserabflussbereich auswirkt. So ist in den stärker alpin geprägten Gemeinden mit geringerem Dauersiedlungsraum der Anteil an Siedlungen im Hochwasserabflussgebiet eines Extremereignisses höher. Abbildung 26 macht am Beispiel von Kärnten deutlich, dass besonders in Oberkärnten relativ mehr Siedlungsfläche im Hochwasserabflussgebiet zu liegen kommt als in den Gemeinden Unterkärntens. In Abhängigkeit von der Siedlungsentwicklung und dem jeweiligen Ausmaß der Hochwasserabflussfläche in den Gemeinden führt die Beschränkung des Dauersiedlungsraums dazu, dass vermehrt potentiell hochwassergefährdete Flächen für Siedlungszwecke genutzt werden.

Aus den Ergebnissen der Überlagerung der Siedlungsflächen im Zeitschritt 1826-1859 mit dem für die Analyse verwendeten Hochwasserabflussgebiet lässt sich ableiten, dass bezogen auf das gesamte Untersuchungsgebiet 21 % der Siedlungsgebiete bei einem Extremereignis potentiell hochwassergefährdet waren. Für das Jahr 2016 hat sich dieser Wert auf 29 % erhöht. Vergleicht man die Siedlungsentwicklung im Untersuchungszeitraum innerhalb und außerhalb des Hochwasserabflussgebiets, so zeigt sich, dass der absolute Flächenzuwachs außerhalb der gefährdeten Bereiche höher ausfällt. Betrachtet man aber für beide Bereiche die relative Siedlungsentwicklung (jeweils bezogen auf die Siedlungsflächen im 19. Jahrhundert, dargestellt als Zuwachsfaktor), steigen die Siedlungsflächen innerhalb des Hochwasserabflussgebiets stärker an wie außerhalb (Abb. 27). Damit verlagert sich im Untersuchungszeitraum ein beträchtlicher Teil der Siedlungstä-



Abb. 26. Prozentueller Anteil der potentiell von Hochwasser betroffenen Siedlungsfläche in Kärnten 2016 (Gemeindegrenzen: BEV; verändert nach JUNGER et al., 2022).



tigkeit in potentiell von Hochwasser betroffene Bereiche, was zu einer Erhöhung des Schadenspotentials führt. Diese Entwicklung wird durch weitreichende Fließgewässerregulierungen und andere technische Hochwasserschutzmaßnahmen ermöglicht, die vielfach gezielt eingesetzt wurden, um Überschwemmungsgebiete für die Siedlungsentwicklung nutzbar zu machen (EBERSTALLER et al., 2004). Die noch im 19. Jahrhundert hochwassergefährdete Siedlungsfläche wurde durch diese Hochwasserschutzmaßnahmen verringert, die darauffolgende bauliche Entwicklung im Wirkungsbereich der Schutzmaßnahmen – in den Restrisikogebieten – hat die bei Extremereignissen hochwassergefährdete Siedlungsfläche aber wieder beträchtlich erhöht.

Den Anstieg der Hochwasserexposition von Siedlungsgebieten weisen auch andere Studien teilweise für vergleichbare Zeiträume nach (vgl. CAMMERER et al., 2013; EBER-STALLER et al., 2004; FUCHS et al., 2015; FRÜH-MÜLLER et al., 2015). FUCHS et al. (2015) zeigen anhand einer Expositionsanalyse, welche die Auswirkungen unterschiedlicher Naturgefahren zum Gegenstand hat, für Österreich zwischen 1919 und 2012 einen Anstieg der Gebäude um 643 %. Die Anzahl der Gebäude im Gefährdungsbereich von Flusshochwassern steigt demnach in diesem Zeitraum um 650 %, jene im Gefährdungsbereich von Wildbächen um 594 % (FUCHS et al., 2015).

Auch der 2. Nationale Hochwasserrisikomanagementplan für Österreich (RMP2021) erlaubt Rückschlüsse auf die Größenordnung von Restrisikogebieten. Da die Gebiete mit potentiell signifikantem Hochwasserrisiko (APSFR-Gebiete) auf Grundlage von Hochwasserextremereignissen ausgewiesen wurden, weisen jene Bereiche in den APS-FR-Gebieten, in denen die wirtschaftlich und technisch möglichen Hochwasserschutzmaßnahmen bereits umgesetzt wurden, auf Restrisiken hin. Dem RMP2021 zufolge wurden Hochwasserschutzmaßnahmen entlang von Gewässerstrecken mit potentiell signifikantem Hochwasserrisiko von insgesamt 1.168 km umgesetzt, was einem Anteil von 40 % der gesamten Gewässerstrecke in APS-FR-Gebieten entspricht. Die Ursachen für das Hochwasserrisiko in diesen Bereichen liegen in "der Standortentwicklung (Siedlung, Betriebe, andere Vermögenswerte) insbesondere nach der Errichtung von Hochwasserschutzanlagen" sowie in der begrenzten Schutzwirkung der Anlagen (BMLRT, 2021).

# 6.3 Der Umgang mit Restrisiken als Interaktion von Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung

## 6.3.1 Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung als Akteurinnen und Akteure

Vor dem Hintergrund der administrativen Zuständigkeiten in Österreich betrachten wir die bauliche Nutzung von Restrisikogebieten als Ergebnis einer Interaktion von Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung. Die Entwicklungsmöglichkeiten im Wirkungsbereich von technischen Hochwasserschutzmaßnahmen sind abhängig von

- der Art und Weise, wie die Informationen zur Hochwassergefährdung nach der Fertigstellung der Hochwasserschutzbauten von den Behörden der Schutzwasserwirtschaft an die veränderte Gefahrenlage angepasst werden, und
- den jeweiligen rechtlichen Rahmenbedingungen für die Widmung dieser Gebiete in der örtlichen Raumplanung.

Im alpinen Raum Österreichs sind als Behörden der Schutzwasserwirtschaft je nach Charakteristik des Fließgewässers die Bundeswasserbauverwaltung und die Wildbach- und Lawinenverbauung für den technischen Hochwasserschutz und die Erstellung von Gefahreninformationen (Gefahrenzonenpläne, Hochwasserabflussuntersuchungen) zuständig. Die Umsetzung der Agenden der Bundeswasserbauverwaltung erfolgt durch die (Schutz) Wasserwirtschaftsabteilungen in den Ämtern der Landesregierungen. Die Wildbach- und Lawinenverbauung ist eine Bundesorganisation mit regionalen Dienststellen (Sektionen und Gebietsbauleitungen) in den Bundesländern. Die österreichische Hochwasserschutzpolitik zielt im Hinblick auf technische Schutzmaßnahmen darauf ab, Hochwasserrisiken für bestehende Gebäude und Infrastruktur zu reduzieren (BMLFUW, 2015). Die Schaffung von baulichen Entwicklungsmöglichkeiten in ehemaligen Überschwemmungsgebieten wird als unbeabsichtigte Auswirkung der errichteten Hochwasserschutzbauten angesehen (125, 127, 132, 133, 142). Im Fall von konkreten Entwicklungsabsichten von Gemeinden im Restrisikobereich wird die Bundesförderung für die Schutzbauten entsprechend der für eine Baulandwidmung in Betracht gezogenen Fläche reduziert (125).

Nach der Errichtung von Hochwasserschutzanlagen wie Dämmen, Wildbachsperren, Hochwasserschutzmauern oder Hochwasserrückhaltebecken überarbeiten die Behörden der Schutzwasserwirtschaft die Hochwassergefahreninformationen, insbesondere die Gefahrenzonenpläne entsprechend der verringerten Hochwassergefährdung. Die sogenannte Revision von Gefahrenzonenplänen geht einer baulichen Nutzung von Restrisikogebieten voraus, denn erst durch die Aufhebung von vor allem roten Gefahrenzonen werden die rechtlichen Voraussetzungen für eine Baulandwidmung geschaffen. Die Bundeswasserbauverwaltung nimmt nach der Realisierung von Hochwasserschutzanlagen die Gefahrenzonen je nach Reduktion der Gefährdung zurück und ersetzt sie im Wirkungsbereich der Schutzmaßnahmen durch die Ausweisung von Restrisikogebieten (125, 127, 132), die im Gefahrenzonenplan rot schraffiert dargestellt werden (BMLFUW, 2016b). Die Wildbach- und Lawinenverbauung hebt die Gefahrenzonen in der Regel nicht gänzlich auf, sondern "bewertet die Gefahrenlage nach der Errichtung von Schutzbauten auf der Grundlage von fachlicher Expertise neu" (137) und lässt oftmals die gelbe Gefahrenzone bestehen. Diese Vorgehensweise eröffnet den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Wildbach- und Lawinenverbauung die Möglichkeit, fachliche Stellungnahmen in Raumordnungs- und Bauverfahren, die diese Bereiche betreffen, abzugeben (135, 137; FELLIN-GER, 2020). Es können im Gefahrenzonenplan der Wildbach- und Lawinenverbauung aber auch Flächen mit Restgefährdung ausgewiesen werden. Dies geschieht in einer gesonderten Karte, die Flächen werden in weißer Schraffur dargestellt (§ 8 Abs 1 Z 3 ForstG-GZPV). Die Berechnung der Konsequenzen des Überströmens bzw. Versagens von Schutzbauten ist sehr komplex (I37). Die Restgefährdung wird deshalb nicht exakt, sondern anhand der Abflussgebiete von Hochwasserereignissen niedriger Wahrscheinlichkeit (300-jährliches Hochwasser oder Extremereignisse) dargestellt (BMLFUW, 2016b).

Für die Raumplanung sind in Österreich die Bundesländer und die Gemeinden zuständig, wobei Gesetzgebung und überörtliche Raumplanung im Aufgabenbereich der Bundesländer liegen und die Gemeinden für die örtliche Raumplanung verantwortlich sind. Die Raumplanung setzt mit ihren Planungsentscheidungen Rahmenbedingungen für die Flächennutzung. Was die Berücksichtigung von Hochwassergefahren in der Raumplanung betrifft, so beruhen diese Entscheidungen auf Hochwassergefahreninformationen der Bundeswasserbauverwaltung bzw. der Wildbach- und Lawinenverbauung und falls erforderlich auf fachlichen Stellungnahmen der Behörden der Schutzwasserwirtschaft in den Raumordnungsverfahren. Für den Umgang mit Hochwassergefahren ist vorrangig die örtliche Raumplanung und hier besonders die Flächenwidmungsplanung von Relevanz. Die Raumordnungsgesetze der Bundesländer sehen in unterschiedlicher Intensität Restriktionen für die Widmung von Bauland in den Abflussbereichen von Hochwasserereignissen hoher und mittlerer Wahrscheinlichkeit vor, um dort bauliche Intensivnutzungen zu verhindern und damit zu einer Vermeidung neuer Risiken beizutragen.

Für Hochwasserabflussbereiche niedriger Eintrittswahrscheinlichkeit und Restrisikobereiche gibt es sowohl im Raumordnungs- als auch im Baurecht nur vereinzelt normative Vorgaben. So legt das Oberösterreichische Raumordnungsgesetz ein Widmungsverbot für Bauland in ehemals roten Gefahrenzonen sowie auf aufgeschütteten Flächen in ehemals roten Gefahrenzonen fest (§ 21 Abs 1a Oö. ROG 1994), wobei sich ,ehemals' auf die Gefährdungssituation vor der Errichtung einer Hochwasserschutzanlage bezieht. Das Niederösterreichische Raumordnungsgesetz sieht im Abflussbereich des 300-jährlichen Hochwassers ein Baulandwidmungsverbot für die Widmungskategorien Bauland-Sondergebiet mit Gefahrenpotential, Bauland-Industriegebiet und Bauland-Verkehrsbeschränktes Industriegebiet vor (§ 15 Abs 6 NÖ ROG 2014). In allen anderen Bundesländern hat die Ausweisung von Restrisikogebieten in den Gefahrenzonenplänen der Bundeswasserbauverwaltung nur indikativen Charakter ohne verbindliche Auswirkungen auf die örtliche Raumplanung (I29, I30, I39). Die Entscheidung über eine Baulandwidmung in Restrisikogebieten liegt dort im Planungsermessen der Gemeinden. Im Baurecht nimmt allein das Oberösterreichische Bautechnikgesetz auf Restrisiken Bezug. Entsprechend § 47 Abs 5 Oö. BauTG 2013 wird eine "hochwassergeschützte Gestaltung von Gebäuden" auch für Bereiche vorgeschrieben, "die auf Grund technischer Hochwasserschutzmaßnahmen nicht mehr im 100-jährlichen Hochwasserabflussbereich liegen". So wird unter anderem festgelegt, dass die Fußbodenoberkante bei Wohngebäuden "mindestens 50 cm über dem Niveau des ursprünglichen Hochwasserabflussbereichs [...] vor Errichtung der technischen Hochwasserschutzmaßnahme liegt". Die Initiative für diese Regelungen in der Raumplanung und im Baurecht ging in beiden Bundesländern von der Schutzwasserwirtschaft aus (I26, I29, 138).

## 6.3.2 Problemwahrnehmung und Politikziele

Die bauliche Nutzung von Restrisikogebieten und der damit verbundene Anstieg des Schadenpotentials - der Dammeffekt - wird von der überwiegenden Anzahl der befragten Expertinnen und Experten als Problem betrachtet (125, 127, 129, 130, 131, 132, 138). In diesem Zusammenhang werden auch die Notwendigkeit einer Reduktion der hohen Flächeninanspruchnahme für Bauland und Verkehrsflächen sowie die umfangreichen Baulandreserven - in Österreich waren 2020 im Durchschnitt der Bezirke 22 % des gewidmeten Baulands nicht bebaut (ÖROK, 2020) - genannt und als Argumente gegen eine weitere bauliche Entwicklung in Restrisikogebieten angeführt. Dennoch wird eine Beschränkung von Baulandwidmungen in Restrisikobereichen, wie sie im Oberösterreichischen Raumordnungsgesetz vorgesehen ist, teils nicht befürwortet, teils als wünschenswert, aber nicht umsetzbar erachtet. Dies wird besonders in den alpin geprägten Bundesländern mit den räumlichen Restriktionen in den Berggebieten begründet. Die Topografie und der geringe Dauersiedlungsraum begrenzen die für die Siedlungsentwicklung und hier besonders die für gewerbliche und industrielle Nutzungen verfügbaren Flächen auf die Talräume und damit oft auf potentiell hochwassergefährdete Standorte. Ein Ausweichen auf Räume ohne Hochwassergefährdung wird im Berggebiet auch durch Gefahrenbereiche, die aus anderen Naturgefahren resultieren (Rutschungen, Steinschlag etc.), erschwert. Die Bevölkerungszunahme, der Anstieg der Haushalte, der Nutzungsdruck im Gewerbe- und Tourismussektor und die Nutzungskonkurrenz in vielen alpinen Talbereichen führen dazu, dass Gemeinden die Chance nutzen, auf ehemals hochwassergefährdeten Flächen

nach der Errichtung von Schutzmaßnahmen neues Bauland zu erschließen (JUNGER et al., 2022; I28, I32, I35, I36, I43). Die Möglichkeit zur Baulandwidmung in Restrisikogebieten wird von Gemeindevertretern auch mit der Kofinanzierung von Hochwasserschutzmaßnahmen durch die Gemeinden begründet (I28, I37).

Informationen über Gebiete mit Hochwasserrestrisiko sind verfügbar und den Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern auf Gemeindeebene weitgehend bekannt, insbesondere, weil die schutzwasserwirtschaftlichen Fachdienste im Raumordnungsverfahren auf die bestehende Gefährdung hinweisen. Zudem werden diese Gefährdungen im Zusammenhang mit der Auflage von Gefahrenzonenplänen kommuniziert. Die diesbezüglichen Widmungs- und Nutzungsentscheidungen der Gemeinden erfolgen daher nicht unter Unwissen (FELLINGER, 2020). Dennoch ist der Dammeffekt in der Flächenwidmung ein Thema von untergeordneter Bedeutung (I30, I32, 139). Die entstehenden Risiken werden von den Gemeinden bewusst in Kauf genommen. Der Klimawandel spielt in der Wahrnehmung des Dammeffekts als Problem aktuell nur eine geringe Rolle. Eine mögliche klimawandelbedingte Zunahme der Hochwassergefährdung erhöht bei gleichbleibendem Ausbaugrad der Schutzbauten und der Beibehaltung der aktuellen Schutzziele das Hochwasserrisiko für bauliche Nutzungen in Restrisikogebieten. Den Befragten zufolge sind aber auch die Auswirkungen des Klimawandels auf Flusshochwasser in der örtlichen Raumplanung wenig präsent. Der Umgang mit der Hitzebelastung und pluvialen Hochwasserereignissen ist hier von größerer Bedeutung (I28, I29, I30, I31). Eine Ausweitung von Widmungsrestriktionen in Restrisikogebieten auf die Raumordnungsgesetzgebung und die Planungspraxis weiterer Bundesländer erscheint vor diesem Hintergrund wenig realistisch. Diesen Befund bestätigen auch die Ergebnisse einer Online-Befragung von Expertinnen und Experten, der zufolge Widmungsrestriktionen für Restrisikogebiete zwar eine hohe Wirksamkeit in der Prävention attestiert, ihre praktische Umsetzbarkeit aber sehr reserviert beurteilt wird (SEHER & LÖSCHNER, 2015).

