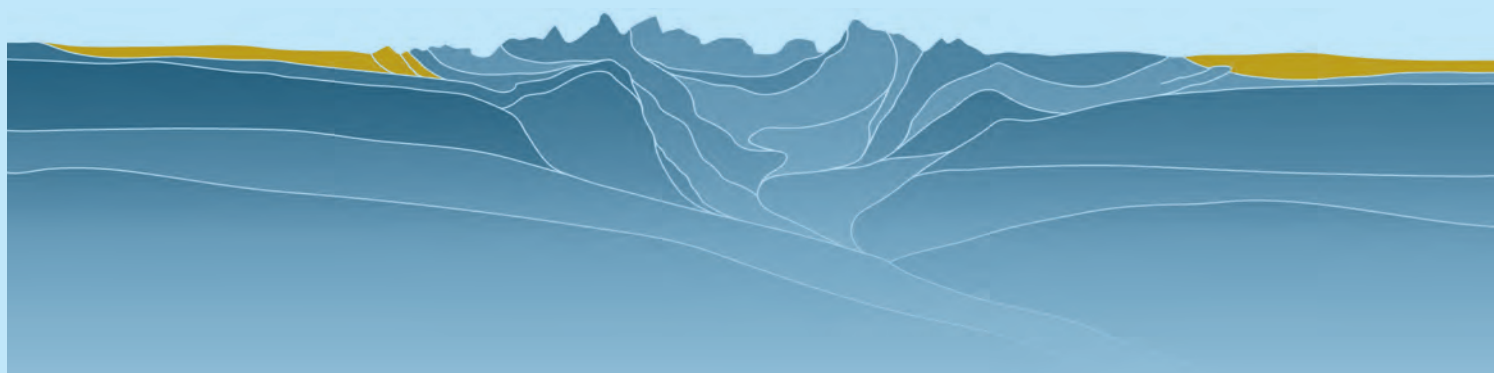
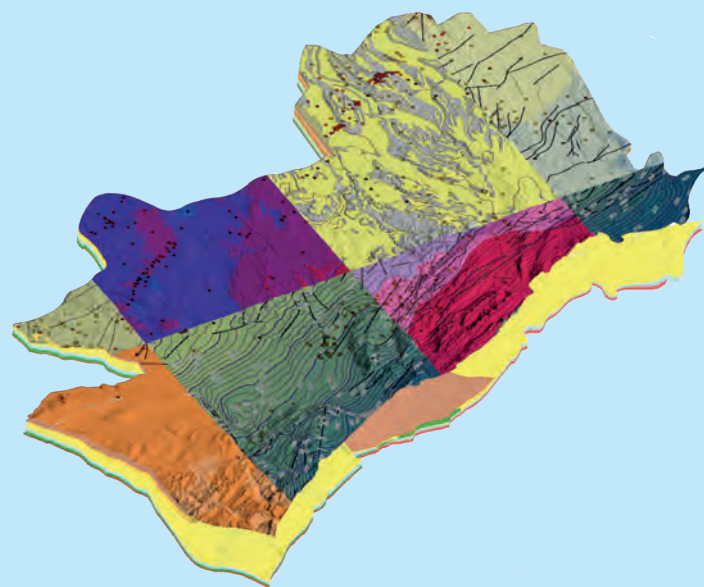


GeoMol – Geopotenziale für die nachhaltige Nutzung des tieferen Untergrundes in den alpinen Vorlandbecken

Abschlussbericht des Pilotgebiets Bodensee-Allgäu



GeoMol LCA-Projektteam

GeoMol – Geopotenziale für die nachhaltige Nutzung des tieferen Untergrundes in den alpinen Vorlandbecken

Abschlussbericht des Pilotgebiets Bodensee-Allgäu

Einen Überblick über die Ergebnisse des Gesamtprojekts vermittelt der folgende Bericht:

GeoMol Team (2015): GeoMol – Assessing subsurface potentials of the Alpine Foreland Basins for sustainable planning and use of natural resources – Project Report, 188 S. (Augsburg, LfU).

Die beiden Berichte werden im Internet unter www.geomol.eu zum Download bereitgestellt. Die Ergebnisse des Projekts können dort zudem über den GeoMol-Kartenviewer erschlossen werden.

2015

Freiburg i. Br.

Herausgegeben vom:

Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (Abteilung 9 im Regierungspräsidium Freiburg)
Baden-Württemberg

Titelbild: Geologisches 3D-Modell des Pilotgebiets Bodensee-Allgäu mit einigen GeoMol-Karten sowie einem schematischen Profilschnitt durch die Alpen und deren Vorlandbecken (nach GeoMol Team 2015).

GeoMol LCA-Projektteam

**GeoMol – Geopotenziale für die
nachhaltige Nutzung des tieferen
Untergrundes in den alpinen
Vorlandbecken**

Abschlussbericht des Pilotgebiets Bodensee–Allgäu

2015

Freiburg i. Br.

Herausgegeben von:

Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (RP Freiburg, Baden-Württemberg)

LGRB-Informationen	30	142 S.	78 Abb.	22 Tab.	0 Kt.	Freiburg i. Br. 2015
--------------------	-----------	--------	---------	---------	-------	----------------------



ISSN 1619-5329

 LGRB – Informationen

Herausgeber: LGRB Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau
(RP Freiburg, Baden-Württemberg)

Autoren: GeoMol LCA-Projektteam:
Isabel Rupf¹ & Gunther Wirsing¹ (Redaktion), Robin Allenbach², Birte Anders³,
Gerold W. Diepolder⁴, Horst Dresmann³, Mirjam Dürst Stucki², Charlotte Fehn¹,
Thomas Fritzer⁴, Peter Huggenberger³, Guido Köberle⁵, Pascal Kuhn², Salomè
Michael², Edgar Nitsch¹, Robert Pamer⁴, Lance Reynolds², Klaus Schwerd⁴,
Stephan Sieblitz⁴, Heiko Zumsprekel¹.

¹LGRB, ²swisstopo, ³AUG, ⁴LfU, ⁵RVBO

Abbildungen: soweit nicht anders angegeben: GeoMol LCA-Projektteam

Satz und Layout: Verena Altmann, Am Kreuzsteinacker 2-8, 79117 Freiburg i. Br.

Druck: Wahl-Druck GmbH, Aalen (www.wahl-druck.de)

Webrepräsentation: <http://www.geomol.eu>

© Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Übersetzung, Nachdruck, Vervielfältigung auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege sowie
Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung
des Herausgebers.

Alle im Text aufgeführten Softwareprodukte sind eingetragene Marken oder eingetragene Warenzeichen
ihrer jeweiligen Eigentümer und sind nicht gesondert gekennzeichnet.

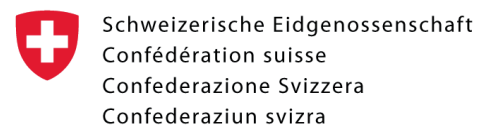
Zitiervorschlag: GeoMol LCA-Projektteam (2015): GeoMol – Geopotenziale für die nachhaltige
Nutzung des tieferen Untergrundes in den alpinen Vorlandbecken.
Abschlussbericht des Pilotgebiets Bodensee - Allgäu. – LGRB-Informationen, 30:
142 S.; Freiburg i. Br.



Projektpartner



Bayerisches Landesamt für
Umwelt







Vorwort

Der tiefere Untergrund der alpinen Vorlandbecken bietet vielfältige Nutzungsmöglichkeiten, die durch eine verstärkt auf Nachhaltigkeit ausgerichtete europäische Energiepolitik zunehmend an Bedeutung gewinnen. Voraussetzung für eine verantwortungsvolle Nutzung des tieferen Untergrundes sind belastbare und flächendeckende geowissenschaftliche Grundlageninformationen. Deren Erhebung und fachliche Bewertung sind Mandat und Kernkompetenz der Staatlichen Geologischen Dienste. Dies ist eine ressourcenintensive Aufgabe, die nicht immer im Rampenlicht der öffentlichen Wahrnehmung steht. Geologische 3D-Modelle sind ein modernes, alternativloses Werkzeug für die geowissenschaftliche Landesaufnahme. Sie leisten maßgebliche Beiträge bei der Analyse, Darstellung und Bewertung komplexer Untergrundverhältnisse.

Weder geologische Strukturen noch Grundwasserströme kennen staatliche Grenzen. Die Zusammenarbeit von Fachleuten über Ländergrenzen hinweg ist daher unabdingbar. Sie sorgt für eine Bündelung regional-geologischer und methodischer Kompetenzen und führt zu abgestimmten Vorstellungen über die geologischen Verhältnisse bis in mehrere tausend Meter Tiefe. Mit „GeoMol – Bewertung von Geopotenzialen für die nachhaltige Planung und Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen in den alpinen Vorlandbecken“ ist ein Alpen umspannendes Netzwerk von Akteuren aus Fachwelt und Anwendung entstanden, das weit über das Projektende hinaus Bestand hat.

Mein Dank gilt der Europäischen Union, die im Rahmen des INTERREG IV B Alpine Space Programms das Projekt über fast drei Jahre gefördert hat, allen Projektpartnern für die stets offene und ergebnisorientierte Zusammenarbeit sowie den externen Experten aus Wissenschaft, Verwaltung und Wirtschaft für ihre Anregungen und Impulse.

Mit der im Projekt GeoMol geschaffenen Wissensbasis erhalten die beteiligten Institutionen ein Werkzeug, das für verschiedenste angewandte Fragestellungen nutzbar ist. Die nun etablierten Modelle werden künftig fortwährend auf dem Prüfstand stehen, denn neue Daten aus Bohrungen, geophysikalischen Erkundungen und Felduntersuchungen führen zu vertieften Erkenntnissen über die Strukturen im Untergrund und die darin ablaufenden Prozesse. Eine kontinuierliche Fortschreibung der Modelle wird daher auch in Zukunft erforderlich sein, um den bisher generierten Mehrwert zu erhalten und auszubauen.

Die Ergebnisse des Projekts erlauben einen neutralen geowissenschaftlichen Blick auf die Nutzungsmöglichkeiten des tieferen Untergrundes. Sie schaffen damit belastbare Planungsgrundlagen und können einen Beitrag zur Versachlichung öffentlicher Diskussionen leisten. Ich wünsche den Produkten daher eine breite Anwendung in der Praxis.

Prof. Dr. Ralph Watzel
Abteilungspräsident Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau





Zusammenfassung

Der tiefere Untergrund der alpinen Vorlandbecken birgt eine Vielzahl von natürlichen Ressourcen und Speichermöglichkeiten. Diese sogenannten Geopotenziale können für eine nachhaltige Bewirtschaftung von Energieträgern aus erneuerbaren Energien nutzbar gemacht werden und damit einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende leisten. Die alpinen Vorlandbecken sind in weiten Bereichen sowohl für eine geothermale Energiegewinnung, als auch für die Speicherung von Druckluft, Erdgas oder CO₂ geeignet. Vielerorts steht die Nutzung dieser Geopotenziale jedoch in direkter Konkurrenz zur Grundwasserversorgung oder zur Öl- und Gasgewinnung. Die Bewertung von Geopotenzialen sowie eventuell konkurrierender Nutzungen erfordert aus diesem Grund einen ganzheitlichen und transnationalen Ansatz.

Im Rahmen des Projekts GeoMol arbeiteten daher 14 Partner aus sechs Alpen-Anrainerstaaten am gemeinsamen Aufbau einer länderübergreifend harmonisierten, digitalen Wissensbasis. Neben einem geologischen Übersichtsmodell für das gesamte nordalpine Molassebecken wurden die Untergrundverhältnisse in fünf Pilotregionen vertieft untersucht. Der hier vorliegende Bericht stellt die Eingangsdaten, Methoden und Ergebnisse der im Dreiländereck Deutschland, Schweiz und Österreich liegenden Pilotregion Bodensee-Allgäu vor. Aufgrund seiner insbesondere im Osten bis in große Tiefen und damit in Bereiche hoher Temperaturen reichenden Aquifere weist diese Region ein hohes Potenzial zur Nutzung der geothermischen Energie für die Wärme- und Stromerzeugung auf. Deshalb wurde in der vorliegenden Studie dieses Pilotgebiet zur Abschätzung des geothermischen Potenzials detaillierter untersucht. Schwerpunkte der Arbeiten umfassten neben der Aufarbeitung

von Eingangsdatensätzen, die Entwicklung eines geologischen 3D-Modells für das gesamte Pilotgebiet sowie eine geostatistische 3D-Temperaturmodellierung für den deutschen und österreichischen Anteil des Pilotgebiets. Standortbezogene Informationen aus den beiden Modellen flossen auch in die Studie zum Potenzial mitteltiefer Erdwärmesonden im baden-württembergischen Teil des Pilotgebiets ein. Zur flächenhaften Abschätzung des Potenzials wurde im Rahmen des Projekts ein Rechenmodul entwickelt. Informationen über das Pilotgebiet Bodensee-Allgäu sind unter www.geomol.eu in Form eines umfangreichen Kartendatensatzes mit den Schwerpunkten geologische Basisthemen und geothermisches Potenzial frei verfügbar.

Das Projekt wurde innerhalb des Programms INTERREG IV B Alpine Space im Themenschwerpunkt „Environment and Risk Prevention“ von September 2012 bis Juni 2015 bearbeitet. Die Abteilung Geologischer Dienst des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) übernahm die Leitung des Gesamtprojekts. Im Pilotgebiet Bodensee-Allgäu arbeiteten neben Vertretern der geologischen Dienste von Baden-Württemberg, Bayern, der Schweiz und Österreich auch der Regionalverband Bodensee-Oberschwaben als Träger der Regionalplanung mit. Die Aktivitäten im Pilotgebiet Bodensee-Allgäu wurden vom Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) gesteuert.

Die Projektergebnisse dienen der Sensibilisierung politischer Entscheidungsträger, der Unterstützung von Projektentwicklern sowie der Information der Öffentlichkeit und geben Anregungen zu den Nutzungsmöglichkeiten der natürlichen Ressourcen des tieferen Untergrundes.



Inhalt

Vorwort.....	5
Zusammenfassung.....	7
1 Das GeoMol-Projekt.....	11
1.1 Veranlassung und Zielsetzung.....	11
1.2 Untersuchungsgebiet.....	13
1.3 Projektorganisation.....	14
2 Das Pilotgebiet Bodensee-Allgäu.....	17
2.1 Arbeitsschwerpunkte im Pilotgebiet Bodensee-Allgäu	17
2.1.1 Nutzerbefragung.....	17
2.1.2 Geologisches 3D-Modell, geostatistische 3D-Temperaturmodellierung und Produktableitung.....	18
2.1.3 Datenbereitstellung	19
2.2 Naturraum und Wirtschaft	19
2.3 Bestehende Studien.....	21
3 Geologische Entwicklung.....	23
3.1 Lage und allgemeiner Bau.....	23
3.2 Alter, Entwicklung und Tektonik	24
3.3 Gesteinsabfolge	27
3.3.1 Quartäre Ablagerungen	27
3.3.2 Tertiäre Beckenfüllung.....	28
3.3.3 Mesozoisches Deckgebirge.....	31
3.3.4 Grundgebirge und Permokarbon.....	37
4 Geologische 3D-Modellierung	39
4.1 Pilotgebietsmodell Bodensee-Allgäu (LCA-Modell).....	39
4.2 Basis-Workflow und Koordinatensysteme (LCA-Modell).....	39
4.2.1 Basis-Workflow	40
4.2.2 Koordinatensysteme	40
4.3 Datengrundlage und Datenaufbereitung für das LCA-Modell	41
4.3.1 Bohrdaten	42
4.3.2 Technische Aufbereitung der Landseismik	43
4.3.3 Technische Aufbereitung der Bodensee-Seismik	44
4.3.4 Aufbereitung von Datensätzen aus der Literatur und von Vorgängerprojekten.....	44
4.4 Erstellung des LCA-Pilotgebietsmodells.....	46
4.4.1 Verbreitungspolygone, Mächtigkeits- und Faziesverteilungen.....	46
4.4.2 Auswertung der Landseismik	49
4.4.3 Auswertung der Bodensee-Seismik	50
4.4.4 Modellierung von Störungen.....	51
4.4.5 Modellierung von Horizonten.....	54
4.4.6 Geschwindigkeitsmodellierung.....	55
4.4.7 Kombination der Teilgebiete zum LCA-Gesamtmodell	58



4.5	Geologisches Übersichtsmodell Baden-Württemberg.....	59
4.5.1	Eingangsdaten.....	59
4.5.2	3D-Methoden und Konzepte für das geologische Übersichtsmodell Baden-Württemberg	59
4.5.3	Vergleich des Übersichtsmodells mit dem LCA-Pilotgebietsmodell (BW).....	61
5	Temperaturmodell	63
5.1	Einführung	63
5.2	Eingangsdaten.....	63
5.2.1	Untergrundtemperaturen.....	63
5.2.2	Oberflächentemperaturen T_{DEM}	69
5.2.3	Wassertemperaturen im Bodensee	70
5.3	Topographieeffekt und Kühlwirkung des Bodensees	71
5.4	Methodik und Workflow des geostatistischen Temperaturmodells	72
5.4.1	Modellaufbau	72
5.4.2	Erstellung und Analyse verschiedener A-Priori-Modelle	73
5.4.3	Erstellung und Analyse verschiedener Residualmodelle.....	78
5.4.4	Finales Temperaturmodell.....	79
5.5	Produktableitungen aus dem geostatistischen Temperaturmodell	83
6	Fallstudie zum Geopotenzial der mitteltiefen bis tiefen Erdwärmesonden-Geothermie im baden-württembergischen Teil des LCA-Pilotgebiets	85
6.1	Einleitung	85
6.1.1	Fragestellung und Zielsetzung der Studie	85
6.1.2	Sondensysteme und Funktionsweise von MTEWS-Anlagen	86
6.1.3	Randbedingungen beim Einsatz mitteltiefer bis tiefer Erdwärmesonden	86
6.2	Methodik.....	87
6.3	Entwicklung standardisierter Nutzungsszenarien.....	88
6.3.1	Identifikation von Betriebsszenarien (Lastprofile).....	88
6.3.2	Festlegung von Ausbauvarianten und Ausbautiefen	89
6.4	Recherche zu den Bohr- und Ausbaurkosten	91
6.4.1	Voruntersuchungen zur thermischen Ergiebigkeit in Abhängigkeit von Ausbauvariante und Ausbautiefe	92
6.4.2	Ableitung thermisch-ökonomisch sinnvoller Ausbautiefen und Ausbauvarianten	93
6.4.3	Ermittlung optimierter Betriebsbedingungen	94
6.4.4	Sensitivitätsanalysen	96
6.4.5	Temperaturspreizung am Sondenkopf.....	96
6.4.6	Bohrlochwiderstände	97
6.5	Entwicklung des Rechenmoduls GEO-HAND ^{pot}	97
6.6	Festlegung geologisch - geothermischer Randbedingungen	98
6.7	Abschätzung des geothermischen Potenzials der MTEWS-Geothermie im baden-württembergischen Teil des LCA-Gebiets und Darstellung als Rasterkarten	99
6.8	Zusammenfassung und Bewertung	103



7	Nutzung des tieferen Untergrundes	106
7.1	Geowissenschaftliche Grundlagen zur Nutzung des tieferen Untergrundes.....	106
7.1.1	Geothermische Nutzung.....	108
7.1.2	Untergroundspeicherung	109
7.1.3	Kohlendioxidverpressung	110
7.1.4	Gewinnung von Kohlenwasserstoffen	110
7.2	Frühere und bestehende Nutzungen	110
7.2.1	Geothermie	110
7.2.2	Mineral- und Heilwasser	111
7.2.3	Erdgasspeicher.....	112
7.2.4	Kohlenwasserstoffe	112
7.3	Geothermisches Potenzial im Pilotgebiet	114
7.3.1	Temperaturen in verschiedenen Tiefen und Abschätzung des geothermischen Nutzungspotenzials auf Grundlage der Temperaturen.....	116
7.3.2	Temperaturen am Top geothermischer Einheiten und Abschätzung des geothermischen Nutzungspotenzials auf Grundlage der Temperaturen.....	119
7.3.3	Tiefenlage verschiedener Isothermen	123
7.4	Potenzial zur Kohlendioxidverpressung	125
8	Nutzerzugänge zu den Ergebnissen.....	127
8.1	GeoMol-Website	127
8.2	MapView	127
8.3	SearchCatalogue	128
8.4	Web Map Services (WMS).....	129
8.5	3D-Explorer.....	130
9	Ausblick.....	131
10	Danksagung	133
	Abkürzungen	134
	Literatur	136



1 Das GeoMol-Projekt

1.1 Veranlassung und Zielsetzung

Im Rahmen der Klimadiskussion nehmen regenerative Energien in den letzten Jahren eine immer bedeutendere Rolle ein. Diese Energieformen stehen im menschlichen Zeithorizont praktisch unerschöpflich zur Verfügung bzw. regenerieren relativ schnell. Neben der Bioenergie, Wasserkraft, Meeresenergie, Sonnenenergie und Windenergie zählt auch die Erdwärme zu den erneuerbaren Energieformen. Demzufolge werden seit längerem vermehrt Anstrengungen unternommen, belastbare und flächendeckende geowissenschaftliche Grundlagen zur Abschätzung des geothermischen Potenzials zu schaffen und die Geothermie zu nutzen. Das geothermische Potenzial bezieht sich im Projektkontext auf die im tieferen Untergrund gespeicherte geothermische Energie, die verschiedenartig genutzt werden kann. Es entspricht damit dem theoretischen Potenzial nach GeoMol Team (2015).

Günstige geologische Voraussetzungen zur Bereitstellung geothermischer Energie sowie zu weiteren Nutzungsmöglichkeiten des tieferen Untergrundes bieten tiefe Sedimentbecken. Dort kommen vielfach geologische Schichten in geeigneter lithologischer Ausprägung sowie ausreichender Mächtigkeit und Tiefenlage vor. Bis mehrere Kilometer tiefe Sedimentbecken können beispielsweise als geologische Gräben im Zusammenhang mit einer tektonischen Dehnung oder einer Blattverschiebung entstehen (z.B. Oberrheingraben) und mit Sedimenten aufgefüllt werden. Weiterhin kann es auch in Folge einer Gebirgsbildung zu ausgedehnten Senkungsstrukturen kommen. Sie sind ebenfalls tektonisch bedingt und entstehen im Vorland des Gebirges durch Einsinken eines kontinentalen Krustenabschnitts vor der Auflast einer heranrückenden orogenen Deckenfront. Sie zeigen im Querprofil eine asymmetrische Form mit der tiefsten Stelle und demzufolge der größten Sedimentakkumulation in unmittelbarer Nachbarschaft des aufgeschobenen Faltengürtels. Derartige Vorlandbecken haben sich auch im Zuge der alpinen Gebirgsbildung entwickelt: das Molassebecken nördlich der Alpen und die Po-Ebene im Süden.

Der Untergrund dieser beiden alpinen Vorlandbecken birgt neben der Erdwärme (Geothermie) weitere natürliche Ressourcen und Speichermöglichkeiten. Diese sogenannten Geopotenziale können für eine nachhaltige Bewirtschaftung von erneuerbaren Energien nutzbar gemacht werden und damit einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende zu leisten.

Die alpinen Vorlandbecken bieten in weiten Bereichen günstige Untergrundvoraussetzungen für eine geothermale Energiegewinnung (wie z.B. regional erhöhte Temperaturgradienten, lokal erhöhte Transmissivitäten von Nutzhorizonten, tief reichende Aquifere). Im süddeutschen Raum erweist sich z.B. die geothermische Nutzung des Grundwassers aus dem Oberjura-Aquifer des Molassebeckens im Großraum München als besonders erfolgversprechend. Dort konnten in den letzten Jahren Standorte sowohl zur Stromerzeugung (Kirchstockach, Dürnhaar, Sauerlach), als auch zur Bereitstellung von Heizwärme (z.B. Fernwärmenetze Pullach, Ismaning, Unterföhring) entwickelt werden. In Baden-Württemberg laufen derzeit bei Pfullendorf Arbeiten, um Thermalwasser aus dem Oberen Muschelkalk zur Gewinnung von Heizwärme zu nutzen. Daneben können die geologischen Voraussetzungen eventuell bereichsweise auch für die Speicherung von Druckluft, Erdgas oder CO₂ gegeben sein.

Die Nutzung dieser Geopotenziale kann jedoch in Konkurrenz zueinander sowie zu einer möglichen Öl- oder Gasgewinnung oder zur Grundwassernutzung stehen. Die umfassende Bewertung von Geopotenzialen erfordert daher letztendlich einen ganzheitlichen und transnationalen Ansatz unter Berücksichtigung möglicher Risiken, sowie eine Abschätzung der Auswirkungen und gegenseitigen Beeinflussung bei ihrer Nutzung.

Das Molassebecken ist Lebensraum für Millionen Menschen. Insbesondere die dicht besiedelten und hochindustrialisierten Ballungszentren wie beispielsweise der Großraum München oder das französisch-schweizerische Gebiet um den Genfer See erfordern eine nachhaltige Ressourcenplanung. Im Gegensatz zur herkömmlichen Raumordnung an der Erdoberfläche steht man bei der Untergrundplanung jedoch am Anfang. Für die meisten Nutzungen liegen keine gesetzlich geregelten Bewertungskriterien vor. Besondere Herausforderungen liegen in der unregelmäßig verteilten und mit zunehmender Tiefe abnehmenden Informationsdichte über die geologischen Strukturen im Untergrund und die dort ablaufenden Prozesse (Watzel 2014). GeoMol liefert hierfür, soweit es die unterschiedlichen gesetzlichen Rahmenbedingungen in den Partnerländern erlauben (vgl. Diepolder 2015, GeoMol Team 2015) harmonisierte und fortschreibungsfähige Informationen und leistet einen wichtigen Beitrag zum geologischen Verständnis des tieferen Untergrundes.

Die alpinen Vorlandbecken standen insbesondere im letzten Jahrhundert im Fokus einer intensiven Kohlenwasserstoffexploration. Seit einigen Jahren ergänzen weitere Erkenntnisse aus der Erkundung im Rahmen von Geothermievorhaben die Vorstellung vom Aufbau des tieferen Untergrundes und von den gesteinsphysikalischen Parametern. Diese Daten sind ein wertvoller Fundus und bilden die Grundlage der Arbeiten in GeoMol. Sie liegen teilweise direkt in den Archiven der geologischen Dienste oder stehen zumindest für eine Einsichtnahme bei den Erdölfirmen zur Verfügung. Allerdings liegen diese Daten aus mehreren Jahrzehnten geologischer Erkundung größtenteils weder digital vor, noch sind sie nach einheitlichen Standards beschrieben. Eine wichtige Voraussetzung für die gemeinsame Entwicklung grenzübergreifender Modellvorstellungen ist daher die technische und inhaltliche Harmonisierung der Basisdaten sowohl innerhalb der bearbeiteten Teilregionen, als auch übergreifend zwischen den Arbeitsgebieten der beteiligten Projektpartner. Darüber hinaus erfordert eine neutrale und nachvollziehbare Abschätzung der Nutzungspotenziale einheitliche Bewertungskriterien und -methoden.

Geologische Strukturen und Grundwasservorkommen sind nicht an administrative Grenzen gebunden. So bewirtschaften beispielsweise Österreich und Deutschland in der Region des Innviertels gemeinsam den oberjurassischen Grundwasserleiter. Ein weiteres Beispiel liefert das Projekt Transenergy, in dem die hydrothermalen Ressourcen im Grenzgebiet zwischen Slowenien, Österreich, Ungarn und der Slowakei länderübergreifend untersucht wurden (<http://transenergy-eu.geologie.ac.at/index.html>). Ein nachhaltiges Ressourcenmanagement und die verantwortungsvolle Erschließung neuer Nutzungsformen erfordern daher einen integrierten internationalen Ansatz, dessen Perimeter sich an den geologischen Strukturen und nicht an Verwaltungseinheiten und Staatsgebieten orientiert.

