

**Berücksichtigung von Systemzuständen und Unschärfen bei der Bemessung von Hochwasserereignissen in kleinen alpinen Einzugsgebieten**

**Konzeptionelle Überlegungen zum Aufbau eines Expertensystems**

*Clemens Geitner, Axel Gerik, Johannes Lammel, Andrew Moran,*

*Carmen Oberparleiter*

*AlpS – Zentrum für Naturgefahren Management - GmbH*

*Grabenweg , A-6020 Innsbruck*

*E-Mail: geitner@alps-gmbh.com*

**1 Einleitung: Ausgangslage und Ziel des Projektes**

Die hydrologische Forschung im Alpenraum hat eine lange Tradition (HEGG 2003). In zahlreichen Untersuchungen wurden dabei in Abhängigkeit von der Fragestellung unterschiedliche Skalenbereiche bearbeitet. Ausgehend von diesen Ergebnissen konnten für die Praxis dem jeweiligen Maßstab angepasste Verfahren für die Hochwasserabschätzungen erarbeitet werden (z.B. KHR 2001, BWG 2003). Dass dennoch weiterhin Untersuchungen zur Abflussbildung insbesondere in kleinen alpinen Einzugsgebieten sinnvoll und notwendig erscheinen, hat vor allem folgende Gründe:

- Die Abflussbildung ist insgesamt ein so komplexer Vorgang, dass einige Zusammenhänge noch immer als nicht hinreichend geklärt betrachtet werden müssen. Damit sind der Übertragbarkeit sowohl auf andere Gebiete als auch in andere Maßstabbereiche noch immer deutliche Grenzen gesetzt.
- Auch von kleinen alpinen Einzugsgebieten können lokal erhebliche Gefährdungen durch Hochwasserereignisse und Murgänge ausgehen. Somit erweist sich eine Abschätzung ihrer Spitzenabflüsse als notwendig. Von den wenigsten dieser Gebiete liegen allerdings hinreichend lange Abflussmessreihen für die Berechnung von Bemessungsereignissen vor, so dass auf andere Verfahren zurückgegriffen werden muss.
- In kleinen Einzugsgebieten spielen die spezifischen Gebietseigenschaften eine dominante Rolle. Ihre räumliche Differenzierung muss daher im Hinblick auf die Abflussbildung so weit als möglich beachtet werden.
- Auch die zeitlich variablen Zustände von Boden und Vegetation, gesteuert durch den Jahres- und Witterungsgang sowie die anthropogene Nutzung, müssen in Bezug auf ihre Abflusswirksamkeit verstärkt mit berücksichtigt werden.
- Nur das Verständnis dieses komplexen Zusammenwirkens von Gebietseigenschaften und Systemzuständen bei der Abflusentstehung ermöglicht eine angemessene Abschätzung, wie sich die Abflussverhältnisse unter sich wandelnden Rahmenbedingungen - seien sie klimatischer oder nutzungsspezifischer Art - in Zukunft verändern können.
- Die abflussrelevanten Gebietseigenschaften unterlagen in jüngster Vergangenheit in vielen alpinen Einzugsgebieten einer nicht unbedeutenden Dynamik. Dabei ist insbesondere an die sukzessiven Veränderungen der Landnutzung von der traditionellen Agrar- zur überwiegenden Freizeitlandschaft zu denken. Auch gezielte Eingriffe in Form von Verbauungsmaßnahmen der letzten Jahrzehnte sind in dieser

Hinsicht zu berücksichtigen. Diese Veränderungen schränken den Aussagewert hydrologischen Datenreihen ein, da die Daten keine homogene Gesamtheit darstellen, sondern oftmals gerade eine Phase grundlegender Veränderungen im Einzugsgebiet repräsentieren.

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel des Projektes, ein Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserereignissen zu entwickeln, das insbesondere die Systemzustände und die in der Natur gegebenen Unschärfen verstärkt berücksichtigt. Zu diesem Zweck soll ein Expertensystem ausgearbeitet werden, das aus einer differenzierten Verknüpfung von Gebietseigenschaften und Systemzuständen eines Einzugsgebietes mit einem bestimmten Niederschlagsereignis die Abflusssentstehung zeitlich und räumlich differenziert ableitet. Auf dieser Grundlage sollte das Verfahren sowohl räumlich übertragbar als auch unter Berücksichtigung sich ändernder Rahmenbedingungen anwendbar sein. Denn insbesondere in dieser Hinsicht bestehen noch immer erhebliche Defizite (BLÖSCHL & MERZ 2002).

An ausgewählten Testgebieten mit guter hydrologischer und meteorologischer Datenlage und unterschiedlicher Gebietsausstattung wird das Expertensystem überprüft, gegebenenfalls modifiziert und erweitert. Aufgrund der Komplexität des Themas wurden allerdings gewisse Einschränkungen bei der Gebietsauswahl getroffen: Die Testeinzugsgebiete sollten weder vergletschert noch von Karst geprägt sein. Zudem sollten sie möglichst klein sein, d.h. ihre Fläche sollte weniger als 20 km<sup>2</sup> betragen.

## **2 Arbeitsschritte und Methoden**

Aus dem Gesamtkonzept des Expertensystems ergeben sich insgesamt sechs klar abgrenzbare Arbeitsbereiche (Tab. 1), die im Folgenden kurz skizziert und in ausgewählten Aspekten diskutiert werden. Die ersten drei Arbeitsschritte dienen der zeitlichen und räumlichen Differenzierung des jeweiligen Untersuchungsgebietes. Die durch sie ermittelte Datenbasis geht als gebietsspezifische Information in das Expertensystem ein.