Dieses Narrativ findet seine Entsprechung im Empfehlungscharakter der Maßnahmen zum Umgang mit Restrisiken in Politikinstrumenten des Hochwasserrisikomanagements und der Raumplanung in Österreich. Der 2. Nationale Hochwasserrisikomanagementplan (RMP2021) beinhaltet diesbezüglich mehrere Maßnahmen, die zusammengefasst darauf abzielen, "Restrisiken zu berücksichtigen und durch geeignete Hochwasserrisikomanagementmaßnahmen zu reduzieren, wo immer dies möglich ist" (BMLRT, 2021). In Bezug auf die Raumplanung empfiehlt der RMP2021 für Restrisikogebiete "Planungsmaßnahmen" sowie Maßnahmen zur Anpassung von Gebäuden an Hochwassergefahren, die in den Raumordnungsgesetzen und Bauordnungen der Bundesländer berücksichtigt werden sollen (BMLRT, 2021). Für die Raumplanung haben die Festlegungen des RMP2021 prinzipiell nur Empfehlungscharakter. Die Österreichische Raumordnungskonferenz (ÖROK), ein staatliches Gremium zur Koordinierung der Raumentwicklung auf Bundesebene, veröffentlicht Empfehlungen zu Themen der Raumordnung und Regionalpolitik. Die ÖROK-Empfehlung Nr. 57 Hochwasserrisikomanagement nimmt in einer der zehn themenbezogenen Empfehlungen auf die Raumentwicklung in Restrisikogebieten Bezug. Dieser Empfehlung entsprechend sollen Restrisikobereiche im Raumordnungs- und Baurecht berücksichtigt werden. Weiters "*sind Planungsgrundlagen für diese Bereiche zu erstellen* [...] sowie restrisikobezogene Handlungsempfehlungen in der Raumordnung und im Baurecht zu erarbeiten und auf festgelegte Bereiche anzuwenden" (ÖROK, 2018). Mit einem zusätzlichen Hinweis auf die Auswirkungen des Klimawandels ist diese Empfehlung auch im Österreichischen Raumentwicklungskonzept 2030 (ÖROK, 2021) enthalten, einem Planungsinstrument, das Leitlinien für die Raumplanung auf Landes- und Gemeindeebene vorgibt.

## 6.3.3 Instrumente und Optionen

Obwohl viele der befragten Expertinnen und Experten regulative Ansätze zur Vermeidung bzw. Verringerung von Restrisiken befürworten (125, 127, 129, 130, 131, 132, 138, 139, 142), schlagen sie einerseits Instrumente vor, die freiwillig anzuwenden sind, andererseits werden Instrumente genannt, die nicht direkt mit der Raumplanung in Verbindung stehen. Dieser Instrumentenmix umfasst die Information und die Sensibilisierung für die verbleibenden Gefahren nach der Errichtung von Hochwasserschutzanlagen (125, 128, 132, 134, 135, 139), die bauliche Anpassung an Hochwasserereignisse, sowohl verpflichtend als auch freiwillig (I31, I38, I39), den Katastrophenschutz unter Berücksichtigung der Auswirkungen extremer Hochwasserereignisse (127, 128, 132, 133, 134, 144) und ganzheitliche Ansätze zur Bewältigung von Überlastfällen im Sinne einer Erhöhung der Redundanz und der Systemsicherheit von Schutzbauten (I37).

#### Information und Bewusstseinsbildung

Die Information zu Hochwasser(rest)risiken ist ein Instrument der Bewusstseinsbildung. Gefahreninformationen für diese Bereiche sind vorhanden (Kap. 6.3.1) bzw. weisen die schutzwasserwirtschaftlichen Fachdienste im Raumordnungsverfahren auf die bestehende Gefährdung hin. Zudem werden Restrisiken auch im Zusammenhang mit der Auflage von Gefahrenzonenplänen sowie im Zuge von Informationsveranstaltungen zu Hochwasserschutzprojekten in den Gemeinden kommuniziert. Eine weitere Informationsquelle zu Hochwassergefahren im Allgemeinen bieten die Geo- und Rauminformationssysteme der Bundesländer. Zudem ist Informationsmaterial in Form von Broschüren zu Hochwasserrisiken und damit auch zu Restrisikobereichen verfügbar, wobei es keine Daten zur Wirksamkeit dieser Informationen in den Gemeinden und bei der Bevölkerung gibt. Die Ersichtlichmachung von Restrisikobereichen in den Planungsinstrumenten der örtlichen Raumplanung, insbesondere im Örtlichen Entwicklungskonzept und im Flächenwidmungsplan, ist wenig verbreitet. Die befragten Expertinnen und Experten betonen neben den Gemeinden die Rolle regionalisierter Verwaltungseinheiten, wie z.B. Bezirksbauleitungen oder Gewässerbezirke, und der Freiwilligen Feuerwehr in der Informationsvermittlung und der Bewusstseinsbildung für Hochwasserrisiken. Die Wasserwirtschaftsverwaltung in Bayern bietet institutionalisiert Beratung in Form sogenannter Risikodialoge an, die die Gemeinden zur Information zu Maßnahmen des Hochwasserrisikomanagements in Anspruch nehmen können.

#### **Bauliche Anpassung an Hochwasserereignisse**

In Abhängigkeit von der tatsächlichen Gefährdung im Überlast- oder Versagensfall können die unterschiedlichen Formen der baulichen Anpassung an Hochwasserereignisse eine geeignete Maßnahme zur Risikovermeidung in Restrisikogebieten darstellen. Hochwasserangepasstes Bauen kann zum einen in der Bebauungsplanung verbindlich festgelegt werden, zum anderen freiwillig durch die Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer erfolgen. Für die Neuerschließung von Siedlungsbereichen ermöglicht der Bebauungsplan Mindestvorgaben für Bauvorhaben in Gefährdungsbereichen im Sinne einer gefahrenangepassten Differenzierung der Nutzungsintensität und der Umsetzung einer baulichen Hochwasseranpassung. Die Vorteile der Bebauungsplanung gegenüber gleichlautenden Auflagen im Bauverfahren liegen in gebietsweisen einheitlichen Festlegungen, einer vorzeitigen Einbindung der Bauwerberinnen und Bauwerber sowie in der Bewusstseinsbildung für Hochwasserrisiken im Fall partizipativ gestalteter Planungsprozesse. Ein kombinierter Flächenwidmungs- und Bebauungsplan würde konkrete Auflagen bezüglich Hochwasseranpassung bereits im Zuge der Widmung möglich machen. Die Erstellung von Bebauungsplänen, welche die Anpassung an Hochwassergefahren zum Inhalt haben, bedarf der Abstimmung zwischen den Ortsplanerinnen und Ortsplanern, den Gemeinden und der Schutzwasserwirtschaft. Ob Festlegungen im Bebauungsplan oder Empfehlungen der Schutzwasserwirtschaft für hochwasserangepasstes Bauen auch tatsächlich im Bauverfahren umgesetzt werden, kann aktuell von den Landesraumplanungsabteilungen und der Schutzwasserwirtschaft oft nicht überprüft werden. Hier sollte die Koordination zwischen diesen Behörden und den Gemeinden als Baubehörden verbessert werden (SEHER & NEUHOLD, 2022).

Die befragten Expertinnen und Experten halten die freiwillige Anpassung an Hochwasserereignisse in Restrisikogebieten für wichtig, beurteilen aber deren Umsetzung deutlich reservierter. Trotz Informations- und Beratungsangeboten geschieht - nicht nur in Restrisikogebieten ohne eine diesbezügliche rechtliche Verpflichtung wenig. Im Zusammenhang mit der Neuwidmung von Bauland in Restrisikobereichen wird daher verbindlichen Vorgaben der Vorzug gegeben. Für die bauliche Hochwasseranpassung im Siedlungsbestand bleibt die freiwillige Anpassung unter den gegebenen rechtlichen Rahmenbedingungen die einzige Option. Direkte Beratungsangebote wie die Bausprechtage für Gemeinden in der Steiermark könnten die Akzeptanz von Anpassungsmaßnahmen bei betroffenen Bauwerberinnen und Bauwerbern verbessern. Voraussetzung dafür ist eine entsprechende Abstimmung der Schutzwasserwirtschaft mit den Raumplanungs- und Baubehörden, bevorzugt auf einer regionalen Verwaltungsebene.

#### Katastrophenschutz

In den Interviews wurde der Katastrophenschutz als wichtige Maßnahme im Umgang mit Hochwasserrestrisiken angeführt. Die Gemeinden sind verpflichtet, Katastrophenschutzpläne zu erstellen. Inwieweit diese Pläne auf den Überlastfall bei Extremereignissen eingehen, ist unterschiedlich. Als Beispiele wurden die Sonderalarmpläne in Niederösterreich, die Notfallpläne im Machland (Kap. 6.4.2) und der St. Georgener Bucht in Oberösterreich, die Katastrophenschutzpläne in Tirol sowie die Hochwassereinsatzpläne in Salzburg genannt. Katastrophenschutzpläne verlangen eine intensive Abstimmung und Koordination von Stakeholdern aus verschiedenen Bereichen, um im Ernstfall möglichst reibungslose Abläufe zu gewährleisten.

# **Risikoorientierte Raumplanung**

Die Entscheidung über die Widmung von Restrisikogebieten liegt in den meisten Bundesländern im Ermessen der Gemeinden. Ergebnisse aus den Fallstudiengemeinden in Vorarlberg (Kap. 6.4.1) zeigen, dass Gemeinden, was die Widmung und Nutzung von Restrisikogebieten betrifft, dem Flächenangebot und dem Baulandbedarf entsprechend differenziert vorgehen. Das Planungsermessen kann von den Gemeinden auch dahingehend genutzt werden, die Baulandentwicklung auf Flächen im Wirkungsbereich von technischen Schutzmaßnahmen nach Kriterien wie der Erforderlichkeit des Baulands, der Nutzung der Fläche für die Innenentwicklung (z.B. Schließung von Baulücken, bauliche Verdichtung) oder alternativen Entwicklungsmöglichkeiten außerhalb gefährdeter Bereiche zu beurteilen. Den Ortsplanerinnen und Ortsplanern wird hier in der Beratung der Gemeinden eine wichtige Rolle zukommen. Ein Entscheidungsbaum zur Beurteilung von Baulandwidmungen im Wirkungsbereich von Schutzmaßnahmen wurde von STEINBRUNNER et al. (2022) entwickelt. Für eine solche Abwägung bietet sich das Örtliche Entwicklungskonzept an (Anmerkung: Die Bezeichnungen in den Bundesländern sind unterschiedlich. Dieses strategisch ausgerichtete Planungsinstrument der örtlichen Raumplanung wird auch als Räumliches Entwicklungskonzept oder als Räumlicher Entwicklungsplan bezeichnet). Dort können neben Ausschluss- und Eignungszonen auch Flächen mit Vorbehalt betreffend Naturgefahren ausgewiesen werden, die dann für eine Baulandwidmung eine Stellungnahme der Schutzwasserwirtschaft erfordern, was in weiterer Folge zu baulichen Auflagen im Bebauungsplan oder im Bauverfahren führt. Die Zonierung im Örtlichen Entwicklungskonzept schafft damit bereits vorab Klarheit über jene Flächen, die nicht bzw. mit oder ohne bauliche Auflagen für eine Baulandentwicklung in Frage kommen. Dazu ist auch eine zeitliche Abstimmung der Überarbeitung von Gefahrenzonenplänen mit der Überarbeitung der Örtlichen Entwicklungskonzepte erforderlich.

Dieser multikriterielle Zugang, der über die Beurteilung von Planungsoptionen nach rein rechtlichen Kriterien hinausgeht, orientiert sich am Ansatz einer risikoorientierten Raumplanung (SEHER & LÖSCHNER, 2018a), der seinerseits auf dem Modell der risikobasierten Raumplanung in der Schweiz basiert. Die risikobasierte Raumplanung legt den Fokus auf die Nutzung von potentiellen Gefahrenbereichen und auf einen bewussten Umgang mit Risiken in allen Gefahrenstufen (auch in Restrisikogebieten) (BAFU & ARE, 2019). Nutzungsentscheidungen orientieren sich an Sicherheitsniveaus, die auf einer Abwägung aus dem technisch Machbaren, der Tragbarkeit der verbleibenden Risiken und von ökologischen Aspekten beruhen. Diese Sicherheitsniveaus basieren nicht mehr auf fixen Werten, sondern auf einem Aushandlungsprozess aller involvierten Interessen (I43).

## 6.4 Fallstudien

#### 6.4.1 Revision von Gefahrenzonenplänen und örtliche Raumplanung

Im Rahmen einer Masterarbeit (FELLINGER, 2020) wurde der Prozess der Revision von Gefahrenzonenplänen der Wildbach- und Lawinenverbauung in Vorarlberg und deren Auswirkung auf die örtliche Raumplanung anhand der Gemeinden Au, Schoppernau, St. Gallenkirch und Gaschurn untersucht. In den vier Gemeinden wurde analysiert, inwieweit als Folge der Errichtung von Schutzbauten eine Nutzungsintensivierung auf den Flächen im Wirkungsbereich der Schutzmaßnahme stattfindet und wie die kommunalen Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger das Restrisiko berücksichtigen.

Eine Revision von Gefahrenzonenplänen erfolgt entweder aufgrund von geänderten Rahmenbedingungen wie z.B. der Errichtung technischer Schutzmaßnahmen oder routinemäßig 10 bis 15 Jahre nach deren Auflage. Das Verfahren der Revision unterscheidet sich dabei nicht wesentlich von jenem der Erstellung eines Gefahrenzonenplans. Aus Ressourcengründen werden oft nur Revisionsvorschläge erstellt, das heißt der rechtsgültige Gefahrenzonenplan bleibt bestehen und nur die Gefahrenzonen einzelner Einzugsgebiete werden in Form eines Vorschlags an die durch die Schutzmaßnahme geänderten Verhältnisse angepasst. Die Revisionsvorschläge werden durch die Sektion geprüft und bei Bewilligung interimistisch für die Gutachtertätigkeit bei Widmungs- und Bauanträgen der Gemeinden verwendet. Oft wird aber nur die rote Gefahrenzone zurückgenommen und die gelbe Gefahrenzone bleibt unverändert bestehen (Kap. 6.3.1). Dieser vorsichtige Umgang mit Revisionen macht deutlich, dass eine Bebauung der Restrisikogebiete für die Sachverständigen der Wildbach- und Lawinenverbauung vorstellbar sein muss. Mit der Beibehaltung der gelben Zone ist für Widmungsanträge der Gemeinden in Restrisikobereichen weiterhin eine Stellungnahme der Wildbach- und Lawinenverbauung, verbunden mit möglichen Auflagen, erforderlich.

In zwei der untersuchten Fallstudiengemeinden wurden in größerem Umfang Flächen im Restrisikobereich als Bauland gewidmet und baulich genutzt, in den beiden anderen Gemeinden beschränkte sich die Baulandentwicklung auf einzelne Parzellen. Die Nutzung der Restrisikogebiete wird wesentlich von der Nachfrage nach Bauland bestimmt. Weitere Faktoren sind das geringe Flächenangebot aufgrund eines sehr beschränkten Dauersiedlungsraums, die begrenzten Optionen für neues geeignetes Bauland au-Berhalb von Gefahrenbereichen und die fehlenden Möglichkeiten dort Baulandreserven zu mobilisieren. Auch wird der Anteil der Gemeinden an der Finanzierung der Schutzbauten als Argument für eine bauliche Nutzung der Restrisikogebiete angeführt. Obwohl sich die befragten Gemeindevertreter der Restgefährdung im Wirkungsbereich der Schutzbauten bewusst sind, spielt das verbleibende Risiko für einen Verzicht auf eine Baulandwidmung nur eine geringe Rolle. In diesem Zusammenhang ist vielmehr relevant, dass sich die in Frage kommenden Flächen nicht im Eigentum der Gemeinde befinden, dass die Erschließungskosten zu hoch wären, dass damit die Außenentwicklung forciert würde, oder dass wertvolle landwirtschaftliche Flächen erhalten werden sollen.

## 6.4.2 Verankerung von Restrisiko in Raumplanung, Baurecht und Katastrophenschutz

Im Oberösterreichischen Raumordnungsgesetz und im Oberösterreichischen Bautechnikgesetz werden Restrisiken berücksichtigt. Zudem stellte sich in den Interviews mit Expertinnen und Experten heraus, dass Überlastfälle in Katastrophenschutzplänen in den Gemeinden des Wasserverbands St. Georgener Bucht (Langenstein und Luftenberg) sowie der Machland-Damm GmbH (Mauthausen, Naarn, Mitterkirchen, Baumgartenberg, Saxen, Grein, St. Nikola) behandelt werden, daher wurden sie als Fallstudie gewählt (Abb. 28). Im Machland wurde im Jahr 2012 der Machlanddamm fertiggestellt, wodurch große Flächen nunmehr im Wirkungsbereich von Schutzmaßnahmen zu



liegen kommen. Anhand dieser Fallstudie wurden die Prozesse der Entstehung und der Umsetzung der beiden Gesetze und der Stellenwert dieser Flächen im Katastrophenschutz untersucht.

Die Verankerung des Restrisikos im Raumordnungs- und Bautechnikgesetz wurde von unterschiedlichen Rahmenbedingungen beeinflusst. Nach der Fertigstellung des 36,4 km langen Machlanddamms liegen nun erhebliche Flächen in den Siedlungsbereichen oder deren Nähe im Restrisikogebiet. Auf diesen Flächen hätte sich die Möglichkeit der Baulandentwicklung geboten, was zu einer beträchtlichen Erhöhung des Schadenspotentials geführt hätte. Eine Einschränkung der Siedlungsentwicklung in diesen Bereichen wurde daher angestrebt und besonders von der Schutzwasserwirtschaft in Oberösterreich vorangetrieben, was vor allem aufgrund der "starken Position der Wasserwirtschaft in Oberösterreich" (I26) schließlich zu einem Baulandwidmungsverbot in ehemals roten Zonen im Oberösterreichischen Raumordnungsgesetz führte. Dabei ging es einerseits um zukünftige Baulandwidmungen, andererseits aber auch um bereits gewidmetes Bauland. Eine Rückwidmung von Bauland kam auf Grund von rechtlichen und finanziellen Hürden nicht infrage, daher wurde 2013 die Regelung im Oberösterreichischen Bautechnikgesetz zum hochwasserangepassten Bauen in ehemaligen Abflussbereichen eines hundertjährlichen Hochwassers (HQ100) implementiert. Das Baulandwidmungsverbot im OÖ Raumordnungsgesetz wurde erst 2015 (nach dem Hochwasser 2013) festgelegt.

Beide Gesetze verweisen auf eine inhaltliche Koordination (Politikintegration) von Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung. Auf die politische Willensbildung wirkten die Auswirkungen der vergangenen Hochwasserereignisse, das steigende Bewusstsein, das Hochwasserschutzprojekt Machland und der Druck der Schutzwasserwirtschaft. Es ist daher nicht nur die Abstimmung zwischen Raumplanung und Wasserwirtschaft, die zu einer verbindlichen Berücksichtigung des Restrisikos in der Raumplanung geführt hat. Vielmehr ist das Zusammenspiel aus unterschiedlichen Rahmenbedingungen und einzelnen wichtigen Akteurinnen und Akteuren maßgebend. Die Schutzwasserwirtschaft kann dabei als ,political entrepreneur' beschrieben werden, womit Stakeholder charakterisiert werden, die Gelegenheiten ergreifen und nutzen, um eigene Initiativen voranzutreiben (PETRIDOU et al., 2015).