Das wissenschaftlich und technisch anspruchsvolle Projekt GeoMol setzte ein hohes Maß an Organisation und Koordination zwischen den beteiligten Institutionen voraus. Wertvolle Konzepte und Erfahrungen konnten dabei aus Vorgängerprojekten, wie dem Interreg IV A Projekt „Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben (GeORG)“ (GeORG-Projektteam 2013, 2013a, 2013b, 2013c) und dem im FP7 geförderten Forschungsvorhaben „ProMine“ geschöpft werden. Die GeoMol-Partner brachten entsprechend ihrer bisherigen fachlichen Arbeitsschwerpunkte unterschiedliche Spezialkenntnisse in das Projekt ein. Der rege wissenschaftliche Austausch führte zu einem wertvollen Kenntniszugewinn aller Beteiligten. Von dem im Laufe des

Projekts entstandenen transalpinen Netzwerk zwischen den geologischen Diensten, Forschungseinrichtungen und Anwendern im behördlichen Umfeld, aber auch weiteren Interessengruppen wie privaten Projektentwicklern profitieren alle Akteure auch über das Projektende hinaus.

Ziele des GeoMol-Projekts sind eine transnational harmonisierte, digitale Datenbasis für die Bewertung von Geopotenzialen, eine technische Lösung für die dezentrale Bearbeitung der Geodaten und die Bereitstellung der Projektergebnisse für verschiedene Nutzerkreise. Die im Rahmen des Projekts erzeugten Produkte erlauben es, den aktuellen geowissenschaftlichen Kenntnisstand grenzüberschreitend einheitlich darzustellen sowie Kenntnislücken aufzuzeigen, die z. B. durch Folgeprojekte geschlossen werden können. Diese Wissensbasis enthält folgende Komponenten:

- ein transnational harmonisiertes geologisches Übersichtsmodell für das nordalpine Vorlandbecken, das die geologischen Haupteinheiten und Störungsstrukturen in ihrer Raumlage bis in mehrere Kilometer Tiefe darstellt
- fünf geologische Detailmodelle in ausgewählten Pilotgebieten der nord- und südalpinen Beckenstrukturen
- 3D-Temperaturmodelle für den Untergrund von vier Pilotregionen als grundlegender Baustein für die Bewertung des geothermischen Potenzials

Die verschiedenen Bausteine dieser Datenbasis wurden eingesetzt, um in den Pilotregionen Nutzungsmöglichkeiten des tieferen Untergrundes, insbesondere des geothermischen und des Speicherpotenzials zu bewerten. Die geologischen Basisinformationen und die abgeleiteten Geopotenzialbewertungen stehen der breiten Öffentlichkeit genauso wie Fachanwendern in verschiedenen digitalen Informationssystemen zur Verfügung (GeoMol Team 2015).

Komplettiert werden die verschiedenen Visualisierungsformen durch mehrere Berichte. Der englischsprachige GeoMol Abschlussbericht dokumentiert die Gesamtkonzeption des Projekts und stellt die Ergebnisse in aggregierter Form dar (GeoMol Team 2015). Fünf weitere Berichte in den jeweiligen Amtssprachen gehen auf die in den Pilotgebieten genutzten Methoden und Ergebnisse der Geopotenzialbewertungen im Detail ein.

Die so bereitgestellten Informationen dienen der Sensibilisierung politischer Entscheidungsträger, der Unterstützung von Projektentwicklern sowie der Information der Öffentlichkeit und geben Anregungen zu den Nutzungsmöglichkeiten der natürlichen Ressourcen des tieferen Untergrundes.



1.2 Untersuchungsgebiet

Das GeoMol-Projektgebiet umfasst die Vorlandbecken nördlich und südlich der Alpen (vgl. Abb. 1-1). Das nördliche Molassebecken erstreckt sich über 1.000 km von Chambéry (Frankreich) im Südwesten bis nach Brno (Tschechische Republik) im Nordosten. Es umfasst französische, schweizerische, deutsche, österreichische und tschechische Gebietsanteile. Die italienische Po-Ebene als geologisches Pendant südlich der Alpen verläuft von Turin im Westen bis nach Udine im Osten.

Die Grenzen des Untersuchungsgebiets werden neben den geologischen Gegebenheiten von der Förderkulisse des Alpine-Space Programms bestimmt. Deshalb konnte in diesem Rahmen nördlich der Alpen der niederbayerische und tschechische Anteil des Molassebeckens nicht in die Bearbeitung einbezogen werden.

Im Zentrum der Arbeiten in GeoMol stand die Entwicklung eines geologischen 3D-Übersichtsmodells (framework model) für das Molassebecken. Es gibt die Raumlage der geologischen Haupteinheiten wieder und bildet einen Rahmen für alle bestehenden und zukünftigen detaillierteren geologischen 3D-Modelle. Das Übersichtsmodell umfasst insgesamt 55.000 km² und deckt die alpine Vorlandmolasse der Region Rhône-Alpes in Frankreich, das gesamte schweizerische Molassebecken, die baden-württembergischen und bayerischen Anteile (ohne Niederbayern) in Deutschland sowie Ober- und Niederösterreich mit Anteilen in Salzburg und Vorarlberg ab. Seine Nordgrenze ist durch den Französischen und Schweizer Jura, die Schwäbisch-Fränkische Plattform und die Böhmisches Masse definiert. Die Südgrenze fällt mit der heutigen alpinen Überschiebungsfrente zusammen.

Neben dem Übersichtsmodell wurden in fünf Pilotregionen detailliertere 3D-Modelle erstellt und hinsichtlich ihrer Geopotenziale bewertet (vgl. Abb. 1-1). Der Fokus der Untersuchungen und genutzten Methoden orientiert sich an den jeweils aktuellen regionalen Fragestellungen.

Das **Pilotgebiet Genf-Savoyen (Geneva-Savoy Area, GSA)** umfasst mit etwa 2.000 km² den Schweizer Kanton Genf und das französische Areal um Chambéry mit den Departements Ain, Haut-Savoie und Savoie. Das Gebiet ist derzeit Teil des geothermischen Erkundungs- und Prospektionsprogramms „GEothermie 2020“ des Kantons Genf. Der Schwerpunkt der Pilotgebietsaktivitäten liegt daher in der Modellierung der geologischen

Untergrundstrukturen und der Auswertung hinsichtlich ihres geothermischen Potenzials.

Das **Pilotgebiet Schweizer Mittelland (Swiss Midlands, SMA)** nimmt eine Fläche von etwa 4.000 km² ein. Es umfasst Teile der Kantone Bern, Solothurn, Luzern und Aargau. Im Fokus dieses Pilotgebiets steht die Abschätzung des geologischen Potenzials für die CO₂-Speicherung.

Das **Pilotgebiet Bodensee-Allgäu (Lake Constance Allgäu Area, LCA)** liegt in der Grenzregion von Deutschland, Schweiz und Österreich. Neben der Region Oberschwaben in Bayern und Baden-Württemberg liegen größere Teile der Schweizer Kantone St. Gallen und Thurgau sowie der Nordwesten des österreichischen Bundeslandes Vorarlberg in diesem Pilotgebiet. Mit rund 9.000 km² ist es das größte in GeoMol bearbeitete Pilotgebiet. Die Aquifere des süddeutschen Molassebeckens gehören zu den wichtigsten geothermischen Reservoiren für die Wärmeproduktion in Zentraleuropa (Paschen et al. 2003). Der Fokus im LCA-Gebiet liegt daher auf der Abschätzung des geothermischen Potenzials.

Das **Pilotgebiet Oberösterreich-Oberbayern (Upper Austria-Upper Bavaria, UA-UB)** verteilt sich zu gleichen Teilen zwischen beiden Ländern und umfasst etwa 4.700 km². Im Untergrund des bearbeiteten Gebiets befindet sich ein von beiden Ländern genutzter Hauptgrundwasserleiter. Der Schwerpunkt der Arbeiten liegt daher in der Bewertung des hydrothermalen Potenzials und in der Erstellung eines geologischen 3D-Modells als Grundlage für weiterführende Grundwasserbetrachtungen.

Südlich der Alpen befindet sich in der Po-Ebene das 5.700 km² große **Pilotgebiet Brescia-Mantua-Mirandola (BMMA)**. Es ist den Regionen Lombardei und Emilia-Romagna zugeordnet und gehört mit den beiden Städten Brescia und Mantua zu einer der am dichtesten besiedelten Regionen Italiens. Im Pilotgebiet steht neben der Auswertung des geothermischen Potenzials die Bewertung des seismischen Risikos im Fokus der Aktivitäten. Für diese Fragestellung werden potenziell aktive Störungen identifiziert und charakterisiert.

Die in GeoMol angewandten Methoden wurden im Rahmen einer **Spezialstudie im Mura-Zala Gebiet** (Slowenien) in das Pannonische Becken übertragen. Wie in den Pilotgebieten wurde auch für diese Beckenstruktur ein geologisches Untergrundmodell entwickelt, die Temperaturverteilung analysiert und die Modelle nachfolgend hinsichtlich verschiedener Nutzungsmöglichkeiten des Untergrundes ausgewertet.

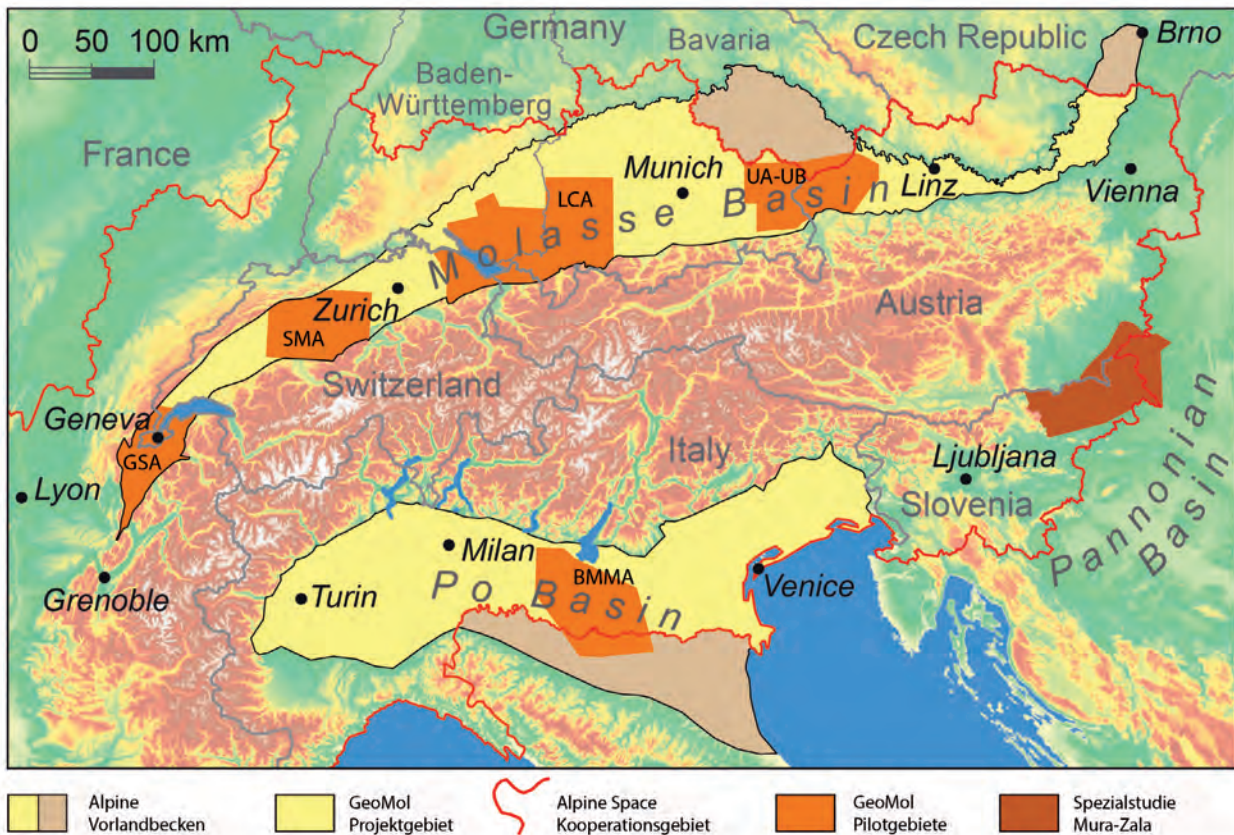


Abb. 1-1: Übersicht über das GeoMol-Projektgebiet und die Areale mit Detailmodellen und Geopotenzialbewertungen (GSA: Pilotgebiet Genf-Savoyen, SMA: Pilotgebiet Schweizer Mittelland, LCA: Pilotgebiet Bodensee-Allgäu, UA-UB: Pilotgebiet Oberösterreich-Oberbayern; BMMA: Pilotgebiet Brescia-Mantua-Mirandola; nach GeoMol Team (2015), verändert).

1.3 Projektorganisation

Das Projekt GeoMol wurde innerhalb des Programms INTERREG IV B Alpine Space im Themenschwerpunkt „Environment and Risk Prevention“ von September 2012 bis Juni 2015 durchgeführt. Innerhalb des Projekts bildeten 14 Institutionen aus sechs Alpen-Anrainerstaaten ein Konsortium (vgl. Abb. 1-2):

- Bayerisches Landesamt für Umwelt, Geologischer Dienst – Augsburg, Deutschland (Projektträger)
- Bundesamt für Energie – Bern, Schweiz
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Landesgeologie – Wabern, Schweiz
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières – Lyon/Orléans, Frankreich
- Etat de Genève, Département de la sécurité, de la police et de l'environnement – Genève, Schweiz
- Geologische Bundesanstalt – Wien, Österreich
- Geološki Zavod Slovenije – Ljubljana, Slowenien
- Istituto Superiore per Protezione e Ricerca Ambientale, Servizio Geologico d'Italia – Roma, Italien
- Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Regierungspräsidium Freiburg – Freiburg, Deutschland
- Landesregierung von Oberösterreich, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft – Linz, Österreich
- Regionalverband Bodensee-Oberschwaben – Ravensburg, Deutschland
- Regione Lombardia, Direzione Generale Territorio e Urbanistica – Milano, Italien
- Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli – Bologna, Italien
- TU Bergakademie – Freiberg, Deutschland



Abb. 1-2: Logos der Mitglieder des GeoMol Konsortiums aus Deutschland, Frankreich, Italien, Österreich, der Schweiz und Slowenien.

Abbildung 1–3 zeigt das Organigramm von GeoMol. Es setzt sich aus drei organisatorischen und fünf fachlich-technischen Arbeitspaketen zusammen. Die Organisation in der Antragsphase und das transnationale Management während der Laufzeit des Projekts lagen in der Verantwortung der Abteilung Geologischer Dienst des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU). Die Steuerung des Projekts übernahm ein Leitungsgremium, das sich aus Vertretern des GeoMol-Konsortiums zusammensetzte. Die Entscheidungen wurden im Rahmen halbjährlicher Treffen einvernehmlich auf Grundlage einer Geschäftsordnung getroffen. Das Leitungsgremium koordinierte des Weiteren die Information der Öffentlichkeit in der Projektphase mit einem Internetauftritt und verschiedenen Veranstaltungen wie der Auftakt-Konferenz in München und einem Informationstag in Brüssel. Die fachlichen Ergebnisse des Projekts wurden von verschiedenen Partnern auf zahlreichen wissenschaftlichen Tagungen präsentiert und während der Halbzeit-Konferenz in Leoben mit der internationalen Geowissenschaftler-Gemeinde diskutiert.

Das Projekt erhielt wesentliche Empfehlungen und fachliche Impulse von externen Beobachtern (Observer) aus der Wirtschaft, regionalen Planungs- und Verwaltungsbehörden und dem universitären Umfeld.

Die fachliche und technische Umsetzung des Projekts erfolgte in fünf Arbeitspaketen, deren Koordination jeweils ein Projektpartner mit entsprechender Fachkompetenz übernahm (vgl. Abb. 1-3). Im Arbeitspaket „Nutzeranforderungen“ wurde unter Leitung des Bundesamts für Energie aufbauend auf einer Fragebogenaktion eine umfassende Bedarfsanalyse der überregionalen und regionalen Interessenvertreter durchgeführt und damit Grundzüge für die Ausrichtung des Projekts gelegt. Das Arbeitspaket „Datenvorbereitung“ beschäftigte sich mit der Erhebung und Harmonisierung der Eingangsdaten. Eine wesentliche Rolle spielten in diesem Arbeitsschritt die technische Vorbereitung und

Interpretation von Seismikprofilen und die Harmonisierung von Bohrdaten. Die Leitung des Arbeitspakets lag beim Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

Der Aufbau des transnationalen, geologischen Übersichtsmodells und die Erarbeitung von Methoden für die Bewertung verschiedener Geopotenziale stand im Mittelpunkt des Arbeitspakets „3D-Geologie und Geopotenziale“. Die Koordination dieser Arbeiten übernahm aufgrund seiner umfangreichen Erfahrungen aus dem Projekt „Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben (GeORG)“ das Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB). Das Arbeitspaket „Technische Infrastruktur“ beschäftigte sich mit der Entwicklung dezentraler Datenbankstrukturen für 3D-Modelle und der technischen Implementierung eines Kartenviewers. Die Leitung des Arbeitspakets oblag der TU Bergakademie Freiberg. Die Erstellung der Detailmodelle und die Bewertung der Geopotenziale erfolgte im Arbeitspaket „Tests und Pilotaktivitäten“ unter der Leitung der Geologischen Bundesanstalt Wien. Die Koordinierung der Arbeiten in den Pilotgebieten erfolgte dabei in regionalen Untergruppen.

Im LCA-Projektteam fanden sich neben Vertretern der geologischen Dienste von Baden-Württemberg, Bayern, der Schweiz und Österreich auch der Regionalverband Bodensee-Oberschwaben als Träger der Regionalplanung für die Landkreise Bodenseekreis, Ravensburg und Sigmaringen. Die Aktivitäten im Pilotgebiet Bodensee-Allgäu wurden vom Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 LGRB gesteuert. Im Rahmen von insgesamt 11 Treffen diskutierten die beteiligten Partner Fragen der Datenharmonisierung und stimmten Methoden für die Erstellung der Modelle und die Ableitung der Geopotenziale ab. Zudem wurden für einzelne Arbeitsschritte und spezielle Fragestellungen wie die technische Aufbereitung der Seismikdaten oder die Studie zur Mitteltiefen Erdwärmesondengeothermie externe Spezialisten beauftragt.

Erste Ergebnisse der Untersuchungen im LCA-Gebiet konnten der Öffentlichkeit auf Fachtagungen und Messen bereits während der Projektlaufzeit präsentiert werden. Mit speziell für die Experten der Verwaltungsbehörden zugeschnittenen Präsentationen informierte das LCA-Projektteam während der 42. Dienstbesprechung Grundwasserschutz und Wasserversorgung und bei einer Verbandsversammlung des Regionalverbands Bodensee-Oberschwaben über die Zielsetzungen und Ergebnisse im Pilotgebiet.

Die Projektergebnisse des Pilotgebiets Bodensee-Allgäu sind unter www.geomol.eu in Form eines umfangreichen Kartendatensatzes mit den Schwerpunkten geologische Basisthemen und geothermisches Potenzial frei verfügbar.

Das Projekt wurde mit der Veröffentlichung des Projektreports (GeoMol Team 2015) und der Freischaltung der Endversion in den internet-basierten Informationskanälen von GeoMol am 30. Juni 2015 erfolgreich beendet.

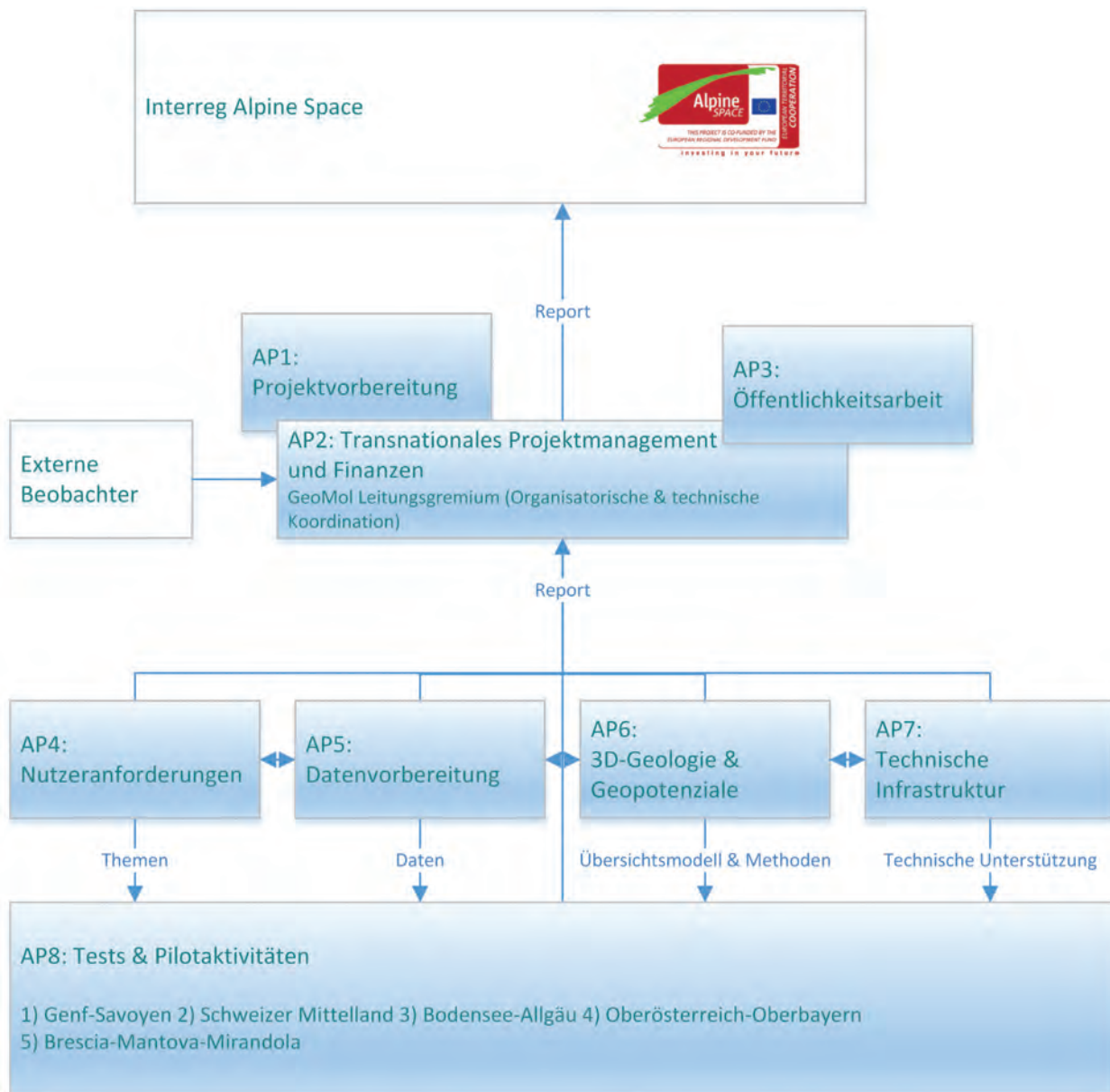


Abb. 1-3: GeoMol Organigramm: Die Arbeitspakete (AP) eins bis drei steuerten und überwachten das Projekt. Die fachliche und technische Umsetzung des Projekts erfolgte in den Arbeitspaketen vier bis acht. Zwischen den Arbeitspaketen gab es einen engen Austausch.



2 Das Pilotgebiet Bodensee-Allgäu

Das Pilotgebiet Bodensee-Allgäu (LCA) liegt im Zentrum des nordalpinen Molassebeckens (vgl. Abb. 2-1). Insbesondere im Osten reichen Aquifere bis in große Tiefen und damit in Bereiche hoher Temperaturen. Damit ergibt sich ein hohes Potenzial zur Nutzung geothermischer Energie für die Wärme- und Stromerzeugung. Deshalb wurde in der vorliegenden Studie das LCA-Gebiet zur Abschätzung des geothermischen Potenzials detaillierter untersucht (vgl. Kap. 7.1). Dabei lag der Schwerpunkt auf der Bereitstellung geowissenschaftlicher Grundlagendaten zum geologischen Aufbau des Untergrundes und zur Temperaturverteilung im 3D-Raum. Diese Datensätze wurden im LCA-Gebiet sowohl zur generellen Abschätzung des geothermischen Potenzials des tieferen Untergrundes als auch speziell zur Abschätzung der gewinnbaren Wärmemenge durch mitteltiefe bis tiefe Erdwärmesonden (MTEWS, vgl. Kap. 6) genutzt. Andererseits können sie als unverzichtbare Eingangsdaten für evtl. anschließende weiterführende Untersuchungen wie z. B. einer gekoppelten thermisch-hydrochemischen Strömungs- und Transportmodellierung der tiefen Grundwässer im Molassebecken dienen. Aufgrund des Bearbeitungsmaßstabes sowie der Datenqualität und -verfügbarkeit konnten in GeoMol weitere wichtige Kriterien, wie beispielsweise die Verbreitung und hydraulische Wirksamkeit von Bruchsystemen sowie der Einfluss von Tiefengrundwässern nicht in die geothermische Potenzialabschätzung einbezogen werden. Darüber hinaus blieben mögliche seismische Risiken, die eventuell mit der Nutzung der geothermischen Energie verbunden sein können, unberücksichtigt.

Eine flächen- und raumdeckende Darstellung des theoretischen geothermischen Potenzials im tieferen Untergrund ist auf Grundlage des heutigen Kenntnisstandes und der Größe des Pilotgebiets Bodensee-Allgäu daher nur kleinmaßstäblich und auf Grundlage der Untergrundtemperaturen möglich.

Die bestehenden balneologischen Nutzungen von thermalem Grundwässern in Thermalbädern stellen insbesondere im baden-württembergischen Bereich des Pilotgebiets für einige Regionen einen bedeutenden Wirtschaftsfaktor dar (z. B. Bad Saulgau, Bad Waldsee, Bad Wurzach).

2.1 Arbeitsschwerpunkte im Pilotgebiet Bodensee-Allgäu

2.1.1 Nutzerbefragung

Die zentrale Zielsetzung des GeoMol-Projekts bestand in der bedarfs- und nutzerorientierten Bereitstellung geowissenschaftlicher Daten über den tieferen Untergrund der alpinen Vorlandbecken. Zur Identifikation der in der Region wichtigen Themenbereiche, der gewünschten Produkte und der Festlegung der Formate, in denen die Ergebnisse zur Verfügung gestellt werden sollten, wurden deshalb zu Projektbeginn hierzu die potenziellen Nutzer befragt. Dafür wurde ein Fragebogen entwickelt und an die verschiedenen Akteure im GeoMol-Projektgebiet versandt.

Das Umfrageergebnis ging insbesondere in den Pilotgebieten wesentlich in die Priorisierung und bedarfsgerechte Spezifizierung der Produkte ein. Dabei waren die Nutzerprofile und Anforderungen in den jeweiligen Partnerländern ähnlich. Hauptnutzergruppen sind Behörden und politische Entscheidungsträger, gefolgt von Beratungs- und Planungseinrichtungen sowie Versorgern und der Grundstoffindustrie. Die Tätigkeitsschwerpunkte liegen dabei zu knapp 50% der Rückmeldungen in den Bereichen Projektentwicklung, Beratung und Machbarkeitsstudien sowie in der staatlichen Verwaltungs- und Vollzugsfunktion und öffentlichen Versorgung (z. B. Stadtwerke). Das Hauptinteresse der Befragten lag in den Bereichen der Geothermie und der tiefen Grundwässer. Weitere Aspekte waren die Regionalplanung und Untergrundspeicherung von Gasen. Im Pilotgebiet Bodensee-Allgäu lag neben den tiefenserialisierten Karten zum Untergrundaufbau und den Temperaturen ein Interessenschwerpunkt bei der Abschätzung des Potenzials mitteltiefer Erdwärmesonden. Dieser Anforderung konnte mit der Durchführung einer Spezialstudie nachgekommen werden (vgl. Kap. 6). Tiefe Grundwässer konnten im Projekt aus Zeit- und Kapazitätsgründen nicht im gewünschten Umfang berücksichtigt werden. GeoMol liefert jedoch mit den bereitgestellten 3D-Geometrien zu den Grundwasserleitern und -geringleitern eine wichtige Grundlage für weiterführende Arbeiten auf diesem Gebiet.