Der Arbeitsschritt vier beinhaltet die Regelbasis des Expertensystems. Die Schritte fünf und sechs ermöglichen die Ableitung von Gebietsabflüssen und somit die Bearbeitung von Szenarien möglicher Spitzenabflüsse.

*Tab. 1: Die Arbeitsfelder des Projektes im Überblick*

1. Bearbeitung der abflussrelevanten meteorologischen Daten
2. Erfassung der Gebietseigenschaften
3. Ableitung der Systemzustände
4. Regelwerk für die Ableitung des Abflusses homogener Teilflächen
5. Anbindung der Flächenabflüsse an ein hydrologisches Modell
6. Aussagen zu Rahmenbedingungen und Möglichkeiten von Spitzenabflüssen

## 2.1 Meteorologische Daten

**Ziel:**

Aussagen zur räumlichen und zeitlichen Variabilität abflussrelevanter meteorologischer Parameter

**Ergebnis:**

Methodische Ansätze für die Korrektur, Aufbereitung und Verwendung von Punktdaten (Messstationen) und Flächendaten (Radar) sowie die Bereitstellung von Eingabedaten für die Untersuchung von Abflussprozessen

Für das Prozessverständnis der Abflussbildung sind meteorologische Daten zu Niederschlag, Temperatur, Schneehöhe usw. von großer Bedeutung. Temperatur und Schneehöhe spielen beispielsweise hinsichtlich Aufbau und Abbau der Schneedecke eine wesentliche Rolle. Für eine differenzierte Betrachtung der Abflussbildungsprozesse ist aber vor allem die räumliche und zeitliche Differenzierung des Niederschlags eine grundlegende Voraussetzung. Sie steht daher im Zentrum der Untersuchung. Denn die Reaktionsweise eines Einzugsgebiets auf ein Niederschlagsereignis kann nur dann verstanden werden und über die Gebieteigenschaften Aufschluss geben, wenn Dauer, Intensität und räumliche Begrenzung des Niederschlages hinreichend bekannt sind.

Niederschlagsereignisse weisen generell eine hohe zeitliche und räumliche Variabilität auf. Diese wird in Gebirgsregionen durch das komplexe Relief zusätzlich verstärkt. Sowohl was die zeitliche, als auch die räumliche Dimension betrifft, unterscheidet sich der Niederschlagscharakter sommerlicher Gewitter stark von den unter Umständen über Tage andauernden Regenfällen aus stationären Fronten. Erstere können sehr lokal auftreten, der Niederschlag ist meist von kurzer Dauer, kann aber hohe Intensitäten erreichen. Stratiforme Niederschläge dagegen treten meist sehr großräumig auf und können lange anhalten.

Um die kleinräumige Variabilität von Niederschlägen zu untersuchen, genügt es nicht, auf das vorhandene meteorologische Messnetz zurückzugreifen. Obwohl im Alpenraum sicherlich eines der weltweit dichtesten Messnetze existiert, ist eine räumlich differenzierte Aussage über die Niederschläge in alpinen Einzugsgebieten in der Regel nicht möglich. Denn der Einfluss des Reliefs ist dermaßen groß, dass die Messergebnisse nur für relativ kleine Gebiete als repräsentativ gelten können. Die Ableitung von Flächenniederschlägen aus diesen Punktdaten kann jedoch unter Einbindung der Information aus Wettarradmessungen wesentlich verbessert werden. Bei dieser Methode wird die Rückstreuung von Niederschlagsteilchen in der Atmosphäre gemessen. GERMAN (2000) verglich in seiner Arbeit Niederschlagsmessungen an Stationen mit Radar-Niederschlagsmessungen. Dabei lagen die Werte der Radarmessungen im Schnitt 50 % unter jenen der Stationen. Allerdings können die Radardaten mit einer horizontalen Auflösung von 1 km<sup>2</sup> wertvolle Informationen über die räumliche Differenzierung der Niederschläge geben und damit herkömmliche Messungen optimal ergänzen.

Als weiterer methodischer Ansatz im Rahmen des Projektes soll die Anströmrichtung von Luftmassen mitberücksichtigt werden. Von ihr hängt es ab, wo es zur Ausbildung von Aufgleit- und Absinkprozessen kommt. In Bereichen des Aufgleitens kann es vermehrt zu „Stauiederschlägen“ kommen. Es soll anhand von Radardaten versucht werden, für verschiedene Anströmrichtungen relevante Aufgleit- bzw. Absinkzonen zu bestimmen. Wenn sich dieses Verfahren bewährt, könnte es auf Gebiete mit fehlenden Niederschlagsmessungen übertragen werden.