Das Bautechnikgesetz wird von den Gemeinden im Rahmen des Bauverfahrens oder im Bebauungsplan angewendet. Den Bauwerberinnen und Bauwerbern wird für jede Parzelle der Verlauf der Anschlaglinie des HQ100 vor der Errichtung des Machlanddamms zur Verfügung gestellt. Beim Raumordnungsgesetz wirkt sich die Regelung auf den Flächenwidmungsplan aus. In beiden Fällen ist das Gesetz klar formuliert und lässt keinen Spielraum für Ausnahmen, wodurch es zu keinem erhöhten Verwaltungsaufwand kommt. Diese klare Vorschreibung im Gesetz führt in den Gemeinden fallweise zu Spannungsfeldern. Für die befragten Gemeindevertreter ist es nachvollziehbar, dass das Schadenspotential in ehemaligen roten Zonen durch Baulandwidmungen nicht erhöht werden soll. Allerdings weisen sie auch auf Baulücken in den Ortszentren hin, die als Grünland gewidmet sind und auch in Zukunft nicht als Bauland für die Innenentwicklung genutzt werden können. Lagebedingt kann das Widmungsverbot im Restrisikogebiet die Entwicklungsmöglichkeiten einschränken, was dazu führt, dass Bauland in dezentraleren Lagen außerhalb gekennzeichneter Gefahrenbereiche entwickelt wird.

Neben den Raumordnungs- und Bauverfahren sind der Überlastfall und das Restrisiko Themen im Katastrophenschutzplan der Machland-Damm GmbH. Das Konzept der Notfallpläne und des Evakuierungsplans entspricht den Sonderalarmplänen in Niederösterreich. Abgesehen von einem Notfallplan für ein Hochwasser, das die Hochwasserschutzanlage nicht übersteigt, gibt es einen Notfallplan für den Überlastfall. Der Überlastfall umfasst das Überströmen des Damms, den Dammbruch und den Ausfall von Pumpen. Für alle drei Szenarien wurden für die Gemeinden Gefahrenkarten erstellt, wobei der Dammbruch nur für bestimmte Stellen berechnet wurde. Anhand der Gefahrenkarten wurden im Evakuierungsplan eine detaillierte Auflistung der exponierten Gebäude inklusive weitergehender Informationen zu den Haushalten (Anzahl der Personen und Tiere, Personen mit eingeschränkter Mobilität etc.) erstellt und Evakuierungsrouten festgelegt. Die Haushalte erhielten bereits Informationen zum Verhalten im Katastrophenfall. Weiters gibt es eine Liste an Ersatzquartieren in der Umgebung. Hauptakteurinnen und -akteure im Katastrophenschutz sind die Gemeinden und die Feuerwehren, bei einem Ereignis, das über die Gemeindegrenzen hinausgeht, ist auch der Bezirkshauptmann verantwortlich und Teil des Krisenstabes. Die Zusammenarbeit der Stakeholder basiert auf zum Teil langjährigen persönlichen Kontakten und etablierten Netzwerken. Der Katastrophenschutzplan stellt damit ein Instrument der administrativen Koordination dar (Koordination von verschiedenen Organisationen).

# 6.5 Schlussfolgerungen

Der Anteil der Siedlungsflächen in potentiell hochwassergefährdeten Gebieten hat in den letzten 150 Jahren signifikant zugenommen. Diese Entwicklung ist einerseits auf eine beträchtliche Ausweitung der gesamten Siedlungsfläche zurückzuführen, andererseits haben in diesem Zeitraum weitreichende technische Hochwasserschutzmaßnahmen die bauliche Nutzung von ehemaligen Überschwemmungsgebieten ermöglicht, damit aber auch das Schadenspotential bei extremen Hochwasserereignissen erhöht. In der wissenschaftlichen Literatur wird dieser Zusammenhang als Dammeffekt beschrieben. Trotz erkennbarer Pfadabhängigkeiten, die mit der Errichtung technischer Hochwasserschutzmaßnahmen in Zusammenhang stehen, begreifen wir den Dammeffekt als Resultat einer Interaktion von Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung. Ob Flächen im Wirkungsbereich von Schutzbauten baulich genutzt werden, hängt einerseits davon ab, wie die Gefahreninformationen nach Errichtung der Schutzbauten überarbeitet werden. Andererseits ist maßgeblich, welche Regelungen die Raumplanung für diese Restrisikogebiete vorsieht.

Nach dem Bau von Hochwasserschutzanlagen passen die Behörden der Schutzwasserwirtschaft die Hochwassergefahrenzonen an die verringerte Hochwassergefährdung an. Die Bundeswasserbauverwaltung hebt die Gefahrenzonen auf und ersetzt sie durch einen Hinweisbereich auf Restrisiken. Die Wildbach- und Lawinenverbauung lässt häufig gelbe Gefahrenzonen bestehen. Die Raumordnungsgesetzgebung in Österreich legt im Hinblick auf Restrisiken nur vereinzelt Widmungsrestriktionen fest. Das Oberösterreichische Raumordnungsgesetz sieht ein Baulandwidmungsverbot für ehemals rote Gefahrenzonen vor, das Niederösterreichische Raumordnungsgesetz beschränkt die Widmung bestimmter Baulandkategorien im Abflussbereich eines 300-jährlichen Hochwassers. Im Bereich des Baurechts schreibt das Bautechnikgesetz in Oberösterreich für Restrisikogebiete eine hochwasserangepasste Bauweise vor. Die Initiative für diese Regelungen ging in beiden Bundesländern von der Schutzwasserwirtschaft aus. Die Ergebnisse einer Fallstudie in oberösterreichischen Gemeinden zeigt, dass durch klare raumordnungsrechtliche Vorgaben ein Anstieg des Schadenspotentials vermieden werden kann, wobei aber auch raumordnungsfachlich sinnvolle Baulandausweisungen, wie die Schließung von Baulücken aus Gründen der Risikovermeidung unterbleiben müssen. Eine Ausweitung dieser Widmungsrestriktionen auf weitere Bundesländer wird derzeit als nicht durchsetzbar angesehen und vorrangig mit der räumlichen Situation in alpinen Regionen begründet, in denen das Angebot an siedlungsgeeigneten Flächen begrenzt ist und verschiedene Landnutzungsinteressen in den Tälern konkurrieren. Diese Ergebnisse machen deutlich, dass insbesondere der räumliche Kontext für die bauliche Nutzung von Restrisikogebieten von Bedeutung ist.

Sowohl in Instrumenten der Schutzwasserwirtschaft als auch in Instrumenten der Raumplanung werden Ziele zum Umgang mit Restrisiken formuliert. Die entsprechenden Maßnahmen haben Empfehlungscharakter und laufen auf eine Berücksichtigung von Hochwasserrestrisiken – besonders in der Raumplanung und im Baurecht – und deren Reduktion durch geeignete Hochwasserrisikomanagementmaßnahmen hinaus. Was die Maßnahmen mit Empfehlungscharakter betrifft, ist die inhaltliche Koordina-

7 Stakeholder-Workshop

In PoCo-FLOOD waren als letzter methodischer Schritt Stakeholder-Workshops als transdisziplinärer Ansatz zur Reflexion der Möglichkeiten und Grenzen der Politikkoordination im Hochwasserrisikomanagement vorgesehen. Mit je einem Workshop pro Interaktionsfeld sollten Lösungsvorschläge für Politikkoordination vorgestellt und diskutiert sowie mit starkem Bezug zur Praxis Optionen zur Verbesserung der Politikkoordination in den Interaktionsfeldern entwickelt werden. Dieser Abschnitt beschreibt den Prozess, der zur Organisation eines Stakeholder-Workshops in Zusammenarbeit mit dem Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV) führte, stellt das Programm und die dahinterstehenden Überlegungen zur Gestaltung des Workshops vor und präsentiert dessen Ergebnisse.

# 7.1 Planung des Stakeholder-Workshops

Laut Projektantrag war für PoCo-FLOOD je ein Stakeholder-Workshop für die drei Interaktionsfelder Wasserkraftnutzung und Hochwasserrisikomanagement, Landwirtschaft und Hochwasserrisikomanagement sowie Raumplanung und Hochwasserrisikomanagement geplant. tion (Politikintegration) als inhaltliche Verknüpfung der Politikfelder Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung weit fortgeschritten. Im Bereich der rechtsverbindlichen Maßnahmen bleibt die Politikintegration auf die genannten Regelungen in Ober- und Niederösterreich beschränkt.

Als geeignete Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Reduktion von Hochwasserrestrisiken abseits von Baulandwidmungsverboten nennen die befragten Expertinnen und Experten Information und Bewusstseinsbildung, die bauliche Anpassung an Hochwasserereignisse, sowohl verpflichtend als auch freiwillig, und den Katastrophenschutz. In den Katastrophenschutzplänen der Bundesländer werden die Auswirkungen extremer Hochwasserereignisse in zunehmendem Ausmaß berücksichtigt. Die Bewusstseinsbildung und insbesondere Maßnahmen der baulichen Anpassung an Hochwasserereignisse erfordern ohne entsprechende rechtliche Verpflichtung eine Intensivierung der administrativen Koordination (Koordination von Organisationen des öffentlichen Sektors) zwischen Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung, insbesondere auf der kommunalen Ebene. Dies unterstreichen auch Interviewergebnisse, wonach der Umgang mit Restrisiken in der örtlichen Raumplanung in der Praxis ein Thema mit sehr untergeordneter Bedeutung ist. Zwar zeigen Ergebnisse einer Fallstudie in vier alpinen Gemeinden in Vorarlberg, dass die Gemeinden mit der Nutzung von Restrisikogebieten differenziert umgehen. Für diesen Umgang ist aber weniger das verbleibende Risiko auf diesen Flächen maßgeblich als vielmehr der konkrete Bedarf und raumordnungsfachliche Erwägungen. Aufbauen kann eine intensivere Koordination zwischen Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung im Umgang mit Restrisiken auf das gute Verhältnis und die engen operativen Kontakte zwischen den Akteurinnen und Akteuren aus diesen beiden Politikbereichen.

Für die Stakeholder-Workshops, insbesondere, was ihre Zielsetzung, die Themen, die Organisation und den Nutzen für die Teilnehmenden betrifft, wurde seitens des Projektteams ein Konzept entwickelt und dieses Konzept in einem Online-Workshop am 17. Juni 2021 mit den teilnehmenden Mitgliedern des PoCo-FLOOD Advisory Boards reflektiert und diskutiert (Kap. 1.4). Die im Projektantrag vorgesehene Abhaltung von drei nach den Themenbereichen der Interaktionsfelder getrennten Workshops erhielt nur wenig Zuspruch. Aus Gründen der besseren inhaltlichen Vernetzung zwischen den drei Themenbereichen, des Austauschs zwischen den Stakeholdern aus verschiedenen Fachgebieten und aufgrund von zu erwartenden erheblichen personellen Überschneidungen bei den potentiellen Teilnehmerinnen und Teilnehmern bei drei Workshops empfahlen die Advisory Board-Mitglieder die Abhaltung eines gemeinsamen Stakeholder-Workshops, der jedenfalls in Präsenz abgehalten werden sollte. Deshalb und auch aufgrund der zu erwartenden Einschränkungen für Präsenzveranstaltungen durch die Maßnahmen gegen die COVID-19-Pandemie wurde vom Projektteam die Entscheidung getroffen, nur einen Stakeholder-Workshop, diesen aber in einem größeren Rahmen, zu veranstalten.
Die im Herbst 2021 wieder stark gestiegenen COVID-19-Infektionszahlen machten unsere ersten Planungen für den Workshop wieder zunichte. Zudem zeigte sich in den projektinternen Diskussionen, dass die Abwicklung des Workshops gemeinsam mit einer Organisation, die über gute Kontakte zu verschiedenen Stakeholdern im Hochwasserrisikomanagement verfügt, von Vorteil wäre. Wir kontaktierten daraufhin den Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (ÖWAV), der Seminare zu verschiedenen wasserwirtschaftlichen Themen anbietet, und legten einen Vorschlag für ein Seminar zum Thema Koordination im Hochwasserrisikomanagement vor. Das Programm stieß beim ÖWAV auf Interesse, und es konnte in mehreren Besprechungen gemeinsam mit dem ÖWAV ein Programm für den Workshop erstellt und die Veranstaltung für den 7. Dezember 2022 terminiert werden.

#### 7.2 Programm des Stakeholder-Workshops

Das Programm des Stakeholder-Workshops (Abb. 29, 30) ist so aufgebaut, dass Referentinnen und Referenten aus dem PoCo-FLOOD-Projektteam in den drei Themenblöcken Wasserkraft, Landwirtschaft und Raumplanung jeweils im ersten Referat die wesentlichen Projektergebnisse vorstellen. Für jeden dieser drei Blöcke haben wir zwei Referenten aus der Praxis eingeladen, unsere Resultate zu ergänzen und zu kommentieren. Für die Auswahl der Referenten waren die praktische Expertise im jeweiligen Themenfeld sowie der Konnex zu den in den einzelnen In-



# Koordination im Hochwasserrisikomanagement

Wasserkraft, Landwirtschaft, Raumplanung



Mittwoch, 7. Dezember 2022 Wirtschaftskammer Salzburg – Plenarsaal (EG) 5027 Salzburg, Julius-Raab-Platz 1 Leitung: Ass.-Prof. DI Dr. Walter SEHER





#### Abb. 29.

Titelblatt des ÖWAV-Seminars "Koordination im Hochwasserrisikomanagement" (Quelle: ÖWAV).

09.30 - 10.00 Registrierung und Begrüßungskaffee 10.00 - 10.15 Begrüßung und Eröffnung GF DI Dr. Daniel RESCH, ÖWAV LR DI Dr. Josef SCHWAIGER, Land Salzburg Ass.-Prof. DI Dr. Walter SEHER, Universität für Bodenkultur Wien Block 1 Wasserkraft und Hochwasserrisikomanagement 10.15 - 10.20 Moderation und Einleitung in den Block a.o. Univ.-Prof. DI Dr. Hubert HOLZMANN, Universität für Bodenkultur Wien 10.20 - 10.35Einfluss von Speicherkraftwerken auf Hochwasser in Österreich DI Dr. Mathew HERRNEGGER, Universität für Bodenkultur Wien Koordination und Zusammenarbeit im Hochwasserfall: Erfahrungen eines 10.35 - 10.50 Kraftwerksbetreibers DI Dr. Klaus HEBENSTREIT, VERBUND AG Ausbau Kaunertal – Hochwasserschutz als Planungsgrundlage für den 10.50 - 11.05 Wasserkraftausbau Dr.-Ing. Johann NEUNER, TIWAG AG Fragen und Diskussion 11.05 - 11.20 Block 2 Landwirtschaft und Hochwasserrisikomanagement Moderation und Einleitung in den Block: 11.20 - 11.25 DI Dr. Heidelinde GRÜNEIS, Bundesanstalt für Agrarwirtschaft u. Bergbauernfragen 11.25 - 11.40 Agrarflächen in Hochwasserrisikogebieten DI Karin SCHROLL, Bundesanstalt für Agrarwirtschaft u. Bergbauernfragen 11.40 - 11.55 Die Rolle der Landwirtschaft in der Praxis des Hochwasserrisikoman agements DI Christoph ZAUSSINGER, Landwirtschaftskammer Oberösterreich 11.55 – 12.10 Grundeigentümerinteressen bei Hochwasserschutzprojekten FM DI Gregor GRILL, Landwirtschaftskammer Salzburg 1210 - 1225Fragen und Diskussion 12.25 - 13.30 Mittagspause Block 3 Raumplanung und Hochwasserrisikomanagement 13.30 - 13.35 Moderation und Einleitung in den Block: Ass.-Prof. DI Dr. Walter SEHER, Universität für Bodenkultur Wien Optionen einer risikoorientierten Raumplanung in Restrisikobereichen 13.35 - 13.50 DI Lena JUNGER, Universität für Bodenkultur Wien Risikobasierte Raumplanung in der Schweiz: Umgang mit Restrisiken 13.50 - 14.05 Stv. SC Roberto LOAT, BAFU Bern 14.05 - 14.20 Hochwasserangepasstes Bauen und Katastrophenschutz in Restrisikogebieten: Erfahrungen aus Oberösterreich DI Josef MADER, Amt der OÖ Landesregierung 14.20 - 14.35 Fragen und Diskussion 14.35 - 15.00 Kaffeepause Block 4 Diskussion 15.00 - 15.10 Moderation und Einleitung in den Block: Dr. Ralf NORDBECK, Universität für Bodenkultur Wien Podiumsdiskussion mit Fragen aus dem Plenum 15.10 - 16.15 Univ.-Prof. DI Dr. Helmut HABERSACK, Universität für Bodenkultur Wien DI Dr. Klaus HEBENSTREIT, VERBUND AG DI Michael REDIK, Amt der Steiermärkischen Landesregierung Priv.-Doz. DI Dr. Florian RUDOLF-MIKLAU, BML / WLV DI Christoph ZAUSSINGER, Landwirtschaftskammer Oberösterreich

Programm

# 16.15 – 16.30

Schlussworte

#### Abb. 30.

Programm des ÖWAV-Seminars "Koordination im Hochwasserrisikomanagement" (Quelle: ÖWAV).

Ass.-Prof. DI Dr. Walter SEHER, Universität für Bodenkultur Wien

teraktionsfeldern bearbeiteten Fallstudien maßgeblich. In jedem Themenblock ist Zeit für Fragen und Diskussion vorgesehen. In einer abschließenden Podiumsdiskussion mit Stakeholdern aus dem Hochwasserrisikomanagement sowie aus den drei Themenbereichen Wasserkraft, Landwirtschaft und Raumplanung wird nach den Einleitungsstatements der Teilnehmenden das Thema Politikkoordination bezogen auf die Themenbereiche mit dem Podium und dem Publikum diskutiert.