Bei den gewünschten Produkten und Produktmerkmalen zeichnete sich der klare Wunsch nach abgeleiteten, leicht lesbaren und verständlichen Kartendarstellungen zur Verbreitung stratigraphischer Haupteinheiten, zu Störungssystemen sowie

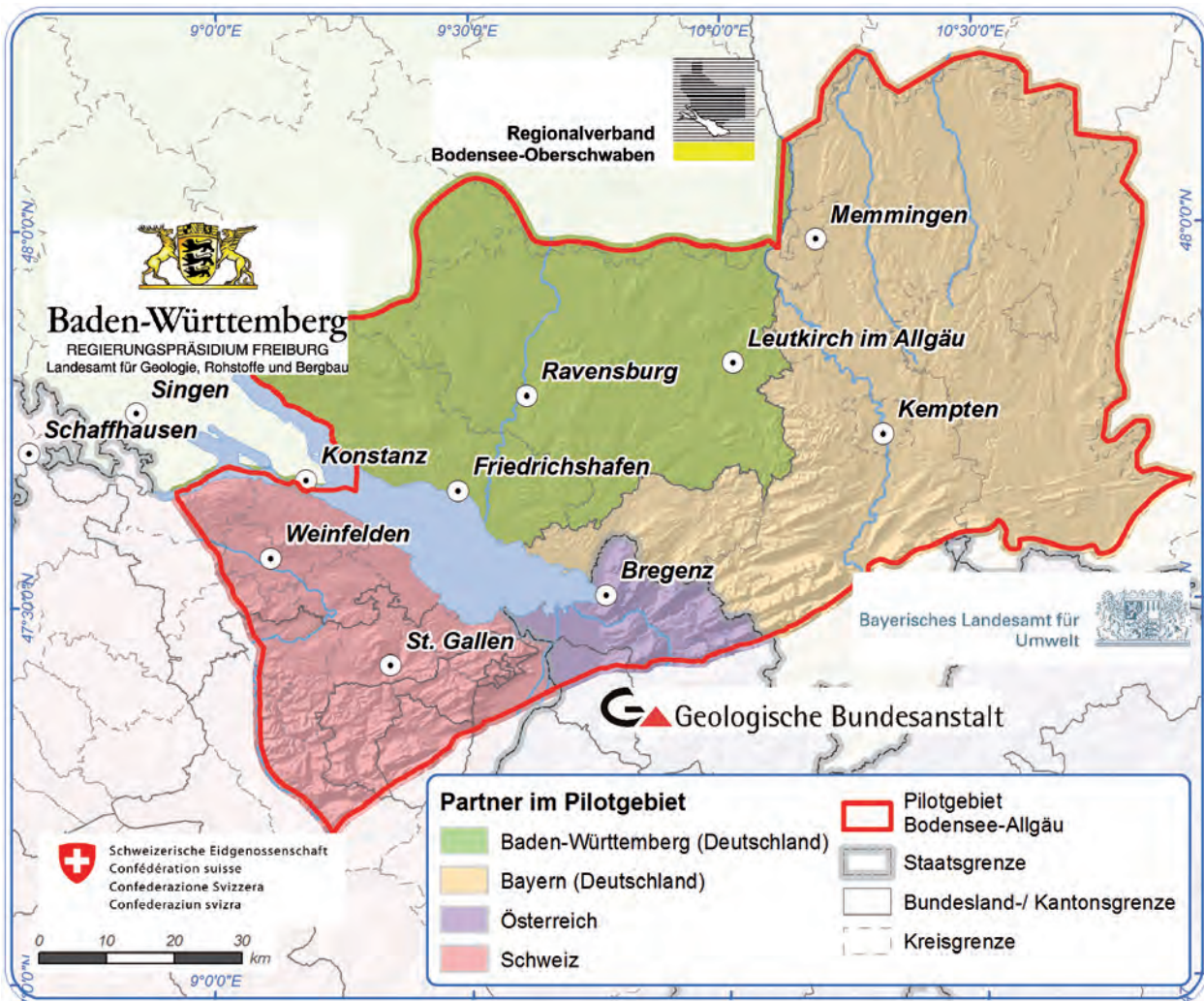


Abbildung 2-1: Das Pilotgebiet Bodensee-Allgäu: Partner und Verwaltungsgrenzen.

zu Schichtlagerungskarten ab. Daneben wurde ein Bedarf an Temperaturkarten deutlich. Die Bereitstellung sollte vorwiegend in Form von digitalen Karten und Profilen erfolgen, die eine Einbindung in GIS-Projekte erlauben.

2.1.2 Geologisches 3D-Modell, geostatistische 3D-Temperaturmodellierung und Produktableitung

Nach Auswertung der Umfrage wurde von den Projektpartnern die Produktpalette festgelegt. Die Grundlagen zur Ableitung der Kartenprodukte bilden das geologische 3D-Modell (vgl. Kap. 4) und eine geostatistische 3D-Temperaturmodellierung (vgl. Kap. 5). Das geologische 3D-Modell zeigt die Tiefenlage der wichtigsten Gesteinseinheiten und deren Lagebeziehungen zueinander. Das Temperaturmodell bildet die Verteilung der Temperaturen im Untergrund ab. Aufgrund der unzureichenden Datenlage musste

für das schweizerische Teilgebiet der Pilotregion auf eine Temperaturmodellierung verzichtet werden.

Aus den beiden Modellen wurden die Kartenprodukte teils direkt abgeleitet (z. B. Verbreitung und Tiefenlage einer Modellschicht, Temperaturverteilung in einer bestimmten Tiefe), teils entstanden sie durch eine Kombination der beiden Modellinhalte (z. B. Temperatur an der Oberfläche der geothermischen Einheit Oberjura, vgl. Kap. 4 und 5).

Die beiden Modelle basieren größtenteils auf Daten der Kohlenwasserstoffindustrie, die den staatlichen geologischen Diensten zur Verfügung stehen. Bereits in den 1950er Jahren wurde der tiefere Untergrund des Pilotgebiets intensiv auf das Vorkommen von Erdöl und Erdgas untersucht. Hierzu wurden zahlreiche seismische Messkampagnen durchgeführt und eine Vielzahl an tiefen Bohrungen abgeteuft. Die erbohrten Schichten wurden beschrieben und hinsichtlich ihrer gesteinsphysikalischen



Eigenschaften sowie der Untergrundtemperaturen untersucht. Eine zweite Explorationskampagne folgte in den 1980er Jahren. Aufgrund des technischen Fortschrittes sind die jüngeren Untersuchungsergebnisse in der Regel von deutlich besserer Qualität. Die sogenannten KW-Daten werden durch Informationen aus den Archiven der staatlichen geologischen Dienste ergänzt, die im Wesentlichen auf Untersuchungsergebnisse von Erschließungsversuchen thermaler Wässer zurückgehen. In den Bohrungen GB1 Ravensburg und TB Singen wurden zur Erweiterung der Datenbasis im Rahmen des GeoMol-Projekts Temperaturmessungen durchgeführt. Sie dienen der Validierung bereits existierender Temperaturmessungen.

Die erforderliche umfangreiche Aufbereitung der Eingangsdaten beinhaltete insbesondere die Harmonisierung der stratigraphischen Gliederung der Bohrungen auf Grundlage geophysikalischer Bohrlochmessungen (vgl. Kap. 4.3.1) sowie die Digitalisierung und Interpretation von mehr als 5.500 km Seismikprofilen im Pilotgebiet (vgl. Kap. 4.3.2 und 4.3.3).

Standortbezogene Informationen aus den beiden Modellen zum Aufbau und den Temperaturen im Untergrund flossen auch in die Studie zum Potenzial mitteltiefer Erdwärmesonden im baden-württembergischen Teil der Pilotgebiets ein. Zur flächenhaften Abschätzung des Potenzials wurde im Rahmen des Projekts ein Rechenmodul entwickelt (vgl. Kap. 6).

2.1.3 Datenbereitstellung

Zur allgemeinen Verfügbarkeit der Ergebnisse des LCA-Gebiets wurden mehrere Nutzerzugänge eingerichtet (vgl. Kap. 8).

- Die **GeoMol-Website** (<http://www.geomol.eu>) ist die zentrale GeoMol-Internetplattform. Sie stellt Informationen über die Projektziele und -aktivitäten bereit und ermöglicht den Zugang zu den Produkten und Webanwendungen (vgl. Kap. 8.1).
- Der **MapView** dient der Web-basierten Visualisierung und interaktiven Analyse der thematischen Karten (vgl. Kap. 8.2).
- Der **SearchCatalogue** liefert weitere Informationen zu Datenverfügbarkeit und -inhalten, Kontaktinformationen sowie eventuelle Nutzungseinschränkungen (vgl. Kap. 8.3).
- Die **Web Map Services** erlauben die Bereitstellung thematischer Karten zur Nutzung außerhalb des MapView (vgl. Kap. 8.4).
- Der **3D-Explorer** dient der Web-basierten Visualisierung und interaktiven Analyse des geologischen Übersichtsmodells (vgl. Kap. 8.5).

2.2 Naturraum und Wirtschaft

Das Pilotgebiet Bodensee-Allgäu liegt zentral im nördlichen Molassebecken im Dreiländereck Deutschland – Schweiz – Österreich. Die Gesamtfläche von 8.850 km² verteilt sich auf die Projektpartner wie folgt:

- Bayern: 4.160 km² (47 %)
- Baden-Württemberg: 2.680 km² (30 %)
- Schweiz: 1.600 km² (18 %)
- Österreich: 410 km² (5 %).

Im baden-württembergischen Bereich des Pilotgebiets liegen die Landkreise Ravensburg, Bodenseekreis und im nördlichsten Teil Sigmaringen. Der Regionalverband Bodensee-Oberschwaben, Projektpartner in GeoMol, ist die verantwortliche überregionale Planungsbehörde im baden-württembergischen Teil des Pilotgebiets.

Im bayerischen Bereich sind die Landkreise Lindau, Oberallgäu, Ostallgäu, Unterallgäu und teilweise Augsburg, Günzburg, Landsberg a. L., Neu-Ulm und Weilheim-Schongau sowie die kreisfreien Städte Kaufbeuren, Kempten und Memmingen Teil des Pilotgebiets. Die Kantone Thurgau, St. Gallen, Appenzell Innerrhoden und Ausserrhoden liegen im Schweizer Bereich, der österreichische Pilotgebietsanteil liegt vollständig im Bundesland Vorarlberg (vgl. Abb. 2-1). Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht über eine Auswahl größerer Städte.

Die Ausdehnung des Pilotgebiets folgt im Westen, Norden und Osten grob den Verwaltungsgrenzen. Im Süden stellt die nördliche Überschiebungsfrent der Alpen die Begrenzung dar.

Das Pilotgebiet Bodensee-Allgäu liegt im nördlichen Alpenvorland, mit geringen Anteilen an den Alpen im Süden. Das Gelände steigt allmählich nach Südosten hin an. Die tiefsten Punkte des LCA-Gebiets bilden zum einen im Westen der Bodensee (mittlerer Wasserspiegel 375 m NN), zum anderen die Täler der Iller und des Lech mit ca. 530 bzw. 570 m NN am nördlichen Rand des Modellgebiets. Die höchsten Erhebungen des Pilotgebiets sind der Höchsten (838 m NN) und der Schwarze Grat (1.118 m NN) in Baden-Württemberg, der Hochgrat (1.834 m NN) in Bayern sowie die Voralpen des Alpsteins mit Kronberg (1.663 m NN), Hundwihler Höhi (1.305 m NN) und Stockberg (1.782 m NN) in der Schweiz. Die heutigen Landschaftsformen wurden maßgeblich durch die Gletschervorstöße während den letzten pleistozänen Eiszeiten geprägt. Moränenwälle und Drumlins gliedern die Landschaft in ein flachwelliges Hügelland. In den tief ausgeschürften glazialen Becken finden sich Seen und Hochmoore.

Tabelle 2.1: Auswahl größerer Städte im Pilotgebiet Bodensee-Allgäu.

Name	Einwohner	Region
Konstanz	81.000	Deutschland (BW)
St. Gallen	75.000	Schweiz
Kempten	66.000	Deutschland (BY)
Friedrichshafen	58.000	Deutschland (BW)
Ravensburg	49.000	Deutschland (BW)
Memmingen	42.000	Deutschland (BY)
Bregenz	29.000	Österreich
Wangen i. A.	26.000	Deutschland (BW)
Leutkirch i.A.	22.000	Deutschland (BW)

Der Bodensee nimmt eine Fläche von 546 km² ein und teilt sich in die Teilbecken des Obersee und des Untersee auf, die durch den Seerhein miteinander verbunden werden. Es handelt sich um ein internationales Gewässer, da keine allgemein anerkannte Grenzziehung im Obersee festgelegt wurde. Der See ist ein Relikt des Rheingletschervorstoßes am Ende der Würmeiszeit. Seine tiefste Stelle liegt heute bei 254 m unter Seespiegel. Hauptzufluss des Bodensees ist der Alpenrhein. Bedeutende Nebenzuflüsse sind der Alte Rhein (Rheintal-Binnenkanal), die Bregenzer Ach, die Argen und die Schussen. Hauptabfluss ist der Hochrhein. Der Bodensee ist als größtes Oberflächengewässer dieser Region zugleich ein bedeutendes Trinkwasserreservoir. Aufgrund der guten Wasserqualität stellt er die Trinkwasserquelle für rund 5 Millionen Menschen in Baden-Württemberg und der Schweiz dar. In Baden-Württemberg versorgt der Zweckverband Bodensee-Wasserversorgung (BWV) als einer der größten deutschen Fernwasserversorgungen ca. 320 Städte und Gemeinden.

Die Wasserstands- bzw. Druckhöhenmessungen aus der Oberen Meeresmolasse (OMM) lassen den Rückschluss zu, dass im Osten das Grundwasser in der OMM mit schwachem Potenzialgefälle dem Bodensee zufließt. Dort hat der See bei Bregenz und Rohrschach mit der OMM Kontakt (LGRB 2005). Im Westen ist im Bereich Überlingen das Strömungsbild ebenfalls auf den Bodensee ausgerichtet. Auch dort streicht die OMM an beiden Seiten des Sees großflächig aus. Dazwischen erfolgt der Abstrom in der OMM wahrscheinlich unter dem Bodensee hindurch. Das Grundwasser im Oberjura und im Muschelkalk steht mit dem Bodensee nicht in hydraulischem Kontakt.

Die Thur durchfließt das Schweizer Projektgebiet und mündet westlich des Bodensees in den Hochrhein. Durch das Pilotgebiet Bodensee-Allgäu

verläuft die Europäische Hauptwasserscheide. Der Süden und Westen entwässert über den Rhein und den Bodensee in die Nordsee. Im Norden und Osten einer Linie Bad Waldsee bis südlich Kempten fließen Riß, Iller, Mindel, Wertach und Lech im bayerischen Allgäu hingegen nach Norden über die Donau ins Schwarze Meer.

Obwohl das Landschaftsbild im Pilotgebiet Bodensee-Allgäu nach wie vor eher landwirtschaftlich geprägt ist, erfolgt die Wertschöpfung hauptsächlich im produzierenden Gewerbe und im Dienstleistungssektor. Insbesondere um die Städte Friedrichshafen, Ravensburg und Memmingen haben sich industrielle Zentren mit vielen mittelständischen Unternehmen, aber auch einigen Großunternehmen gebildet. Zu den Schlüsselindustrien zählen insbesondere Luft- und Raumfahrttechnik, Maschinenbau, Umwelt- und Verpackungstechnologien sowie Bio-, Nano- und Mobilitätstechnologien bis hin zur Nahrungsmittelindustrie und weiteren Branchen aus dem Dienstleistungssektor. St. Gallen ist mit dem Schwerpunkt im Versicherungs- und Bankensektor das wirtschaftliche Zentrum der Ostschweiz.

Die grenzüberschreitende Zusammenarbeit ist ein Schlüssel für die erfolgreiche Wirtschaftsentwicklung in der Region. Zusätzlich gestützt wird die Wirtschaft durch Kooperationen mit einer Vielzahl von Hochschulen und Forschungseinrichtungen.

Einen wichtigen Wirtschaftsfaktor stellt auch der Tourismus insbesondere am Bodensee, im Allgäu, in Vorarlberg und dem Schweizer Alpenvorland dar.

Die insgesamt anhaltende stabile Bevölkerungsentwicklung im Pilotgebiet Bodensee-Allgäu spricht für die Attraktivität des Raumes aufgrund seiner Wirtschafts- und Innovationskraft, des kulturell vielfältigen Angebotes sowie seiner vielfältigen Natur-, Landschafts- und Erholungsräume.



2.3 Bestehende Studien

Das Molassebecken ist Gegenstand einer Vielzahl von Studien, vorrangig mit dem Fokus auf die Kohlenwasserstoffexploration und die Gewinnung von Thermalwasser.

In Tabelle 2-2 ist eine Auswahl wichtiger Projekte, Studien und Publikationen zum Thema Thermal- und Grundwasser zusammengetragen, die für die geologische Bearbeitung zur Verfügung standen.

Die wichtigste Arbeit aus dem Bereich Kohlenwasserstoffe im Molassebecken (BW und BY) stellt die Alpenvorlandstudie aus dem Jahre 1999 (überarbeitet 2007) dar (LBEG 2007). In dem umfassenden Werk mit umfangreichem Kartenmaterial wurden die Ergebnisse der vieljährigen Explorationsstätigkeit zusammengefasst, wobei detailliert auf die Geologie des Molassebeckens mit Fokus auf die Erdöl- und Erdgasfelder eingegangen wird. Für das Projekt GeoMol waren besonders die geologischen Grundlagenkarten (Schichtlagerungen, Mächtigkeitsverteilungen) wichtig.

In den letzten Jahren richtete sich das Interesse außerdem auf die Möglichkeit, Gase wie z. B. CO₂ im Untergrund einzulagern. Hierzu wurden im Projekt „Speicher-Kataster“ in den Jahren 2009 und 2010 bereits vorhandene Daten, wie Schichtlagerungskarten und Mächtigkeitsverteilungen aufgearbeitet. Anhand der Kriterien Mindesttiefenlage und Mindestmächtigkeit von Speicher- und Barrieregesteinskomplexen wurde eine erste Übersicht über untersuchungswürdige Regionen im deutschen Anteil des Molassebeckens erarbeitet. Die Untersuchung erfolgte unter Koordination der BGR bei den geologischen Diensten der Länder (Fehn & Wirsing 2011, Diepolder & Schulz 2011).

Weitere Studien beschäftigen sich mit der Neuberechnung möglicher Kapazitäten zu CO₂-Speicherung in tiefen Aquiferstrukturen (Knopf et al. 2010) und möglichen Nutzungskonkurrenzen mit tiefer Geothermie (Suchi et al. 2014).

Im Interreg IV A Projekt GeORG „Geopotenziale im tieferen Untergrund des Oberrheingrabens“ wurden grundlegende Arbeitsabläufe im Hinblick auf die Datenaufbereitung, Modellierung und Methoden für Geopotenzialableitungen entwickelt (GeORG-Projektteam 2013). Diese stellen die methodische Grundlage für die Arbeiten in GeoMol dar. In Baden-Württemberg existieren mit dem Landesmodell (Rupf & Nitsch 2008) und dem Modell für das Informationssystem für Oberflächennahe Geothermie (ISONG, Rupf & Armbruster 2008) außerdem zwei geologische Vorgängermodelle, die Teile des Pilotgebiets Bodensee-Allgäu abdecken.

In Bayern konnte auf landesweite 3D-Modelle wichtiger Horizonte wie Top Oberjura oder Top Basement (Pamer & Diepolder 2010) als Ausgangsbasis zurückgegriffen werden.

Das Schweizer Teilgebiet baut auf den seismischen Untersuchungen von Roth et al. (2010) auf (vgl. Kap. 4.3.4). Eine weitere Grundlage bildet der Seismische Atlas des schweizerischen Molassebeckens (Sommaruga et al. 2012), auf dem das Übersichtsmodell in der Schweiz im Wesentlichen basiert. Zudem stand der schriftliche Bericht von Gmünder et al. (2013) über die Erstellung eines geologischen 3D-Modells der Nordschweiz, welches das nördliche und westlich-zentrale Teilgebiet LCA-CH betrifft, zur Verfügung, nicht jedoch das Modell selbst. Die geologische Entwicklung der Nordschweiz ist z. B. ausführlich in Müller et al. (2002) beschrieben.

Die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) untersucht seit mehreren Jahrzehnten den Untergrund des Molassebeckens. Auf die Erfahrungen der Nagra konnte im Projekt GeoMol zurückgegriffen werden. Es standen mehrere Berichte über verschiedene Themen im Molassebecken zur Verfügung.

Tab. 2-2: Ausgewählte Projekte, Studien und Publikationen zum Thema Thermal- und Mineralwasser im Pilotgebiet Bodensee-Allgäu.

Projekt/Studie	Zeitraum	Beschreibung	Quelle
Geothermisches Demonstrationsprojekt Saulgau	1979	Zwei Bohrungen (Saulgau GB2, GB3) inklusive geohydraulischer, hydrochemischer und isotopenhydrologischer Untersuchungen	
Ergebnisse der Hydrogeothermiebohrungen	1988	Umfassende Beschreibung der bis 1988 niedergebrachten acht Geothermiebohrungen im baden-württembergischen Molassebecken	Bertleff et al. (1988)
Grundwasserbilanz Obere Meeresmolasse	1989	Grundwasserbilanz der Oberen Meeresmolasse in Oberschwaben	LGRB (1989)
Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malmkarstes	1984-1989	Umfangreiches BMFT-Projekt mit Untersuchungen zu Hydrochemie, Isotopenhydrologie, Gas, Geohydraulik, Stofftransportmodell Grundwasserströmungsmodell und Hydrogeothermik	BayLfW & LGRB (1991), unveröff.
Geothermische Rasteranalyse	2000-2002	Konduktives Temperaturmodell, Hauptfokus der Studie: Endlagerung	Clauser et al. (2002)
Archivierung und Kompilation geothermischer Daten der Schweiz und angrenzende Gebiete	2002	Archivierung und Kompilation geothermischer Daten (Bohrungen) der Schweiz und angrenzende Gebiete	Schärli & Kohl (2002)
Bayerischer Geothermieatlas	2004 (2. Aufl. 2010)	Zusammenfassende Studie zum Kenntnisstand der Aquifer-Charakteristika, Temperaturverteilung und Strukturen u. a. im bayerischen Molassebecken	BayStWIVT (2010)
Tiefe Geothermie/ Hydrogeothermie Bodensee-Oberschwaben	2005	Studie mit dem Ziel der Nutzbarmachung vorhandener Daten für Planung geothermischer Erkundungsvorhaben	LGRB (2005)
BMU-Projekt FKZ 0329985 Thermische und hydraulische Gesteinseigenschaften	2005-2006	BMU-Projekt mit dem Ziel der Ableitung thermischer und hydraulischer Gesteinseigenschaften für die wichtigsten stratigraphischen Einheiten im Molassebecken	Clauser & Koch (2006)
BMU-Projekt GeotIS	2005-2009	Informationssystem für geothermische Nutzungen und Temperaturen	www.geotis.de
Geothermische Eigenschaften der Schweizer Molasse (Tiefenbereich 0 – 500m)	2006	Geothermische Eigenschaften der Schweizer Molasse (Tiefenbereich 0 – 500m)	Leu et al. (2006)
Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz	2006	Temperaturmodell der Nordschweiz	Signorelli & Kohl (2006)
Thermische Leitfähigkeit: Eichung von in-situ Messungen (d.h. „kabellose Temperatursonde“) mit Laborbestimmungen als Grundlage für die geothermische Kartierung des Kanton ZH und der umliegenden Kantone	2007	Temperaturmodellierung im Kanton Zürich in < 300m Tiefe	Schärli & Rohner (2007)
BMU-Projekt GeoTool	2009-2013	Auswertung hydraulischer Parameter und Hydrochemie	Stober & Jodocy (2011)
Klimaprogramm Bayern 2020: Tiefe Geothermie im bayer. Molassebecken	2012-2014	3D-Untergrundmodell zur Minderung des Erschließungsrisikos u. a. im östlichsten Teil des LCA-Gebiets	BayLfU (2014), unveröff.
Das Geothermie-Projekt der Stadt St. Gallen		http://www.geothermie.stadt.sg.ch	Huwiler et al. (2009), Heuberger & Naef (2012), Graf (2013), Naef (2013), Wolfgramm et al. (2014), Moeck et al. (2015), Wolfgramm et al. (2015)
Geothermie, Schlattingen		http://www.grob-gemuese.ch	



3 Geologische Entwicklung

3.1 Lage und allgemeiner Bau

Das Modellgebiet umfasst tektonisch den Alpenrand und Teile des nördlich anschließenden Molassebeckens. Unter quartären Ablagerungen mit stark wechselnder Mächtigkeit stehen hunderte bis tausende Meter mächtige Sedimente aus dem Tertiär an, die gebietsweise zutage austreichen. Im tieferen Untergrund, unter dem Tertiär des Molassebeckens, liegen mesozoische Gesteine aus Trias und Jura, deren Basis meist unmittelbar auf paläozoischen Graniten und Gneisen des Grundgebirges auflagert. Nur im westlichen Bodenseegebiet und in Oberschwaben haben wenige Bohrungen jungpaläozoische Sedimente zwischen dem kristallinen Grundgebirge und der Trias nachgewiesen. Diese permokarbonen Sedimente weisen teilweise Mächtigkeiten von mehreren hundert Metern auf, ihre Verbreitung ist aber aufgrund der wenigen Bohrungen und der in dieser Tiefe nicht hinreichend deutlichen

geophysikalischen Messergebnisse nicht genauer bestimmbar. Grundgebirge und Mesozoikum finden sich dabei im Nordwesten des Gebiets in der geringsten Tiefe und fallen nach Südosten, gegen den Alpenrand, in immer größere Tiefe ab, wobei sie von zunehmend mächtigeren Molassesedimenten überdeckt werden.