## 2.2 Erfassung der Gebietseigenschaften

**Ziel:**

Optimierung der Erfassung abflussrelevanter Gebietseigenschaften

**Ergebnis:**

Vorschläge für die Erfassung abflussrelevanter Gebietseigenschaften

### Dateninhalte und Datenlage

Zahlreiche gebietspezifische Eigenschaften des Natur- und Kulturräumens greifen steuernd in das Abflussgeschehen ein und müssen dementsprechend ausreichend differenziert erfasst und gewichtet werden. Dies betrifft das Ausgangsgestein, das Relief und seine Prozessbereiche, den Boden, die Vegetation sowie die Nutzung und gegebenenfalls die Nutzungsgeschichte. Für die Bereitstellung der entsprechenden Daten werden zunächst bereits vorhandene Kartierungen ausgewertet. Diese sind hinsichtlich Aufnahme- bzw. Ausgabemaßstab, Kartierverfahren und inhaltliche Differenzierung (Kartierlegende) zu überprüfen. In einem weiteren Schritt müssen die spezifischen Kartierinhalte im Hinblick auf ihren hydrologische Relevanz hinterfragt werden. Dabei stellt sich häufig heraus, dass die vorliegenden Daten inhaltlich nur bedingt hydrologisch relevant sind. So bieten beispielsweise auch die Informationen aus geologischen Karten großen Maßstabs nur vage Anhaltspunkte für die Abschätzung dominanter Abflussprozesse. Es fehlt insbesondere meist eine genauere Differenzierung der oft großflächig vorhandenen Lockermaterialdecken. Ihre Mächtigkeit, Korngrößenzusammensetzung und Dichte bestimmen aber unter anderem, welcher Anteil der raschen, oberflächennahen Abflusskomponente zukommt. Zudem steuern sie wesentlich die Ausbildung der Böden, was ihre Entwicklungstiefe und Korngrößenzusammensetzung betrifft. Somit mangelt es in der Regel an einer „Informationsebene“ zwischen der vorhandenen geologischen Kartierung und dem Boden, die entweder gesondert aufgenommen oder im Zuge der Bodenkartierung verstärkt berücksichtigt werden muss. Ähnliche Defizite hinsichtlich der hydrologischen Relevanz ließen sich auch bei anderen vorhandenen Flächendaten aufzeigen. Somit sind selbst in datenmäßig gut dokumentierten Gebieten ergänzende Erhebungen mittels Luftbildauswertung, Kartierung sowie Befragung und Recherche notwendig.

### Der Boden: Bedeutung, Datendefizite und Entwicklungsbedarf

Der Boden wird zu Recht von unterschiedlichen Autoren als „Herzstück“, „Schlüsselstelle“ oder „Schaltstelle“ des Wasserhaushaltes und damit auch für hydrologische Modelle angesehen (LÖHMANNSRÖBEN 2002: 201). Umso problematischer ist, dass für alpine Einzugsgebiete außerhalb der landwirtschaftlich genutzten Flächen in der Regel keine Bodeninformationen vorliegen und die Bodenaufnahme extrem aufwendig ist. Zudem müssen einige methodische Schwierigkeiten und offene Fragen bezüglich der Bodenaufnahme in alpinen Einzugsgebieten sowie im Hinblick auf ihre hydrologische Relevanz diskutiert werden.

Die räumliche Variabilität der Bodenbeschaffenheit ist in alpinen Einzugsgebieten bekanntlich extrem hoch. Da eine entsprechend kleinflächige Erhebung ausgeschlossen ist, sollten neben den Leitprofilen bestimmter Flächeneinheiten zumindest auch die Schwankungsbreiten der relevanten Bodeneigenschaften erfasst und angegeben werden. Zudem stellt sich insbesondere auch beim Boden die Frage, welche Merkmale überhaupt von hydrologischer Relevanz sind. Die übliche morphologisch-genetische Klassifikation der Böden erweist sich für hydrologische Fragestellungen als nur bedingt aussagekräftig (z.B. BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT 2000). Somit sollte in Ergänzung zu einer Kartierung der Bodentypen nach bewährtem Schema eine konsequent hydrologische Klassifizierung der Böden zur Anwendung kommen, die allerdings erst noch entwickelt werden muss. Sie sollte sich vor allem an einer objektiven Kombination hydrologisch relevanter Merkmale wie Gründigkeit, Grundwassereinfluss, Korngrößenzusammensetzung, Struktur, Porengrößenverteilung, Dichte, Humusform usw. orientieren. Ein in dieser Hinsicht differenzierterer Ansatz für die abflussrelevante Bodenaufnahme findet sich bei HORAT & SCHERRER (2001).

Methodischer Entwicklungs- bzw. Anwendungsbedarf besteht ebenso bei den (geostatistischen) Verfahren zur Übertragung der punktuellen Daten der Bodenerhebung auf die Fläche anhand von nachvollziehbaren Standards. Nicht zuletzt sollten auch aus Gründen der Zeitersparnis Verfahren diskutiert werden, Bodenkarten mit definierten Zielgrößen durch geeignete Modellansätzen und mit GIS-Unterstützung abzuleiten. Von einer in dieser Art synthetisch erzeugten Konzeptbodenkarte wäre zu erwarten, dass sie die Kartierung hinsichtlich Anzahl und Auswahl von Bodenprofilen wesentlich unterstützt und somit den Aufwand minimiert.