Die Veranstaltung zielt darauf ab, eine Plattform zur Vernetzung der verschiedenen Akteurinnen und Akteure im Hochwasserrisikomanagement zu bieten, das Verständnis von Koordination im Hochwasserrisikomanagement zu vertiefen und die Umsetzung von Hochwasserrisikomanagementmaßnahmen zu unterstützen. Zielgruppe des Workshops sind Vertreterinnen und Vertreter der Bundes- und Landesverwaltung, von Gemeinden, Wasserverbänden,

Interessenvertretungen, Ingenieur- und Planungsbüros, Kraftwerksbetreibern, Universitäten und Forschungseinrichtungen sowie von NGOs.

Der Stakeholder-Workshop fand plangemäß am 7. Dezember 2022 in Salzburg statt und wurde von insgesamt 70 Personen (inklusive der Referentinnen und Referenten sowie der Teilnehmenden der Podiumsdiskussion) besucht. Der überwiegende Anteil der Besucherinnen und Besucher war der Schutzwasserwirtschaft und der Landwirtschaft zuzurechnen, in geringerem Ausmaß waren aber auch die beiden anderen Themenfelder des Projekts vertreten. In einer vom ÖWAV durchgeführten Online-Evaluierung (N = 20) wurde die Veranstaltung von 75 % der Befragten mit sehr gut und von 20 % mit gut bewertet.

#### 7.3 Ergebnisse des Stakeholder-Workshops

Dieser Abschnitt stellt die wesentlichen Erkenntnisse aus den Referaten und der Podiumsdiskussion getrennt nach den drei Interaktionsfeldern dar.

#### Wasserkraft

Neben den Projektergebnissen zeigen auch die Beiträge aus der Praxis, dass Speicherkraftwerke wesentlich zu einer Reduktion der Hochwasserabflussspitzen beitragen können. Dabei spielen Prognosemodelle zur Quantifizierung des zu erwartenden Zuflusses eine bedeutende Rolle. Diese Modelle hängen von der Genauigkeit der verfügbaren Inputdaten zu Niederschlag, Temperatur und Höhe der Schneedecke ab. Dafür ist wiederum die Abstimmung mit den Hvdrographischen Diensten der Bundesländer und der Geosphere Austria von erheblicher Bedeutung. Die Verbund AG entwickelt auf Grundlage der Hochwasserprognosen ein Decision Support Tool zur Hochwasserabsenkung von Stauräumen. Am Beispiel der Planungen zum Ausbau und Erweiterung des Kraftwerks im Kaunertal wird deutlich, dass der Hochwasserschutz auch eine wichtige Planungsgrundlage für den Wasserkraftausbau darstellt und dass in diesem Zusammenhang auch technische Maßnahmen in Form von Überleitungssystemen zur Anwendung kommen, die aus betriebswirtschaftlicher Sicht einen Mehraufwand bedeuten, aber einen nennenswerten Beitrag zum Hochwasserschutz leisten. Der Betrieb dieser Systeme im Hochwasserfall erfordert eine enge Abstimmung mit den Hydrographischen Diensten. Der zentrale Stellenwert der Wehrbetriebsordnungen für die Koordination von Wasserkraftnutzung und Hochwasserrisikomanagement wird sowohl in den Referaten als auch in der Podiumsdiskussion bestätigt. Ein aktives Hochwassermanagement seitens der Kraftwerksbetreiber ist gesetzlich nicht vorgesehen. Verpflichtend ist eine Absenkung des Wasserspiegels in den Stauräumen nur, wenn diese Regelungen in der Wehrbetriebsordnung festgelegt sind. Daher ist die Kommunikation zwischen den Kraftwerksbetreibern und den Behörden der Schutzwasserwirtschaft im Hochwasserfall sehr wichtig. Eine weitergehende rechtliche Verankerung des Beitrags der Wasserkraft zum Hochwasserschutz wird mit dem Hinweis auf die unterschiedlichen Kapazitäten der Speicherkraftwerke nicht als notwendig angesehen. Die Berücksichtigung von Sedimentablagerungen in Stauräumen, welche die Stauraumkapazität verringern und dadurch das Speichermanagement im Hochwasserfall beeinflussen können, wird als sehr wichtig betrachtet. Ein kritischer Aspekt im Verhältnis von Wasserkraftnutzung und Hochwasserrisikomanagement ist der Umgang mit Entschädigungsforderungen der von Hochwasser betroffenen Bevölkerung. Hier wird Verbesserungsbedarf konstatiert, sowohl was die Information der Bevölkerung zur Wirkung von Kraftwerken auf den Hochwasserabfluss, als auch die Schaffung privatrechtlicher Rahmenbedingungen zur Entschädigung von hochwasserbetroffenen Grundeigentümerinnen und Grundeigentümern betrifft.

#### Landwirtschaft

Der Anspruch an die Landwirtschaft, Flächen für Hochwasserabfluss und Hochwasserrückhalt bereitzustellen bzw. entsprechend zu bewirtschaften, stößt zunehmend an Grenzen der Flächenverfügbarkeit und damit der Akzeptanz von Landwirtinnen und Landwirten. Insbesondere im Alpenraum liegt ein erheblicher Anteil wertvoller landwirtschaftlicher Nutzflächen in potentiellen Hochwasserabflussgebieten. Der weitaus überwiegende Teil der Hochwasserschutzprojekte läuft ohne größere Konflikte mit der Landwirtschaft ab. Wenn Konflikte auftreten, können sie allerdings die Umsetzung einzelner Projekte erheblich verzögern. Die Beiträge aus der Praxis machen deutlich, dass der Kommunikation mit den Grundeigentümerinnen und Grundeigentümern für die erfolgreiche Umsetzung von Hochwasserschutzprojekten große Bedeutung zukommt. Es wird empfohlen, "auf Augenhöhe" mit den Betroffenen zu kommunizieren, sie umfassend zu informieren und einen wertschätzenden Umgang zu pflegen mit Respekt gegenüber ihrem Grundeigentum auch trotz des öffentlichen Interesses am Hochwasserschutz. Für Projekte, bei denen vor allem aufgrund der Größe der Flächeninanspruchnahme Konflikte erwartet werden, empfiehlt sich eine frühzeitige Abstimmung und Vermittlung zwischen den unterschiedlichen Interessen. Kommunikation und Vermittlung sollten im Rahmen von Projekten mit einem entsprechenden Budget ausgestattet werden. Die Entschädigung landwirtschaftlicher Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer basiert immer auf privatrechtlichen Bestimmungen, wo nachvollziehbar dargelegt werden soll, wie diese Entschädigungen zustande kommen. Die Landwirtschaftskammern bieten teilweise die Möglichkeit für Rahmenvereinbarungen an, die neben dem Hochwasserschutz auch in anderen Infrastrukturprojekten zur Anwendung kommen. Diese Vereinbarungen enthalten Regelungen zu Dienstbarkeiten und Entschädigungen, zur Bau- und Betriebsphase von Hochwasserschutzanlagen sowie zum Umgang mit landwirtschaftlichen Flächen im Hochwasseranlassfall. Diese Vereinbarungen sind auch für kleine Projekte von Bedeutung, in denen die beteiligten Akteurinnen und Akteure oft über weniger Erfahrung im Umgang mit diesen Themen verfügen. Eine sektorenübergreifende Aufgabenstellung ist die Sicherung landwirtschaftlicher Flächen in Hochwasserabflussgebieten vor dem Hintergrund einer hohen Flächeninanspruchnahme für Bauland und Infrastruktur. Dafür sind ordnungspolitische Instrumente sowohl aus der Raumplanung in Form von landwirtschaftlichen Vorrangflächen als auch aus der Wasserwirtschaft in Form von wasserwirtschaftlichen Regionalprogrammen geeignet. Eine intensivere Anwendung dieser Instrumente zur Erhaltung von landwirtschaftlich genutzten Hochwasserabflussflächen wird als nicht vorrangig angesehen. Vielmehr wird hier auf die Kommunikation mit den Betroffenen

(v.a. Vertreterinnen und Vertreter von Gemeinden, landwirtschaftliche Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer) gesetzt, um möglichst eine konsensuale Lösung zu erreichen.

#### Raumplanung

Die Beiträge zu diesem Themenblock stimmen dahingehend überein, dass es beim Umgang mit Restrisiken in der Raumplanung darum geht, das Schadenspotential und damit das Hochwasserrisiko nicht weiter zu erhöhen. Entsprechende Maßnahmen haben in Österreich vorwiegend Empfehlungscharakter, gesetzliche Regelungen zu Restrisiken in Raumplanung und Baurecht finden sich nur in Oberösterreich. Eine risikoorientierte Raumplanung im Sinne eines bewussten Umgangs mit Restrisiken bietet Optionen in der baulichen Anpassung an Hochwasserereignisse sowie in nach planerischen Kriterien (z.B. Innenentwicklung vor Außenentwicklung) differenzierten Widmungs- und Nutzungsentscheidungen, die einer intensiven Abstimmung von Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung bedürfen. Der Beitrag zur risikobasierten Raumplanung in der Schweiz verdeutlicht, dass das Schadenspotential auch dort durch das Bevölkerungswachstum und den Anstieg der bebauten Flächen stark angewachsen ist. Als Folge von Klimawandelauswirkungen ist eine weitere Zunahme der Risiken zu erwarten. Das Konzept der risikobasierten Raumplanung setzt bei den Nutzungen an und zielt darauf ab, durch Förderung des Risikobewusstseins und eine integrale Maßnahmenplanung (z.B. Kombination technischer Schutzmaßnahmen mit einer raumplanerischen Sicherung von Entlastungsräumen) die Risikoentwicklung so zu steuern, dass Risiken auch in Zukunft tragbar bleiben. Festgelegte Schutzziele verlieren zugunsten einer Anpassung der Nutzung an die Gefahrensituation, die in Abstimmung mit den Trägern der Risiken erfolgt, an Bedeutung. Dieser risikobasierte Zugang findet auch in Restrisikogebieten, beispielsweise in Form des Objektschutzes, Anwendung. Der Beitrag aus der wasserwirtschaftlichen Genehmigungspraxis von Widmungsund Bauanträgen aus Oberösterreich zeigt, dass trotz bestehender rechtlicher Regelungen eine Abstimmung von

## 8 Vergleichende Synthese

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Analyse der Politikkoordination zu den drei Interaktionsfeldern verglichen und entlang der drei, diesem Projekt zugrundeliegenden Dimensionen der Politikkoordination (Kap. 1.2) zusammenfassend dargestellt. In der vergleichenden Analyse legen wir den Schwerpunkt auf die Unterschiede und Gemeinsamkeiten in Bezug auf (i) die Motive für die Politikkoordination (Problemdruck und Problemstruktur), (ii) die Funktionsweise der Politikkoordination in Abhängigkeit vom Verhältnis der jeweiligen Politikziele (Prozess der Politikkoordination) und (iii) die Auswirkungen der Politikkoordination im Hinblick auf eine Vermeidung bzw. Verringerung von Hochwasserrisiken (Performance der Politikkoordination). Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung bzw. Baurecht weiterhin von Bedeutung ist, damit es durch bauliche Einzelmaßnahmen wie zum Beispiel im Zusammenhang mit Aufschüttungen nicht zu einem Anstieg des Hochwasserrisikos kommt. In der Diskussion wird auch auf den Stellenwert informeller Maßnahmen wie Planungsleitfäden als Steuerungsinstrumente und der Kommunikation mit Vertreterinnen und Vertretern der Gemeinden hingewiesen. Die Raumplanung kann auch abseits der Freihaltung von Gefahrenbereichen durch die Bereitstellung von Informationen zur Entwicklung der Vulnerabilität im Siedlungsbestand zu einer Reduktion von Hochwasserrisiken beitragen, indem etwa Prioritäten für Schutzmaßnahmen in Abstimmung mit den Raumplanungsbehörden festgelegt werden. Ein planvoller Umgang mit Restrisiken setzt voraus, dass es Ausweichmöglichkeiten gibt. Die begrenzten räumlichen Verhältnisse im alpinen Raum, vor allem im Zusammenhang mit Wildbachextremereignissen, lassen ein Ausweichen aber oft nicht zu. Im Management von Extremereignissen werden robuste Maßnahmen und Redundanz forciert, die ohne sektorenübergreifend abgestimmte Zugänge nicht auskommen.

#### Resümee

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass im Stakeholder-Workshop die Beiträge aus der Praxis die Projektergebnisse bestätigen konnten. Als wesentliche Ergänzung für alle drei Interaktionsfelder kann die Bedeutung von Information und Kommunikation gesehen werden. Dabei geht es nicht nur um den Austausch zwischen den in den Interaktionsfeldern beteiligten Disziplinen, sondern auch mit den von den jeweiligen Planungen und Maßnahmen Betroffenen. Die Kommunikation wird als wichtiges und noch ausbaufähiges Instrument des Hochwasserrisikomanagements betrachtet. Eine Intensivierung der Politikkoordination auf Grundlage regulativer ordnungspolitischer Instrumente hingegen wird für keines der drei Interaktionsfelder befürwortet. Vielmehr soll bei konträren Zielsetzungen und im Umgang mit Konflikten möglichst auf konsensuale und Verhandlungslösungen gesetzt werden.

## 8.1 Problemdruck und Problemstruktur

Die historische Analyse der Landnutzung in den österreichischen Einzugsgebieten von Rhein, Salzach und Drau seit Mitte des 19. Jahrhunderts zeigt eine starke Ausweitung der Siedlungsfläche, eine Zunahme der Waldflächen, einen Rückgang der landwirtschaftlich genutzten Flächen und einen starken Rückgang der Gletscher. Eine Verschiebung der Landnutzung lässt sich auch bezogen auf die Höhenstufen erkennen, insbesondere Siedlungsflächen und Ackerland konzentrieren sich heute in tieferen Lagen als noch im 19. Jahrhundert. Es zeigt sich, dass die Veränderungen in der Landnutzung einer Zunahme der Hochwasserrisiken in den alpinen Tallagen Vorschub leisten. Die Ausweitung von Siedlungen und die Urbarmachung von Feuchtflächen erhöhen das Hochwasserrisiko, während die Aufforstung von landwirtschaftlichen Nutzflächen zu einer Reduktion des Hochwasserrisikos beitragen kann.

Die Ergebnisse der Untersuchung der Hochwasserretention von Speicherkraftwerken zeigen eine deutliche Hochwasserscheitelreduktion an allen untersuchten Pegeln. Diese Reduktion nimmt entlang der Fließstrecke mit zunehmender Einzugsgebietsgröße ab. Die österreichischen Speicherkraftwerke dienen primär der Stromerzeugung, ein gesetzlicher Auftrag zur Verbesserung der Hochwassersituation besteht zumeist nicht. Allerdings machen die Ergebnisse deutlich, dass ein wesentlicher Beitrag zur Hochwasserabflussreduktion möglich ist. Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Water Retention Index (WRI) weisen darauf hin, dass der Hochwasserrückhalt in den Tallagen stärker ausgeprägt ist als in steilen Kopfeinzugsgebieten. Der Vergleich zwischen dem historischen und dem aktuellen WRI zeigt eine moderate bis starke Abminderung des Retentionspotentials vor allem in den Tälern und damit auch entlang der Fließgewässer, was sich hauptsächlich durch die Ausweitung der Siedlungsgebiete und der damit einhergehenden Bodenversiegelung erklärt.

Die Verschneidung der landwirtschaftlich genutzten Flächen Österreichs mit den für PoCo-FLOOD ermittelten Hochwasserabflussflächen bei einem ca. 300-jährlichen Extremereignis (Kap. 3.1) zeigt, dass ein signifikanter Anteil (8 %) der landwirtschaftlich genutzten Flächen Österreichs in potentiell hochwassergefährdeten Gebieten liegt. Davon entfällt ein beträchtlicher Anteil auf hochwertige Ackerund Grünlandflächen, welche für die landwirtschaftlichen Betriebe von besonderer Bedeutung sind. Von den in Österreich als für die regionale Ernährungssicherung wertvoll ausgewiesenen landwirtschaftlichen Produktionsflächen liegen 12 % in den genannten Hochwasserabflussflächen. In den alpinen Regionen ist tendenziell ein größerer Anteil der als für die Ernährungssicherung wichtig ausgewiesenen landwirtschaftlichen Flächen von Hochwasser(extrem) ereignissen betroffen.

Die Analyse der Siedlungsentwicklung innerhalb und außerhalb der für dieses Projekt ermittelten Hochwasserabflussflächen zeigt, dass die relative (d.h. die auf die Siedlungsfläche Mitte des 19. Jahrhunderts bezogene) Siedlungsentwicklung innerhalb des Hochwasserabflussgebiets stärker ausgeprägt ist. Damit verlagert sich im Untersuchungszeitraum ein beträchtlicher Teil der Siedlungstätigkeit in potentiell von Hochwasser betroffene Bereiche, was zu einer erheblichen Zunahme des Schadenspotentials führt. In den stärker alpin geprägten Gemeinden mit geringerem Dauersiedlungsraum ist der Anteil der Siedlungsfläche im Hochwasserabflussgebiet höher. In Abhängigkeit von der Siedlungsentwicklung und dem jeweiligen Ausmaß der Hochwasserabflussfläche in den Gemeinden führt die Beschränkung des Dauersiedlungsraums dazu, dass, ermöglicht durch technische Hochwasserschutzmaßnahmen, potenziell hochwassergefährdete Flächen für Siedlungszwecke genutzt werden.