An der Erdoberfläche wurden die Landschaften des Allgäus, Oberschwabens, des Bodenseegebiets und des Schweizer Mittellandes vorwiegend von den Abtragungs- und Ablagerungsvorgängen der pleistozänen Eiszeiten geprägt, als die Alpen großenteils unter einer Eiskappe lagen und Gletscher weit in das Alpenvorland vordrangen. Aus dem Frühen Pleistozän (ca. 2,6–0,78 Ma v. H. = Millionen Jahre vor heute) sind dabei nur wenige Sedimentreste auf den höchsten Anhöhen und an

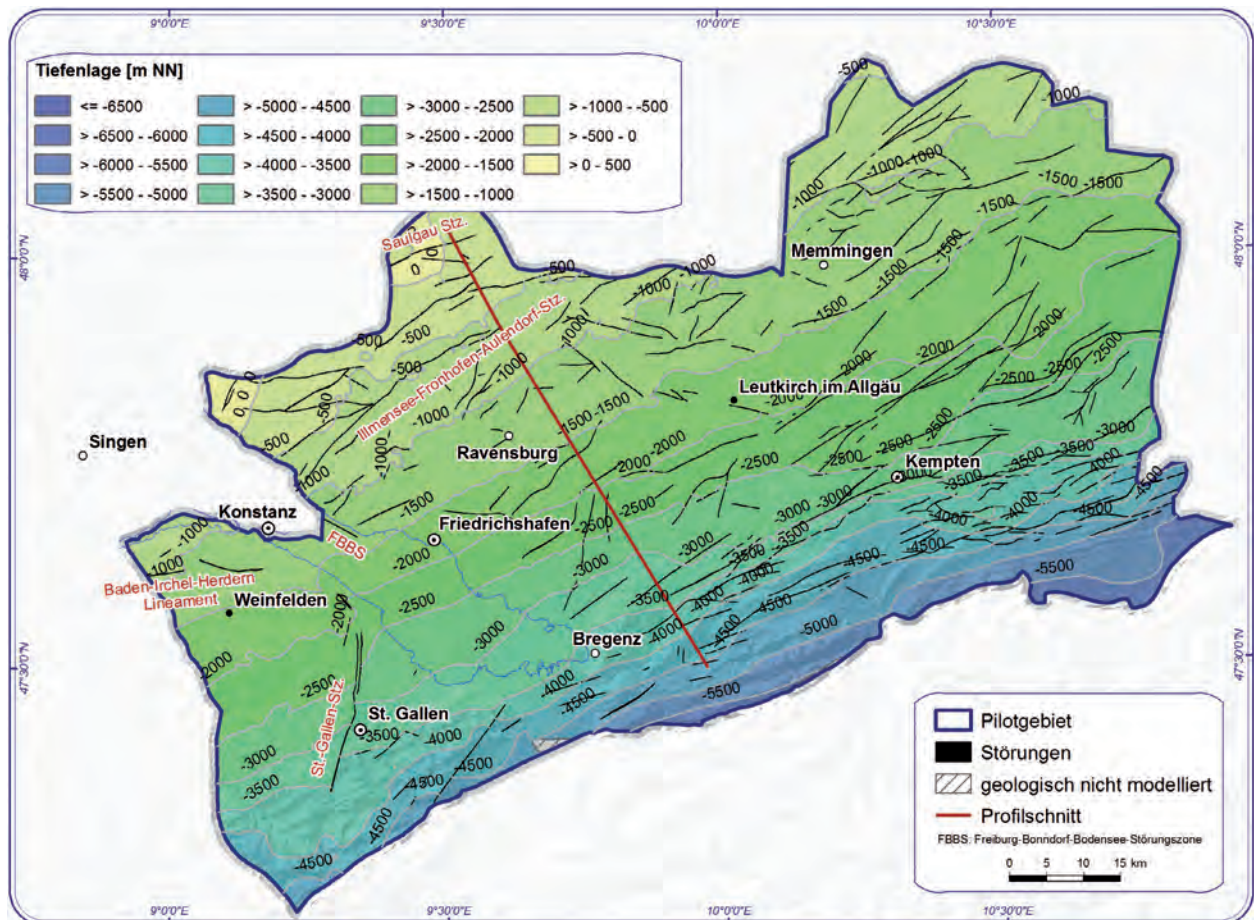


Abb. 3-1: Tiefenlage der Tertiärbasis und Störungsspuren nach den Modellierungsergebnissen.

deren Hängen überliefert, da im Mittleren (0,78–0,12 Ma v. H.) und Späten Pleistozän (vor 120.000 bis vor 11.700 Jahren) die Landschaft im Zuge der großen Vergletscherungen intensiv abgetragen und die Landoberflächen um örtlich mehrere hundert Meter tiefer gelegt sowie das Erosionsbecken des Bodensees ausgeräumt wurden. In der Nacheiszeit (Holozän, seit 11.700 Jahren) verlandeten die meisten vom Schmelzwasser hinterlassenen Seen ganz oder teilweise (z. B. Federsee). Ansonsten veränderten sich die Landschaftsformen unter dem sich ausbreitenden Waldland und der seit etwa 8.500 Jahren in der Region betriebenen Landwirtschaft nur noch wenig.

3.2 Alter, Entwicklung und Tektonik

Das Molassebecken stellt als Flexurbecken ein klassisches Beispiel für ein orogenes Vorlandbecken dar, das im Tertiär den Abtragungsschutt der aufsteigenden Alpen aufnahm. Der Raum für die bis zu über 4.000 m mächtigen Sedimente wurde dabei durch die Auflast der nach Norden auf die mitteleuropäische Kruste aufgeschobenen alpinen Decken geschaffen, durch die der Untergrund im Süden zunehmend nach unten gebogen wurde. In der dabei entstandenen Vorlandsenke begann die Molassesedimentation nahe der Alpen im Eozän (56–34 Ma v. H.), wobei jedoch die ältesten Ablagerungen besonders im Bodenseegebiet von den alpinen Decken noch überfahren wurden. Das Sedimentationsgebiet breitete sich im Oligozän (34–23 Ma v. H.) zunehmend nach Norden aus und erreichte im Miozän (23–5 Ma v. H.) zeitweise Gebiete nördlich des heutigen Donautals (Schwerd et al. 1996, Geyer et al. 2011).

Unmittelbar vor dem Nordrand der Helvetischen und Penninischen Decken der Alpen wurden bis in das Miozän hinein auch die jüngeren Molassesedimente noch von der alpinen Deformation betroffen, dabei gefaltet und teilweise wie ein horizontaler Keil einige Kilometer weit zwischen die weiter nördlich gelegenen, mächtigen, wenig verfestigten Molasseablagerungen geschoben (Trusheim 1961, Bachmann & Müller 1981). Den Nordrand dieser Zone bildet eine nordfallende Aufschiebung, über der die hangenden Molasseschichten flexurartig aufgebogen sind. Das Schichtenfallen erreicht in dieser Aufgerichteten Molasse bis über 40°. Das Liegende der Aufschiebung bildet eine duplexartige Struktur, die zwischen Aufgerichteter Molasse und dem Rand der alpinen Decken als bis zu 15 km breiter Streifen gefalteter und gestörter Molasseablagerungen ausstreicht. Diese tektonisch deformierte Zone wird in Deutschland als Faltenmolasse, in der Schweiz und Österreich als Subalpine Molasse bezeichnet.

Auf seismischen Linien in der Ostschweiz ist innerhalb der Subalpinen Molasse eine Triangelzone und eine südlich angrenzende Schuppenzone unmittelbar vor dem Alpenrand erkennbar (Stäubli & Pfiffner 1991, Berge & Veal 2005, Pfiffner 2009, Sommaruga et al. 2012, Ortner 2015). Die Basis der Falten- bzw. Subalpinen Molasse bildet eine flache Überschiebung von gestörter Molasse über tieferen Molasseschichten. Im Inneren der Triangelzone liegt unmittelbar südlich der nordfallenden Rücküberschiebung („Randunterschiebung“ bei Habicht 1945) eine Zone steil- bis subvertikal stehender, isoklinal verfalteter Schichten. In deren Hangendem fallen die Schichten der mittelländischen Aufgerichteten Molasse ungefähr nach Nordnordwest ein (Habicht 1945, Pfiffner 2009, Pfiffner et al. 2010, Pfiffner 2011, Zaugg & Löpfe 2011). Der Südrand der Triangelzone wird teilweise unmittelbar durch die südfallende Deckenüberschiebung am Alpenrand gebildet, teilweise von einer Frontalen Überschiebung, über der in der Schuppenzone stark verstellte Molasseschichten in südliche Richtungen einfallen (vgl. Abb. 3-2). Nach Pfiffner et al. (1997) wurzeln die nordgerichteten Überschiebungen der Subalpinen Molasse erst an der Nordflanke des Aar-Massivs im Grundgebirge. Wichtige Abscherhorizonte innerhalb der Molasse bilden die Tonmergel der Unteren Meeresmolasse (Pfiffner 2009).

Der größte Teil des Modellgebiets liegt nördlich der Alpinen Deformationsfront, d. h. nördlich der Aufgerichteten Molasse, im Inneren des Molassebeckens. Nördlich des Bodensees wird der nordwestliche Rand des Flexurbeckens in der Schichtlagerung durch die Molasseflexur (Albsüdrandflexur, nahe



Abb. 3-2: Schematische Übersicht zur tektonischen Situation im Bereich der Subalpinen Molasse in der Schweiz. Die Schuppenzone zwischen alpinen Decken und Triangelzone i. e. S. dünnt gegen Nordosten aus, weshalb beide Bereiche in Deutschland traditionell als Faltenmolasse zusammengefasst werden. Als Aufgerichtete Molasse werden dabei die nach Norden verkippten Molasseschichten unmittelbar nördlich der Rücküberschiebung bezeichnet.



des heutigen, erst im Quartär entstandenen Donautals) angezeigt, an der das allgemeine Schichtfallen des mesozoischen Untergrundes über kurze Distanz von etwas weniger als 1° im Gebiet der Schwäbischen Alb im Norden auf etwa 5° nach Süden unter dem Molassebecken zunimmt. Nördlich dieser Flexur wurden nur über begrenzte Zeiträume geringmächtige Sedimente abgelagert, von denen nur noch wenige Erosionsreste erhalten sind. Westlich des Bodensees grenzt das Molassebecken nach Nordwesten an das gleichmäßige mit ca. 4° nach Osten einfallende mesozoische Deckgebirge des Randes und an den sich südlich anschließenden Faltenjura.

Das allgemeine flache Einfallen der mesozoischen Gesteine unter dem Molassebecken und der ältesten Molassesedimente wird dabei von einigen Verwerfungen gestört, die jedoch selten mehr als 100 m Sprunghöhe erreichen. Die längsten Störungen östlich des Bodensees streichen zumeist in geringem Winkel zum Verlauf der alpinen Deformationsfront. Die wichtigsten tektonischen Bruchlinien dieser Zone sind SE-NW und SW-NE streichende Dehnungsbrüche, die sich im Querschnitt als teils nord-, teils südfallende Abschiebungen darstellen. An diesen Störungen wurde das mesozoische Deckgebirge zusammen mit den älteren auflagernden Molassesedimenten versetzt, während die Störungen im Hangenden von jüngeren Sedimenten überdeckt werden. Das Alter der Störungen lässt sich dadurch im Süden in das Oligozän datieren und verjüngt sich offenbar nach Norden bis in das Miozän (Bachmann & Müller 1992). Die Orientierung dieser Brüche schräg zur alpinen Einengung legt nahe, dass sie zunächst als Scherbrüche angelegt, dann aber in einer vorübergehenden Dehnungsphase als Abschiebung reaktiviert wurden (Laubscher 1970). Die wichtigsten dieser Störungen finden sich in der Illensee-Fronhofen-Aulendorf-Störungszone und nördlich davon in der Saulgau-Hauptverwerfungszone. Daneben treten in Oberschwaben kürzere N-S bzw NNW-SSE streichende Störungen auf, die einen größeren Winkel zur alpinen Deformationsfront aufweisen und daher möglicherweise vorwiegend Dehnungsbrüche mit geringer Scherkomponente darstellen.

Das Hauptstrukturelement im nördlichen Schweizer Teilgebiet wird durch zwei ungefähr WSW-ENE und NW-SE bis WNW-ESE verlaufende Störungen gebildet. Sie sind Teil des Baden-Irchel-Herdern-Lineaments bzw. seine östliche Fortsetzung (Müller et al. 2002, Nagra 2008, Roth et al. 2010; die östliche Störung wird in Gmünder et al. (2013) als Homburg-Störung bezeichnet). Dieses Lineament lässt sich in WSW-ENE Richtung von Baden über den Irchel bis Herdern und darüber hinaus in den

verschiedenen Seismiklinien verfolgen (Diebold et al. 1991, Naef et al. 1995, Müller et al. 2002). Es entspricht einer aus verschiedenen Störungssegmenten zusammengesetzten Störungszone am Südrand des Nordschweizer Permkarbon-Trogs (Weiach-Trog; Müller et al. 2002). Im Gebiet LCA-CH haben diese Störungen extensiven Charakter, außerhalb des Modellgebiets nach Westen hin erfolgt ein Übergang zu mehrheitlich kompressiven Strukturen (Müller et al. 2002). An beiden Störungen wird die Schichtenfolge von Basis Mesozoikum bis einschließlich Basis Obere Süßwassermolasse versetzt, bei der östlichen Störung jedoch nicht entlang der gesamten Länge der Störung.

Im zentralen bis östlichen Schweizer Teilgebiet bildet die St.-Gallen-Störungszone die markanteste Struktur. Aus der Interpretation der 2D-Seismik lässt sich diese Störungszone als eine (Sommaruga et al. 2012 (Encl. 21)) oder zwei diskrete NNE-SSW verlaufende Störungen darstellen (Roth et al. 2010, Nagra 2008, Müller et al. 2002). Der Verdacht, dass es sich bei den bestehenden Interpretationen um eine grobe Vereinfachung handelt (Roth et al. 2010), wurde durch die Ergebnisse der im Jahr 2010 durchgeführten, ausgedehnten 3D-Seismikkampagne im Raum St. Gallen bestätigt (Heuberger & Naef 2012, Naef 2013, Wolfgramm et al. 2015). Heuberger & Naef (2012) beschreiben die St.-Gallen-Störungszone als eine bis zu 1 km breite Störungszone, in der neben den steil einfallenden Abschiebungen lokal auch Überschiebungen auftreten. Im südlichen Bereich treten verstärkt kurze Störungen mit geringerem Versatz auf, die oft nur die unteren mesozoischen Einheiten versetzen, und die St.-Gallen-Störungszone eher als Flexurzone erscheinen lassen (Heuberger & Naef 2012, Naef 2013).

Neben diesen Strukturen finden sich im Schweizer Teilgebiet noch weitere Störungen, bei denen es sich in der Regel um eher kurze, oft nur über zwei oder drei Seismiklinien hinweg korrelierbare Abschiebungen handelt. Hierzu zählen Abschiebungen innerhalb der mesozoischen Abfolge. Meist versetzen diese noch die Basis Tertiär, sind jedoch innerhalb der tertiären Einheiten oft nicht mehr kartierbar. Nur selten wurde aus der Seismik ein Versatz der Basis Obere Süßwassermolasse und Basis Obere Meeresmolasse interpretiert. Beispiel hierfür ist eine ca. NW-SE verlaufende Störung wenige Kilometer nordöstlich von Amriswil.

Nordwestlich des Bodensees ist außerhalb des Modellgebiets im mesozoischen Deckgebirge des Hegau und im Grundgebirge des Schwarzwaldes die Freiburg-Bonndorf-Bodensee-Störungszone (FBBS) kartiert, deren vorherrschend NW-SE streichende Störungen bis an den Bodensee reichen.

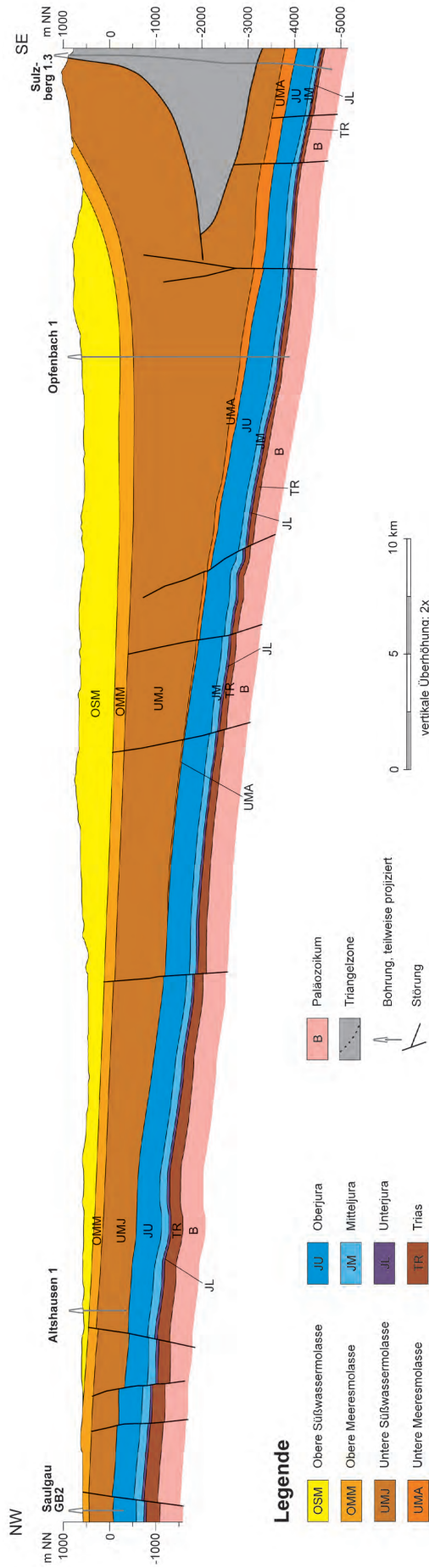


Abb. 3-3: Geologischer Profilschnitt aus dem 3D-Modell für das östliche Modellgebiet (Allgäu – östliches Oberschwaben) aus GeoMol Team (2015) verändert.



Unter dem Bodensee sind daher ebenfalls mehrere etwa NW-SE streichende tieferreichende Störungen anzunehmen, die bislang nicht zuverlässig in den Ergebnissen der geophysikalischen Untersuchungen verortet werden konnten. Einen Hinweis auf solche Störungen geben jedoch verschiedene Schichtverstellungen (bis $< 80^\circ$) in der Molasse nahe der Bodenseeufer. Die Molasseflexur am Südrand der Schwäbischen Alb endet im Hegau an der FBBS, wobei im Vergitterungsbereich beider Strukturen stärkere Verstellungen und lokale Falten und Monoklinen auftreten (z. B. Immendinger Flexur). Südlich der FBBS fällt das mesozoische Gebirge vom Schwarzwaldrand bis unter das Molassebecken annähernd gleichmäßig mit $3-4^\circ$ ein, ohne eine entsprechende Flexur aufzuweisen (Rupf & Nitsch 2008, Geyer et al. 2011).

3.3 Gesteinsabfolge

3.3.1 Quartäre Ablagerungen

Die quartären Ablagerungen des nördlichen Alpenvorlandes sind überwiegend glazial und glazifluvial geprägt. Die ältesten Ablagerungen sind Reste von Geröllsträngen, teilweise linsenartig zu Konglomeraten verfestigt, die sich an und auf den höchsten Aufragungen des Molasseuntergrundes finden. Sie werden nach den in größeren Flächen erhaltenen Vorkommen im Gebiet zwischen Riß und Lech als Deckenschotter bezeichnet und können nach der Höhenlage in mehrere Ablagerungsniveaus untergliedert werden, die bei einer sukzessiven Denudation des Alpenvorlandes terrassenartig erhalten blieben.

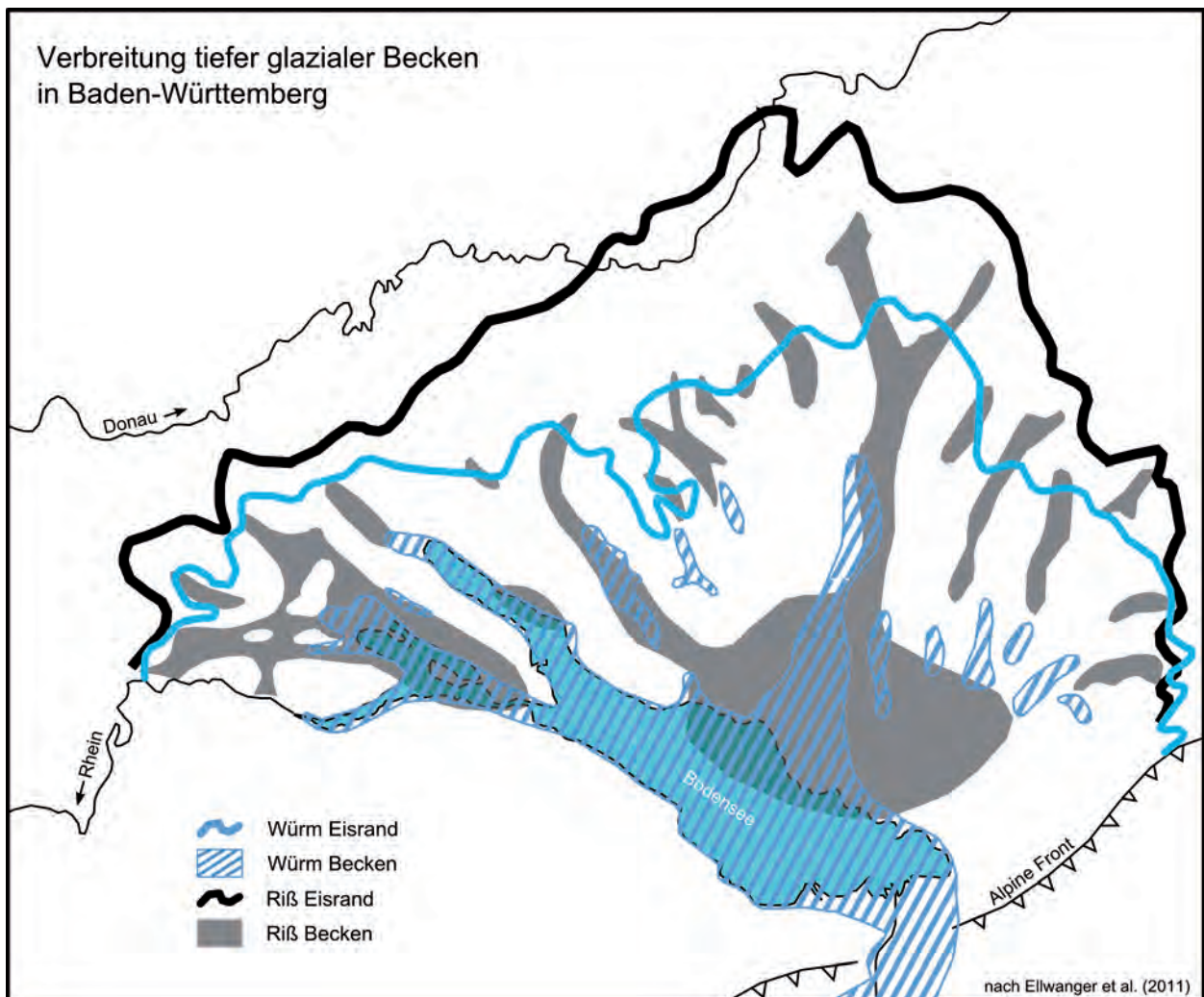


Abb. 3-4: Verbreitung quartärer Becken im Gebiet des pleistozänen Rheingletschers (nach Ellwanger et al. 2011). Die Becken entstanden als subglaziale Erosionsformen und wurden teilweise noch unter Eisbedeckung, in Teilen erst inter- bzw. postglazial mit Seesedimenten oder fluvialen Schottern gefüllt und erreichen Erosionstiefen von oftmals über 100 m (im Bodensee über 400 m).

Aus den Zeiten der großen Vorland-Vergletscherungen sind flächenhaft glaziale Diamikte, glazifluviatile und subglaziale Schotter und Sande sowie Feinsedimente in kleinräumig stark wechselnden Mächtigkeiten überliefert. Unter Alpenrheintal und Bodensee sowie in mehreren davon nach Norden abzweigenden Erosionsbecken wurde die Molasse als Felsuntergrund z.T. mehrere hundert Meter tief ausgeräumt und mit Diamikten, Rutschmassen, Kiesen und Sanden sowie vor allem tonig-schluffigen Seesedimenten gefüllt (vgl. Abb. 3-4). Zwischen diesen Erosionsbecken bleiben die Quartärmächtigkeiten gering und die Sedimente bestehen vorherrschend aus Schottern, Sanden und Diamikten mit geringeren Zwischenlagen von Feinsediment, teils flächenhaft ausgebreitet, teils in erhaltenen subglazialen Akkumulationsformen (Drumlins, Oser, Kameterrassen) oder zum Moränenwall aufgehäuft bzw. gestaucht. An den Hängen der Flusstäler treten pleistozäne Flussterrassen hinzu, deren Gefälle sich häufig mit einer der aus den Endmoränenwällen bekannten Eisrandlagen verbinden lässt. Als jüngste Ablagerungen sind vielfach spätpleistozäne bis holozäne Deckschichten und Torfbildungen in den Talauen anzutreffen.

3.3.2 Tertiäre Beckenfüllung

Unter den quartären Ablagerungen des Alpenvorlandes liegt mit nach Südosten zunehmender Mächtigkeit die tertiäre Beckenfüllung der nördlichen alpinen Vorlandmolasse. Die südlichsten und zugleich ältesten Ablagerungen sind von den Helvetischen und Penninischen Decken der Alpen überschoben worden. Im Gebiet der Aufgerichteten Molasse und Faltenmolasse und in deren nördlich anschließendem Vorland wurden erst ab dem Oligozän zunächst marine, dann fluviolakustrine und im frühen Miozän nochmals vorübergehend marine klastische Sedimente abgesetzt. Die Sedimentation endete im späten Miozän, woraufhin die Molasse seit dem ausgehenden Tertiär und besonders im Pleistozän wieder abgetragen wurde und die höheren Schichten nur noch örtlich erhalten sind. Von den Sedimenten des Molassebeckens sind meist nur die Süßwasserkalksteine und manche kalkig gebundene Sandsteine gut verfestigt, während der Großteil der Sandsteine und Mergelsteine nur eine geringe Verfestigung erfahren hat und nahe der Oberfläche leicht wieder zu lockeren Sanden und Mergeln entfestigt wird.

In Annäherung an den Alpenrand herrschen grobe Sandsteine und Konglomerate („Nagelfluh“) vor, die in einigen Kilometern Abstand im Beckeninneren von Mergel- und Schluffsteinen mit Sandstein-Einschaltungen abgelöst werden. Gebietsweise

treten Kalksteine mit einer Süßwasserfauna auf, die gegen den Nordwestrand des Molassebeckens häufiger werden. Von Norden und Westen wurden ebenfalls konglomeratisch-sandige, jedoch auch stark von umgelagertem Mergelmaterial geprägte Schuttfächer in das Becken geschüttet, die den Rand des Modellgebiets im Nordwesten mit ihren Ausläufern erreichen. Diese Juranagelfluh unterscheidet sich vor allem durch ihren hohen Anteil an jurassischen Gesteinen im Geröllbestand von der Alpinen Nagelfluh im Süden. Die beiden marinen Intervalle in der Schichtenfolge werden als Untere und Obere Meeresmolasse bezeichnet und gehen jeweils über eine geringmächtige und im Bodenseegebiet nur gebietsweise verbreitete Einschaltung aus Sedimenten mit brackischer Fauna, der Unteren bzw. Oberen Brackwassermolasse, in die Untere bzw. Obere Süßwassermolasse über, deren mächtige und eintönige Abfolgen den Hauptanteil der Beckenfüllung stellen. Da sich die beiden Brackwassermolassen im Bodenseeraum lithologisch nur wenig von den jeweils hangenden Süßwasserablagerungen unterscheiden, in die sie oft allmählich übergehen, dagegen mit scharfer, im Fall der Oberen Brackwassermolasse sogar diskordanter Grenze auf den Meeresmolassen liegen, sind sie hier jeweils mit den hangenden Süßwassermolassen zusammengefasst.

Obere Süßwassermolasse

Die jüngsten tertiären Ablagerungen des Molassebeckens sind Mergel, Sandsteine, Konglomerate und Kalksteine der Oberen Süßwassermolasse. Sie überlagern im Modellgebiet unmittelbar die Obere Meeresmolasse (einschließlich Albstein). Lediglich entlang eines bis etwa 20 km breiten Streifens, der sich vom Hegau südlich des Donautals in nordöstlicher Richtung bis etwa Ulm erstreckt und den Nordwestrand des Modellgebiets streift, sind geringmächtige Sandsteine, Kiessande und Mergel der Oberen Brackwassermolasse erhalten.