### **Die Zusammenführung der Informationsebenen zu Systemkomplexen**

Die Aufnahme der Informationsebenen wie Geologie, Boden, Vegetation und Nutzung erfolgt konsequenterweise getrennt und nach unterschiedlichen Standards. In einem weiteren Bearbeitungsschritt erfolgt in der Regel im GIS eine Überlagerung und Verschneidung der verschiedenen Datenlayer. Daraus resultiert mitunter eine so große Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten, dass die weitere Verarbeitung und Interpretation der Daten nur mehr schwer zu bewältigen ist. Zudem entspricht dieses Verfahren nur mit Einschränkungen den realen Bedingungen. Denn der aus den Subsystemen Substrat, Boden, Vegetation und Nutzung „zusammengesetzte“ Systemkomplex stellt nicht nur die Summe der Subsysteme

dar, sondern ist vielmehr durch ein komplexes Ineinanderwirken der Subsysteme gekennzeichnet. Augenfällig wird diese Tatsache besonders, wenn man feststellt, wie stark die Vegetation durch die Nutzung bestimmt ist. Von herausragender Bedeutung für die Abflussentstehung ist aber vor allem der Einfluss der Vegetation auf die hydrologischen Eigenschaften des Bodens. Denn sowohl die Infiltrationskapazität als auch die Speicherleistung des Bodens sind bei sonst gleichen Ausgangsbedingungen maßgeblich durch die Vegetation gesteuert. Zu nennen sind insbesondere die bodenphysikalischen Auswirkungen der Durchwurzelung und der jeweiligen Humusform. Insofern ist es nicht nur methodisch einfacher, für die Beurteilung und Modellierung des Wasserhaushaltes von Boden-Vegetationskomplexen auszugehen; es entspricht auch eher den tatsächlichen wirksamen Zusammenhängen. Dieser Tatsache ist bei der Bearbeitung der Ausgangsdaten Rechnung zu tragen. Ebenso sollten diese Erkenntnisse in die Kartierung maßgeblich einfließen, wie es beispielsweise bei der in Arbeit befindlichen „Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflusses bei konvektiven Starkregen“ von MARKART et al. (2004) der Fall sein wird.

### 2.3 Ableitung der Systemzustände

**Ziel:**

Ableitung möglicher hydrologisch relevanter Systemzustände im Gebiet

**Ergebnis:**

Einfache Verfahren zur Modellierung der Systemzustände

### Bedeutung und zeitliche Dimension von Systemzuständen

Die zuvor genannten Subsysteme und Systemkomplexe des Einzugsgebietes weisen nicht nur weitgehend persistente Eigenschaften auf, die für den Wasserhaushalt entscheidend sind, sondern auch zeitlich variable Eigenschaften, die als Systemzustände bezeichnet werden können. Als wichtigste natürliche Systemzustände in diesem Sinne sind zu nennen: Schneebedeckung, Bodengefrorenis, Bodendurchfeuchtung und phänologischer Zustand der Vegetation. Zudem sind diverse Systemzustände an die Nutzungseingriffe des Menschen gebunden (Beweidung, Mahd usw.). Mit Ausnahme der Bodendurchfeuchtung ist die Abfolge der Systemzustände stark vom jahreszeitlichen Witterungsverlauf gesteuert und verläuft eher sukzessiv. Die Bodenfeuchte hingegen kann sich durch einzelne Niederschlagsereignisse und während dieser sehr rasch verändern.

Für eine exakte Modellierung des Verlaufes von Systemzuständen von Teilflächen in alpinen Einzugsgebieten fehlen in der Regel die notwendigen Eingangsdaten. In einem Expertensystem, das leicht auf andere Gebiete anzuwenden sein soll, müssen somit einfache Verfahren zur Anwendung kommen, um den Verlauf der Systemzustände in den Einzugsgebieten nachzubilden. Dazu werden meist gut verfügbare meteorologische Daten (Temperatur, Niederschlag) mit den Informationen aus dem Geländemodell (Höhe, Exposition) kombiniert.

Anhand vorhandener meteorologischer Datenreihen kann der mittlere jährliche Witterungsverlauf für ein Gebiet ermittelt werden. Er kann zur ersten Typisierung und zu Vergleichszwecken mit anderen Gebieten nützlich sein. Wichtiger allerdings sind die Abweichungen und Extreme, die als Beleg dafür gelten, was in einem Gebiet prinzipiell möglich ist und somit im Expertensystem berücksichtigt werden muss.

### **Abhängigkeit der Systemzustände von den Gebietseigenschaften**

Für die räumlich differenzierte Ermittlung der Systemzustände muss die Abhängigkeit der Systemzustände von den Gebietseigenschaften berücksichtigt werden. Denn zwei unterschiedlich ausgeprägte Böden werden beispielsweise durch den gleichen Witterungsverlauf in unterschiedliche Systemzustände versetzt bzw. werden auch unterschiedlich schnell wieder in den Ausgangszustand zurückkehren. Das gilt gleichermaßen für alle natürlichen Systemzustände, die den Zustand des Bodenspeichers bestimmen.

Drei einfache Beispiele sollen diesen Zusammenhang erläutern:

Schneebedeckung:

Bei gleich großem Schneeniederschlag kann die Schneedecke unter Wald im Frühjahr wesentlich früher abgeschmolzen sein als auf Wiesenflächen.

- **Bodengefrorenis:**  
Bei gleichen Temperaturverhältnissen wird der Bodenfrost in einem wassergesättigten Boden die Infiltration effektiver verhindern als in einem wasserungesättigten Boden.
- **Bodendurchfeuchtung:**  
Bei gleichem Niederschlag wird sich die Wassersättigung des Bodens in Abhängigkeit von den bodenphysikalischen Eigenschaften unterschiedlich verändern und unterschiedliche lang andauern.