Die Ergebnisse der Analysen verweisen auf die Flächeninanspruchnahme für bauliche Nutzungen – besonders für die Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung – und die damit in Zusammenhang stehende Bodenversiegelung als gemeinsames Problem im Zusammenhang mit dem Hochwasserrisikomanagement. Diese Flächeninanspruchnahme führt nicht nur zu einer Erhöhung des Schadenspotentials im Hochwasserfall, sondern beeinträchtigt auch den Hochwasserrückhalt insbesondere in den Tälern. Gleichzeitig hat die Flächeninanspruchnahme auch einen Ver-

hwertige Acker-<br/>dwirtschaftlichenserwirtschaft an die Landwirtschaft, Flächen für den Hoch-<br/>wasserabfluss und Hochwasserrückhalt zur Verfügung zu<br/>stellen, deutet auf einen hohen Koordinationsbedarf im

wasserabiliuss und Hochwasserrückhalt zur Verlugung zu stellen, deutet auf einen hohen Koordinationsbedarf im Interaktionsfeld Landwirtschaft und Hochwasserrisikomanagement hin. Die Ausweitung der Siedlungsfläche in ehemals hochwassergefährdeten Gebieten (Restrisikogebiete) gilt als wesentlicher Treiber des Hochwasserrisikos. Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Hochwasserabfluss könnten hier das Risiko weiter erhöhen. Während die Schutzwasserwirtschaft darauf abzielt, einen Anstieg des Schadenspotentials möglichst zu vermeiden, wird die bauliche Nutzung von Restrisikogebieten seitens der Raumplanung nur in Oberösterreich beschränkt. Diese unterschiedlichen sektoralen Auffassungen zur Landnutzung in Restrisikobereichen lassen einen hohen Bedarf an Politikkoordination im Interaktionsfeld Raumplanung und Hochwasserrisikomanagement erwarten.

lust zumeist wertvoller landwirtschaftlicher Nutzflächen

zur Folge, was einerseits zu einer Reduktion potentieller

Hochwasserabflussflächen führt und andererseits die Be-

reitschaft der Landwirtinnen und Landwirte. Flächen für

Maßnahmen des Hochwasserrisikomanagements zur Ver-

Die unterschiedliche Problemstruktur beeinflusst die Not-

wendigkeit der Politikkoordination in den drei Interaktions-

feldern von PoCo-FLOOD. Der positive Beitrag der Spei-

cherkraftwerke zur Reduktion von Hochwasserabflüssen

lässt Synergien zwischen der Wasserkraftnutzung in al-

pinen Einzugsgebieten und der Schutzwasserwirtschaft

erwarten. Auch wenn eine Verringerung der Hochwas-

serabflüsse nicht zum gesetzlichen Auftrag der Kraft-

werksbetreiber zählt, ist aufgrund der nachweisbaren

Auswirkungen der Speicherkraftwerke auf das Hochwas-

sergeschehen nur ein geringer Bedarf an Politikkoordinati-

on in diesem Interaktionsfeld zu erwarten. Im Hinblick auf

die Landwirtschaft verweisen sowohl der hohe Anteil an wertvollem Acker- und Grünland in Hochwasserabfluss-

bereichen als auch der laufende Entzug zumeist hoch-

wertiger landwirtschaftlicher Nutzflächen durch die Siedlungsentwicklung auf eine angespannte Situation, was die

Verfügbarkeit von Flächen für die landwirtschaftliche Nut-

zung betrifft. Die gleichzeitige Erwartung der Schutzwas-

fügung zu stellen, verringert.

#### 8.2 Prozess der Politikkoordination

In PoCo-FLOOD betrachten wir die sektoralen Zielbeziehungen als wesentlichen Faktor zur Erklärung von Prozessen der Politikkoordination im Hochwasserrisikomanagement. Die Herausforderungen der Integration sind in den drei Interaktionsfeldern unterschiedlich. Im Folgenden wird die Relevanz von komplementären bzw. konfligierenden Politikzielen für den Prozess der Politikkoordination dargestellt. Angesichts der unterschiedlichen Problemstruktur in den Interaktionsfeldern erscheint es zudem naheliegend, einen Zusammenhang zwischen den Herausforderungen der Politikintegration und den eingesetzten Instrumenten herzustellen.

Im Interaktionsfeld Wasserkraftnutzung und Hochwasserrisikomanagement sehen wir eine komplementäre bzw. neutrale Beziehung zwischen den Zielen der Kraftwerksbetreiber und jenen der Schutzwasserwirtschaft, die einen Prozess der Politikintegration zur Folge haben, der überwiegend weiche Instrumente einsetzt, um die Synergien zwischen den Kraftwerksbetreibern und der Schutzwasserwirtschaft zu unterstützen. Die Zusammenarbeit zwischen diesen Akteurinnen und Akteuren hat sich über einen langen Zeitraum entwickelt. Die sektorübergreifenden Probleme im Hochwasserrisikomanagement werden von den Kraftwerksbetreibern zwar anerkannt, aber als zweitrangig angesehen. Zu Konflikten können jedoch Forderungen von Dritten führen. Dies gilt vor allem für naturschutzorientierte NGOs, welche die Ziele der Wasserrahmenrichtlinie im Zusammenhang mit dem Ausbau der Wasserkraft einfordern, sowie für Vertreterinnen und Vertreter von Gemeinden oder Grundeigentümerinnen und Grundeigentümern, die aufgetretene Hochwasserschäden als Auswirkungen des Betriebs von Wasserkraftwerken wahrnehmen. Aufgrund einer überschaubaren Konfliktsituation können die Herausforderungen der Politikintegration in diesem Interaktionsfeld als gering bis mäßig eingestuft werden. Das Hauptinstrument der Politikintegration sind die Wehrbetriebsordnungen sowohl für den Regelbetrieb als auch für den Hochwasserfall (z.B. in gemeinsamen Krisenstäben). Bei diesen Regeln handelt es sich um politische Instrumente, die von den Kraftwerksbetreibern vorgeschlagen und von den Behörden der Schutzwasserwirtschaft genehmigt werden. Ein weiteres Instrument besteht in einstweiligen Verfügungen, die beispielsweise zu Vorabsenkungen von Speicherräumen als Hochwasserschutzmaßnahme durch Bezirkshauptmannschaften beim Hochwasser 2018 und 2019 an der Drau genutzt wurden. Die Einbeziehung Dritter ist nur in einem begrenzten Ausmaß vorgesehen. Zusätzliche sektorübergreifende Integration findet in Form eines Austausches von Daten und Fachwissen in einem bilateralen, informellen Rahmen statt.

Demgegenüber steht der Hochwasserrückhalt auf landwirtschaftlichen Flächen mit einem konkurrierenden Zielverhältnis zwischen der Landwirtschaft und der Schutzwasserwirtschaft. Da landwirtschaftliche Flächen bereits durch die Siedlungsentwicklung unter Druck stehen, sinkt die Bereitschaft der Landwirtinnen und Landwirte, Flächen für den Hochwasserrückhalt zur Verfügung zu stellen oder Bewirtschaftungseinschränkungen durch veränderte Hochwasserabflussverhältnisse hinzunehmen. Der Widerstand landwirtschaftlicher Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer kann vor allem großflächige Hochwasserschutzprojekte an alpinen Flüssen behindern und verzögern. Es gibt Forderungen der Schutzwasserwirtschaft, die mit den Interessen der Landwirtschaft konformgehen, etwa jene nach einer Reduktion der hohen Flächeninanspruchnahme für Bauland und Infrastruktureinrichtungen. Wenn aber Hochwasserschutzprojekte landwirtschaftliche Flächen beanspruchen, Bewirtschaftungseinschränkungen erforderlich sind und Entschädigungsfragen aufgeworfen werden, werden die konkurrierenden Landnutzungsinteressen zwischen diesen Sektoren sichtbar. Dementsprechend sind die Herausforderungen der sektoralen Politikintegration in diesem Interaktionsfeld sehr hoch. Die wichtigsten Instrumente, die zur Politikintegration eingesetzt werden, haben ordnungspolitischen Charakter. Auf Projektebene finden die Verhandlungen zwischen den Beteiligten in einem formalen Rahmen auf Grundlage der Bestimmungen des Wasserrechtsgesetzes statt. Entschädigungen für landwirtschaftliche Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer für Bewirtschaftungseinschränkungen und Eingriffe in Eigentumsrechte beruhen aber auf zivilrechtlichen Vereinbarungen. Eine Enteignung für bauliche

Hochwasserschutzmaßnahmen wäre nach dem Wasserrechtsgesetz möglich, wird aber nur selten angewendet, da die Enteignungsverfahren als langwierig und kompliziert gelten. Während die Akteurinnen und Akteure der Schutzwasserwirtschaft das Verhältnis zur Landwirtschaft als gleichberechtigt wahrnehmen, sehen die Vertreterinnen und Vertreter der Landwirtschaft eine Dominanz der Schutzwasserwirtschaft. Trotz konfligierender Ziele und der dadurch schwierigen Rahmenbedingungen verläuft die Koordination von Landwirtschaft und Schutzwasserwirtschaft vor Ort allerdings in den meisten Projekten erfolgreich. Interessant an den Fällen, in denen Konflikte auftreten, ist, dass die Behörden der Schutzwasserwirtschaft auf Zwangsmaßnahmen verzichten. Stattdessen greifen sie nach einiger Zeit auf weichere Politikinstrumente wie Überzeugungsarbeit und Neuverhandlungen zurück.

Die Ergebnisse der Analyse des Prozesses der Politikkoordination im Interaktionsfeld Raumplanung und Hochwasserschutz stehen auf den ersten Blick im Widerspruch zu unserer Hypothese über die Auswirkungen der Zielbeziehungen auf den Prozess der Politikintegration. Auch zwischen Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung liegt im Hinblick auf den Umgang mit Restrisikobereichen eine potentiell konfligierende Zielbeziehung vor, in deren Folge man manifeste Interessengegensätze und den Einsatz ordnungspolitischer Instrumente erwarten würde. Allerdings treten Interessengegensätze zwischen den Akteurinnen und Akteuren in diesem Interaktionsfeld kaum zu Tage, und ein ordnungspolitischer Zugang kommt nur in einem österreichischen Bundesland (Oberösterreich) in Form eines Baulandwidmungsverbots und einer verpflichtenden baulichen Hochwasseranpassung in Restrisikogebieten zur Anwendung. Die empirischen Befunde aus der Analyse des Prozesses der Politikkoordination verweisen vielmehr auf ein gutes Verhältnis und enge operative Kontakte zwischen den Akteurinnen und Akteuren von Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung. Eine Beschränkung bzw. eine Anpassung der baulichen Nutzung im Wirkungsbereich von Hochwasserschutzanlagen durch ordnungspolitische Zugänge in der Flächenwidmungs- und Bebauungsplanung wird zwar von einer Mehrheit der befragten Stakeholder aus beiden Sektoren für wünschenswert gehalten, mit Verweis auf die beschränkten baulichen Entwicklungsmöglichkeiten in den alpinen Talräumen aber als derzeit politisch nicht durchsetzbar angesehen. Zur Lösung des sektorübergreifenden Problems zeigt sich eine Präferenz der Entscheidungstragenden für politische Instrumente mit Empfehlungscharakter. Sowohl die fehlenden Konflikte als auch das weitgehende Fehlen ordnungspolitischer Maßnahmen lassen sich damit erklären, dass der Dammeffekt de facto als zweitrangige Problemstellung angesehen wird, die in der Praxis gegenüber einer Vermeidung neuer Risiken in Bereichen mit höherer Gefährdung und der Freihaltung von Hochwasserabfluss- und Hochwasserrückhalteräumen von baulichen Nutzungen in den Hintergrund tritt.

Die Ergebnisse der empirischen Analyse stützen im Wesentlichen die Hypothese, dass die sektorale Zielbeziehung einen starken Einfluss auf den sich entfaltenden Prozess der Politikintegration hat. In den drei Interaktionsfeldern haben wir signifikante Unterschiede zwischen niedrigen und hohen Herausforderungen der Politikintegration festgestellt. Komplementäre und widersprüchliche sektorale Politikziele beeinflussen die Herausforderung der Politikintegration und sind ein wichtiger Faktor zur Erklärung des sich entfaltenden Politikintegrationsprozesses in Bezug auf politische Rahmenbedingungen, die Beziehungen zwischen den Akteurinnen und Akteuren und die Anwendung politischer Instrumente. Komplementäre politische Ziele führen zu eher informellen, harmonischen Verhandlungen und zum Einsatz weicherer politischer Instrumente wie Informationen, Empfehlungen und freiwillige Maßnahmen. Im Gegensatz dazu führen konfligierende politische Ziele zu eher formellen Verhandlungen zwischen den betroffenen Sektoren und zu regulativen Instrumenten. Die Ergebnisse der Analyse des Prozesses der Politikkoordination zeigen jedoch auch, dass die Beteiligten in einer konfliktreichen Situation den Fortschritt in kleinen Schritten bevorzugen, indem sie weiche politische Instrumente einsetzen, um ein Scheitern der Politikintegration zu vermeiden.

## 8.3 Performance der Politikkoordination

Zur Analyse der Performance der Politikkoordination wurden in allen drei Interaktionsfeldern empirische Fallstudien durchgeführt. Dieser Abschnitt stellt anhand der Ergebnisse dieser Fallstudien vergleichend dar, wie sich die Koordination der Akteurinnen und Akteure in den einzelnen Politikfeldern auf eine Vermeidung bzw. Verringerung von Hochwasserrisiken auswirkt.

Im Interaktionsfeld Wasserkraftnutzung und Hochwasserrisikomanagement wurden der Prozess einer Änderung der Wehrbetriebsordnung an der Drau sowie die Steuerung der Kraftwerke durch die Kraftwerksbetreiber im Ereignisfall untersucht. Im Jahr 2014 wurden erstmals Stauräume aufgrund von Hochwasserprognosen vorabgesenkt, wie das in vorübergehenden Wehrbetriebsordnungen, die nach dem Hochwasser 2012 bewilligt wurden, geregelt ist. Gleichzeitig wurde an neuen permanenten Wehrbetriebsordnungen gearbeitet, um einerseits die Regelungen aller Kraftwerke, und somit der gesamten Staukette entlang der Drau, aufeinander abzustimmen und andererseits auch Abflussprognosen in den Betriebsordnungen für den Hochwasserfall zu berücksichtigen. Dabei waren die Regelungen zu etwaigen Abstaukurven aufgrund von definierten maximalen Abflussscheitelprognosen die größten Streitpunkte. Durch den Vorabstau der Speicher könnte zusätzliches Retentionsvolumen geschaffen, die Hochwasserwelle gekappt und somit die Hochwassergefahr reduziert werden. Diese Absenkungen können gleichzeitig negative Auswirkungen auf die Ökologie (z.B. Fischpopulation), auf die Betriebssicherheit (z.B. Hangrutschungen, Böschungsbrüche) und auch auf die Stromproduktion haben. Daher sind solche Regelungen durchaus komplex. Die neu verhandelten und bewilligten Wehrbetriebsordnungen berücksichtigen nun geringfügige, prognosebasierte Vorabsenkungen bei festgelegten prognostizierten Durchflüssen, die aus ökologischer Sicht vertretbar waren und welche die Betriebssicherheit der Anlagen nicht gefährden. Allerdings können Betriebsvorschriften nicht jedes Hochwasserereignis und jede Hochwasserwelle berücksichtigen, da die einzelnen Ereignisse sehr unterschiedliche Charakteristiken aufweisen können. Während der Hochwasser 2018 und 2019 kam es zu einer zusätzlichen Absenkung der Stauräume. Diese zusätzlichen Absenkungen, die über die in den neuen Wehrbetriebsordnungen geregelten Absenkungen hinausgehen, wurden von verschiedenen Bezirkshauptmannschaften, die im Krisenfall die obersten Behörden sind, durch einstweilige Verfügungen angeordnet. Dadurch konnten bei diesen beiden Ereignissen weitgehende Überflutungen verhindert und die Hochwassergefahr reduziert werden. Diese Fallstudie verdeutlicht, dass die Wehrbetriebsordnung das wichtigste Instrument zur Politikintegration zwischen Wasserkraftnutzung und Schutzwasserwirtschaft ist, das im Hochwasserfall zu einer Reduktion der Hochwasserspitze und damit zu einer Verringerung des Hochwasserrisikos im Unterlauf eingesetzt wird. Der Erlass von einstweiligen Verfügungen in 2018 und 2019 zeigt darüber hinaus, dass es im Krisenfall noch weitere Instrumente gibt, die von den Behörden und den politischen Akteurinnen und Akteuren eingesetzt werden können, um das Hochwasserrisiko zu verringern.

Als Beispiel für die Performance der Koordination von Landwirtschaft und Schutzwasserwirtschaft wurde die Entschädigungsrichtlinie des Landes Salzburg untersucht. In den Jahren 2020 und 2021 wurden von der Landwirtschaftskammer Salzburg in Abstimmung mit der Wildbach- und Lawinenverbauung eine Grundlage für privatrechtliche Übereinkünfte bei Hochwasserschutzprojekten sowie eine Muster-Vereinbarung erstellt, die in der Praxis bereits mehrfach angewendet wurde. Im Rahmen dieser Vereinbarung werden sowohl Entschädigungssummen als auch inhaltliche Details für die Dauer der Bauzeit, der Betriebsphase, sowie im Anlassfall für die Grundbesitzerinnen und Grundbesitzern geregelt. Diese Richtlinie wurde in der Praxis bereits mehrmals angewendet und wurde als Fallstudie in der Salzburger Gemeinde Bischofshofen untersucht. Die Entschädigungen für landwirtschaftliche Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer wurden darin, unter Einbindung der Landwirtschaftskammer, vollständig mithilfe der genannten Muster-Vereinbarung abgewickelt. Diese trug im genannten Fall maßgeblich dazu bei, das Projekt rasch umzusetzen, da den zu entschädigenden Eigentümerinnen und Eigentümern einerseits genug rechtliche Sicherheit gegeben wurde, und andererseits auch die Entschädigungssummen, die nach einer Begehung in einem Gutachten errechnet wurden, als angemessen empfunden wurden. Dieses Koordinationsinstrument kann hilfreich sein, Projekte in kürzerer Zeit umzusetzen und damit auch das Hochwasserrisiko zu mindern.