Die Sedimente der Oberen Süßwassermolasse (OSM) bestehen aus Flussablagerungen einer Schwemmlandebene, die sich von Ost nach West über das gesamte Vorlandbecken ausgebreitet hat und deren Ablagerungen als OSM-Glimmersande bezeichnet werden. Die Abfolge wird von grauen und braunen bis ockergelben sandigen Mergeln der Auenbereiche und Rinnenfüllungen aus glimmerführenden, sehr schwach verfestigten Sandsteinen der OSM-Glimmersande aufgebaut. Deren Fortsetzung wird in der Nordschweiz als Glimmersandstein bezeichnet und ist hier auf eine etwa 20 km breite Talfüllung („Glimmersandrinne“) nördlich etwa einer Linie südlich Kreuzlingen – Frauenfeld



beschränkt (Gander 2004, Zaugg & Geyer 2008). Näher zum Alpenrand hin treten vor allem Konglomerate und Sandsteine der Alpinen Nagelfluh auf (Hörnli-Schüttung, Adelegg-Schichten). Sie sind, ähnlich wie die Ablagerungen der Unteren Süßwassermolasse, als Schuttfächersedimente der sich hebenden Alpen entstanden (Müller et al. 2002). Nach Norden werden die Schuttfächerseimente feinkörniger und verzahnen sich mit den Sedimenten der Glimmersandschüttung (Geologische Übersichtskarte 1:200 000 auf Zaugg & Geyer 2008). Auch Tuffe und Bentonite können innerhalb der Oberen Süßwassermolasse vorkommen, z. B. beschreibt Hofmann (1959, 1975) aus dem nördlichen Kanton Thurgau (westlicher Seerücken und, knapp westlich des Pilotgebiets, Wellenberg östlich von Frauenfeld) Tufflagen, deren Ursprung er von vulkanischen Tätigkeiten im Unterseegebiet und dem Hegau ableitet.

Obere Meeresmolasse der Schweiz

Gesteine der Oberen Meeresmolasse (OMM) sind im Schweizer Teilgebiet hauptsächlich in der gefalteten und aufgerichteten mittelländischen Molasse in einem subparallel zum Alpenrand verlaufenden Streifen aufgeschlossen. In der Subalpinen Molasse treten sie nur im Südosten des Schweizer Teilgebiets im Liegenden einer Überschiebung zutage. Sie wurden in mehreren Transgressions-Regressionenzyklen des vordringenden Meeres abgelagert und bestehen aus faziell unterschiedlichen marinen Sandsteinen, in die vor allem am südlichen Beckenrand lokal fluvio-terrestrische und limnische Sedimente eingeschaltet sind (Büchi 1975, Keller 1992). Nach dem Geologischen Atlas 1:25 000 (GA25) (Blätter St. Gallen – Appenzell (Ludwig et al. 1949), Rorschach (Saxer 1964), Flawil – Herisau – Brunnadern – Schwellbrunn (Ludwig 1930), Nesslau (Zaugg et al. 2011) und Ricken (Löpfe et al. 2012)) stehen marine Ablagerungen der Oberen Meeresmolasse im Bereich der aufgerichteten mittelländischen Molasse nur östlich des Gebiets um Herisau an. Im deutschen Anteil des Modellgebiets ist die Obere Meeresmolasse in vier Formationen gegliedert, von oben nach unten in die Steinhöfe-, Baltringen-, Kalkofen- und Heidenlöcher-Formation (s. u.).

Steinhöfe-Formation der Oberen Meeresmolasse

Der oberste Abschnitt der Oberen Meeresmolasse wird von sandigen Mergelsteinen und mergeligen Feinsandsteinen eingenommen, die im unteren Teil noch Glaukonit und Muscheln führen können, beides nach oben allmählich verlieren und in hellgraue

Sandsteine übergehen. Sie werden oben von geringmächtigen rotbraunen oder bunten Mergeln (Helicidenmergel) und einer pedogenen Kalksteinkruste von bis zu 4 m Mächtigkeit (Albstein) abgeschlossen. Örtlich sind auch in tieferen Lagen der Formation bereits rote und bunte Farben entwickelt. Der höhere Abschnitt der Steinhöfe-Formation ist meist fossil-leer oder enthält nur spärliche Süßwasserfossilien und umgelagerte Landfauna. In der älteren Literatur wurden die im Bodenseeraum als ‚Deckschichten‘, in Bayern z. T. als ‚Feinsandserie‘ bezeichneten Ablagerungen der Steinhöfe-Formation teilweise noch mit dem Grobsandstein der Baltringen-Formation als ‚Baltringer Schichten‘ zusammengefasst.

Baltringen-Formation der Oberen Meeresmolasse

Über den grauen Sandmergeln der Kalkofen-Formation bzw. der Luzern-Formation folgen über einer Erosionsdiskordanz graugrüne glaukonitische Grobsandsteine, gebietsweise auch Geröllsandsteine mit konglomeratischen Lagen, die häufig Austernschill oder Bryozoen führen. Feinsandsteine sind lokal ebenfalls angetroffen worden, treten aber meist in den Hintergrund. Diese in Deutschland als ‚Baltringer Sandstein‘ bekannte Einheit wird heute als Baltringen-Formation von den hangenden mergelig-feinsandigen ‚Deckschichten‘ der Steinhöfe-Formation abgegrenzt. An der Basis der Einheit wird nach den Bohrbefunden zunächst ein erosives Paläorelief aufgefüllt, wobei mehrere Kilometer breite und bis zu 10 m tiefe Rinnen zu kleinräumigen Mächtigkeitsschwankungen führen.

Kalkofen- und Heidenlöcher-Formation der Oberen Meeresmolasse

Die Obere Meeresmolasse setzt im Bodenseeraum über einer flachen Erosionsfläche mit massiven marinen Sandsteinen ein, die durch einen oft deutlichen Gehalt an Glaukonit im frischen Bruch grünlichgrau wirken. Die Sandsteine beginnen gebietsweise mit Grobsanden und teilweise mit mehreren Metern mächtigen Feinkiesbänken, bestehen jedoch überwiegend aus schräggeschichteten Mittel- und Feinsanden mit grobsandigen Einschaltungen. Schillanreicherungen gaben teilweise Anlass zu bankartigen kalkigen Zementationszonen („Muschelbänke“, „Cardiumbänke“). Diese am Bodensee und in Oberschwaben als Heidenlöcher-schichten bzw. Heidenlöcher-Formation, östlich der Iller als OMM-Basissande bezeichnete, fast rein sandige Abfolge wird nach oben von Sandstein-Mergelstein-Wechselfolgen und grauen sandigen Mergelsteinen abgelöst, die in Deutschland als

Kalkofen-Formation angesprochen werden. Besonders im unteren Teil der Kalkofen-Formation können dabei nochmals mehrere Meter mächtige Sandsteine in der Fazies der liegenden Heidenlöcher-Formation eingeschaltet sein.

Untere Süßwassermolasse und Untere Brackwassermolasse

In den nordwestlichen Teilen des Molassebeckens folgen als älteste Molasseeinheit über dem Mesozoikum (bzw. der Bohnerz-Formation, soweit entwickelt) mehrere hundert bis mehrere tausend Meter mächtige Süßwasserablagerungen in fluvialer und lakustriner Fazies, die als Untere Süßwassermolasse (USM) bezeichnet werden.

Der überwiegende Teil der Unteren Süßwassermolasse besteht aus monotonen bunten und grauen, oft feinsandigen Mergelsteinen mit Merkmalen pedogener Überprägung, in die Rinnenfüllungen und linsenartige Schichtbänke von Fein- bis Mittelsandsteinen, untergeordnet auch Grobsandsteinen eingeschaltet sind. Die Sandsteine enthalten neben Quarz viel Feldspat und Glimmer, woraus sich der Name Bunte Granitische Molasse für diese Einheit ableitet. Die unteren 10–100m können lokal in fluviolakustriner Fazies als Wechselfolgen von vorherrschend grauen Mergelsteinen mit Kalkstein und Kalksandstein-Bänken ausgebildet sein und werden dann in Deutschland als USM-Süßwasserkalke bezeichnet. In geophysikalischen Bohrlochmessungen, insbesondere im Widerstandslog, zeichnet sich dabei ein gleichmäßiger oberer Abschnitt von einem unregelmäßigeren unteren Teil ab. Das untere Logintervall ist vielfach durch eine bis 20m mächtige hellgraue Kalksandsteinabfolge gegliedert, den USM-Hauptsanden. Unterhalb dieser USM-Hauptsande treten im Illergebiet untergeordnet Anhydritknollen in den bunten Mergelsteinen auf, die oberhalb davon nur noch lokal und vereinzelt belegt sind und im oberen Logintervall fehlen. Nach den spärlichen Fossilfunden (v. a. Charophytenresten) ist die Oligozän-Miozän-Grenze in der Nähe dieser Intervallgrenze anzunehmen, lässt sich aber anhand der Lithologie allein nicht sicher korrelieren.

In der Schweiz ist das Liegende heterogen aufgebaut; Molasse rouge in Verzahnung mit verschiedenen Schuttfächersedimenten. Über der Oligozän-Miozän-Grenze tritt die Formation der Granitischen Molasse auf.

In Annäherung an den heutigen Alpenrand, insbesondere in der Aufgerichteten Molasse und der Subalpinen bzw. Faltenmolasse, schalten sich zunehmend geröllführende Lagen in die

Süßwasserablagerungen ein und leiten in die Schuttfächerfazies der Alpenen Nagelfluh (Somersberg-, Speer-, Gäbris-, Kronberg- u. a. Schuttfächer in der Schweiz, teilweise Altersäquivalent zur Oberen Meeresmolasse) über. Konglomerate, Sandsteine und Mergel der Unteren Süßwassermolasse sind beispielsweise im Süden des Schweizer Teilgebiets in der Subalpinen Molasse sowie im südlichsten, aufgerichteten Teil der mittelländischen Molasse aufgeschlossen. In der Tiefbohrung St. Gallen (SG-GT1) wurde die Untere Süßwassermolasse im Verschubbereich der Triangelzone durchteuft.

Gegen den nördlichen Beckenrand gehen die fluviatilen Ablagerungen der Bunten Granitischen Molasse im westlichen Bodenseegebiet in bunte, oft sandige oder geröllführende Mergel mit Konglomerat- und Sandsteinrinnen über, deren Geröllbestand überwiegend aus Juragesteinen aus dem NW stammt und die daher als Ältere Juranagelfluh bezeichnet werden. Zwischen den als Alluvialfächer ausgebreiteten Vorkommen der Älteren Juranagelfluh sind auch hier Kalksteinbänke und Mergel der USM-Süßwasserkalke ausgebildet.

Südöstlich etwa einer Linie Friedrichshafen – Bad Waldsee wird die Untere Süßwassermolasse von älteren Molasseeinheiten unterlagert. Zwischen Tettnang und Memmingen ist in einem 20–40 km breiten, SW-NE streichenden Streifen eine bis über 30m mächtige Abfolge von grauen und grünen Tonsteinen, Mergelsteinen, Kalk- und Dolomitsteinbänken sowie Sandsteinlagen ausgebildet, die Brackwasserfossilien führen und als Untere Brackwassermolasse einen Ausläufer der bayerischen Unteren Cyrenenschichten darstellen (Haus 1960).

Untere Meeresmolasse

Das Verbreitungsgebiet der Unteren Meeresmolasse wurde im Süden in stärkerem Maße als jenes der jüngeren Molasseeinheiten von den alpinen Decken überschoben, weshalb nur dessen nördlicher Anteil im Gebiet der ungefalteten Molasse vorhanden ist. Im Schweizer Teilgebiet ist die Untere Meeresmolasse in Schuppen der Subalpinen Molasse aufgeschlossen, im deutschen Teilgebiet in der bayerischen Faltenmolasse. Die Abfolge setzt sich aus marinen Tonmergelsteinen mit Sandstein-Einschaltungen zusammen, die oben von einer bis mehrere zehn Meter mächtigen Sandsteinabfolge (Bausteinschichten bzw. Horw-Sandstein) abgeschlossen wird. Im Schweizer Teilgebiet wurde die Untere Meeresmolasse im Bereich der autochthonen mittelländischen Molasse einzig in der Tiefbohrung St. Gallen (SG-GT1) erbohrt. Nach Norden



keilen die Ablagerungen der Unteren Meeresmolasse aus (Büchi et al. 1965a, 1965b, Lemcke 1988).

Bausteinschichten der Unteren Meeresmolasse

Den oberen Abschnitt der Unteren Meeresmolasse bildet im südlichen Teil des Molassebeckens eine Abfolge von grauen marinen Sandsteinen mit geringen Einschaltungen von sandigen Tonmergelsteinlagen. Diese Sandsteinabfolge wird in Deutschland als Bausteinschichten bezeichnet, in der Schweiz entspricht dieser Fazies der Horw-Sandstein. Die Einheit greift über das Verbreitungsgebiet der Tonmergelschichten nach NW aus und keilt erst in 40–60 km vom heutigen Alpenrand unter der Unteren Süßwassermolasse aus. In Annäherung an den Alpenrand treten in den Sandsteinen Gerölllagen auf. Der Horw-Sandstein wird in Zaugg & Löpfe (2011) als gut sortierter, fein- bis mittelkörniger Kalksandstein beschrieben, der in massiger oder plattiger Fazies, mit Glimmern und Pflanzenresten auf den Schichtflächen, auftreten kann.

Tonmergelschichten der Unteren Meeresmolasse

Im Bodenseeraum beginnt die Molassesedimentation über dem Mesozoikum mit marinen Sedimenten aus dem frühen Oligozän, die als Untere Meeresmolasse bezeichnet werden. Im Südosten des Modellgebiets besteht der untere Teil der Unteren Meeresmolasse aus grauen Tonmergel- und Mergelsteinen, die Karbonatbänke und abschnittsweise Sandsteine oder Sandmergelsteine führen. Sie werden in Deutschland als Tonmergelschichten bezeichnet und entsprechen dem Grisigen-Mergel in der Schweiz. In Zaugg & Löpfe (2011) werden die Grisigen-Mergel als eintönige Serie von grauen siltigen Tonmergel- bis Siltsteinen beschrieben, die im oberen Bereich mit nach oben zunehmender Häufigkeit geringmächtige, oft schräggeschichtete Sandsteinlagen enthalten. Die Mergel können Pflanzenhäcksel sowie horizontweise Muscheln, Fischschuppen und -zähne (Zaugg & Löpfe 2011) enthalten. Die Tonmergelschichten keilen nach NE in geringer Distanz vom Alpenrand aus und sind im Osten des Gebiets nur in der bayerischen Faltenmolasse zutage erschlossen. Im Allgäu bildet ein bis 15 m mächtiger bituminöser Tonstein, der als Fischschiefer bekannt ist, die Basis der Tonmergelschichten.

Bohnerz-Formation

Karsthohlräume und -schloten in den Kalksteinen des Oberjura sind lokal mit roten oder braunen Tönen

bis Tonsteinen gefüllt, die häufig limonitische Pisotide (Bohnerz) und Lösungsreste aus dem Jurakalkstein (z. B. Kieselfossilien, Kalkstein-Reliktbrocken) führen. Örtlich ist feinkörniger Quarzsand eingelagert. Büchi et al. (1965b) beschreiben Spaltenfüllungen von grünen, beige und rötlichbraunen Tönen aus den Bohrungen Berlingen-1 und Kreuzlingen-1 und vermuten hier eine Bolus-Tonlage unterhalb der Molassesedimente. Ähnliche Bohnerztöne bilden in Oberschwaben gebietsweise eine bis zu 20 m mächtige Schicht über den Oberjura-Kalksteinen, die kleinräumig auskeilen kann. Wo sie in Bohrungen angetroffen wurden, werden sie mit der Bohnerz-Formation der Schwäbischen Alb zusammengefasst. Ihr Alter ist unter dem Molassebecken nicht direkt datiert (prä-Oligozän, post-Tithonium), die ältesten datierten Bohnerztöne der Schwäbischen und Fränkischen Alb erbrachten jedoch Fossilien aus Paläozän und Eozän.

3.3.3 Mesozoisches Deckgebirge

Gesteine der Kreidezeit wurden im Modellgebiet nicht erbohrt. Unter der Molasse liegen unmittelbar Sedimente der Jurazeit. Die Gesteine des Oberjura sind allerdings selbst in benachbarten Bohrungen oft in unterschiedlichen stratigraphischen Niveaus gekappt, weshalb die Basis der Molassesedimente wahrscheinlich ein erosives Paläorelief mit Höhenunterschieden von mehreren Zehnern Metern überdeckt, dessen Entstehung mit lang andauernder Erosion und Verkarstung der Oberjura-Kalksteine einherging. Alttertiäre Karstspaltenfüllungen aus rotem und buntem verschwemmtem Bodenmaterial sind besonders aus den Oberjura-Kalksteinen der Oberschwäbischen Tiefbohrungen bekannt. In den nördlich angrenzenden Aufschlussgebieten konnten solche Karstablagerungen durch Fossilien datiert werden und belegen überwiegend oligo- bis miozäne Einschwemmungen, in wenigen Fällen jedoch bereits eozänes Alter. Müller et al. (2002) vermuten für das Gebiet der Nordschweiz Abtragungsbeträge von rund 500 m Gestein, weshalb eine einstige Ablagerung kretazischer Gesteine, gefolgt von deren vollständigen Erosion noch vor dem Eozän, nicht ausgeschlossen werden kann.

Unter den wenig verfestigten tertiären Ablagerungen liegen dementsprechend stark verfestigte Sedimente aus dem Jura und der Trias, die eine südliche Fortsetzung der im Gebiet der Schwäbisch-Fränkischen Alb und ihres Vorlandes sowie des Juragebirges ausstreichenden Ablagerungen darstellen. Ablagerungen der Frühen Trias fehlen im Bodenseegebiet, die Sedimentation setzt im Nordwesten des Gebiets mit terrestrischen Sedimenten in Buntsandsteinfazies ein, die mit dem Oberen Buntsandstein

und tiefstem Muschelkalk des nördlich anschließenden Germanischen Beckens korrelieren und damit aus dem Anisium (Mittlere Trias) stammen dürften (Büchi et al. 1965a, Lemcke 1988, Geyer et al. 2011). Marine Karbonate und Evaporite herrschen im übrigen Anisium und frühen Ladinium als Sedimente vor und werden als Muschelkalk vom wiederum fast durchgehend terrestrisch entwickelten Keuper unterschieden, dessen Ablagerungen die übrige Trias vom Späten Ladinium bis in das Rhätium repräsentieren. Marine Ablagerungen des Rhätium sind als Oberer Keuper allerdings nur in Teilen des Bodenseegebiets erhalten und keilen östlich von Ravensburg und Biberach sowie nordwestlich von Schaffhausen und Tuttlingen aus. Die jurassische Entwicklung ist durchgehend marin, beginnt mit einer Transgression im Hettangium und endet mit Kalksteinen aus dem Tithonium (Schneider 1962, Lemcke 1988).

Schwäbische Fazies über der Impressamergel-Formation/dem Effingen-Member (Oberjura-Aquifer)

Die Ablagerungen des Oberjura treten im Bodenseegebiet in zwei stark unterschiedlichen Faziesausbildungen auf, einer Schwäbischen Fazies nördlich etwa einer Linie Markdorf – Ravensburg – Leutkirch – Kaufbeuren und einer Helvetischen Fazies südlich davon (vgl. Abb. 3-5), die auch hydrogeologisch stark unterschiedliche Eigenschaften besitzen (Schneider 1962, Meyer & Schmidt-Kaler 1989, Huwiler 2009). Die Fortsetzung der Faziesgrenze südwestlich des Bodensees ist bisher nicht näher bekannt, da aus diesem Raum keine hinreichend tiefen Bohrungen vorliegen, ist aber südöstlich von Kreuzlingen anzunehmen (Schneider 1962, Büchi et al. 1965a). Möglicherweise liegt die Tiefbohrung St. Gallen nahe am Übergangsbereich, da neben der überwiegenden schwäbischen Fazies darin im tieferen Teil auch dunkelgraue Kalksteine auftreten (Wolfgramm et al. 2014, 2015).

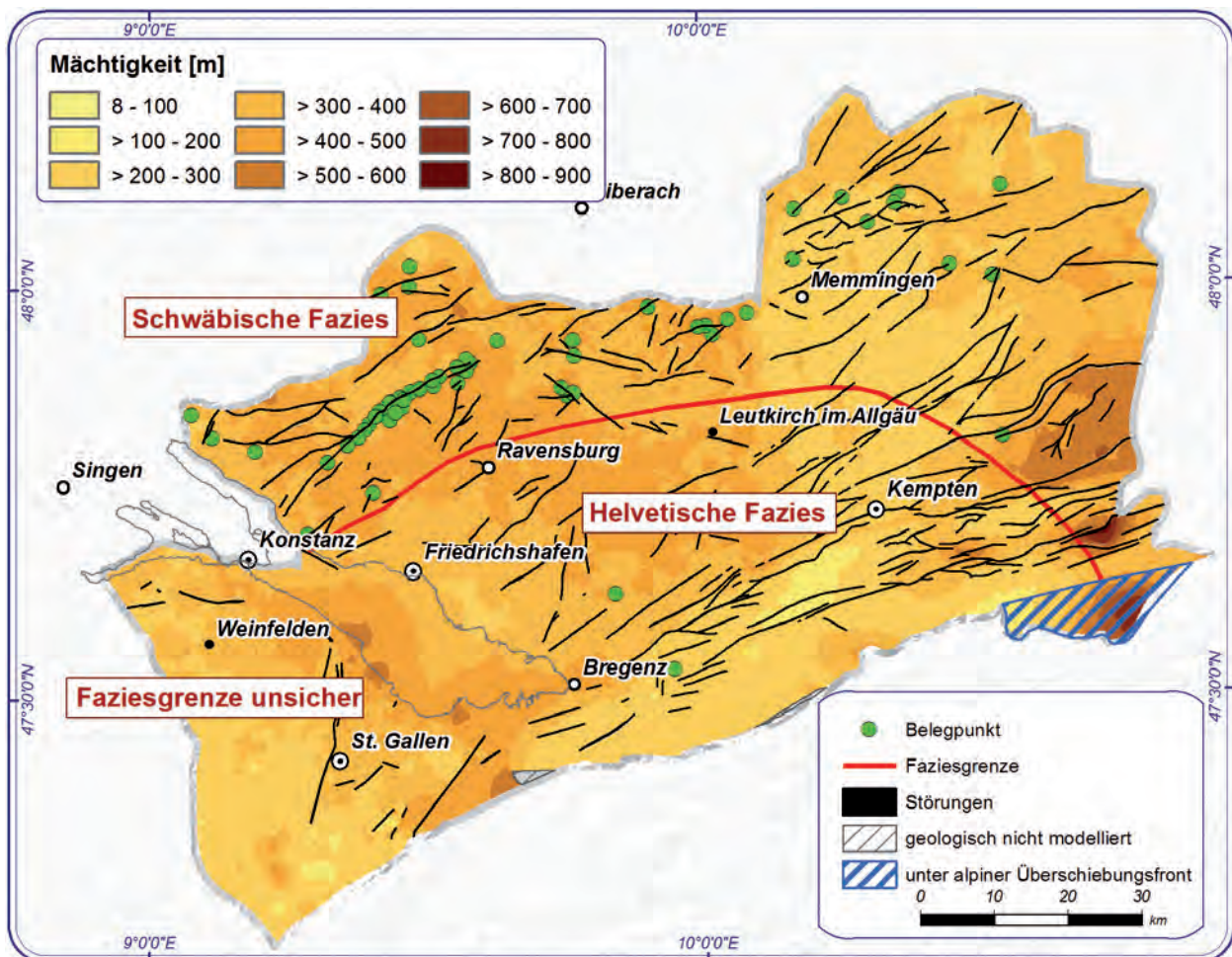


Abb. 3-5: Mächtigkeit des Oberjura nach den Modellierungsergebnissen und ungefähre Lage der Faziesgrenze von Schwäbischer Fazies (helle, teilweise biogene Kalksteine und Mergelsteine) zu Helvetischer Fazies (dunkle, bituminöse Kalk- und Mergelsteine) nach den Bohrbefunden. Südwestlich des Bodensees konnte die Faziesgrenze anhand der bisherigen Bohrungen noch nicht verortet werden.



In der Schwäbischen Fazies besteht der Oberjura vorwiegend aus grauen bis hellgrauen, auch weißgrauen, gelegentlich bräunlichen Kalksteinen und grauen Mergelsteinen. Über der basalen Impressamergel-Formation folgen dabei zunächst 20–30 m gut gebankte Kalksteine (Wohlgeschichtete-Kalke-Formation), auf die nochmals ein 25–35 m mächtiges Paket aus Mergelsteinen mit Kalksteinbänken (Lacunosamergel-Formation) folgt. Den Hauptteil des Oberjura machen dann wiederum gebankte und massige Kalksteine aus, wobei mit den oft kleinräumigen Fazieswechseln zwischen gebankter Fazies (Untere-Felsenkalke-, Obere-Felsenkalke- und Liegende-Bankkalke-Formation) und Massenkalkfazies (Massenkalk-Formation) stets auch eine erhebliche Mächtigkeitsänderung einhergeht, da in den massigen und teilweise dolomitisierten Schwamm-Mikroben-Biohermen die altersgleichen Schichten deutlich mächtiger werden. Die Massenkalkfazies setzt teilweise schon unmittelbar über den Impressamergeln, häufiger jedoch in den höheren Lacunosamergeln oder Unteren Felsenkalke ein. Die Massenkalk setzen sich lokal bis an die Molassebasis fort, gehen aber häufig im oberen Teil wieder in die geschichtete Fazies über, wobei der Übergang im Niveau der Liegenden-Bankkalke-, der Zementmergel- oder der Hangenden-Bankkalke-Formation erfolgen kann. Gelegentlich sind die Mergelsteine der Zementmergel-Formation auch im Liegenden wie im Hangenden von Massenkalken begleitet. Da sie ein sedimentäres Paläorelief über bzw. zwischen den Biohermen auffüllen, schwankt ihre Mächtigkeit kleinräumig stark. Im östlichen Oberschwaben ersetzt die Mergelfazies zudem teilweise die Fazies der Liegenden Bankkalke, weshalb die im Westen faziell getrennten Schichtniveaus hier zu einer ungegliederten Mergelstetten-Formation zusammengefasst werden. Das Alter dieser Abfolge umfasst das gesamte Kimmeridgium und die ältesten Teile des Tithonium (in der Hangende-Bankkalke-Formation).

Die Kalksteine des Oberjura sind besonders im Übergangsbereich zwischen Bank- und Massenkalkfazies lokal verkarstet. Die Karsthohlräume wurden in den bisherigen Bohrungen teils wassergefüllt, teils mit Lehm oder Bohnerzton verfüllt angetroffen, nahe der Molassebasis z. T. auch mit eingeschwemmtem Molassematerial.

Impressamergel-Formation (Wildeg-Formation der Schweiz)

Die Impressamergel-Formation (D) bzw. die Wildeg-Formation (CH) besteht in ihrem Hauptteil aus grauen bis schwarzgrauen Mergelsteinen mit

mergeligen Kalksteinbänken. Im oberen Teil schließen sich die Kalksteinbänke dichter zusammen (Bimammatusschichten) und gehen nach Südwesten zunehmend in Bankkalke mit geringen Mergelzwischenlagen über (Hornbuck- und Küssaburg-Member der Villigen-Formation in der Schweiz). Die Basis bildet ein 1–2 m mächtiger glaukonitreicher und z. T. feinsandiger Mergelsteinhorizont (Glaukonitsandmergel), dessen südlichstes Vorkommen bislang aus der Tiefbohrung St. Gallen bekannt wurde (Wolfgramm et al. 2014, 2015). Das Alter der Impressamergel-Formation umfasst das Mittlere und Späte Oxfordium. Frühes Oxfordium ist in diesem Raum nicht nachgewiesen und fehlt oder ist in den fossilarmen Glaukonitsandmergeln kondensiert.