Die genauere Kenntnis der Gebietseigenschaften ist also eine weitere unbedingte Voraussetzung für die Ableitung möglicher Systemzustände. Durch sie müssen die zunächst allgemeinen Ergebnisse, die aus den meteorologischen Daten in Kombination mit dem Geländemodell ermittelt worden sind, teilflächenspezifisch modifiziert werden.

### 2.4 Regeln für die Ableitung des Abflusses homogener Teilflächen unter Berücksichtigung von Gebietseigenschaften und Systemzuständen

**Ziel:**

Aufbau einer Regelbasis zur Bestimmung des Abflussgeschehens auf Teilflächen

**Ergebnis:**

Regelbasis zur Bestimmung des Abflussgeschehens auf Teilflächen

### **Die Regelbasis: Bedeutung, Eingangsinformationen und Aussagen**

Die Regelbasis für die Ableitung des Abflusses homogener Teilflächen unter

Berücksichtigung von Gebietseigenschaften und Systemzuständen steht im Zentrum des Expertensystems. Die Regelbasis soll zunächst einfach aufgebaut und so konzipiert sein, dass sie mit zunehmendem Detailwissen ausbaubar ist. Die Regelbasis verknüpft jeweils einen bestimmten Niederschlagstyp mit den Gebietseigenschaften und Systemzuständen einer homogenen Teilfläche. Als Ausgabe erfolgt ein zeitlich differenzierter Wert der raschen Abflüsse, der die Anlaufzeit, die sukzessive Zunahme des Oberflächenabflusses und den sich einstellenden konstanten Abflussbeiwert berücksichtigt.

Die Vielfalt der vorhandenen Flächendaten muss nach nachvollziehbaren Regeln zu komplexen hydrologisch relevanten Eingangsdaten zusammengefasst werden. Beispielsweise werden die zahlreichen Profilverkmale eines Bodens zu komplexen Eigenschaften wie Infiltrationsrate, Speichervermögen und Disposition zu lateralem Fließen zusammengefasst.

### **Datendefizite und ergänzende Messungen**

Die Daten für die Erstellung dieser Regelbasis können nicht im Rahmen des Projektes erhoben werden. Vielmehr gilt es, aus vorhandenen Untersuchungen und Datensätzen die Regeln zu extrahieren. Dabei stellt sich allerdings heraus, dass eine Reihe von Zusammenhängen noch nicht hinlänglich geklärt ist. So liegt zwar beispielsweise eine große Zahl von Beregnungsversuchen vor, aufgrund des Arbeitsaufwandes wurde es allerdings nur in seltenen Fällen unternommen, die gleiche Fläche bei unterschiedlichen Vorbedingungen zu beregnen, so dass der Einfluss von wechselnden Systemzuständen nur in Ausnahmen belegt und quantifiziert werden konnte (MARKART et al. 1996, NAEF et al. 1998).

Aufgrund dieser methodischen Defizite und generell erschwelter Zugänglichkeit der Originaldaten von Beregnungsversuchen erweist es sich als sinnvoll, die Aufnahme von Gebietseigenschaften durch eigene, punktuelle, einfach zu bewerkstellende Messungen zur Infiltration und zur Bodenfeuchte zu ergänzen. Nicht zuletzt werden auf diese Weise die Geländebefunde einer gewissen Überprüfung unterzogen. Zudem hilft die eigen ermittelte Datenbasis, vorhandene Daten aus der Literatur ergänzend in das Expertensystem einzubinden.

## 2.5 Anbindung der Flächenabflüsse an ein hydrologisches Modell

<b>Ziel:</b>
Einbindung der Daten aus dem Expertensystem in unterschiedliche vorhandene hydrologische Modelle
<b>Ergebnis:</b>
Definition von Schnittstellen zu hydrologischen Modellen

Das Ziel des Projektes liegt nicht in der Ausarbeitung eines neuen Niederschlag-Abflussmodells (Überblick bei MERZ & BLÖSCHL 2002). Das Expertensystem soll vielmehr dazu dienen, räumlich und zeitlich differenziertere Daten zum Abflussverhalten von Teilflächen in Einzugsgebieten zur Verfügung zu stellen. Die Anbindung der Daten in bereits

vorhandene oder in Weiterentwicklung begriffene hydrologische Modelle anderer alpS-Projekte ist in Diskussion. Sie bildet eine wesentliche Voraussetzung für die Ermittlung der Abflusswerte im Gerinne und ermöglicht somit erst den Vergleich und die Überprüfung des Expertensystems anhand vorhandener Messwerte in Testeinzugsgebieten.

## 2.6 Aussagen zu Rahmenbedingungen und Möglichkeiten von Spitzenabflüssen

**Ziel:**

Aussagen zu möglichen Dimensionen von Spitzenabflüssen

**Ergebnis:**

Angaben zu Rahmenbedingungen und Möglichkeiten von Spitzenabflüssen unter Berücksichtigung von Gebietseigenschaften und Systemzuständen auch für Einzugsgebiete ohne Abflussmessungen

Da das Expertensystem auf der Kombination aus Gebietseigenschaften, Systemzuständen und gebietsspezifischen Niederschlagstypen beruht, ergeben sich für die Anwendung unterschiedliche Möglichkeiten:

- Die Ableitung von Spitzenabflüssen unter aktuellen Rahmenbedingungen
- Die Ableitung von Spitzenabflüssen unter sich verändernden Rahmenbedingungen
- Die Anwendung des Expertensystems auf Gebiete mit anderen Gebietseigenschaften

Für die vorläufige Ausgestaltung des Expertensystems wird der vollständige Umfang möglicher Gebietseigenschaften alpiner Einzugsgebiete noch nicht berücksichtigt werden können. Die Struktur des Expertensystems wird aber so gestaltet sein, dass eine sukzessive Erweiterung ohne Probleme erfolgen kann.