Für das Interaktionsfeld Raumplanung und Hochwasserschutz verweisen die Ergebnisse der Fallstudie in Vorarlberg auf die Bedeutung der Gemeindeebene im Umgang mit Restrisiken. Die Fallstudiengemeinden in Vorarlberg, die keinen Restriktionen der Raumplanung für die Nutzung von Restrisikobereichen unterliegen, gehen in der örtlichen Raumplanung differenziert mit der Widmung von Flächen im Wirkungsbereich von technischen Schutzmaßnahmen um. Für die Nutzung dieser Flächen ist vorrangig die Nachfrage nach Bauland ausschlaggebend. Zusätzlich spielen das geringe Flächenangebot aufgrund des beschränkten Dauersiedlungsraums, die begrenzten Optionen für neues geeignetes Bauland außerhalb von Gefahrenbereichen und die fehlende Verfügbarkeit von Baulandreserven eine Rolle. Das verbleibende Risiko auf diesen Flächen ist für die Entscheidung, ob dort Bauland gewidmet wird, von untergeordneter Bedeutung. Eine Vermeidung neuer Hochwasserrisiken ist durch diese Vorgehensweise nicht zu erwarten. Allerdings nimmt die Wildbach- und Lawinenverbauung die Gefahrenzonen nach der Errichtung von Schutzbauten nicht vollständig zurück und lässt die gelbe Gefahrenzone weiterbestehen. Damit ist für Widmungsanträge der Gemeinden in Restrisikobereichen weiterhin eine Stellungnahme der Wildbach- und Lawinenverbauung, verbunden mit möglichen Auflagen, erforderlich. Diese Auflagen führen in der Regel zu einer Vermeidung neuer Hochwasserrisiken. Die Fallstudie im oberösterreichischen Machland macht deutlich, dass die Vorgaben des Raumordnungsund Baurechts die weitere Entwicklung des Hochwasserrisikos in Restrisikogebieten maßgeblich beeinflussen. Das Baulandwidmungsverbot in ehemals roten Gefahrenzonen und die verpflichtende bauliche Hochwasseranpassung bei Neubauten im vormaligen 100-jährlichen Hochwasserabflussbereich lassen den Gemeinden nur wenig Spielraum, über die bauliche Nutzung von Restrisikogebieten nach eigenem Planungsermessen zu entscheiden. Mit diesen regulativen Ansätzen ist eine effektive Möglichkeit gegeben, neue Hochwasserrisiken zu vermeiden. Der Beitrag der Politikkoordination zur Vermeidung von Hochwasserrisiken ist hier nicht in der Abstimmung auf Gemeindeebene, sondern auf Landesebene in der Gesetzgebung zu Raumordnung und Baurecht zu verorten. Auch im Hinblick auf mögliche Auswirkungen des Klimawandels stellt die Beschränkung der Baulandwidmung in Restrisikobereichen eine robuste Maßnahme des Hochwasserrisikomanagements dar, die unabhängig von den Klimawandeleinflüssen einen Anstieg des Risikos sehr geringhält. Ohne entsprechende rechtliche Regelungen erfordert ein risikobewusster Umgang mit Restrisiken in der Raumplanung eine intensive Abstimmung zwischen Schutzwasserwirtschaft und Raumplanung. Dafür bieten sich auf regionaler,

einzugsgebietsbezogener Ebene das Gewässerentwicklungs- und Risikomanagementkonzept (GE-RM) sowie auf lokaler Ebene das Örtliche Entwicklungskonzept an. Aufbauen kann die Koordination in diesem Zusammenhang auf die engen operativen Kontakte zwischen den Akteurinnen und Akteuren aus den beiden Politikbereichen.

Im abschließenden Stakeholder-Workshop wurden die Projektergebnisse durch die Beiträge aus der Praxis des Hochwasserrisikomanagements weitestgehend bestätigt. Für die Koordination zwischen Wasserkraftnutzung und Schutzwasserwirtschaft ist die Wehrbetriebsordnung das wichtigste Instrument. Die Berücksichtigung landwirtschaftlicher Anliegen in Hochwasserschutzprojekten wird durch privatrechtliche Vereinbarungen gewährleistet. Das gesellschaftliche Interesse am Erhalt wertvoller landwirtschaftlicher Flächen wird dadurch aber nicht erfasst. Im Umgang der Raumplanung mit der Nutzung von Restrisikoflächen überwiegen informelle Ansätze. Eine integrale Maßnahmenplanung im Sinne einer risikoorientierten Raumplanung erfordert eine verstärkte Koordination der beteiligten Akteurinnen und Akteure, um die Risikoentwicklung so zu steuern, dass Risiken auch in Zukunft tragbar bleiben. Als Option zur Verbesserung der Politikkoordination wird seitens der Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Workshops eine Intensivierung der Kommunikation mit den betroffenen Akteurinnen und Akteuren empfohlen. Die Kommunikation zwischen allen Stakeholdern trägt wesentlich zur erfolgreichen Umsetzung von Projekten im Hochwasserrisikomanagement bei. Dabei ist nicht nur der Austausch zwischen den in den Interaktionsfeldern beteiligten Disziplinen, sondern auch jener mit den von den jeweiligen Planungen und Maßnahmen Betroffenen von Bedeutung.

#### 9 Dissemination

#### 9.1 Wissenschaftliche Publikationen

GRÜNEIS, H., SCHROLL, K. & WAGNER, K. (2021): The Role of Agriculture in Flood Risk Management in Austria Conflicts and Challenges. – Journal of Environmental Science and Engineering B, **10**/3, 112–127, Wilmington (David Publishing Company). http://dx.doi.org/10.17265/2162-5263/2021.03.004

GRÜNEIS, H., NIEDERMAYR, J., SCHROLL, K. & WAGNER, K. (2023): Die Landwirtschaft im integrierten Hochwasserrisikomanagement. BAB-Report 005, 88 S., Bundesanstalt für Agrarwirtschaft und Bergbauernfragen, Wien.

HOHENSINNER, S., ATZLER, U., BERGER, M., BOZZETTA, T., HÖBERTH, C., KOFLER, M., RAPOTTNIG, L., STERLE, Y. & HAIDVOGL, G. (2021): Land Use and Cover Change in the Industrial Era: A Spatial Analysis of Alpine River Catchments and Fluvial Corridors. – Frontiers in Environmental Science, **9**, Nr. 647247, 1–17. http://dx.doi. org/10.3389/fenvs.2021.647247

HOHENSINNER, S., EGGER, G., MUHAR, S., VAUDOR, L. & PIÉGAY, H. (2021): What remains today of pre-industrial Alpine rivers? Census of historical and current channel patterns in the Alps. – River Research and Applications, **37**/2, 128–149 (John Wiley & Sons). http://dx.doi.org/10.1002/rra.3751.

JUNGER, L., HOHENSINNER, S., SCHROLL, K., WAGNER, K. & SEHER, W. (2022): Land Use in Flood-Prone Areas and Its Significance for Flood Risk Management – A Case Study of Alpine Regions in Austria. – Land, **11**/3, 392, 16 S. http://dx.doi.org/10.3390/land11030392

JUNGER, L. & SEHER, W. (in Bearbeitung): Counteracting the levee effect – Possibilities within spatial planning.

NORDBECK, R., SEHER, W., GRÜNEIS, H., HERRNEGGER, M. & JUNGER, L. (2023): Conflicting and complimentary policy goals as sectoral integration challenge: an analysis of sectoral interplay in flood risk management. – Policy Sciences. https://doi.org/10.1007/s11077-023-09503-8

SEHER, W. & NEUHOLD, C. (2022): Koordination von Raumplanung und Wasserbau als wesentlicher Bestandteil des Hochwasserrisikomanagements. – Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, **74**/3–4, 144–153. http://dx.doi.org/10.1007/s00506-022-00847-8

STECHER, G. & HERRNEGGER, M. (2022): Impact of hydropower reservoirs on floods: evidence from large river basins in Austria. – Hydrological Sciences Journal, **67**/14, 2082–2099. http://dx.doi. org/10.1080/02626667.2022.2130332

STECHER, G. & HERRNEGGER, M. (in Bearbeitung): Changes in the Natural Water Retention of alpine Landscapes since the 1820s – the case of Vorarlberg, Salzburg and Carinthia, Austria.

THALER, T., NORDBECK, R., LÖSCHNER, L. & SEHER, W. (2020): Cooperation in flood risk management: understanding the role of strategic planning in two Austrian policy instruments. – Environmental Science & Policy, **114**, 170–177 (Elsevier). http://dx.doi. org/10.1016/j.envsci.2020.08.001

#### 9.2 Factsheet

GRÜNEIS, H., SCHROLL, K. & WAGNER, K. (2021): Landwirtschaft und Hochwasserrisikomanagement. – Bundesanstalt für Agrarwirtschaft und Bergbauernfragen, Fact Sheet 001, Jänner 2021, Wien.

#### 9.3 Präsentationen

HERRNEGGER, M. & STECHER, G. (2022): Einfluss von Speicherkraftwerken auf Hochwasser in Österreich. Koordination im Hochwasserrisikomanagement. – ÖWAV, 7. Dezember 2022, Salzburg.

JUNGER, L. & SEHER, W. (2021): Hochwasserexposition von alpinen Siedlungsgebieten im historischen Vergleich. – Dresdner Flächennutzungssymposium 2021, 28.–29. Juni 2021, online.

JUNGER, L. & SEHER, W. (2021): Growing flood risk in areas with lower flood hazard – spatial planning options to address this challenge. – REAL CORP 2021, 7.–10. September 2021, Vienna.

JUNGER, L. & SEHER, W. (2022): Framework conditions of growing flood damage potential in areas with residual risk ('levee effect') – A case study of Austria. – Association of European Schools of Planning, AESOP 2022 congress, 25.–29. Juni 2022, Tartu.

JUNGER, L. & SEHER W. (2022): Optionen einer risikoorientierten Raumplanung in Restrisikobereichen. Koordination im Hochwasserrisikomanagement. – ÖWAV, 7. Dezember 2022, Salzburg.

LEBIEDZINSKI, K., FÜRST, J., SCHULZ, K. & HERRNEGGER, M. (2020): Possible impacts of a hydropower reservoir on the flood hazard of an Alpine valley. – EGU General Assembly, 4.–8. Mai 2020, online.

#### 10 Quellenverzeichnis

#### 10.1 Literatur

AMA (2020): Cross Compliance 2020 – Teil 2: Bestimmungen für alle Landwirte. – 30 S., Wien. https://www.ama.at/getattach-ment/81ec6af0-0988-4713-b06c-937872faa67f/20200324\_CC\_2020\_2\_alle-LW.pdf (abgerufen am 19.01.2021).

APCC – AUSTRIAN PANEL ON CLIMATE CHANGE (2014): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014. – 1096 S., Wien (Österreichische Akademie der Wissenschaften).

ARE, BWG & BUWAL (Hrsg.) (2005): Recommendation. Spatial planning and natural hazards. – 24 S., Bundesamt für Raument-wicklung (ARE)/Bundesanstalt für Wasser und Geologie (BWG)/Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.

ATZLER, U. (2021): Historische Veränderung der Landbedeckung im Tiroler Jamtal 1820–2019. – Masterarbeit, 61 S., Universität für Bodenkultur, Wien.

AVOYAN, E. & MEIJERINK, S. (2021): Cross-sector collaboration within Dutch flood risk governance: historical analysis of external triggers. – International Journal of Water Resources Development, **37**/1, 24–47 (Taylor & Francis online). http://dx.doi.org/10.1080/07 900627.2019.1707070

BAB – BUNDESANSTALT FÜR AGRARWIRTSCHAFT UND BERGBAUERN-FRAGEN (2020): Standardoutputkoeffizienten. – Digitale Datenbank der BAB, Wien.

BAFU – BUNDESAMT FÜR UMWELT & ARE – BUNDESAMT FÜR RAUM-ENTWICKLUNG (2019): Risikobasierte Raumplanung – Risiken abwägen: Instrumente, Chancen und Erfahrungen aus Sicht von Kantonen, Gemeinden, Raumplanern und Architekten. – 24 S., Bern. LÖSCHNER, L., HERRNEGGER, M., HOHENSINNER, S., LEBIEDZINSKI, K., NIEDERMAYR, J., NORDBECK, R., SEHER, W., WAGNER, K. & WESE-MANN, J. (2019): Flood risk management in mountain regions: a policy coordination perspective. – EGU General Assembly, 7.–12. April 2019, Vienna.

NORDBECK, R. (2021): Towards better sectoral interplay in flood risk management in Austria. – 5<sup>th</sup> International Conference on Public Policy, 5.–9. Juni 2022, Barcelona.

SCHROLL, K. (2022): Flood Storage on Agricultural Land in Austria – Integrated Flood Risk Management in Mountain Areas: Policy instruments. – PESCRL (Permanent European Conference for the Study of the Rural Landscapes) conference – Living together in European Rural Landscapes, 26. September–2. Oktober 2022, Jaén und Baeza, Spanien.

SCHROLL, K., GRÜNEIS, H. & WAGNER, K. (2022): Agrarflächen in Hochwasserrisikogebieten. Koordination im Hochwasserrisikomanagement. – ÖWAV, 7. Dezember 2022, Salzburg.

SEHER, W. & JUNGER, L. (2022): Tracing justice in flood risk management – the case of developing residual risk zones. – 11<sup>th</sup> International and Interdisciplinary Symposium, European Academy of Land Use and Development, 1.–3. September 2022, Frankfurt.

WAGNER, K. (2020): Flood Retention and Impacts on Agriculture in Austria. – 1<sup>st</sup> IALE-Russia online international conference Landscape Science and Landscape Ecology: Considering Responses to Golbal Challenges, 14.–18. September 2020, online.

WAGNER, K. (2022): Interrelations of Flood Risk Management and Agriculture in Austrian Alpine Regions. – Global Mountain Sustainability Forum, EURAC, 3.–4. Oktober 2022, online.

BFW – BUNDESFORSCHUNGS- UND AUSBILDUNGSZENTRUM FÜR WALD, NATURGEFAHREN UND LANDSCHAFT (2018): eBod2. – digitale Karte, Wien. https://bodenkarte.at

BIESBROEK, G.R., KLOSTERMANN, J.E.M., TERMEER, C.J.A.M. & KABAT, P. (2013): On the nature of barriers to climate change adaptation. – Regional Environmental Change, **13**/5, 1119–1129. http://dx.doi.org/10.1007/s10113-013-0421-y

BLÖSCHL, G. (2020): Hochwässer. – In: GLADE, T., MERGILI, M. & SATTLER, K. (Hrsg.): ExtremA 2019 – Aktueller Wissenstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich, 229–246, Wien (Vienna University Press).

BMLFUW – BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (Hrsg.) (2007): Hydrologischer Atlas Österreichs. – 3. Lieferung, Wien.

BMLFUW – BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (Hrsg.) (2009): FloodRisk II. Vertiefung und Vernetzung zukunftsweisender Umsetzungsstrategien zum integrierten Hochwassermanagement. Synthesebericht. – Bericht, 274 S., Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

BMLFUW – BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2014): Hochwasserrisikozonierung Austria – HORA. – BMLFUW, Wien. https://hora.gv.at/ (abgerufen am 11.11.2020).

BMLFUW – BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2015): Technische Richtlinie für die Bundeswasserbauverwaltung RIWA-T, gemäß § 3 Abs 2 WBFG, Fassung 2016, Wien. BMLFUW – BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2016a): Task Force Donau – Hochwasserspitzensenkung durch Vorabsenkung. – Endbericht, 73 S., Wien.

BMLFUW – BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2016b): Technische Richtlinie für die Gefahrenzonenplanungen gemäß § 42a WRG.

BMLFUW – BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT & BAB – BUNDESANSTALT FÜR AGRARWIRTSCHAFT UND BERGBAUERNFRAGEN (2017): INVEKOS-Datenpool 2017 des BMLFUW, Wien. https://www.bmlrt.gv.at/land/ direktzahlungen/Invekos.html (abgerufen am 11.11.2020).

BMLRT – BUNDESMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, REGIONEN UND TOURISMUS (2018): INVEKOS Daten. – Interne Datenbank, Wien.

BMLRT – BUNDESMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, REGIONEN UND TOURISMUS (2021): RMP2021: Umsetzung der EU-Hochwasserrichtlinie (2007/60/EG) – 2. Nationaler Hochwasserrisikomanagementplan – Bericht, 420 S. https://info.bml.gv.at/dam/ jcr:c923f099-47b5-4724-b82a-36537169ce57/RMP2021.pdf (abgerufen am 12.10.2022).

BOLOGNESI, T., METZ, F. & NAHRATH, S. (2021): Institutional complexity traps in policy integration processes: a long-term perspective on Swiss flood risk management. – Policy Sciences, **54**/4, 911–941 (Springer). http://dx.doi.org/10.1007/s11077-021-09443-1

BOZZETTA, T. (2022): Veränderung der Landbedeckung im Einzugsgebiet des Rheins in Vorarlberg. – Masterarbeit, 106 S., Universität für Bodenkultur, Wien.

BUCKEL, J. & OTTO, J.-C. (2018): The Austrian Glacier Inventory GI 4 (2015) in ArcGIS (shapefile) format. – PANGAEA – Data Publisher for Earth & Environmental Science. https://doi.org/10.1594/ PANGAEA.887415

BURBY, R.J. (2006): Hurricane Katrina and the Paradoxes of Government Disaster Policy: Bringing About Wise Governmental Decisions for Hazardous Areas. – The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science, **604**/1, 171–191. http://dx.doi. org/10.1177/0002716205284676

CAMMERER, H., THIEKEN, A.H. & VERBURG, P.H. (2013): Spatio-temporal dynamics in the flood exposure due to land use changes in the Alpine Lech Valley in Tyrol (Austria). – Natural Hazards, **68**/3, 1243–1270 (Springer). http://dx.doi.org/10.1007/s11069-012-0280-8

CANDEL, J. & BIESBROEK, R. (2016): Toward a processual understanding of policy integration. – Policy Sciences, **49**, 211–231 (Springer). https://doi.org/10.1007/s11077-016-9248-y

CRED/UNISDR (2015): The Human Cost of Weather-Related Disasters 1995–2015. – 30 S., Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR), Brüssel.