Oberjura in Helvetischer Fazies

Im südlichen Oberschwaben und unter dem östlichen Bodensee werden die hellen Kalksteine des Schwäbischen Weißjura von dunkel- bis schwarzgrauen bituminösen Gesteinen abgelöst, die in ihrer faziellen Ausbildung dem Oberjura der Helvetischen Decken entsprechen (Schneider 1962, Geyer et al. 2011). Der Fazieswechsel zeigt sich im Übergangsbereich durch nach Südosten rasch zunehmenden Bitumengehalt (mit Farbwechsel von hellen zu dunklen Grautönen) und allmählich zunehmende Bankmächtigkeiten, sowie im Aussetzen der Schwamm-Mikroben-Bioherme. Der größere Teil der Abfolge wird von den dickbankigen bituminösen Kalksteinen der Quinten-Formation eingenommen, in der sich als einzige Gliederungsmöglichkeit ein mehrere Meter mächtiges ‚Mergelband‘ (Mittlere Quinten-Formation) als Fortsetzung der tonigen Einschüttungen der Lacunosamergel abzeichnet. Während die geophysikalischen Bohrlochmessungen der nördlichsten Bohrungen in dieser Fazies noch Anklänge an die Loggliederung der Schwäbischen Fazies zeigen, sind die Logs der südlichen Bohrungen nicht mehr weiter gliederbar. Über der Quinten-Formation, die das Kimmeridgium und frühe Tithonium repräsentiert, ist nahe am Alpenrand noch eine Abfolge aus Mergelsteinen mit Kalksteinbänken erhalten, die Zementstein-Formation, deren tithonische Alter keine heute erhaltenen Äquivalente mehr in der Schwäbischen Fazies aufweisen.

Als Äquivalent der Impressamergel liegt unter der Quinten-Formation die Schilt-Formation. Sie besteht aus grauen Mergelsteinen mit Kalksteinbänken und umfasst offenbar auch Ablagerungen aus dem Frühen Oxfordium, das in der Schwäbischen Fazies in den basalen Glaukonitsandmergeln kondensiert ist oder fehlt.

Mitteljura

Der Mitteljura besteht überwiegend aus einer Abfolge von Tonsteinen, in die sich etwa in der Mitte in der östlichen Hälfte des Bodenseeraumes Sandsteine einschalten und die teilweise eisenoolithische Kalksteinbänke und tonige Eisenoolithe führen (Schneider 1962, Geyer et al. 2011). Die Gesteine sind vorwiegend dunkelgrau bis schwarzgrau gefärbt. Hellgraue Farben beschränken sich weitgehend auf die sandigen Einschaltungen. Mithilfe von geophysikalischen Bohrlochmessungen, insbesondere Widerstands- und Gammalog, lassen sich die aus dem Vorland und Untergrund der Schwäbischen Alb bekannten Formationen des Mitteljura bis an den Bodensee gut unterscheiden, wenngleich die Mächtigkeit der Einheiten nach Süden rasch auf oft nur wenige Meter abnimmt.

Der Mittlere und Obere Mitteljura nimmt zusammen nur etwa die Hälfte der Gesamtmächtigkeit oder weniger ein und besteht wieder vorherrschend aus Tonsteinen, die nun stärker mit meist eisenoolithischen Kalksteinbänken wechsellagern. Sandige Tonsteine und geringe Sandstein-Einschaltungen finden sich nur im unteren Teil des Mittleren Mitteljura und setzen dann nach oben aus. Die unteren 90 bis 120 m des Mitteljura nimmt die Opalinuston-Formation (Opalinus-Ton in der Schweiz; vgl. Naef 2008, Franz & Nitsch 2009) ein, die überwiegend aus ungegliederten, teilweise schluffigfeinsandigen Tonsteinen besteht und besonders in geophysikalischen Bohrlochmessungen eine leicht erkennbare und sichere Orientierung erlaubt. Die Tonsteine werden in ihrem obersten Abschnitt sandig und westlich etwa einer Linie Meßkirch-Kreuzlingen von ähnlichen dunkelgrauen Tonsteinen überlagert, in die jedoch Kalksteinbänke und dünne Sandsteinlagen eingeschaltet sind (Achdorf-Formation in Baden-Württemberg, in der Schweiz Teil der Passwang-Formation). Nach Westen und Osten schalten sich rasch mächtiger werdende Sandmergelsteine und Sandsteine ein, in denen lokal eisenoolithische Horizonte auftreten können (Eisensandstein-Formation: Franz & Nitsch 2009, Geyer et al. 2011, Hauenstein- und Sissach-Member in der Schweiz: Burkhalter et al. 1997, Naef 2008, Wolfgramm et al. 2014, 2015).

Unterjura

Auch die Ablagerungen des Unterjura nehmen nach Süden rasch in ihrer Mächtigkeit ab (Schneider 1962, Geyer et al. 2011). Nördlich des Bodensees lassen sich auch hier die Formationen des Schwäbischen Albvorlandes in geophysikalischen Bohrlochmessungen nach Süden verfolgen, wobei

sich insbesondere die bituminösen Ton- und Mergelsteine der Posidonienschiefer-Formation und die darüber folgenden Kalksteinbänke und Mergelsteine der Jurensismergel-Formation des Oberen Unterjura überall gut erkennen lassen. Auch der Mittlere Unterjura ist bis nach Oberschwaben gut in eine hangende Amaltheenton-Formation und eine liegende, oft nur wenige Meter mächtige Numismalmergel-Formation zu gliedern. Diese sandige Randfazies besteht vorwiegend aus hellgrauen Fein-, Mittel- und lagenweise Grobsandsteinen, die meist kalkig zementiert sind und zwischen die schwarz- bis dunkelgraue Tonsteine eingeschaltet sind. Im nördlichen Oberschwaben sind daher häufig noch Tonsteine der Obtususton-Formation über der sandigen Randfazies zu erkennen, weiter südlich reicht die Sandfazies bis in den Mittleren Unterjura, sodass im Allgäu die Posidonienschiefer-Formation unmittelbar darüber folgt. Eine Aufteilung des tiefsten Abschnitts („Lias Alpha“ der älteren Literatur) in Pylonotenton-, Angulatensandstein- und Arietenkalk-Formation wird erst im Donauebiet erkennbar. Im nördlichen Schweizer Teilgebiet wird der untere Lias ebenfalls von unterschiedlich kalkigen Sandsteinen, die tonflaserig sein können, und von Kalkareniten gebildet (Albert & Bläsi 2001). Darüber folgen Mergel und Tonsteine mit Kalkbänken (Naef 2008). Im zentralen und südlichen Schweizer Teilgebiet gibt es keine Bohrungen, die bis in den Lias abgeteuft wurden.

Mittel- und Oberkeuper

Der Obere Keuper ist nicht überall vorhanden und erreicht im Modellgebiet nirgends über 16 m Mächtigkeit (Stoll-Steffan 1987). Es handelt sich um kieselige hellgraue Sandsteine, über denen in den mächtigeren Profilen noch einige Meter grüne bis graue, oft sandige Tonsteine folgen.

Der Mittlere Keuper besteht überwiegend aus bunten, vielfach rotbraunen Tonsteinen und eingeschalteten hellgrauen oder rotbraunen Sandsteinen (DSK 2005, Geyer et al. 2011). Zwei überregionale Diskordanzen teilen die Abfolge in drei Abschnitte, wobei unter dem oberen (Löwenstein- und Trossingen-Formation) nach Süden und Osten zunehmend größere Teile des Mittleren Abschnitts ausfallen (Stuttgart-, Steigerwald- und Hassberge-Formation) und dieser wiederum auf unterschiedlich tiefen Niveaus des unteren Abschnitts (Grabfeld-Formation) liegt.

Der obere Abschnitt erreicht eine Mächtigkeit von etwa 70 m im Norden des Modellgebiets, die nach Süden auf ca. 20–25 m abnimmt. Sandsteine sind auf den unteren Teil dieser Abfolge beschränkt (Löwenstein-Formation, Stubensandstein). Darüber



folgen sandfreie bunte Tonsteine der Trossingen-Formation (Knollenmergel). Die Löwenstein-Formation wird im gesamten Bodenseeraum und Oberschwaben von einer bis 50 m mächtigen Abfolge von Grob- und Geröllsandsteinen, Mittel- und Feinsandsteinen, sandigen bunten Tonsteinen und dolomitischen, teils auch kalkigen Krustenkarbonaten gebildet. Die Sandsteine gehen teilweise in Arkosen über, teilweise werden sie bereits in benachbarten Bohrungen von sandigen Tonsteinen vertreten. In älteren Profilaufnahmen wurden die tieferen Sandstein-Horizonte häufig als Kieselsandstein (der Hassberge-Formation) oder als ‚Bunte Mergel mit Sandlagen‘ angesprochen, da die Diskordanz an ihrer Basis noch nicht bekannt war, weshalb die Mächtigkeitsangaben in der älteren Literatur häufig zu gering ausfallen. Über der Löwenstein-Formation folgt mit Aussetzen der Sandführung die Faziesgrenze zur Trossingen-Formation, die wie im größten Teil ihres Verbreitungsgebiets aus rotbraunen und rotvioletten, in Flecken auch graugrünen schluffigen Tonsteinen besteht, die gebietsweise einen schwachen Kalkgehalt aufweisen und vielfach grüngraue Kalksteinknollen führen. Die Trossingen-Formation vertritt gebietsweise die Sandfazies der höheren Löwenstein-Formation. Die Mächtigkeiten von Löwenstein- und Trossingen-Formation bzw. Stubensandstein und Knollenmergel können durch diese Faziesverzahnung kleinräumig zwischen benachbarten Bohrungen schwanken, obwohl die Gesamtmächtigkeit des oberen Abschnitts konstant bleibt.

Der mittlere Abschnitt des Mittelkeuper besteht im Modellgebiet aus der Stuttgart-Formation, der Steigerwald-Formation und der Hassberge-Formation (soweit erhalten). Besonders die Stuttgart-Formation (‚Schilfsandstein‘) zeigt kleinräumig stark wechselnde Mächtigkeiten zwischen wenigen Metern und über 20 m, da sie ein Paläorelief in der darunter liegenden Grabfeld-Formation auffüllt. Sie besteht im Westen und ostwärts bis an den mittleren Bodensee neben den vorherrschenden dunkelgrauen sandigen, teils Pflanzenreste führenden Tonsteinen und Schlufftonsteinen auch aus feinkörnigen glimmerführenden Sandsteinen. Im östlichen Oberschwaben treten zunehmend grobkörnige und teilweise arkosische Sandsteine hinzu (Ansbach-Sandstein) und vertreten die Formation gebietsweise ganz, wodurch sie bei älteren Bohraufnahmen teilweise mit den Sandsteinen der höheren Keuperformationen verwechselt wurden. Über der Stuttgart-Formation beginnt die Steigerwald-Formation mit einem nur in Teilen des Modellgebiets erhaltenen Anhydrit-horizont, dem Beaumont-Horizont, der von bis zu mehreren Metern rotbraunen Tonsteinen mit Anhydritknollen überlagert wird (Rote Wand). Nach

Südwesten reduziert sich die Mächtigkeit, weshalb die Einheit in der Schweiz häufig mit tonigen Basis-schichten der (diskordant auflagernden) Stubensandsteine als ‚Bunte Mergel‘ zusammengefasst wird. Die grobkörnigen Sandsteine der Hassberge-Formation (‚Kieselsandstein‘ alter Nomenklatur) sind nach einer Neubearbeitung sämtlicher Bohrlochmessungen aus der Region im Modellgebiet nur noch in der Umgebung des Ostrachtales im nördlichen Oberschwaben erhalten und im größten Teil des Bodenseeraumes diskordant unter der Löwenstein-Formation abgetragen, die nach Südosten auf immer tieferen Teilen des Mittleren Keupers liegt und im Allgäu bereits unmittelbar auf der Benk-Formation auflagert. Die in den älteren Bohrprotokollen als ‚Kieselsandstein‘ ausgewiesenen Sandsteine zeigten sich in der Korrelation meist als Äquivalente des Unteren Stubensandsteins (Löwenstein-Formation), im Osten teilweise auch als Ausläufer des Ansbach-Sandsteins (Stuttgart-Formation).

Der untere Abschnitt besteht besonders im Westen des Modellgebiets aus grauen und bunten dolomitischen Tonsteinen, in die Knollen und Lagen von Anhydritstein eingeschaltet sind (Grabfeld-Formation). Nach Osten und Südosten werden sie von bunten Tonsteinen mit Sandstein-Einschaltungen abgelöst (Benk-Formation; südwestliches Oberschwaben und Allgäu).

Südwestlich des Bodensees nimmt die Mächtigkeit der Keupersedimente rasch nach Westen ab (Büchi et al. 1965a). In der Nordschweiz wird daher der größte Teil des Mittleren und Oberen Keuper in der Klettgau-Formation zusammengefasst. Nur die Äquivalente der Grabfeld-Formation werden als Bänkerjoch-Formation davon unterschieden. Der Mittlere Keuper besteht aus den evaporitischen Ablagerungen der Bänkerjoch-Formation (rotbunte Tonsteine mit Anhydritlagen und -knollen: Büchi et al. 1965a), die der Grabfeld-Formation nördlich des Bodensees entspricht. Die darüber in der älteren Literatur als ‚Schilfsandstein‘, ‚Kieselsandstein‘, ‚Obere Bunte Mergel‘, ‚Stubensandstein‘ und ‚Knollenmergel‘ bezeichneten Schichten, die eine Wechselfolge von Sandsteinen, Ton- und Mergelsteinen bilden (Albert & Bläsi 2001, Naef 2008), werden heute mit den Äquivalenten des Oberen Keuper in der Klettgau-Formation zusammengefasst, zumal die Einheiten über dem Schilfsandstein in Umfang und Abgrenzung nicht den früher gleichnamigen Einheiten in Deutschland entsprechen. Die Äquivalente des Oberen Keuper bestehen aus kalkarmen bis kalkfreien, fein- bis mittelkörnigen Sandsteinen, die in den Bohrungen des Untersuchungsgebiets ölimprägniert sind, sowie schwarzgrauen Tonsteinen (Büchi et al. 1965a, Naef 2008).

Unterkeuper

Der Unterkeuper besteht im Norden des Projektgebiets aus einer geringmächtigen Wechsellagerung von grauen Dolomitsteinen und dunkelgrauen Tonsteinen, in die im unteren Teil sandige Lagen oder geringmächtige Sandsteinbänke eingeschaltet sein können und zur Erfurt-Formation gerechnet werden. In den obersten Metern der Formation treten erste Lagen und Knollen von Anhydritstein auf, die bereits der Fazies der darüber folgenden Grabfeld-Formation ähneln. Nach Süden und Osten nimmt die Mächtigkeit des Unteren Keuper auf wenige Meter ab, wobei insbesondere die tonigen Einschaltungen auf dünne Tonschmitzen zwischen den Dolomitbänken reduziert werden. Im Allgäu ist der Untere Keuper meist nicht mehr klar vom Oberen Muschelkalk abzugrenzen, sofern nicht Bohrkernkerne eine Unterscheidung der Dolomitfazies erlauben. Auch in der Nordschweiz ist die Abgrenzung gegen den Oberen Muschelkalk wegen der geringen Mächtigkeit meist nur noch in Aufschlüssen und Bohrkernen möglich, weshalb die äquivalenten Schichten dort mit dem Oberen Muschelkalk zur Schinz nach-Formation zusammengefasst werden. Im nördlichen Schweizer Teilgebiet (nur hier liegen im Schweizer Anteil des Modellgebiets Informationen aus Bohrungen vor) besteht der Unterkeuper-Anteil der Schinz nach-Formation mit Dolomiten, Mergel- und Tonsteinen in einer Mächtigkeit von ca. 7 bis 14 m (Naef 2008).

Oberer Muschelkalk und Diemel-Formation des Mittleren Muschelkalk

Der Obere Muschelkalk besteht vorwiegend aus Kalksteinen und im höheren Teil, im südlichen Oberschwaben und Allgäu auch ganz, aus feinkristallinen grauen bankigen Dolomitsteinen. Die Mächtigkeit erreicht im Schweizer Teilgebiet (Büchi et al. 1965a, Naef 2008) und am Nordrand des deutschen Teilgebiets rund 60–70 m und nimmt nach Südosten auf ca. 40 m im Allgäu ab. Die Dolomitsteine sind häufig etwas kavernös und können sandige Lagen führen, die sich nach Osten häufen. Vielfach sind in geringen Mengen Bleiglanz- und/oder Zinkblende-Kristalle eingestreut. Im Nordwesten des Modellgebiets besteht der untere Teil des Oberen Muschelkalk aus gebankten Kalksteinen mit meist geringen Tonstein-Zwischenlagen. Einzelne Bänke können als Kalkoolith ausgebildet sein. Die Grenze zur Dolomitfazies steigt dabei nach Süden zunehmend tiefer in der Schichtfolge, wobei auch innerhalb der Kalksteinabfolge partienweise dolomitisierte Abschnitte auftreten können. Unter der Basis des Oberen Muschelkalk sind einige Meter oft mergelige Dolomitsteine entwickelt, die in Deutschland als Diemel-Formation den oberen Abschluss

des Mittleren Muschelkalk bilden, in der Schweiz mit dem Oberen Muschelkalk i. e. S. zur Schinz nach-Formation zusammengefasst werden.

Im mittleren und oberen Illergebiet bildet dabei der Obere Muschelkalk die älteste Ablagerung der Trias und ist im unteren Teil in bis zu 30 m mächtiger sandiger Randfazies entwickelt. Diese Sandsteine ähneln faziiell denen der Eschenbach- und Grafenwöhr-Formation und werden daher diesen Einheiten zugerechnet.

Mittlerer und Unterer Muschelkalk

Der Mittlere Muschelkalk ist wie in den nördlich angrenzenden Gebieten durch evaporitische Gesteine gekennzeichnet, wobei allerdings südlich der Donau bislang kein Steinsalz nachgewiesen wurde. Die Schichtenfolge besteht aus Anhydrit im Wechsel mit anhydritführenden grauen bis schwarzen oder graubraunen bis graugrünen Tonsteinen und untergeordneten Einschaltungen von dolomitischen Mergeln sowie Kalk- und Dolomitbänken (Heilbronn-Formation in Deutschland, in der Schweiz: Zeglingen-Formation, früher ‚Anhydritgruppe‘: Büchi et al. 1965a, Albert & Bläsi 2001, Naef 2008). Die Mächtigkeit beträgt ca. 40–50 m. Die Basis des Mittleren Muschelkalk bilden östlich des Bodensees dolomitische Mergelsteine und Dolomitsteine der Karlstadt-Formation (‚Orbicularisschichten‘), in die eine erste mächtigere Anhydritsteinbank eingeschaltet sein kann. Nach Südwesten lassen sich diese Orbicularisschichten nicht klar von den Ablagerungen des Unteren Muschelkalk trennen oder keilen aus.

Im mittleren und östlichen Bodenseegebiet, Allgäu und größten Teil Oberschwabens stellt der Mittlere Muschelkalk die älteste triassische Ablagerung dar und geht an der Basis aus Sandsteinen der Eschenbach- oder Grafenwöhr-Formation hervor. Die tieferen Anhydritsteine sind hier teilweise sandig oder wechsellagern mit anhydritischen Sandsteinlagen. Ähnliche Verhältnisse sind auch an der unteren Iller bis in den Raum Ulm nachgewiesen. Steinsalz tritt im Modellgebiet nicht auf.

Der Untere Muschelkalk im engeren Sinne (Freudenstadt- bzw. Kaiseraugst-Formation) erreicht dementsprechend den Bodenseeraum nur im Westen des Gebiets mit wenigen Meter mächtigen dunkelgrauen Tonsteinen und Dolomitsteinbänken. Darunter zeigen sich graue dolomitische Sandsteine mit sandigen Dolomitsteinbänken, die als randmarine Fazies in Deutschland der Eschenbach-Formation zugerechnet werden (‚Basissand‘ bei Büchi et al. 1965a). Sie bilden örtlich die Basis der Trias auf Kristallin (vgl. Abb. 3-6), gehen aber gebietsweise



aus einer Abfolge von terrestrischen, oft kieselig gebundenen Sandsteinen mit rotbraunen, violett-roten und grüngrauen Farben hervor oder werden ganz davon vertreten. Die Sandsteine sind teils fein-, öfter aber grobkörnig und teilweise konglomeratisch. Rotbraune Ton- und Schluffsteine unterschiedlicher Mächtigkeit sind immer wieder eingeschaltet, können aber auch fehlen. Diese nichtmarine Randfazies wurde früher teilweise als ‚Buntsandstein‘, ‚Permotrias-Basissandstein‘ oder gar als ‚Melser Schichten‘ angesprochen und wird heute in Deutschland in der Grafenwöhr-Formation zusammengefasst. Das Alter von Grafenwöhr- und Eschenbach-Formation als Basissandsteine dürfte nach Südosten jünger werden, da sie sich mit zunehmend höheren Anteilen des Mittleren Muschelkalk und im Illergebiet mit dem Oberen Muschelkalk verzahnen. Eine direkte Datierung war aber bislang nicht möglich.

Für das Schweizer Teilgebiet liegen nur aus den zwei Tiefbohrungen im Norden, Berlingen-1 und Kreuzlingen-1, und aus der Tiefbohrung Herdern-1 direkte Informationen vor. Über dem Basissand folgt das Wellengebirge aus grauen, anhydritführenden Ton- und (Dolomit-) Mergelsteinen, die einzelne Kalkbänke enthalten und im unteren Bereich sandig sind (Büchi et al. 1965a, Naef 2008). Eine Untergliederung in Wellendolomit, Wellenmergel und Orbicularis-Mergel ist hier kaum möglich (Müller et al. 2002).

Buntsandstein (nicht im Modellgebiet vorhanden)

Die Verbreitung des Buntsandstein im heutigen lithostratigraphischen Sinne endet nach neueren Ergebnissen nur wenige Kilometer nordwestlich des LCA-Pilotgebiets (Albert & Bläsi 2001, Rupf & Nitsch 2008, Geyer et al. 2011). Dennoch sind in älteren Profilaufnahmen häufig rotbraune fluviatile bis alluviale Sedimente an der Triasbasis als ‚Buntsandstein‘ oder ‚Permotrias‘ angesprochen worden. Während dies nach der Fazies verständlich ist, zeigt die Korrelation von geophysikalischen Bohrlochmessungen jedoch, dass es sich hierbei um eine terrestrische bis marine Randfazies des tieferen Muschelkalk handeln dürfte (‚Basissand des Muschelkalks‘, heute in Deutschland der fluviatilen Grafenwöhr- und randmarinen Eschenbach-Formation zugerechnet; Büchi et al. 1965a, Naef 2008, Zaugg et al. 2008, Geyer et al. 2011).

3.3.4 Grundgebirge und Permokarbon

Die ältesten und am tiefsten liegenden Gesteine des Bodenseeraumes bilden paläozoische Metamorphite, Magmatite und deren in spätpaläozoischen Senken erhaltenen Abtragungsprodukte (vgl. Abb. 3-6).

Letztere bestehen überwiegend aus Arkosen und klastischen Feinsedimenten, die erhebliche Mächtigkeiten erreichen können, deren Verbreitung und Alter aber nur sehr ungenügend bekannt ist. Die Tiefbohrungen bei Dingelsdorf und Berlingen wiesen unter dem Bodensee ein solches spätpaläozoisches Becken nach, dessen älteste Ablagerungen in das späte Karbon datiert sind und dessen jüngere, vorherrschend rote Ablagerungen aus dem Perm stammen dürften. Das Vorkommen wird als östliche Fortsetzung des Nordschweizer Permokarbons angesehen, dessen Schichtenfolge insbesondere an den Proben der Sondierbohrung Weiach intensiv untersucht worden ist (Lemcke & Wagner 1961, Diebold 1988, Nagra 1988, Müller et al. 2002). Darüber hinaus haben wenige weitere Bohrungen in Oberschwaben bunte Arkosen unter der Trias angetroffen, ohne deren Basis zu erreichen oder einen weiteren Hinweis auf deren Alter zu geben.

Südlich des Nordschweizer Permokarbon-Trogs werden weitere Permokarbonvorkommen vermutet. Allerdings gibt es bislang keine genügend tiefen Bohrungen und allein aus der Reflexionsseismik lassen sich mögliche Vorkommen nicht immer sicher abgrenzen (Marchant 2005, Sommaruga et al. 2012). Im Bereich St. Gallen werden aufgrund der 3D-reflexionsseismischen Untersuchungen (Wolfgramm et al. 2014, Moeck et al. 2015) permokarbone Gesteinsserien im Untergrund erwartet. Die Tiefbohrung St. Gallen (SG-GT1) wurde allerdings nicht bis in die entsprechenden Tiefen abgeteuft, um diese Gesteine tatsächlich zu erreichen.

Die Mehrzahl der Tiefbohrungen, die bis unter die Trias abgeteuft worden sind, fanden jedoch unter dem mesozoischen Deckgebirge ein kristallines Grundgebirge aus Gneis, Granit und weiteren amphibolitfazial metamorphen oder plutonischen Gesteinen mit Gangintrusionen (Mazurek & Peters 1992, Müller et al. 2002, Drong 2003). Sie entsprechen dem aus dem Schwarzwald, dem Aarmassiv oder dem Bayerischen Wald im Ausstrich bekannten kristallinen variskischen Grundgebirge, ohne sich klar einer der dort unterschiedenen tektonostratigraphischen Provinzen einzugliedern. In reflexionsseismischen Profilen sind die kristallinen Grundgebirgsbereiche bislang nicht klar von den Gebieten mit permokarbonen Sedimentbecken abzugrenzen, da die Qualität der bisherigen, meist älteren Profile in dieser Tiefe, die außerhalb der Zieltiefe lag, nicht mehr ausreicht, zwischen horizontalen Mehrfachreflektoren in durch Bohrung belegten Grundgebirgsgebieten und ähnlichen Mustern in den Sedimentbecken zu unterscheiden. Die Bohrdichte genügt für diese Teufe ebenfalls nicht für eine sichere Abgrenzung der Becken, weshalb über deren Verbreitung und Mächtigkeit bislang keine zuverlässigen Aussagen getroffen werden können.

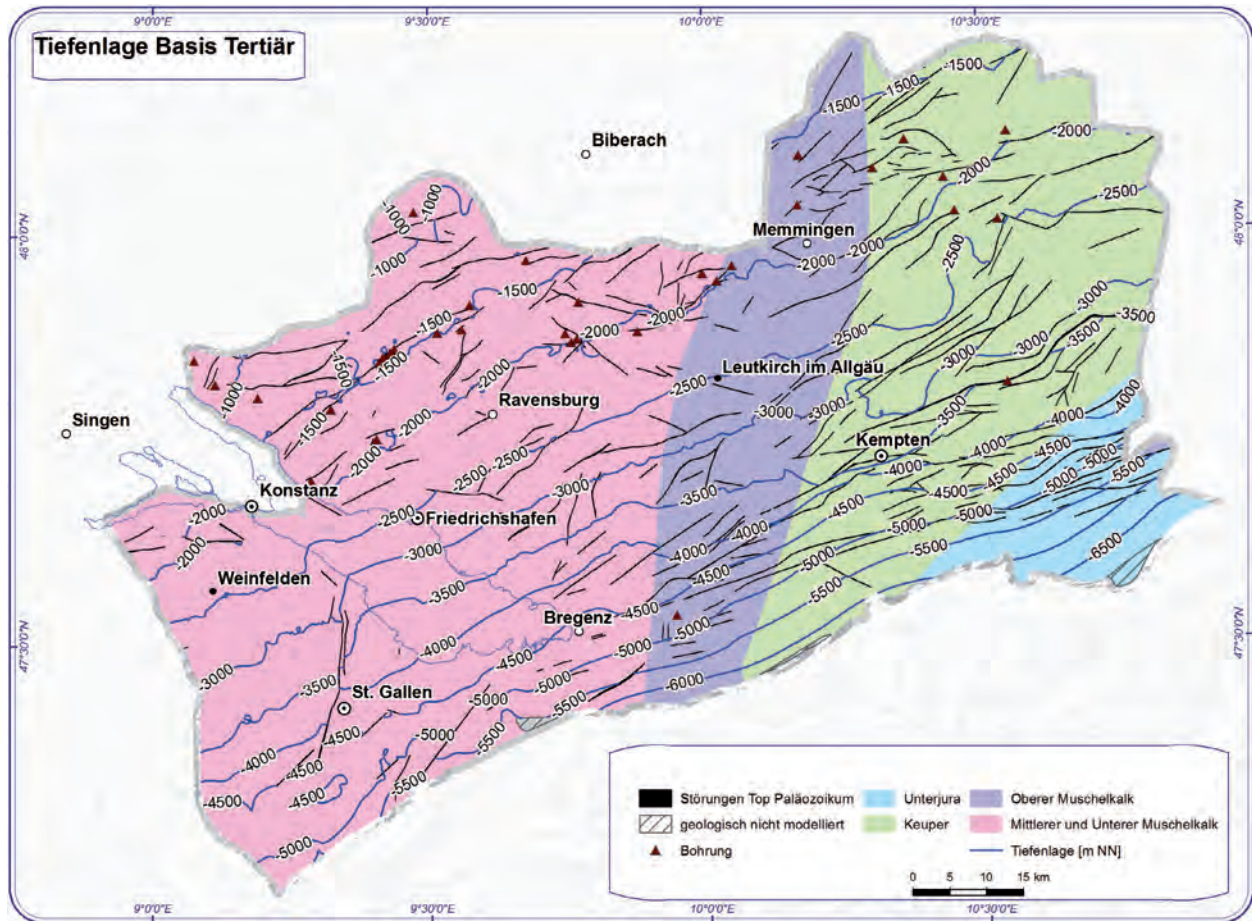


Abb. 3-6: Tiefenlage der Oberfläche Grundgebirge / Paläozoikum nach den Modellierungsergebnissen. Die Flächenfarben geben an, mit welcher Einheit das Mesozoikum nach den Bohrergebnissen darüber einsetzt (generalisiert).