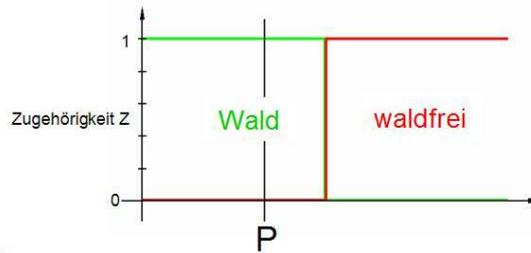
Die Aussagen des Expertensystems zu möglichen Spitzenabflüssen beziehen sich nicht nur auf das worst case Szenario, sondern auf eine größere Gruppe möglicher Spitzenabflüsse mit Angaben zu den jeweiligen Rahmenbedingungen.

### **3 Die Fuzzy Logik und Möglichkeiten ihrer Anwendung im Rahmen des Expertensystems**

Die Fuzzy Logik ermöglicht einen arithmetischen Umgang mit Unschärfen und stellt daher einen Ansatz dar, der nicht auf die boolische Logik (0 oder 1) beschränkt ist, sondern sich auf eine mathematische Mehrwertigkeit stützt. Diese Methode wird als wichtiger Bestandteil in das Expertensystem integriert, um Unschärfen adäquater bearbeiten zu können.

### Herkömmliche Mengenlehre:

Scharfe Schwellenwerte legen Eigenschaftsbereiche fest



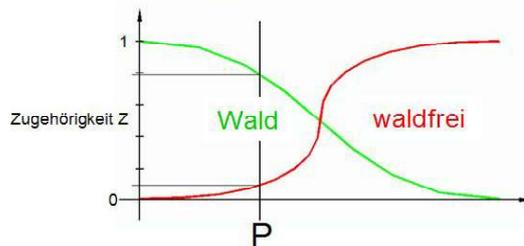
An der Stelle P:

$$Z_{\text{waldfrei}} = 1$$

$$Z_{\text{Wald}} = 0$$

### Fuzzy-Logic

Eigenschaften können mit „fließenden“ Übergängen dargestellt werden



An der Stelle P:

$$Z_{\text{waldfrei}} = 0,09$$

$$Z_{\text{Wald}} = 0,79$$

Abb. 1: Vergleich der Zugehörigkeitsfunktionen zwischen der herkömmlichen Mengenlehre und der Fuzzy Logic

### 3.1 Was ist Fuzzy Logik?

Die Fuzzy (zu deutsch „unscharfe“) Mengenlehre stellt ein Konzept dar, mit dem man Elemente einer graduellen Zugehörigkeit einer oder mehreren Mengen zuweisen kann. Das Prinzip geht ansatzweise auf BLACK (1937) und LUKASIEWICZ (1957) zurück, wurde aber einer umfangreichen mathematischen Definition durch den Mathematiker ZADEH (1965) unterzogen, der somit als Begründer der Fuzzy Logik gilt. Mit dieser Theorie wird der Umgang mit der Unschärfe systematisiert. Die Fuzzy Logik hat seit den neunziger Jahren vermehrt Eingang in Expertensysteme (COX 1998; BRAUNER et al. 2000) und in die Geowissenschaften gefunden. Sie wird dort mit dem Ziel eingesetzt, einen möglichst naturgetreuen Umgang unscharfer Eigenschaften, Messwerte und räumlicher Übergänge, wie sie in der realen Welt vorkommen, zu ermöglichen. Dabei spielen Geographische Informationssysteme (GIS) eine übergeordnete Rolle bei der Bearbeitung und Darstellung von fuzzifizierten, räumlichen Daten. Die Anwendung von Fuzzy Methoden hat v.a. bisher verstärkt für bodenkundliche Untersuchungen stattgefunden; einen Überblick bieten u.a. ZHU et al. (2001), GRUNWALD et al. (2001), MCBRATNEY & ODEH (1997) und De GRUIJTER et al. (1997). Darüber hinaus finden Veröffentlichungen in den Bereichen der Standortsuche, sowie der Botanik und der kartographischen Visualisierung statt. In den Bereich der Hydrologie hat die Fuzzy Logik bisher nur wenig Eingang gefunden (z.B. BRONSTERT 1994)

### 3.2 Mögliche Anwendung im Rahmen des Projektes

Die Untersuchung von Systemzuständen in kleinen hydrologischen Einzugsgebieten erfordert das Verständnis von zahlreichen komplexen Vorgängen und Zusammenhängen. Dabei sind

umfangreiche Daten über das Gebiet notwendig, die allerdings oft nur unvollständig oder mit gewissen Ungenauigkeiten behaftet erhältlich sind. Um mit diesen Daten möglichst effektiv umzugehen zu können, sowie um auf die Anwendung von numerischen oder empirischen Modellen, die oftmals eine Blackbox darstellen oder eine umfangreiche Parametrisierung erfordern, verzichten zu können, findet im Rahmen des Projektes der Einsatz der Fuzzy Logik statt. Aufgrund der zahlreichen Unschärfen, z.B. in den Messwerten, in ihrer räumlichen und zeitlichen Interpolationen sowie im Gesamtverständnis des Systems, wird mit Unschärfen gerechnet. In diesem Zusammenhang ist die Verwendung linguistischer Variablen von großem Vorteil. So werden Ausdrücke wie „kalt“, „feucht“, trocken“ usw. Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktionen zugeordnet. Dadurch wird eine Vorgangsweise verwendet, die dem menschlichen Empfinden und Denkweise ähnlich ist. Diese unscharfen, linguistischen Variablen fließen schließlich in der Regelbasis ein.