CUMISKEY, L., PRIEST, S.J., KLIJN, F. & JUNTTI, M. (2019): A framework to assess integration in flood risk management: implications for governance, policy, and practice. – Ecology and Society, **24**/4, 17. http://dx.doi.org/10.5751/ES-11298-240417

CUTTER, S., EMRICH, C.T., GALL, M. & REEVES, R. (2018): Flash Flood Risk and the Paradox of Urban Development. – Naturalo Hazards Reviews, **19**, 05017005. https://doi.org/10.1061/(ASCE) NH.1527-6996.0000268

DI BALDASSARRE, G., KOOY, M., KEMERINK, J.S. & BRANDIMARTE, L. (2013): Towards understanding the dynamic behaviour of floodplains as human-water systems. – Hydrology and Earth System Sciences, **17**, 3235–3244. https://doi.org/10.5194/hess-17-3235-2013 DI BALDASSARRE, G., KREIBICH, H., VOROGUSHYN, S., AERTS, J., ARN-BJERG-NIELSEN, K., BARENDRECHT, M., BATES, P., BORGA, M., BOT-ZEN, W., BUBECK, P., MARCHI, B. DE, LLASAT, C., MAZZOLENI, M., MOLINARI, D., MONDINO, E., MÅRD, J., PETRUCCI, O., SCOLOBIG, A., VIGLIONE, A. & WARD, P.J. (2018): Hess Opinions: An interdisciplinary research agenda to explore the unintended consequences of structural flood protection. – Hydrology and Earth System Sciences, **22**/11, 5629–5637. http://dx.doi.org/10.5194/hess-22-5629-2018

EBERSTALLER, J., FRAISS, B., GABRIEL, H., HAIDVOGL, G., KÜBLBÄCK, G., KUSEBAUCH, G., PINKA, P. & SEEBACHER, F. (2004): Raumordnung und Hochwasserschutz am Beispiel der Traisen – Siedlungsentwicklung und Schadensanalyse. – Studie im Rahmen von FloodRisk: Analyse der Hochwasserereignisse vom August 2002, 108 S., Wien.

ELMER, F., HOYMANN, J., DÜTHMANN, D., VOROGUSHYN, S. & KREI-BICH, H. (2012): Drivers of flood risk change in residential areas. – Natural Hazards and Earth System Sciences, **12**/5, 1641–1657. http://dx.doi.org/10.5194/nhess-12-1641-2012

ESA GLOBAL LAND SERVICES (2021): Copernicus Global Land Services-Leaf Area Index (LAI). – https://land.copernicus.eu/global/ products/lai

FELLINGER, R. (2020): Revision von Gefahrenzonenplänen und ihre Wirkung auf die örtliche Raumplanung. Die Wechselwirkung zwischen technischen Schutzmaßnahmen, Gefahrenzonen und räumlicher Entwicklung, sowie der raumplanerische Umgang mit Restrisiken und Revisionsflächen in alpinen Regionen am Beispiel Vorarlberg. – Masterarbeit, 157 S., Universität für Bodenkultur, Wien.

FRÜH-MÜLLER, A., WEGMANN, M. & KOELLNER, T. (2015): Flood exposure and settlement expansion since pre-industrial times in 1850 until 2011 in north Bavaria, Germany. – Regional Environmental Change, **15**/1, 183–193. http://dx.doi.org/10.1007/s10113-014-0633-9

FUCHS, S., KEILER, M. & ZISCHG, A. (2015): A spatiotemporal multihazard exposure assessment based on property data. – Natural Hazards and Earth System Sciences, **15**/9, 2127–2142. http:// dx.doi.org/10.5194/nhess-15-2127-2015

FUHRMANN, S. (2007): Digitale historische Geobasisdaten im Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) – Die Urmappe des Franziszeischen Katasters. – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, **1**, 24–35, Wien.

GANAHL, P. (1988): Retention of a 100 years event by the Zillertal reservoirs. – Internationales Symposium INTERPRAEVENT, Band **4** (Tagungspublikation), 43–54, Graz.

GEOVILLE INFORMATION SYSTEMS (2017): cadasterENV – Final Report (TD-9) – Public Version I 1.0. – https://www.landinformationsystem.at/#/lisa/overview (abgerufen am 11.11.2020).

GRAF, W.L. (2006). Downstream hydrological and geomorphic effects of large dams on American rivers. – Geomorphology, **79**/3–4, 336–360, Amsterdam. http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.022

GRALEPOIS, M., LARRUE, C., WIERING, M., CRABBÉ, A., TAPSELL, S., MEES, H., EK, K. & SZWED, M. (2016): Is flood defense changing in nature? Shifts in the flood defense strategy in six European countries. – Ecology and Society, **21**/4, 37. http://dx.doi.org/10.5751/ ES-08907-210437

GUMBEL, E.J. (1958): Statistics of Extremes. – 375 S., New York (Columbia University Press). https://doi.org/doi:10.7312/ gumb92958 HASLMAYR, H.P., BAUMGARTEN, A., SCHWARZ, M., HUBER, S., PRO-KOP, G., SEDY, K., KRAMMER, C., MURER, E., POCK, H., RODLAUER, C., SCHAUMBERGER, A., NADEEM, I. & FORMAYER, H. (2016): BEAT – Bodenbedarf für die Ernährungssicherung in Österreich. – Forschungsbericht der AGES im Auftrag des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus, 102 S., Wien.

HAUENSTEIN, W. (2009): Wasserkraft und Klimawandel: Stromwirtschaft im Klimawandel. Auswirkungen der Klimaveränderung auf die Erzeugung von Strom. – Wasser Energie Luft, **101**/2, 33–50, Baden.

HOFER, B., SCHÖBER, J. & PERZLMAIER, S. (2013): Flood control: Principles for the operation of existing and the planning of new storage power plants. – International Conference and Exhibition (Hydro 2013). – Proceedings of HYDRO 2013, Innsbruck, 2013.

HOHENSINNER, S., ATZLER, U., BERGER, M., BOZZETTA, T., HÖBERTH, C., KOFLER, M., RAPOTTNIG, L., STERLE, Y. & HAIDVOGL, G. (2021a): Land Use and Cover Change in the Industrial Era: A Spatial Analysis of Alpine River Catchments and Fluvial Corridors. – Frontiers in Environmental Science, **9**, 647247. https://doi.org/10.3389/ fenvs.2021.647247

HOHENSINNER, S., ATZLER, U., FISCHER, A., SCHWAIZER, G. & HEL-FRICHT, K. (2021b): Tracing the Long-Term Evolution of Land Cover in an Alpine Valley 1820–2015 in the Light of Climate, Glacier and Land Use Changes. – Frontiers in Environmental Science, **9**, 683397. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.683397

HOHENSINNER, S., EGGER, G., MUHAR, S., VAUDOR, L. & PIÉGAY, H. (2021c): What remains today of pre-industrial Alpine rivers? Census of historical and current channel patterns in the Alps. – River Research and Applications, **37**, 128–149. https://doi.org/10.1002/ rra.3751

HUMMEL, T. (2007): Betriebswirtschaftslehre kompakt. – 3. Auflage, 336 S., München (Oldenbourg).

HUSCROFT, J., GLEESON, T., HARTMANN, J. & BÖRKER, J. (2018): Compiling and mapping global permeability of the unconsolidated and consolidated Earth: GLobal HYdrogeology MaPS 2.0 (GLHYMPS 2.0). – Geophysical Research Letters, **45**, 1897–1904. https://doi.org/10.1002/2017GL075860

ICOLD (2021): The World Register Dams (WRD). – International Commission on Large Dams (Last Update: April 2021) [Datensatz]. https://www.icold-cigb.org/

JUNGER, L., HOHENSINNER, S., SCHROLL, K., WAGNER, K. & SEHER, W. (2022): Land Use in Flood-Prone Areas and Its Significance for Flood Risk Management – A Case Study of Alpine Regions in Austria. – Land 2022, **11**/3, 392. https://doi.org/10.3390/land11030392

KENYON, W., HILL, G. & SHANNON, P. (2008): Scoping the Role of Agriculture in Sustainable Flood Management. – Land Use Policy, **25**/3, 351–360, Amsterdam. https://doi.org/10.1016/j.landus-epol.2007.09.003

KLAGHOFER, E. (2003): Hochwasser und Landnutzung. – Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, **19**, 60–69, Wien.

KLINGLER, C., SCHULZ, K. & HERRNEGGER, M. (2021): LamaH-CE: LArge-SaMple DAta for Hydrology and Environmental Sciences for Central Europe. – Earth System Science Data, **13**, 4529–4565. https://doi.org/10.5194/essd-13-4529-2021

KOFLER, M. (2021): Veränderung der Landbedeckung im Einzugsgebiet der Drau in Osttirol. – Masterarbeit, 100 S., Universität für Bodenkultur, Wien.

KONDOLF, G. & BATALLA, R.J. (2005): Chapter 11 Hydrological effects of dams and water diversions on rivers of Mediterraneanclimate regions: examples from California. – Developments in Earth Surface Processes, **7**, 197–211, Amsterdam. https://doi. org/10.1016/S0928-2025(05)80017-3

DLAUER, Maltatal. – Carinthia II, **176/96**, 311–319, Klagenfurt. BEAT –

LAUFFER, H. (1975): Die Auswirkungen der Speicherkraftwerke auf die Umwelt. – Österreichs Wasserwirtschaft, **27**/5/6, 101–118, Wien.

KUGI, W. & WEISSEL, G. (1986): Das Augusthochwasser 1985 im

LINDEN, E., CINELLI, M., SPADA, M., BECKER, W. & BURGHERR, P. (2018): Composite Indicator Analysis and Optimization (CIAO) Tool, v.2. – http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.14408.75520

LÖSCHNER, L. (2018): The spatial turn in flood risk management. A case study of Austria's changing flood policy. – Dissertation submitted at the University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna.

LÖSCHNER, L. & NORDBECK, R. (2020): Switzerland's transition from flood defence to flood-adapted land use – A policy coordination perspective. – Land Use Policy, **95**, 103873. http://dx.doi. org/10.1016/j.landusepol.2019.02.032

LÖSCHNER, L., HERRNEGGER, M., APPERL, B., SENONER, T., SEHER, W. & NACHTNEBEL H.P. (2017): Flood risk, climate change and settlement development: a microscale assessment of Austrian municipalities. – Regional Environmental Change, **17**, 311–322. http://dx.doi.org/10.1007/s10113-016-1009-0

MAYRING, P. (2015): Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken. – 152 S., Weinheim (Beltz).

MEI, X., VAN GELDER, P.H.A.J.M., DAI, Z. & TANG, Z. (2017): Impact of dams on flood occurrence of selected rivers in the United States. – Frontiers of Earth Science, **11**/2, 268–282. https://doi. org/10.1007/s11707-016-0592-1

MERZ, B. (2006): Hochwasserrisiken – Grenzen und Möglichkeiten der Risikoabschätzung. – 334 S., Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).

MERZ, R. & BLÖSCHL, G. (2005): Flood frequency regionalisation – Spatial proximity vs. catchment attributes. – Journal of Hydrology, **302**/1–4, 283–306, Amsterdam. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.07.018

METZ, F., ANGST, M. & FISCHER, M. (2020): Policy integration: Do laws or actors integrate issues relevant to flood risk management in Switzerland? – Global Environmental Change, **61**, 101945. http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101945

MORRIS, J., BEEDELL, J. & HESS, T.M. (2016): Mobilising flood risk management services from rural land: principles and practice. – Journal of Flood Risk Management, **9**/1, 50–68. http://dx.doi. org/10.1111/jfr3.12110

MUHAR, S., GRÜNER, B., BÖCK, K., SCHEIKL, S. & BECSI, R. (2018): SPARE synthesis report: "Balancing river protection needs, ecosystem functions and human uses". – European Regional Development Fund (ERDF), Interreg Alpine Space, 31 S., Universität für Bodenkultur Wien, Wien.

NACHTNEBEL, H.P. & APPERL, B. (2015): Beurteilung des Hochwasser-Schadenspotenzials unter dynamischen Bedingungen. – Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, **67**/3–4, 120–130. http://dx.doi.org/10.1007/s00506-015-0220-4

NEUWIRTH, J. & WAGNER, K. (2010): Agricultural land management and flood risks – Interrelations. – Journal of US-China Public Administration, **7**/4, 24–29.

NORDBECK, R. (2014): Klimawandel und vorsorgender Hochwasserschutz in Österreich: eine entwicklungsdynamische Analyse der Anpassungskapazitäten (2002–2012). – InFER Diskussionspapier/Discussion Paper 2-2014, 35 S., Universität für Bodenkultur Wien, Wien.

NORDBECK, R., SEHER, W., GRÜNEIS, H., HERRNEGGER, M. & JUNG-ER, L. (2023): Conflicting and complementary policy goals as sectoral integration challenge: an analysis of sectoral interplay in flood risk management. – Policy Sciences. https://doi.org/10.1007/ s11077-023-09503-8

ÖROK – ÖSTERREICHISCHE RAUMORDNUNGSKONFERENZ (2018): ÖROK-Empfehlung Nr. 57: "Hochwasserrisikomanagement". Ausgangslage & Rahmen, Empfehlungen, Erläuterungen & Beispiele. – Materialien, Heft 5, 52 S., Wien.

ÖROK – ÖSTERREICHISCHE RAUMORDNUNGSKONFERENZ (2020): Anteil der Baulandreserven am Bauland insgesamt 2020. – ÖROK-Atlas. https://www.oerok-atlas.at/#indicator/70 (abgerufen am 23.10.2022).

ÖROK – ÖSTERREICHISCHE RAUMORDNUNGSKONFERENZ (2021): Österreichisches Raumentwicklungskonzept ÖREK 2030. Raum für Wandel. – ÖROK-Schriftenreihe **210**, 178 S., Wien.

PETRIDOU, E., AFLAKI, I.N. & MILES, L. (2015): Unpacking the Theoretical Boxes of Political Entrepreneurship. – In: AFLAKI, I.N., MILES, L. & PETRIDOU, E. (Hrsg.), Entrepreneurship in the polis. Understanding political entrepreneurship, 1–16, Routledge–London–New York.

PIRCHER, W. (1990): The contribution of hydropower reservoirs to flood control in the Austrian Alps. – Hydrology in Mountainous Regions II: Artificial Reservoirs, Water and Slopes. – IAHS Publication, **194**, 3–10, Wallingford.

PIRKER, O. (2005): Wasserkraftanlagen. – Hydrologischer Atlas Österreichs, Karte 9.1, BMLFUW, Wien.

RAMM, F. (2019): OpenStreetMap Data in Layered GIS Format. – Technischer Bericht, https://download.geofabrik.de/europe/austria.html (abgerufen am 11.11.2020).

RAPOTTNIG, L. (2021): Veränderung der Landbedeckung im Einzugsgebiet der Mittleren Salzach in Salzburg. – Masterarbeit, 57 S., Universität für Bodenkultur, Wien.

RECHNUNGSHOF (RH) (2016): Bericht des Rechnungshofes. Das Donauhochwasser 2013. – Niederösterreich, **2016**/3, 125 S., Wien.

RIWA-T (2016): Technische Richtlinien für die Bundeswasserbauverwaltung. – 57 S., Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

RIWA-T-BWS (2010): Technische Richtlinien für die Bundeswasserstraßenverwaltung. – Fassung 2010, 63 S., Wien.

RUNHAAR, H., MEES, H., WARDEKKER, A., VAN DER SLUIJS, J. & DRIES-SEN, P.P.J. (2012): Adaptation to climate change-related risks in Dutch urban areas: stimuli and barriers. – Regional Environmental Change, **12**, 777–790. http://dx.doi.org/10.1007/s10113-012-0292-7

RUNHAAR, H., WILK, B., PERSSON, Å., UITTENBROEK, C. & WAMSLER, C. (2018): Mainstreaming climate adaptation: taking stock about "what works" from empirical research worldwide. – Regional Environmental Change, **18**/4, 1201–1210. http://dx.doi.org/10.1007/s10113-017-1259-5

SAMUELS, P., KLIJN, F. & DIJKMAN, J. (2006): An analysis of the current practice of policies on river flood risk management in different countries. – Irrigation and Drainage, **55**, 141–150. http://dx.doi. org/10.1002/ird.257

SCHÖBERL, F. (2003): Hochwasserschutz durch Hochwasserrückhalt. – Innsbrucker Bericht, 2003/07, 115–128, Innsbruck.

SCHOLTEN, T., HARTMANN, T. & SPIT, T. (2020): The spatial component of integrative water resources management: differentiating integration of land and water governance. – International Journal of Water Resources Development, **36**/5, 800–817. http://dx.doi. org/10.1080/07900627.2019.1566055

SEHER, W. & LÖSCHNER, L. (2015): Analyse der Fachliteratur und der Raumordnungsgesetzgebung im Hinblick auf Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Restrisikobereichen in der Raumplanung. – In: ÖSTERREICHISCHES INSTITUT FÜR WIRTSCHAFTSFOR-SCHUNG (Hrsg.): Naturgefahren und die Belastung von Landeshaushalten, 61–85, Wien.

SEHER, W. & LÖSCHNER, L. (2018a): Risikoorientierte Raumplanung in Österreich: Merkmale und Umsetzungsoptionen am Beispiel von Hochwasserrisiken. – disP: The Planning Review, **54**/3, 26–35. http://dx.doi.org/10.1080/02513625.2018.1525202

SEHER, W. & LÖSCHNER, L. (2018b): Instrumente der Raumplanung für die Flächenvorsorge gegenüber Hochwassergefahren. – In: KANONIER, A. & RUDOLF-MIKLAU, F. (Hrsg.): Regionale Risiko Governance: Recht, Politik und Praxis, 445–459, Wien (Verlag Österreich).

SEHER, W. & NEUHOLD, C. (2022): Koordination von Raumplanung und Wasserbau als wesentlicher Bestandteil des Hochwasserrisikomanagements. – Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, **74**/3–4, 144–153. http://dx.doi.org/10.1007/s00506-022-00847-8

SEIFERT, P. (2012): Mit Sicherheit wächst der Schaden? Überlegungen zum Umgang mit Hochwasser in der räumlichen Planung. – 40 S., Regionaler Planungsverband Oberes Elbtal/Osterzgebirge, Radebeul.

STECHER, G. & HERRNEGGER, M. (2022): Impact of hydropower reservoirs on floods: evidence from large river basins in Austria. – Hydrological Sciences Journal, **67**, 2082–2099. https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2130332

STEINBRUNNER, B., WENK, M. & FUCHS, S. (2022): Überlegungen zu einer risikoangepassten Betrachtungsweise in der Raumplanung. – Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, **74**/3–4, 154–165. http://dx.doi.org/10.1007/s00506-022-00844-x

STERLE, Y. (2021): Changes in land cover and land use in the upper Salzach catchment (Salzburg/Tyrol) between 1830 and 2016. – Masterarbeit, 98 S., Universität für Bodenkultur, Wien.