4 Geologische 3D-Modellierung

Geologische 3D-Modelle sind essentielle Bestandteile des GeoMol-Projekts. Sie liefern neben geologischen Basisdaten Informationen zu Nutzungsmöglichkeiten des tieferen Untergrundes. Im Rahmen des Projekts wurden zwei Modelle bearbeitet. Das geologische Übersichtsmodell wurde für das nördliche Molassebecken erstellt. Neben den tektonischen Hauptstrukturen bildet es die Raumlage der geologischen Haupteinheiten von der Basis Quartär bis zum Top des Paläozoikum ab und fungiert als zentrales Gerüst für die Pilotgebietsmodelle und zukünftige Modellierungen.

Das geologische 3D-Modell für das LCA-Pilotgebiet weist einen höheren Detaillierungsgrad als das Übersichtsmodell auf. Neben den geologischen Haupteinheiten wurden in dieses Modell zusätzliche, für die Geopotenzialcharakterisierung notwendige Horizonte integriert. Auch die implementierten Störungsstrukturen sind höher aufgelöst.

Das geologische Übersichtsmodell dient im Rahmen von GeoMol vorrangig der Visualisierung im 3D-Explorer (vgl. Kap. 8.5), während das Pilotgebietsmodell zur Bewertung des Untergrundes hinsichtlich verschiedener Nutzungsmöglichkeiten herangezogen wurde (vgl. Kap. 7).

Die Methodik zur Erstellung beider Modelle unterscheidet sich bei den beteiligten Projektpartnern aufgrund der genutzten Software sowie der Menge und Qualität der Eingangsdaten. Im bayerischen und österreichischen Gebietsanteil existierten bisher keine flächendeckenden geologischen 3D-Modelle. Bei diesen Partnern wurden daher zunächst die Pilotgebietsmodelle erstellt und das Übersichtsmodell im Nachgang aus den Pilotgebietsmodellen abgeleitet. Baden-Württemberg konnte auf bereits erstellte 3D-Modelle für die Erzeugung des geologischen Übersichtsmodells zurückgreifen. Die Arbeiten am Übersichtsmodell und am Pilotgebietsmodell fanden bei diesem Projektpartner parallel statt und folgten teilweise unterschiedlichen Methoden. Die Kapitel 4.1 bis 4.4 beschreiben die Konzepte für die Erstellung des Pilotgebietsmodells Bodensee-Allgäu (LCA), während Kapitel 4.5 eine Übersicht über die im baden-württembergischen Übersichtsmodell genutzten Methoden gibt und beide Modelle miteinander vergleicht.

4.1 Pilotgebietsmodell Bodensee-Allgäu (LCA-Modell)

Die geologische 3D-Modellierung für das Pilotgebiet Bodensee-Allgäu wurde von folgenden geologischen Diensten und Universitäten durchgeführt:

- Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Regierungspräsidium Freiburg (LGRB)
- Bayerisches Landesamt für Umwelt, Geologischer Dienst (LfU)
- Geologische Bundesanstalt Wien (GBA) in Zusammenarbeit mit der Universität Innsbruck
- Bundesamt für Landestopografie (swisstopo) in Zusammenarbeit mit der Universität Basel, Abteilung Angewandte und Umweltgeologie (AUG).

Ziel war es, die Verbreitung und Lagerungsverhältnisse der Gesteine im tieferen Untergrund von der Basis quartärer Ablagerungen bis zum kristallinen Grundgebirge sowie das Auftreten und den räumlichen Verlauf von Störungen in einem länderübergreifenden, fachlich abgestimmten 3D-Modell konsistent und digital zu erfassen. Neben der direkten Ableitung von Ergebnissen in Kartenform, wie z. B. Schichtlagerungskarten, diente das geologische 3D-Modell vor allem in der Kombination mit dem Temperaturmodell (vgl. Kap. 5) und der Fallstudie zur mitteltiefen bis tiefen Erdwärmesondengeothermie (vgl. Kap. 6), um Ergebniskarten zum geothermischen Potenzial im LCA-Pilotgebiet abzuleiten (vgl. Kap. 7, Kap. 8 und <http://maps.geomol.eu>).

4.2 Basis-Workflow und Koordinatensysteme (LCA-Modell)

Die für die geologische 3D-Modellierung genutzten Eingangsdaten lagen bei den Partnern hinsichtlich ihrer Haltung in unterschiedlichen Datenbanksystemen sowie in ihrer Bezeichnung von Modelleinheiten und ihres Koordinatensystems heterogen vor. Zudem nutzten die Partner für die seismische Interpretation und geologische 3D-Modellierung ihrer Teilgebiete unterschiedliche Softwareprodukte, die durch die IT-Struktur ihrer Institution vorgegeben waren und in denen sie langjährige Expertise haben: Gocad (LGRB und Universität Basel), SKUA (LfU), Kingdom Suite (Universität Basel) und Move (Universität Innsbruck). Für die Datenaufbereitung, den Austausch von Arbeits- und die Ableitung von Ergebnisdaten kamen außerdem unterschiedliche

GIS-Software und Spezialanwendungen zur Geodaten-Prozessierung zum Einsatz.

Um ein konsistentes geologisches 3D-Modell für das LCA-Pilotgebiet zu generieren, war es daher wichtig, bereits in der Frühphase der Modellierungsarbeiten einen Basis-Workflow zu erarbeiten und mit den partnerspezifischen Gegebenheiten in Einklang zu bringen sowie Bezeichnungen für Modelleinheiten und einheitliche Methoden für die Koordinatentransformation gemeinsam abzustimmen.

4.2.1 Basis-Workflow

Der erste und zugleich zeitaufwändigste Arbeitsschritt beinhaltet die technische und inhaltliche Harmonisierung der Eingangsdaten auf Basis der untereinander abgeglichenen geologischen Nomenklaturen. Danach lässt sich der Basis-Workflow in vier wesentliche Arbeitsschritte untergliedern:

- (1) Seismische Interpretation von erkennbaren seismischen Reflektoren und Störungen in der Zeitdomäne
- (2) Modellierung von Horizonten und Störungen in der Zeitdomäne
- (3) Zeit-Tiefenkonvertierung der seismischen Interpretation und/oder der bereits modellierten Störungen und Horizonte

(4) Modellierung von Horizonten und Störungen in der Tiefendomäne, zum Teil unter Zuhilfenahme von Mächtigkeitsverteilungen.

Die im LCA-Pilotgebiet modellierten Horizontflächen mit Kurzbezeichnungen und ihre Konstruktionsmethodik in den Teilgebieten sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst. Weitere Detailbeschreibungen zur Modellierung von Horizonten und Störungen finden sich in Kap. 4.4.4 und 4.4.5.

4.2.2 Koordinatensysteme

Die Eingangsdaten für die geologische Modellierung im LCA-Pilotgebiet sind ursprünglich zumeist in landesüblichen Koordinatenreferenzsystemen gehalten:

- Baden-Württemberg: DHDN 3 Gauß-Krüger Zone 3 (EPSG: 31467)
- Bayern: DHDN 3 Gauß-Krüger Zone 4 (EPSG: 31468)
- Österreich: MGI / Austria GK M28 (EPSG: 31257)
- Schweiz: CH1903 / LV03 (EPSG: 21781) und CH1903+ / LV95 (EPSG: 2056)

Für die Darstellung der Projektergebnisse in Form von gedruckten Karten und mit Webdiensten wird

Tab. 4-1: Modellflächen (Horizonte) und ihre Konstruktionsmethoden in der geologischen 3D-Modellierung des LCA-Pilotgebiets (LCA-A: Teilgebiet Österreich, LCA-BW: Teilgebiet Baden-Württemberg, LCA-BY: Teilgebiet Bayern, LCA-CH: Teilgebiet Schweiz; FM = aus dem Geologischen Übersichtsmodell (Framework Model) übernommen, S = seismische Interpretation, T = aus Mächtigkeitsverteilungen, X = nicht modelliert oder nicht verbreitet).

Horizont	LCA-Kürzel	Konstruktionsmethode			
		LCA-A	LCA-BW	LCA-BY	LCA-CH
Basis Quartär	B_Q	X	FM	FM	FM
Basis Obere Süßwassermolasse	B_OSM	T	T	S	S
Basis Steinhöfe-Fm.	B_SH	X	T	X	X
Basis Baltringen-Fm.	B_BA	T	T	S	X
Basis Obere Meeresmolasse	B_OMM	T	S	S	S
Top Untere Meeresmolasse	B_UMJ	S	T	S	X
Top Tonmergelschichten	T_TM	T	T	T	X
Basis Tertiär	B_T	S	S	S	S
Top Impressamergel-Fm.	T_TJUI	T	T	T	S
Top Mitteljura	T_JM	S	T	S	S
Top Unterjura	T_JL	T	S	S	S
Top Trias	T_Tr	T	T	T	S
Top Unterkeuper	T_KL	T	T	T	T
Top Muschelkalk	T_M	T	T	T	S
Top Heilbronn-Fm.	T_MMH	T	T	T	T
Top Paläozoikum	T_B	S	S	S	S



das europaweit gängige Koordinatenreferenzsystem ETRS_1989 mit der im LCA-Pilotgebiet gültigen Projektion UTM Zone 32N (EPSG: 25832) sowie die Projektion Web Mercator (EPSG: 3857) verwendet.

Für die Koordinatentransformation von Gocad-Objekten sowie Gocad-kompatiblen SKUA-Objekten wurde das an der TU Bergakademie Freiberg im Rahmen des GeORG-Projekts entwickelte Programm KoordTrans genutzt (Karich 2010). Ein Schwerpunkt des Projekts GeoMol lag in der Entwicklung einer softwareunabhängigen Geodateninfrastruktur samt Koordinatentransformation für den Austausch von 3D-Objekten zwischen den Projektpartnern. Diese Geodateninfrastruktur wurde parallel zur Erstellung des geologischen 3D-Modells entwickelt und getestet, konnte aus Zeitgründen jedoch nicht für den routinemäßigen Datenaustausch eingesetzt werden.

4.3 Datengrundlage und Datenaufbereitung für das LCA-Modell

Der überwiegende Teil der Eingangsdaten für die geologische 3D-Modellierung stammt aus Bohrungen und reflexionsseismischen 2D-Messungen, die im Zuge der Explorationen auf Erdöl und Erdgas seit den 1950er Jahren bis in die 1990er Jahre im LCA-Pilotgebiet durchgeführt wurden. Die räumliche Verteilung der Bohrungen spiegelt dabei deutlich die Lage ehemaliger und vermuteter Erdöl- und Erdgasfelder wider (vgl. Abb. 4-1), wie z. B. die Felder Pfullendorf-Ostrach, Fronhofen-Illmensee, Mönchsrot, Gaisbeuren und Wurzach in Baden-Württemberg und Boos, Niederrieden, Lauben und Arlesried in Bayern.

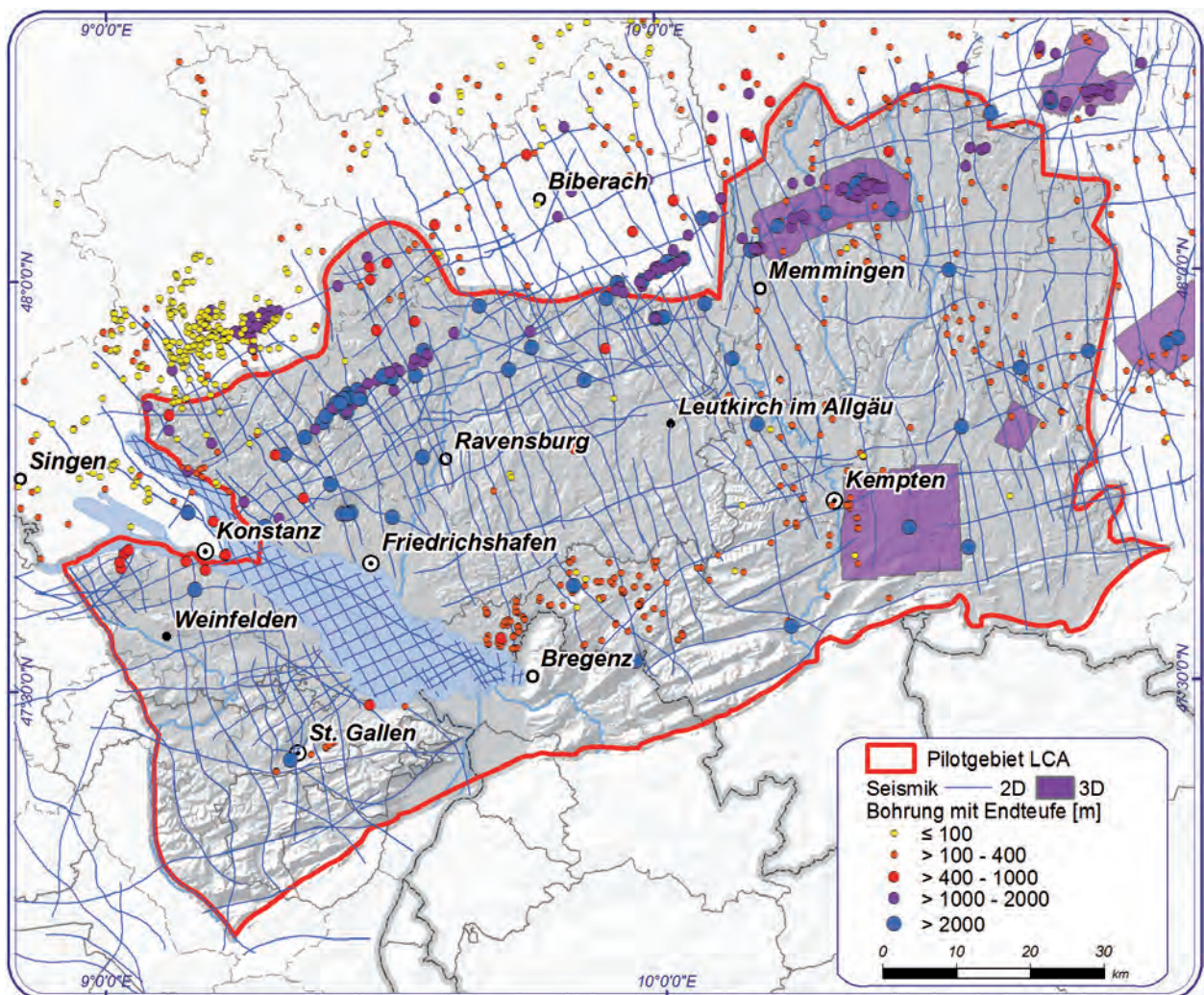


Abb. 4-1: Lage der Bohrungen und Seismikdaten im LCA-Gebiet. Nicht dargestellt sind zahlreiche flache Bohrungen, die für die Modellierung der Basis Quartär genutzt wurden.

Besonders im Süden des LCA-Pilotgebiets sind weniger Bohrinformationen vorhanden. Hier liegen aufgrund der allgemeinen Mächtigkeitzunahme der tertiären Füllung des Molassebeckens allerdings auch die tiefsten Bohrungen des Untersuchungsgebiets: Tett nang (Endteufe 3.253 m), Opfenbach 1 (Endteufe 4.510 m) und Sulzberg 1.3 (Endteufe 5.645 m). Zusätzlich zu den Daten aus der Erdöl- und Erdgasindustrie stammen weitere Bohrdaten aus einer Reihe von Geothermie-Projekten (z. B. Bad Waldsee und Bad Saulgau in Baden-Württemberg, Bad Wörishofen und Mauerstetten in Bayern und St. Gallen GT-1 mit einer Endteufe von 4.450 m in der Schweiz).

In Baden-Württemberg, Bayern und der Schweiz wurde das Gebiet über Jahrzehnte mit Hilfe reflexionsseismischer Messungen intensiv untersucht, sodass bereichsweise ein engmaschiges Netz aus 2D-Seismiklinien besteht.

Die technische Aufbereitung und Schritte zur Harmonisierung von Bohr- und Seismikdaten für die geologische 3D-Modellierung werden in Kap. 4.3.1 bis 4.3.3 näher beschrieben. Tabelle 4-2 fasst die Anzahl der genutzten Bohrungen und Seismikdaten des LCA-Pilotgebiets zusammen. Im Zuge der seismischen Interpretation von Störungen und Modelleinheiten wurden außerdem Geodaten aus der Literatur und von Vorgängerprojekten genutzt, deren Aufbereitung in Kap. 4.3.4 näher ausgeführt wird.

4.3.1 Bohrdaten

Die Bohrdaten liefern für die geologische 3D-Modellierung punktgenaue Informationen über die Raumlage der Gesteinseinheiten im Untergrund sowie über das Auftreten von Störungen, tektonisch bedingten Schichtausfällen etc. Je nach Aufsuchungszweck enthalten sie neben den obligatorischen Stammdaten, lithologischen Schichtbeschreibungen und stratigraphischen Zuordnungen eine Reihe weiterer Ergebnisse aus geophysikalischen Bohrlochmessungen („Logs“), Pump- und Fördertests,

Temperaturmessungen, hydrochemischen Untersuchungen oder petrophysikalischen Messreihen, die als Eingangsdaten für die Geschwindigkeits- und Temperaturmodellierung (vgl. Kap. 4.4.6 bzw. 5) sowie zur Charakterisierung von Geopotenzialen (vgl. Kap. 7) im LCA-Pilotgebiet aufbereitet und verwendet wurden.

Insgesamt wurden 300 Bohrungen für die geologische 3D-Modellierung der präquartären Horizonte aufbereitet (vgl. Tab.4-2 und Abb.4-1). Die verwendeten Bohrungen stammen in Baden-Württemberg und Bayern zum größten Teil aus der Erdöl- und Erdgasexploration oder wurden für Geothermie- oder Mineralwasserzwecke abgeteuft. Für das Schweizer Teilgebiet wurden Bohrdaten bei Bundesämtern, Kantonen, Privaten und der Nagra recherchiert.

Stammdaten der Bohrungen (Name, Lagekoordinaten des Bohransatzpunkts, Endteufen, Bohrfad, etc.) wurden überprüft. Für das Schweizer Teilgebiet wurden zudem geophysikalische Logs in der Datenbank erfasst.

Harmonisierungsarbeiten der Schichtdaten umfassten in Baden-Württemberg eine vollständige Neubearbeitung und -interpretation der lithologischen Beschreibungen und stratigraphischen Zuordnungen, insbesondere auf Basis von Logmessungen des elektrischen Widerstands der Gesteine („Resistivity logs“).

Für die Modellierung der Basis Quartär standen umfangreichere Datensätze zur Verfügung. So wurden in der Schweiz insgesamt 6.300 und in Baden-Württemberg mehr als 14.000 Bohrungen genutzt. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Erdwärmesonden und geotechnische Bohrungen. Im Schweizer Teilgebiet wurden 793 Bohrungen ausgewertet und in die GeoMol-Stratigraphie (vgl. Kap. 3) konvertiert.

Für die Geschwindigkeitsmodellierung (vgl. Kap. 4.4.6) wurde jeweils eine Datenbasis der

Tab. 4-2: Anzahl der verwendeten Eingangsdaten im LCA-Pilotgebiet für die Modellierung präquartärer Einheiten (LCA-A: Teilgebiet Österreich, LCA-BW: Teilgebiet Baden-Württemberg, LCA-BY: Teilgebiet Bayern, LCA-CH: Teilgebiet Schweiz).

Teilgebiet LCA	Anzahl verwendeter Bohrungen	2D-Seismikprofile	
		Anzahl verwendeter Profile	Gesamtlänge (km)
LCA-A	1	30	318
LCA-BW	107	135	2.373
LCA-BY	169	106	2.032
LCA-CH	23	46	793
Gesamtgebiet	300	317	5.516



vorhandenen Geophonversenkungsmessungen (GVM, „check shots“) für Baden-Württemberg, Bayern und die Schweiz zusammengestellt. Mit 205 Messungen (105 in LCA-BW und 100 in LCA-BY) konnte im deutschen Gebietsanteil ein Großteil der GVM auf Grundlage der Kohlenwasserstoffdatenbank des LBEG digital aufbereitet werden. Im Teilgebiet LCA-BW wurden in Gebieten mit geringer Datendichte zusätzlich Informationen aus 85 Aufzeitmessungen genutzt, die mit der Akquirierung von Seismikdaten aufgenommen werden und in denen die Geschwindigkeiten bis zu einer max. Tiefe von ca. 150–200 m gemessen werden. Im Teilgebiet LCA-BY wurden systematisch erfasste Stapelgeschwindigkeiten aus früheren 2D-Seismikprozessierungen sowie Ausgleichsgeschwindigkeiten für oberflächennahe Schichten verwendet.

In der Schweiz wurden zudem mittels check shots korrigierte Sonic Logs in die Datenbasis für die Geschwindigkeitsmodellierung integriert.

4.3.2 Technische Aufbereitung der Landseismik

Im LCA-Pilotgebiet steht aufgrund der intensiven Kohlenwasserstoff-Explorationstätigkeit ein dichtes Netz von reflexionsseismischen 2D-Abspielungen zur Verfügung (vgl. Abb. 4-1). Aus diesem Datenpool wurden für die geologische 3D-Modellierung insgesamt 317 2D-reflexionsseismische Abspielungen mit einer Gesamtlänge von 5.516 km von den jeweiligen Projektpartnern für ihr Bearbeitungsgebiet aufbereitet (vgl. Tab. 4-2).

Vor allem hinsichtlich ihrer Formate (digital, gescannt oder als großformatige Papiausdrucke), ihrer Prozessierungsstufen (z. B. gestapelt, migriert, interpretiert) und ihres Bezugsniveaus wiesen die Seismikdaten dabei erhebliche Unterschiede auf, die eine sorgfältige Vorauswahl und vielfach eine vollständige Reprozessierung notwendig machten.

In den Archiven des LGRB und des LfU stehen die Daten seismischer Erkundungen von den 1950er bis in die 1990er Jahre als gescannte, großformatige Papiausdrucke zur Verfügung. Auf den Ausdrucken sind bis etwa in die Mitte der 1970er Jahre hinein seismische Interpretationen erkennbarer Reflektoren ohne Messabspielungen dargestellt. Auf späteren Ausdrucken können hingegen die enthaltenen Seismogramme digital reprozessiert werden.

Insgesamt wurden in Deutschland 272 reflexionsseismische Abspielungen (135 in BW und 137 in BY) für die Reprozessierung ausgewählt.

Ausgewertet wurden in BW 135, in BY 106 reprozessierte Seismikprofile mit einer Gesamtlänge von 4.405 km (vgl. Tab. 4-2). Bei der Auswahl wurde Wert auf eine möglichst gleichmäßige räumliche Verteilung der Profile gelegt. Profile in der Nähe tiefer Bohrungen, Profile mit qualitativ guten und vollständigen Aufzeichnungen der Seismogramme sowie Profile mit vollständiger Beschreibung der Zusatzinformationen (z. B. Bezugsniveau) und der Prozessierungsmethoden (z. B. Stapelgeschwindigkeiten) wurden bevorzugt verwendet.

Die 2D-Reprozessierung umfasste in einem ersten Schritt die Vektorisierung und Konvertierung der Scans in das standardisierte Datenformat SEG-Y. Nachfolgende Harmonisierungsschritte beinhalteten u. a. Verbesserungen der Datenqualität durch Verfahren der Rauschunterdrückung (noise reduction) und Filteroperationen, die Minimierung von Laufzeitunterschieden an Kreuzungspunkten von Profilen (Mistie-Analyse, vgl. Abb. 4-2) sowie die Post-Stack-Migration der Daten (Details der Reprozessierung in GGD 2013a, GGD 2013b, GGD 2013c und GGD 2013d). Alle Daten wurden während der Reprozessierung auf ein einheitliches Bezugssystem (datum plane) von 500 m NN harmonisiert. Um die Messungen auch im oberen Bereich vollständig zu erfassen, wurden die Daten mit einem Vorlauf (seismic shift) von 300 ms versehen.

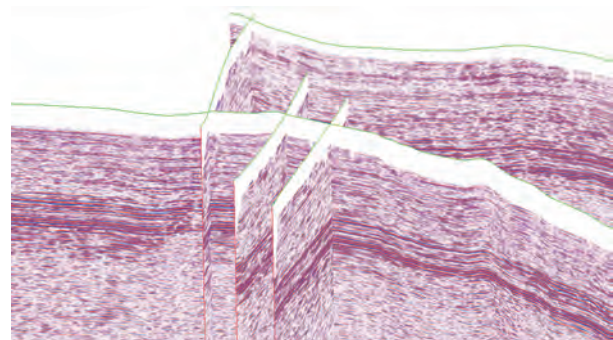


Abb. 4-2: Perspektivischer Blick in südöstliche Richtung auf drei N-S-verlaufende und zwei E-W-verlaufende reprozessierte SEG-Y-Datensätze (dreifach überhöht). Durch die Reprozessierung konnten in Baden-Württemberg und Bayern die aus unterschiedlichen Surveys stammenden Datensätze harmonisiert und Misties an Kreuzungspunkten minimiert werden.

Im Teilgebiet BY wurden zusätzlich die am LfU digital vorhandenen, migrierten 3D-Seismiken Kempfen, Memmingen und Marktoberdorf ausgewertet. Eine Reprozessierung war hier nicht notwendig. Es

musste lediglich eine Anpassung an das gemeinsame Bezugsniveau von 500 m NN erfolgen.

In der Schweiz lagen 2D-Reflexionsseismiklinien der Erdölindustrie vor, die von verschiedenen seismischen Kampagnen aus den 1970er und 1980er Jahren stammen. Die Linien aus dem nördlichen und zentralen Bereich des Modellgebiets wurden von der Nagra zur Verfügung gestellt, die diese Linien im Rahmen ihres Projekts „Kompilation und Interpretation der Reflexionsseismik im Tafeljura und Molassebecken der Zentral- und Nordostschweiz“ zusammengestellt und bearbeitet hatte (Roth et al. 2010). Eine Beschreibung dieser Daten findet sich in Kapitel 4.3.4. Zusätzliche Linien aus dem südlichen Modellgebiet wurden von der SEAG (Aktiengesellschaft für schweizerisches Erdöl) bereitgestellt.

Alle Schweizer Daten lagen prozessiert in der Zeitdomäne vor, teils migriert und teils gestapelt. Für manche Linien waren verschiedene Versionen (Stapelung und Migration) vorhanden. Für die Seismikinterpretation wurde in solchen Fällen die migrierte Linie herangezogen.