#### **4 Die Testeinzugsgebiete**

Für die Auswahl der Testgebiete (Abb. 2) war neben der Größe (<20 km<sup>2</sup>) die gute hydrologische und meteorologische Datenlage bei unterschiedlicher Gebietsausstattung entscheidend. Die Geländearbeiten innerhalb des Projektes konzentrieren sich auf die drei Gebiete, die in Tabelle 2 mit einigen Rahmendaten angeführt sind. Die bereits intensiv untersuchten Einzugsgebiete des Alpthals und der Löhnersbach (z.B. BURCH 1994, KIRNBAUER et al. 2001) sollen als ergänzende Referenzgebiete bei der Ausarbeitung des Expertensystems berücksichtigt werden.

Mit den detaillierten Untersuchungen und Auswertungen der Testgebiete werden generell zwei Ziele verfolgt:

1. Konkrete Erkenntnisse der Zusammenhänge von Gebietseigenschaften und Systemzuständen zu gewinnen und ihrem Einfluss auf das Abflussgeschehen zu definieren.
2. Die Überprüfung des Expertensystems anhand der vorliegenden meteorologischen und hydrologischen Daten vorzunehmen.

Denn über den konkreten Einfluss von gebietsspezifischen Systemzuständen auf die Abflussentstehung ist vergleichsweise wenig bekannt. Daher ist es bisher kaum möglich, eine Abschätzung ihrer hydrologischen Relevanz vorzunehmen. Diese bildet aber eine notwendige Voraussetzung für das Expertensystem. Neben der Auswertung von Daten aus der Literatur soll das Studium der meteorologisch-hydrologischen Zusammenhänge in Testeinzugsgebieten Auskunft über den Einfluss von Systemzuständen geben.

Dafür werden die vorhandenen meteorologischen und hydrologischen Daten ereignisspezifisch ausgewertet. Von besonderem Interesse für das Verständnis von Systemzuständen sind dabei Ereignisse, bei denen vergleichsweise geringe Niederschläge eine starke Abflussreaktion hervorrufen. Von den Ergebnissen dieser Auswertungen im Sinne einer Relevanzanalyse von Einflussfaktoren wird ein wichtiger Input für die Regelbasis des Expertensystems erwartet.

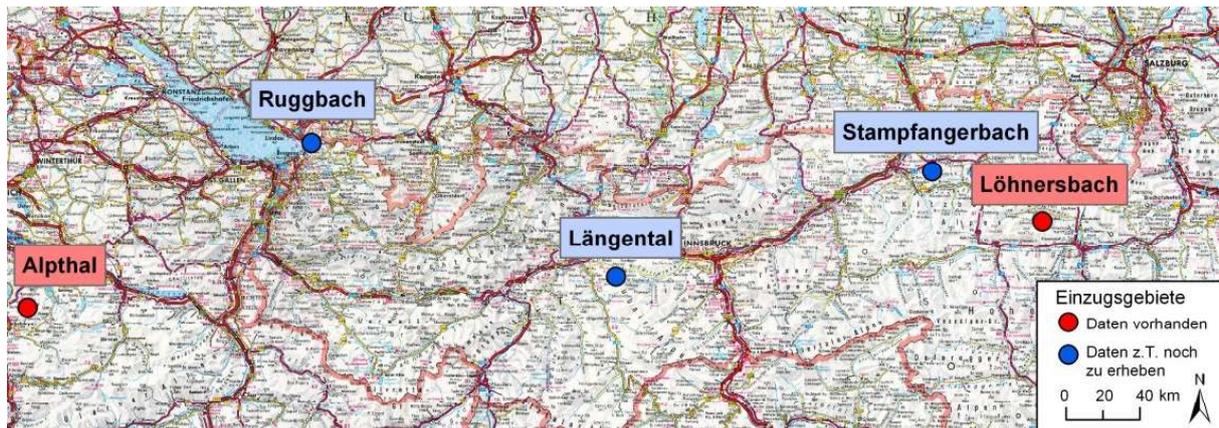


Abb. 2: Lage der ausgewählten alpinen Testeinzugsgebiete

Tab. 2: Zusammenstellung der Gebietseigenschaften der Testeinzugsgebiete, in denen