TASSER, E., WALDE, J., TAPPEINER, U., TEUTSCH, A. & NOGGLER, W. (2007): Land-use changes and natural reforestation in Eastern Central Alps. – Agriculture, Ecosystems and Environment, **118**/1–4, 115–129. http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.004

THALER, T. (2015): Rescaling in flood risk governance – new spatial and institutional arrangements and structures. – PhD thesis, Middlesex University London, 284 S., London.

THIEKEN, A.H., CAMMERER, H., DOBLER, C., LAMMEL, J. & SCHÖBERL, F. (2016): Estimating changes in flood risk and benefits of nonstructural adaption strategies – a case study from Tyrol, Austria. – Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, **21**, 343– 376. https://doi.org/10.1007/s11027-014-9602-3

TRL-WLV (2015): Technische Richtlinie für die Wildbach- und Lawinenverbauung. – 48 S., Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

TOSUN, J. & LANG, A. (2017): Policy integration: mapping the different concepts. – Policy Studies, **38**/6, 553–570. http://dx.doi.org/1 0.1080/01442872.2017.1339239

UMWELTBUNDESAMT (2022): Flächeninanspruchnahme. https:// www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/boden/flaecheninanspruchnahme (abgerufen am 25.08.2022). VANDECASTEELE, I., MARÍ I RIVERO, I., BARANZELLI, C., BECKER, W., DERONI, I., LAVALLE, C. & BATELAAN, O. (2018): The Water Retention Index: Using land use planning to manage water resources in Europe. – Sustainable Development, **26**, 122–131. https://doi. org/10.1002/sd.1723

VAN HERK, S., RIJKE, J., ZEVENBERGEN, C. & ASHLEY, R. (2015): Understanding the transition to integrated flood risk management in the Netherlands. – Environmental Innovation and Societal Transitions, **15**, 84–100. https://doi.org/10.1016/j.eist.2013.11.001

VIGLIONE, A., MERZ, B., VIET DUNG, N., PARAJKA, J., NESTER, T. & BLÖSCHL, G. (2016): Attribution of regional flood changes based on scaling fingerprints. – Water Resources Research, **52**, 5322–5340. https://doi.org/10.1002/2016WR019036

WAGNER, B., HAUER, C., SCHODER, A. & HABERSACK, H. (2015): A review of hydropower in Austria: Past, present and future development. – Renewable and Sustainable Energy Reviews, **50**, 304–314. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.169

WAGNER, K., JANETSCHEK, H. & NEUWIRTH, J. (2009): Die Wechselwirkungen zwischen Landwirtschaft und Hochwasserrisiko. Ergebnisse des Projektes AWI/162/07, Teilprojekt der Forschungskooperation Flood Risk II des Lebensministeriums. – 59 S., Bundesanstalt für Agrarwirtschaft, Wien.

WESEMANN, J. (2021): Hydrologische Modellierung des natürlichen Abflussverhaltens und dessen Veränderung durch anthropogene Einflüsse. – Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft (HyWa), 175 S., Wien.

WESEMANN, J., HERRNEGGER, M. & SCHULZ, K. (2017): Beeinflussung von Quelleinzugsgebieten durch Forststraßen und Waldwirtschaft mit besonderem Schwerpunkt auf Karstgebiete – eine Literaturstudie für die Praxis. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, **61**, 6–26. https://doi.org/10.5675/HyWa\_2017.1\_1

WESEMANN, J., HOLZMANN, H., SCHULZ, K. & HERRNEGGER, M. (2018): Behandlung künstlicher Speicher und Überleitungen in der alpinen Niederschlags-Abfluss-Vorhersage. – Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, **70**, 485–496. https://doi.org/10.1007/s00506-018-0501-9

WIDMANN, R. (1988): Einfluss von alpinen Speichern auf den Abfluss von Hochwässern. Die Talsperren Österreichs. – 16. Talsperrenkongress in San Francisco, Q.63, R.85, 137–144.

WOLTER-KRAUTBLATTER, R., RIMBÖCK, A., HAFNER, T., WAGNER, C. & OBERSACKER, C. (2016): Chancen und Herausforderungen im Berich des Hochwasser-Restrisikos und der Risikokommunikation: Ideen aus Bayern. – In: KOBOLTSCHNIG, G. & MIKOŠ, M. (Hrsg.): 13<sup>th</sup> Congress INTERPRAEVENT 2016, Conference proceedings: 30 May to 2 June 2016, Lucerne, Switzerland, 176–185, International Research Society INTERPRAEVENT, Klagenfurt.

WWF (2009): Mythos Wasserkraft. Glorifizierung und Wirklichkeit. – 32 S., Wien.

ZEITFOGEL, H., FEIGL, M. & SCHULZ, K. (2021): Variability across scales – exploring methods for predicting soil properties from multiple sources. – 9 S., EGU, Vienna.

ZISCHG, A., COSTA, R., FLURY, C. & SCHILD, A. (2012): Einfluss der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung auf alpine Naturgefahren – Eine zusammenfassende Betrachtung. – 12<sup>th</sup> Congress INTRA-PRAEVENT 2012, Conference Proceedings, 833–844, Grenoble, Frankreich.

#### 10.2 Gesetze

BGLD. RPG. 2019: Burgenländisches Raumplanungsgesetz 2019. – StF: LGBI. Nr. 49/2019. Geltende Fassung vom 03.02.2021.

EU-HWRL 2007: Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken.

FORSTG 1975: Forstgesetz. – StF: BGBI. Nr. 440/1975. Geltende Fassung vom 02.02.2021.

FORSTG-GZPV: 132. Verordnung der Bundesministerin für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus über die Gefahrenzonenpläne nach dem Forstgesetz 1975 (ForstG-Gefahrenzonenplanverordnung).

LWG 1992: Bundesgesetz, mit dem Maßnahmen zur Sicherung der Ernährung sowie zur Erhaltung einer flächendeckenden, leistungsfähigen, bäuerlichen Landwirtschaft getroffen werden. Geltende Fassung vom 02.02.2021.

NÖ ROG 2014: NÖ Raumordnungsgesetz 2014. – LGBI. Nr. 3/2015 idF LGBI. Nr. 97/2020.

Oö. BauTG 2013: Landesgesetz über die bautechnischen Anforderungen an Bauwerke und Bauprodukte (Oö. Bautechnikgesetz 2013). – LGBI. Nr. 35/2013 idF LGBI. Nr. 56/2021.

Oö. ROG 1994: Landesgesetz vom 6. Oktober 1993 über die Raumordnung im Land Oberösterreich (Oö. Raumordnungsgesetz 1994). – LGBI. Nr. 114/1993 idF LGBI. Nr. 125/2020.

STROG 2010: Steiermärkisches Raumordnungsgesetz 2010. – StF: LGBI. Nr. 49/2010. Geltende Fassung vom 03.02.2021.

TROG 2016: Tiroler Raumordnungsgesetz 2016. – StF: LGBI. Nr. 101/2016. Geltende Fassung vom 03.02.2021.

WBFG 1985: Bundesgesetz über die Förderung des Wasserbaues aus Bundesmitteln (Wasserbautenförderungsgesetz 1985 – WBFG). – StF: BGBI. Nr. 148/1985 (WV). Geltende Fassung vom 02.02.2021.

WRG 1959: Wasserrechtsgesetz 1959. – StF: BGBI. Nr. 215/1959 (WV). Geltende Fassung vom 02.02.2021.

#### 10.3 Interviews

Schutzwasserwirtschaft	11, 12, 16, 17, 18, 19, 112, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 127, 128, 131, 132, 133, 134, 137, 140, 142, 145
Wasserkraft	13, 14, 15, 110, 146, 147, 148, 149
Landwirtschaft	111, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 154, 155, 156
Raumplanung	126, 129, 130, 135, 136, 138, 139, 141, 143, 144, 150, 151, 152, 153

## Buchbesprechung

FEICHTINGER, J. (Hrsg.), MAZOHL, B. (Hrsg.), AIGNER, P., ANDORFER, P., BAUMGART, M., CORRADINI, D., FEICHTINGER, J., GEIGER, K., KARNER, H., KLEMUN, M., KÜHTREIBER, T., KLOS, S., MATTES, J., MAZOHL, B., REITER, W., SCHLÖGL, M., SIENELL, S., TELESKO, W., UHL, H. & WALLNIG, T. (2022): Die Österreichische Akademie der Wissenschaften 1847– 2022: Eine neue Akademiegeschichte. – Denkschriften der Gesamtakademie, 88, 3 Bände, 1845 S., ill., Wien (Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften).

#### **ISBN 978-3-7001-9051-6 (Print), 978-3-7001-9052-3 (E-Book).** Printausgabe (gebunden): 99,00 € https://doi.org/10.1553/978OEAW90516

Die beiden Herausgeber, Johannes Feichtinger und Brigitte Mazohl, haben mit der Arbeitsgruppe Geschichte der Österreichischen Akademie der Wissenschaften 1847– 2022 bereits im Jahr 2014 begonnen, das Thema umfassend mit einem hochkarätigen Team von Autorinnen und Autoren umzusetzen.

Das dreibändige Werk, das auf den Titelseiten jeweils Ansichten des Eingangs zur ÖAW am Dr.-Ignaz-Seipel-Platz in Wien (Innere Stadt) zeigt, ist in elf Abschnitte gegliedert.

Wer die Geschichte der Akademie im Zeitraffer lesen will, beginnt in Band 3. Auf den Seiten 402 bis 455 sind die reich bebilderten Meilensteine ausgehend von einer ersten Petition von 12 Proponenten vom 18. März 1837 eine Akademie zu gründen, über die eigentliche Gründung am 14. Mai 1847 (veröffentlicht in der "Wiener Zeitung" vom 17.05.1847) bis zum 14. Mai 2022, dem Festtag der 175-Jahrfeier samt Eröffnung des ÖAW Campus.

Exemplarisch seien hier große Kapitel wie "Expeditionen und Forschungsreisen (1847–1918) – Die kaiserliche Akademie als Förderer und Veranstalter" oder "Die kaiserliche Akademie der Wissenschaften als Geburtshelfer der modernen Physik in Österreich und Europa" genannt, die einmal mehr die bedeutende Rolle d-er ÖAW im Bereich der Wissenschaften zeigen. Pars pro toto sei auf das am 28. Oktober 1910 eröffnete Radiuminstitut, dem ersten Institut der ÖAW, hingewiesen.

Abschnitt 4 in Band 1, Krise, behandelt "Die kaiserliche Akademie im Ersten Weltkrieg (1914–1918)" und unter dem Titel "Umbrüche und Kontinuitäten" die Akademie in der Zwischenkriegszeit. Es waren hier vor allem der Geldmangel, der Ende 1920 eine massive Bedrohung für den Verlag der ÖAW darstellte, da die Druckkosten nicht mehr getragen werden konnten. Nach einem öffentlichen Hilfeschrei konnte sich die Akademie bis Ende Mai 1921 über Spenden in Höhe von über einer Million Kronen erfreuen.

Band 2 hat die schweren Zeiten der ÖAW zum Thema, die NS-Zeit, die nachfolgende Zeit der Selbstfindung und schließlich die Gegenwart. Kurz ein Exkurs in die NS-Zeit: In der zweiten Märzhälfte 1938 wurde an der Akademie eine neue Satzung ausgearbeitet, um dem Regime dienlich zu sein. Die kleinste Änderung war die Umbenennung der wirklichen Mitglieder in ordentliche Mitglieder, massive Auswirkungen hatte indes der Ausschluss von 21 Mitgliedern zwischen 1938 und 1941, die den rassistischen Kriterien des Reichsbürgergesetzes nicht gerecht wurden. Insbesondere am Institut für Radiumforschung und an der Biologischen Versuchsanstalt im Prater wurden zahlreiche Personen mit jüdischen Wurzeln ihrer Positionen enthoben, ausgeschlossen und verfolgt.

Im Zuge der Neuorientierung erfolgte in den Jahren 1945 bis 1965 der Beitritt zu den westeuropäischen Akademieverbünden, verknüpft mit dem Lossagen von den Akademien der kommunistischen Staaten Ost- und Ostmitteleuropas. Auch mit Deutschland, Ost- wie Westdeutschland, wurden die alten Verbindungen wiederhergestellt. Auch der Name der Akademie wurde geändert, neu war das Wort "Österreich", man nannte sich fortan: "Österreichische Akademie der Wissenschaften in Wien". Dieses Signal – verankert im Bundesgesetz vom 9. Mai 1947 – war ein wichtiger Schritt auf dem Weg der Selbstfindungen und Lossagung von den düsteren Jahren der NS-Zeit (Band 2: 277f.).

In der Zeit des Kalten Krieges wurde insbesondere der Austausch von Wissenschaftlern forciert. In Zahlen ausgedrückt, zeigt sich folgendes Bild: Insgesamt 6.635 Austauschbesuche fanden zwischen 1967 und 1991 statt.

Prägend sollten die 1970er Jahre werden (Band 2: 445): "In der Ära Firnberg (Bundesministerin für Wissenschaft und Forschung 1970–1983) stellte sich die Autonomiefrage neu. Die Akademie hatte sich ab 1965 zu einem Wissenschaftsbetrieb mit Instituten von hohem Finanzaufwand gewandelt." Das Resultat kann sich sehen lassen: "In den letzten 50 Jahren entwickelte sich die ÖAW zum größten Träger außeruniversitärer Grundlagenforschung in Österreich mit gegenwärtig 25 Instituten." (Band 2: 450).

Band 3 widmet sich unter anderem der Umweltforschung an der ÖAW sowie der Frauengeschichte. Zudem wird die Historie der Standorte, allen voran das alte Universitätsviertel mit dem Akademiegebäude (samt Nutzungsgeschichte), umfassend dargestellt. Interessant und sicher nicht allen bekannt sind die ersten Jahre der Akademie. Nach deren Gründung 1847 wurden ihr im Gebäude der heutigen Technischen Universität (TU) am Karlsplatz Räume zugewiesen, denn das heutige Hauptgebäude der ÖAW wurde von 1848 bis 1856 vom Militär als Kaserne für 1.000 Mann genutzt, erst am 3. Jänner 1857 wurde es der Akademie übergeben. Die Aula war ursprünglich als Wagenremise genutzt worden.

Den Schluss von Band 3 bilden ausführliche Darstellungen, die aus der Webapplikation ÖAW M|I|N|E (Members|Institutions|Networks|Events), die von der Arbeitsgruppe Geschichte der Österreichischen Akademie der Wissenschaften 1847–2022 realisiert wurde, abgeleitet werden. So werden nicht nur die Entwicklung der Mitgliederzahlen, das Geschlechterverhältnis, die Altersstruktur, sondern auch Akademiepreise und ihre Vergabezeiträume über den Zeitraum der 175 Jahre dargestellt und erläutert.

Fazit: Das dreibändige Werk übertrifft alle Erwartungen, die man an eine Festschrift stellt, die man zu einem 175-Jahrjubiläum gar nicht zwingend erwarten würde. Die Gratulation und der Dank dafür ergeht stellvertretend für alle Autorinnen und Autoren an die Herausgeber, Johannes Feichtinger und Brigitte Mazohl.

THOMAS HOFMANN

#### Inhalt Contents

Vorwort	5	Preface	5
ELSTER, D, HELFRICHT, K. & SEHER, W.: Vernetzungs-Workshop zum Thema "Transdisziplinäre Zugänge und Methoden in den Projekten" im Themencluster Disaster Risk Manage- mont	7	ELSTER, D, HELFRICHT, K. & SEHER, W.: Networking workshop on "Transdisciplinary approaches and methods in the projects" in the Disaster Risk Management thematic cluster	7
ELSTER, D, HOCHLEITHNER, S, TUREWICZ, V., OTTOWITZ, D., JA- RITZ, W., SCHATTAUER, I., KRALIK, M., HIEBL, J., HÖFLER, A., HOLZSCHUSTER, R., BISPING, C., WÖHRER-ALGE, M., ALMER, M., HOYER, S. & HOBIGER, G.: Verständnis extremer klimatolo- gischer Auswirkungen in besiedelten alpinen Gebieten durch 4D-Modellierung hydrogeologischer Prozesse (EXTRIG)	13	ELSTER, D, HOCHLEITHNER, S, TUREWICZ, V., OTTOWITZ, D., JARITZ, W., SCHATTAUER, I., KRALIK, M., HIEBL, J., HÖFLER, A., HOLZ- SCHUSTER, R., BISPING, C., WÖHRER-ALGE, M., ALMER, M., HOYER, S. & HOBIGER, G.: Understanding of Extreme Climato- logical Impacts in Populated Alpine Areas from 4D Modelling of Hydrogeological Processes (EXTRIG)	13
HELFRICHT, K., HILLER, C., HOHENSINNER, S., HAAS, F., SCHWAI- ZER, G., ACHLEITNER, S. & FISCHER, A.: Veränderte Schutt- bedeckung auf ostalpinen Gletschern: Quantifizierung und hydrologische Auswirkungen (Hidden.ice)	83	HELFRICHT, K., HILLER, C., HOHENSINNER, S., HAAS, F., SCHWAIZ- ER, G., ACHLEITNER, S. & FISCHER, A.: Changing debris cover on Eastern Alpine glaciers: Quantification and hydrological impacts (Hidden.ice)	83
GRÜNEIS, H., NIEDERMAYR, J., SCHROLL, K., WAGNER, K., HOHEN- SINNER, S., HERRNEGGER, M., STECHER, G., LEBIEDZINSKI, K., SEHER, W., JUNGER, L., LÖSCHNER, L. & NORDBECK, R.: Inte- griertes Hochwasserrisikomanagement in Berggebieten: sektorale Interdependenzen, Konflikte und Möglichkeiten der Politikkoordination (PoCo-FLOOD).	133	GRÜNEIS, H., NIEDERMAYR, J., SCHROLL, K., WAGNER, K., HOHEN- SINNER, S., HERRNEGGER, M., STECHER, G., LEBIEDZINSKI, K., SEHER, W., JUNGER, L., LÖSCHNER, L. & NORDBECK, R.: Inte- grated Flood Risk Management in Mountain Areas: Assess- ing Sectoral Interdependencies, Conflicts and Options for Policy Coordination (PoCo-FLOOD)	133
Buchbesprechung	192	Book Review	192



💳 Bundesministerium Bildung, Wissenschaft und Forschung

www.geosphere.at