<b>Einzugsgebiet</b>	<b>Ruggbach</b>	<b>Längentalbach</b>	<b>Stampfangerbach</b>
<b>Fläche in km<sup>2</sup></b>	<b>7,2</b>	<b>9,2</b>	<b>20,9</b>
<b>H in m von-bis</b>	<b>410-1100</b>	<b>1900-2900</b>	<b>700-1600</b>
<b>Geologie</b>	<b>Molasse</b>	<b>kristallin</b>	<b>Grauwacke</b>
<b>Waldanteil</b>	<b>ca. 65%</b>	<b>ca. 5%</b>	<b>ca. 70%</b>
<b>Pegel seit</b>	<b>1968</b>	<b>1981</b>	<b>1986</b>
<b>max. Q in m<sup>3</sup>/s</b>	<b>65,0</b>	<b>4,1</b>	<b>18,5</b>
<b>Spende in m<sup>3</sup>/s·km<sup>2</sup></b>	<b>9,03</b>	<b>0,44</b>	<b>0,89</b>
<b>ØN in mm/Jahr</b>	<b>1700</b>	<b>1100</b>	<b>1400</b>

## 5 Literatur

Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft [Hrsg.] (2000): Geländeanleitung zur Abschätzung des Abfluss- und Abtragsgeschehens in Wildbacheinzugsgebieten. - Materialien des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, 87: 111 S. München.

Black, M. (1937): Vagueness: an exercise in logical analysis. - Philosophie of Science: 427-455.

Blöschl, G. & Merz, R. (2002): Methoden der hydrologischen Regionalisierung im Zusammenhang mit der Niederschlag-Abflussmodellierung. - Wiener Mitteilungen - Wasser, Abwasser, Gewässer: 149-178.

Brauner, M., Ganahl, E. & Hübl, J. (2000): Ein GIS-basiertes Expertensystem zur Risikobewertung von Hanggleitungen in Wildbacheinzugsgebieten. In: J. Strobl, T. Blaschke, H. Griesebner (Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000.

Bronstert, A. (1994): Modellierung der Abflussbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen. - Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Heft 46: 192 S.; Karlsruhe.

Burch, H. (1994): Ein Rückblick auf die hydrologische Forschung der WSL im Alptal. - Landolt, R. [Hrsg.]:

Hydrologie kleiner Einzugsgebiete: Gedenkschrift Hans M. Keller, Bern: Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL), Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL): 18-33.

BWG (Bundesamt für Wasser und Geologie) [Hrsg.] (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten. – Berichte des BWG, Serie Wasser: 118 S.; Bern.

Cox, E. (1998): The fuzzy systems handbook. San Diego.

De Gruijter, J., Walvoort, D. & van Gaans, P. (1997): Continuous soil maps - a fuzzy set approach to bridge the gap between aggregation levels of process and distribution models. - Geoderma: 169-195.

German, U. (2000): Spatial Continuity of Precipitation, Profiles of Radar Reflectivity and Precipitation Measurements in the Alps, PhD thesis, ETH Zürich, 104 S. Zürich.

Germann, U. & Joss, J. (2001): Variograms of Radar Reflectivity to Describe the Spatial Continuity of Alpine Precipitation. - Journal of Applied Meteorology: 1042-1059.

Grunwald, S., McSweeney, K., Rooney, D. & Lowery, R. (2001): Soil layer models created with profile cone penetrometer data. In: Geoderma: 181-201.

Hegg, Ch. (2003): 100 Years of Hydrologic Research at WSL. – In: Stähli, M. & Hegg, Ch. [eds.] (2003): Abstracts of the International Workshop on Mountain Hydrology, April 2-4, Einsiedeln: 5.

Horat, P., Scherrer, S. (2001): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. – 67 S.; Reinach.

Kirnbauer, R., Blöschl, G., Haas, P., Müller, G. & Merz, B. (2001): Space-time patterns of runoff generation in the Löhnersbach catchment. - Runoff Generation and Implications for River Basin Modelling, Freiburger Schriften zur Hydrologie, University of Freiburg i.Br./Germany: 37-45.

KHR (Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes [Hrsg.] (2001): Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. Erfahrungen aus den Rheinanliegerstaaten. – Bericht der KHR, 1-19: 191 S.

Löhmansröben, R. (2002): Die Bedeutung des Bodens im Zusammenhang mit der hydrologischen Regionalisierung. - Wiener Mitteilungen - Wasser, Abwasser, Gewässer: 201-213.

Lukasiewicz, J. (1957): ARISTOTELE'S syllogistic: From the standpoint of modern formal logic. Oxford.

Markart, G., Kohl, B., Zanetti, P. (1996): Beurteilung des Abflussverhaltens von Wildbacheinzugsgebieten anhand boden- und vegetationskundlicher Grundlagen. Ergebnisse der Untersuchungen im Rahmen des Pilotprojektes Schesastudie 1995/1996. – Endbericht, Forstliche Bundesversuchsanstalt, Innsbruck: 85 S.; Innsbruck.

Markart, G. et al. (2004, in Vorbereitung): Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflusses bei konvektiven Starkregen.

McBratney, A. & Odeh, I. (1997): Application of fuzzy sets in soil science: Fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. - Geoderma: 85-113.

Merz, R. & Blöschl, G. (2002): Marktüberblick und Beispiele – Software für die NA Modellierung. - Wiener Mitteilungen - Wasser, Abwasser, Gewässer: 223-242.

Naef, F., Scherrer, S. & Faeh, A. (1998): Die Auswirkungen des Rückhaltevermögens natürlicher Einzugsgebiete bei extremen Niederschlagsereignissen auf die Größe extremer Hochwasser. – Schlussbericht NFP 31: 143 S.; Zürich.

Zadeh, L. (1965): Fuzzy sets. - Information and Control: 338-353.

Zhu, A. (2001): Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. - Soil Science Society of America Journal: 1463-1472.