Die von der SEAG zur Verfügung gestellte Seismik lag als SEG-Y oder als Scan vor (PDF bzw. TIF) und musste zuerst vektorisiert werden. Eine Reihe der als SEG-Y vorliegenden Linien enthielt keine Koordinaten. In diesen Fällen wurden die Linien mit Navigationsdaten geladen. Es fanden keine eigentlichen Reprozessierungen statt. Linien wurden mittels Static Shifts an kreuzenden Linien eingehängt (analog Roth et al. 2010, vgl. Kap. 4.3.4). Migrationen wurden an gestapelten Linien durchgeführt.

4.3.3 Technische Aufbereitung der Bodensee-Seismik

In den Jahren 1980/81 fand auf dem Bodensee eine Seismikkampagne statt, in deren Verlauf die Prakla-Seismos GmbH ein Netz an reflexionsseismischen 2D-Linien vermessen hat. Ziel war die Erfassung von Lagerung und Tektonik der mesozoischen Schichtenfolge (Schulz et al. 1982). Die einzelnen Seismiklinien der Kampagne lagen am LGRB in Form von Papieraudrucken der Profilspielungen vor. Eine detaillierte Interpretation der Seismik stand nicht zur Verfügung. Eberhard (2012) hat die Linien im Rahmen einer Bachelorarbeit an der Universität Innsbruck qualitativ beschrieben und gestörte Bereiche ausgeschieden sowie eine Störungskorrelation im 2D-Raum versucht.

Im Bereich des Bodensees treffen die Teilarbeitsgebiete der beteiligten Partner des LCA-Pilotgebiets

aufeinander. Um die vorhandene Datenlücke im Bereich des Sees zu füllen, ließ swisstopo zunächst 10 ausgewählte Seismikprofile digitalisieren, auf ein Bezugsniveau von 500 m NN umrechnen und migrieren. Sowohl als Stapelung als auch als Migration lagen alle Linien in zwei Versionen vor: einmal ohne und einmal mit statischer Korrektur und Kohärenzfilterung. Die Stapelung ohne statische Korrektur war bei genügender Qualität von der Firma Prakla-Seismos zur Interpretation des Seebodens und der Basis Quartär benutzt worden. Die Ergebnisse waren Teil des Datensatzes zur Bestimmung der statischen Korrektur (Schulz et al. 1982). Die statische Korrektur soll dafür sorgen, dass unterschiedliche Höhenlagen von Sender und Empfänger ausgeglichen und der Einfluss niedriger Geschwindigkeiten im oberflächennahen Bereich reduziert werden (Verwitterungskorrektur, z. B. McQuillin et al. 1979). Ohne durchgeführte statische Korrektur zeichnen die mesozoischen Schichten die Rinnen des Seebodens nach und die Korrektur muss im Rahmen der Zeit-Tiefen-Konvertierung durchgeführt werden. Für die Seismikinterpretation von Basis Tertiär und den mesozoischen Horizonten wurden die migrierten Linien mit statischer Korrektur und Kohärenzfilterung ausgewählt.

4.3.4 Aufbereitung von Datensätzen aus der Literatur und von Vorgängerprojekten

Neben den primär bei der seismischen Interpretation im LCA-Pilotgebiet genutzten Bohr- und reflexionsseismischen 2D-Daten fand eine Vielzahl weiterer Geodaten aus der Literatur und aus früheren Projekten Eingang in die Modellierung.

Geologische Karten

Zum konsistenten Abgleich der geologischen 3D-Modellierung mit den Kenntnissen über die Verbreitung von Gesteinen und Störungsspuren an der Erdoberfläche wurde in Baden-Württemberg auf die geologischen Fachthemen der Integrierten Geologischen Landesaufnahme (GeoLa, LGRB 2015a) zurückgegriffen (Bearbeitungsstand Mai 2014). Die Datensätze liegen fachübergreifend homogenisiert, blattschnittfrei digital im mittleren Maßstabsbereich vor.

In Bayern wurden zum Abgleich der Verbreitung von modellierten und kartierten geologischen Einheiten die digitale Geologische Karte von Bayern im Maßstab 1:500.000 (GK500) sowie die Erläuterungen hierzu (BayGLA 1996) herangezogen. Diese kleinmaßstäbliche, aggregierte und bayernweit harmonisierte Karte fand Verwendung, da detailliertere



geologische Karten derzeit noch nicht flächendeckend für das Projektgebiet vorliegen. Insbesondere die Informationen zur Verbreitung von Paläozoikum und mesozoischen Abfolgen konnten mittels dieser synoptischen Darstellungen bzw. Beschreibungen überprüft und die Ausbisslinien von Oberer Meeresmolasse und Oberer Süßwassermolasse in das 3D-Modell übertragen werden. Ferner diente die GK500 zur Abgrenzung der Verbreitungsgebiete quartärer Einheiten, wenn keine größermaßstäbigen Informationen verfügbar waren.

Geologische Kartengrundlagen im Schweizer Teilgebiet bilden die Karten des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25.000 (GA25) als Pixelkarten und der digitale Vektordatensatz von GeoCover im gleichen Maßstab. Als Übersichtskarten wurden die Tektonischen Nebenkarten des GA25 im Maßstab 1:200.000, die Blätter Toggenburg und Vorarlberg der Geologischen Spezialkarte 128 „Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps“ (Piffner et al. 2010) im Maßstab 1:100.000 und die Geologische sowie Tektonische Karte der Schweiz 1:500.000 hinzugezogen. Da die Karten des GA25 weder semantisch noch an den Blattschnitträndern geometrisch harmonisiert sind, können die geologischen Konturen der Ausbisslinien nicht unverändert übernommen werden. Deshalb wurde aus dem obengenannten Kartenmaterial eine harmonisierte Karte der Molasseeinheiten kompiliert, welche für die 3D-Modellierung in GeoMol genutzt wurde, damit die Molassehorizonte und die Triangelzone an der Felsoberfläche angebunden werden konnten.

Strukturkarten

Für die räumliche Korrelation von in den seismischen Profilen detektierten Störungsspuren („Fault sticks“) und deren Verlaufsspuren in Horizontalschnitten zu Störungsflächen im 3D-Raum wurden die Daten des Bayerischen Geothermieatlas (BayStMIVT 2010) verwendet, einer digitalen und georeferenzierten Kompilation von Schichtlagerungskarten verschiedener Kohlenwasserstoff-Explorationskampagnen. Referenzlinien waren hierbei die Störungsspuren bezogen auf die Oberjura-Oberfläche.

Die Ergebnisse der seismischen Untersuchungskampagnen wurden von den im Alpenvorland prospektierenden Erdöl- und Erdgasfirmen in zahlreichen Schichtlagerungskarten in unterschiedlichen Maßstäben zusammengestellt. Insbesondere in der 1999 fertiggestellten und 2007 überarbeiteten „Alpenvorlandstudie“ (LBEG 2007) sind die bei der Erforschung der Kohlenwasserstoff-Potenziale Süddeutschlands gewonnenen Erkenntnisse über den tieferen Untergrund im Bereich Alpen und

Alpenvorland umfangreich dokumentiert und das verfügbare Kartenmaterial zusammengestellt worden. Für die seismische Interpretation im baden-württembergischen Teilgebiet wurden vor allem bei der räumlichen Korrelation von erfassten Störungen („Fault sticks“) über mehrere seismische Profile verschiedene Übersichtskarten verwendet.

Geologische 3D-Modelle

Im Rahmen der geologischen 3D-Modellierung für das Projekt KLIP (Klimaprogramm Bayern 2020) wurden im sogenannten 5-Seenland zwischen München und Lech Seismikprofile für ein einfaches 3D-Modell mit Fokus Tiefenlage des Oberjura und Störungsstrukturen ausgewertet (BayLfU 2014). Ziel des 3D-Modells war die Minderung der Erschließungs- und Nutzungsrisiken tiefer Geothermie in diesem Teilbereich des Bayerischen Molassebeckens. Das Modell reicht von Osten her abschnittsweise in das LCA-Gebiet hinein und liefert in Bereichen mit unzureichender Datendichte und fraglichen Interpretationen zusätzliche, plausibilitätsgeprüfte Stützpunkte.

In Baden-Württemberg existieren mit dem geologischen Landesmodell Baden-Württemberg (Rupf & Nitsch 2008) und dem geologischen 3D-Modell für das Informationssystem für Oberflächennahe Geothermie (ISONG, Rupf & Armbruster 2008) bereits zwei flächendeckende 3D-Modelle für das LCA-Gebiet. Diese Modelle basieren im Wesentlichen auf der Auswertung von Bohrungen, Strukturkarten und den Ausbisslinien der modellierten Flächen nach GeoLa (LGRB 2015a). Seismikprofile wurden für die Konstruktion hingegen nicht hinzugezogen.

Digitales Geländemodell

Als digitales Geländemodell standen in Baden-Württemberg und Bayern aufbereitete SRTM-Daten (Shuttle Radar Topography Mission, Bezugsquelle CGIAR: <http://srtm.csi.cgiar.org/>) mit einer Pixelgröße von 77,6m für das Projektgebiet zur Verfügung. Für die geologische 3D-Modellierung und als Grundlage für das Produktgrid zur Ableitung von Ergebnisdaten erfolgte ein Resampling der Daten auf eine Pixelgröße von 100m.

In der Schweiz wurde das digitale Höhenmodell DHM25 der swisstopo als Grundlage für die 3D-Modellierung genutzt. Es wurde im Wesentlichen aus der Höheninformation der Landeskarte 1:25.000 (LK25) abgeleitet. Das digitale Höhenmodell wurde für den Schweizer Anteil des Projektgebiets auf eine Pixelgröße von 50m umgerechnet.

Interpretierte Seismikprofile in Baden-Württemberg („Line drawings“)

In Baden-Württemberg sind ca. 1.170 Interpretationen von erkennbaren Reflektoren und Störungen aus Seismikkampagnen verfügbar (sog. „Line drawings“). Sie enthalten zumeist keine Messabspielungen, zeigen die Interpretation verschiedener Reflektoren, besitzen unterschiedliche Bezugsniveaus und wurden kampagnen-spezifisch mit einfachen Geschwindigkeitsmodellen in die Tiefendomäne umgerechnet. Eine hinreichend genaue Rekonstruktion der Scans in der Zeitdomäne für die seismische Interpretation im Teilgebiet LCA-BW wäre daher – auch angesichts der großen Datenmengen – mit einem nicht vertretbaren Zeitaufwand bei der Datenaufbereitung verbunden gewesen. Bei der Modellierung von Störungsflächen wurden die Scans in Einzelfällen, vor allem bei Unsicherheiten in der räumlichen Korrelation von „Fault sticks“, als ergänzende Information verwendet (vgl. Abb. 4-3). Hierfür wurden ausgewählte „Line drawings“ in die Software Gocad importiert, im 3D-Raum georeferenziert und auf die vertikale 2D-Fläche ihres Profilverlaufs projiziert.

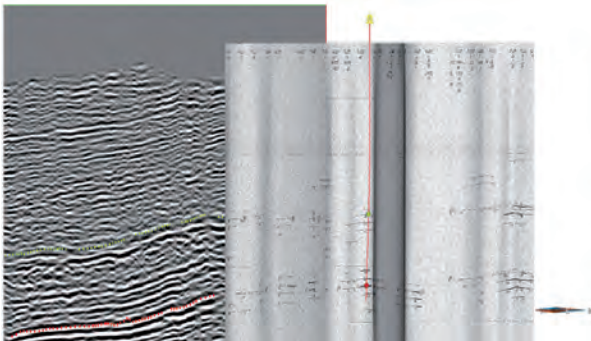


Abb. 4-3: Kombination verschiedener Eingangsdatensätze in der Modellierungssoftware: Die Marker der Bohrung sind Voraussetzung für die Interpretation der reprozessierten SEG-Y-Datensätze. Die im SEG-Y-Datensatz erfassten Horizonte Basis Tertiär (grün) und Basis Mitteljura (rot) können im „Line drawing“ als eingetragene Reflektoren weiterverfolgt werden.

Daten aus dem Nagra-Projekt „Kompilation und Interpretation der Reflexionsseismik im Tafeljura und Molassebecken der Zentral- und Nordostschweiz“ (Roth et al. 2010)

Die Nagra-Studie „Kompilation und Interpretation der Reflexionsseismik im Tafeljura und Molassebecken der Zentral- und Nordostschweiz“ beschäftigte sich mit der Zusammenführung vorhandener reflexionsseismischer Daten aus der Zentral- und Nordostschweiz, der Vereinheitlichung ihrer Interpretation und der Ableitung von Struktur- und

Schichtlagerungskarten aus diesen Daten. Das Ergebnis dieser Studie wurde als Bericht mit Beilagenkarten von Roth et al. (2010) veröffentlicht. Neben dem Bericht wurden von der Nagra verschiedene digitale Daten aus dieser Studie, namentlich die Seismiklinien und ihre Interpretation in der Zeitdomäne, für das Projekt GeoMol zur Verfügung gestellt.

Die Seismiklinien lagen prozessiert in der Zeitdomäne im Format SEG-Y vor. Im Teilgebiet LCA-CH waren bis auf eine Seismiklinie alle migriert. Eine einheitliche Reprozessierung der gesamten Reflexionsseismik ist im Rahmen der Nagra-Studie nicht durchgeführt worden. Dafür sind die Linien sorgfältig ausbalanciert und die verwendeten Verschiebungsbeträge und Phasenrotationen dokumentiert. Diese Angleichungsbeträge wurden auf die SEG-Ys nach ihrem Import in die Interpretationssoftware IHS Kingdom angewendet.

Insgesamt sind von der Nagra sieben Horizonte durchgängig interpretiert worden (nach GeoMol-Nomenklatur: Basis Obere Süßwassermolasse, Basis Obere Meeresmolasse, Basis Tertiär, Top Mitteljura, Top Unterjura, Top Muschelkalk, Top Paläozoikum), die alle im Rahmen von GeoMol berücksichtigt werden sollten. Diese Horizontinterpretationen wurden zusammen mit der Interpretation der Störungsspuren als digitale Daten zur Verfügung gestellt.

4.4 Erstellung des LCA-Pilotgebietsmodells

4.4.1 Verbreitungspolygone, Mächtigkeits- und Faziesverteilungen

Die Interpretation der Seismikdaten und die darauf aufbauende geologische 3D-Modellierung wird durch Abschätzungen der Verbreitung der Modellhorizonte sowie grundlegende Kenntnisse zur Mächtigkeits- und Faziesentwicklung erleichtert. Haupteingangsdatensatz sind hierfür Bohrmarker und bereits publizierte oder hausintern verfügbare Kartendarstellungen. Um Konsistenz zwischen den korrespondierenden Einheiten von Übersichts- und Pilotgebietsmodell zu gewährleisten, wurden diese Datensätze für beide Modelle gleichermaßen genutzt.

Verbreitungspolygone

Nicht jede Modellgrenze ist über den gesamten Projektraum verbreitet. Neben primären Sedimentationsschlüssen können die Gesteine zu einem späteren



Zeitpunkt erosiv gekappt worden sein. Für die Abschätzung der Verbreitung wurden hauptsächlich Bohrmarker und der Ausstrich an der Geländeoberfläche analysiert sowie Daten aus älteren Publikationen genutzt. Allerdings ist die Information aus Bohrungen mit zunehmender Tiefe und außerhalb der intensiv erkundeten Erdölstrukturen ungleichmäßig verteilt und lückenhaft, sodass die Existenz oder das Fehlen geologischer Einheiten in diesen Bereichen mit Unsicherheiten behaftet ist. Für die Konstruktion von Verbreitungspolygonen wurden die Eingangsdaten verschiedener Herkunft zunächst im GIS miteinander kombiniert und auf eventuell auftretende Widersprüche geprüft. Falls Unterschiede auftraten, wurden die in GeoMol harmonisierten Bohrdatensätze genutzt, um die Zuverlässigkeit der zusätzlichen Datenquellen zu evaluieren.

Mächtigkeitsverteilungen

Einige Horizonte waren nicht in den Seismikprofilen erkennbar und mussten mit Hilfe von Mächtigkeitsverteilungen durch Addition oder Subtraktion ausgehend von bereits modellierten Grenzflächen in das Modell eingefügt werden. Je nach Dateneingangslage und Eigenschaften des betrachteten Schichtpakets wurden die Mächtigkeitsverteilungen mit verschiedenen Methoden konstruiert (Details in den Tabellen 4-3 und 4-4).

Die Modellierung von Mächtigkeitsverteilungen basierend auf einem **Bohrmarker** ist die Standardmethode, die für die Mehrzahl der im Projektkontext entworfenen Verteilungen genutzt wurde (z. B. Oberer Muschelkalk in BW vgl. Abb. 4-4). Im

Tab. 4-3: In Bayern erstellte Mächtigkeitsverteilungen (FM: Geologisches Übersichtsmodell, LCA: LCA-Pilotgebietsmodell).

Name	Methode	Genutzt für FM/LCA
Bausteinschichten tBSS	Bohrmarker (Kriging)	LCA
Impressamergel-Fm. jol	Bohrmarker (Kriging)	LCA
Mittlerer Keuper km	Bohrmarker (Kriging)	FM/LCA
Unterer Keuper ku	Bohrmarker (Kriging)	LCA
Oberer Muschelkalk mo bis Mittlerer Muschelkalk mm	Bohrmarker (Kriging)	FM/LCA

Tab. 4-4: In Baden-Württemberg genutzte Methoden für die Konstruktion von Mächtigkeitsverteilungen (FM: Geologisches Übersichtsmodell, LCA: LCA-Pilotgebietsmodell).

Name LGRB	Methode	genutzt für FM/LCA	Quelle (Kokriging)
Obere Meeresmolasse tOM (gesamt)	Bohrmarker (DSI)	FM	-
Steinhöfe-Fm.	Prozentmethode	LCA	-
Baltringen-Fm.	Prozentmethode	LCA	-
Heidenlöcher-Fm. und Kalkofen-Fm.	Prozentmethode	LCA	-
Untere Meeresmolasse tUM (gesamt)	Bohrmarker (DSI)	FM	-
Bausteinschichten	Prozentmethode	LCA	-
Tonmergel der Unteren Meeresmolasse	Prozentmethode	LCA	-
Oberjura (gesamt)	direkte Interpolation	FM/LCA	-
Impressamergel-Fm.	direkte Interpolation	LCA	-
Mitteljura (gesamt)	Kokriging	FM/LCA	Landesmodell
Unteljura (gesamt)	Kokriging	FM/LCA	Landesmodell
Keuper (gesamt)	Kokriging	FM/LCA	Landesmodell
Unterkeuper	Prozentmethode	LCA	-
Oberer Muschelkalk	Bohrmarker (DSI)	FM/LCA	-
Mittlerer Muschelkalk	Bohrmarker (DSI)	FM/LCA	-
Diemel-Fm.	Prozentmethode	LCA	-
Unterer Muschelkalk	Bohrmarker (DSI)	FM/LCA	-

Rahmen dieses Workflows wurden in Baden-Württemberg die Bohrmarker für eine erste Übersicht in der Modellierungssoftware Gocad mit dem Gocad-spezifischen DSI-Algorithmus (Discrete Smooth Interpolation Method, Mallet 1992) interpoliert. Die dadurch entstehende Fläche zeigt die grundlegende Mächtigkeitsentwicklung über den Projekt- raum, lässt aber auch offensichtliche Ausreißer erkennen, die auf Fehler in den Eingangsdaten zurückzuführen sind. In Bayern wurden für diesen Arbeitsschritt in der Software Surfer im Kriging-Verfahren Verteilungen erstellt (vgl. Tab. 4-3). Nach Bereinigung der Eingangsdatensätze und nochmaliger Interpolation wurden die Isopachen in ArcGIS an bekannte paläogeographische Elemente, wie Küstenlinien, glazigene oder fluviatile Erosionsrin- nen, Becken und Schwellen angepasst. Neben den Bohrungen mit vollständiger Schichtenfolge liefern auch unvollständige Profile (Bohrung setzt inner- halb der betrachteten Einheit an oder erreicht deren Basis nicht, tektonisch bedingter Schichtausfall) wertvolle Informationen zu Mindestmächtigkeiten. Aus den in ArcGIS modifizierten Isopachen können Grids mit einheitlicher Zellgröße und Flächen in der Modellierungssoftware erzeugt werden.

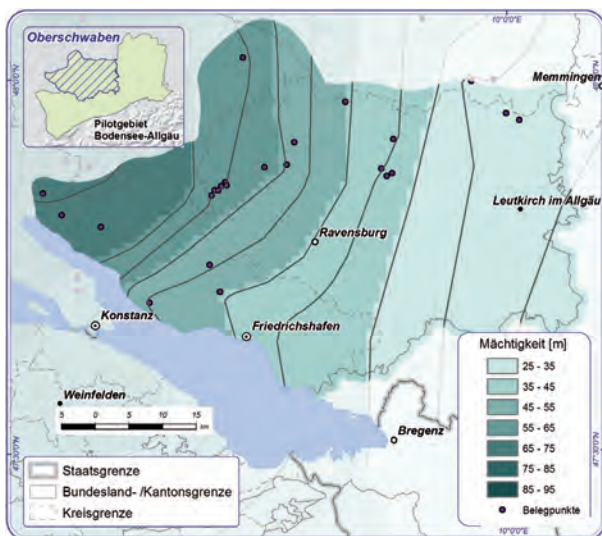


Abb. 4-4: Im LCA-Teilgebiet Baden-Württemberg wurde die Mächtigkeitsverteilung Oberer Muschelkalk mit der Methode „Bohrmarker- set“ rekonstruiert.

Kokriging ist eine multivariate, geostatistische Interpolationsmethode, bei der eine zu regionalisierende Variable mit Hilfe zusätzlicher Eingangs- daten geschätzt wird. Diese Methode eignet sich gut für die Konstruktion von Mächtigkeiten, für die bereits Verteilungen existieren. Letztere fungieren bei der Interpolation der Bohrmarker als weiche Datensätze im Hintergrund. Der Korrelationsko- effizient zwischen beiden Datensätzen bestimmt dabei, wie groß der Einfluss der älteren Verteilung

auf das Ergebnis ist. Der prinzipielle Arbeitsab- lauf gestaltete sich analog zu der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Abschätzung mit einem Bohrmarker- set. Hinzu kommen jedoch eine Vario- grammanalyse zur Beschreibung der Ortsabhän- gigkeit der Bohrmarker sowie die Berechnung des Korrelationskoeffizienten.

Für die Abschätzung der Mächtigkeit von Unter- schichten bei einer bereits modellierten überge- ordneten Einheit eignet sich die **Prozentmethode** besonders gut. Anders als bei den anderen hier beschriebenen Workflows werden statt absoluter Mächtigkeitsangaben die prozentualen Anteile der Untereinheiten am Schichtgesamtpaket berech- net. Einerseits lassen sich speziell in wenig beleg- ten Gebieten Schichtdurchdringungen vermeiden. Andererseits ähnelt die Geometrie der Isopachen der zugrunde liegenden Verteilung des Gesamt- pakets. Die Methode eignet sich auch gut für die nachträgliche Verfeinerung bestehender Modelle mit weiteren Horizonten. Allerdings muss getestet werden, ob sich die neu berechneten Verteilungen der Subeinheiten in geologisch sinnvollen Gren- zen bewegen, d. h. nicht zu geringmächtig oder zu mächtig werden. Im Zweifelsfall muss u. U. auch die übergeordnete Einheit nochmals justiert werden.

Schwanken die Mächtigkeiten aufgrund der Ablagerungsbedingungen oder nachträglicher Ero- sionsprozesse lokal stark, bleibt nur die **direkte Interpolation** der Mächtigkeitswerte aus Bohrmar- kern als erste grobe Annäherung. Auf diese Methode musste in Baden-Württemberg nur bei der Mächtig- keitsverteilung des Oberjura und der Impressamer- gel-Formation zurückgegriffen werden.

Faziesverteilungen

Neben dem Ausstrich der geologischen Einhei- ten an der Geländeoberfläche sind Bohrungen die wichtigste Quelle für die Rekonstruktion lateral variierender fazieller Ausprägungen der Gesteine. Da Faziesverteilungen stark von der jeweiligen paläogeographischen Situation abhängen, müs- sen entsprechende Informationen zum Verlauf von Küstenlinien oder der Verteilung von Becken und Schwellen bei der Konstruktion berücksichtigt werden. Weitere Informationen finden sich häufig in Textbeschreibungen der Literatur. Im Rahmen von GeoMol wurden in Baden-Württemberg fol- gende Faziesverteilungen für das oberschwäbische Molassebecken rekonstruiert (vgl. auch Kap. 3.3):

- Oberjura (Schwäbische und Helvetische Fazies)
- Mitteljura (Achdorf-Fm., Eisensandstein-Fm., Murchinsonae-Oolith-Fm., vgl. Abb. 4-5)



- Mittelkeuper (Grabfeld-Fm., Benk-Fm.)
- Unterer Muschelkalk (Grobkörnige Randfazies des Vindelizischen Landes)



Abb. 4-5: Faziesverteilung Mitteljura in Baden-Württemberg: jmAC: Achdorf-Formation, jmES: Eisensandstein-Formation, die Murchinsonae-Oolith-Formation (Sissach-Member in der Schweiz) liegt im Molassebecken westlich des LCA-Pilotgebietsmodells (vgl. Kap. 3.3.3).

4.4.2 Auswertung der Landseismik

Die Interpretation der einheitlich reprozesierten 2D-Seismikprofile (vgl. Kap. 4.3.2) wurde für das deutsche Teilgebiet innerhalb der auch für die 3D-Modellierung verwendeten Software Gocad (BW) bzw. SKUA (BY) in der Zeitdomäne durchgeführt. Auf diese Weise konnten die Ergebnisse direkt nach der Interpretation von Störungen und Horizonten in einem Seismikprofil einer visuellen Kontrolle mit allen anderen Eingangsdaten und schon vorhandenen Seismikinterpretationen im 3D-Raum unterzogen werden.

Seismische Reflektoren wurden anhand ihrer seismischen Signatur nach Merkmalen wie Amplitude, Frequenz, Anordnung und Kontinuität qualitativ charakterisiert und differenziert. In einem ersten Interpretationsschritt konnten die meisten Seismikprofile in drei Segmente unterteilt werden:

1 Im oberen Segment 1 treten Reflektoren mit schwachen bis mittleren Amplituden, niedrigen Frequenzen, geringer bis mittlerer Kontinuität und subparalleler bis gekrümmter Anordnung auf. Die Reflektoren korrespondieren mit quartären und tertiären Sedimentgesteinen und sind

zumeist nicht über weite Strecken im Profil zu verfolgen.

2 Reflektoren mit hohen Amplituden, mittleren Frequenzen, hoher Kontinuität und paralleler Anordnung treten im mittleren Segment 2 der Seismikprofile auf. Die Reflektoren korrespondieren mit mesozoischen Gesteinen und lassen sich generell gut verfolgen. Innerhalb dieses Abschnitts ist eine Zone mit schwächeren Reflektoren eingeschaltet.

3 Das untere Segment 3 der Seismikprofile zeigt keine über längere Strecken detektierbaren Reflektoren und fällt in der Regel mit kristallinen Gesteinen des Grundgebirges zusammen. Teilweise treten Artefakte der seismischen Prozessierung (Multiples) auf.

Die Zuordnung seismischer Reflektoren zu lithostratigraphischen Grenzen erfolgte auf Grundlage der aufbereiteten Bohrdaten, die mithilfe des vereinfachten Geschwindigkeitsmodells 1 (vgl. Kap. 4.4.6) in die Zeitdomäne konvertiert wurden. Folgende lithostratigraphische Grenzen (Horizonte) ließen sich in Baden-Württemberg und Bayern anhand ihrer seismischen Signatur in den Seismikprofilen visuell erfassen:

- Basis Obere Meeresmolasse (B_OMM): Untere Begrenzung eines Reflektorpakets mit mittleren Amplituden und mittlerer Kontinuität innerhalb der quartären / tertiären Gesteinsabfolge in Segment 1. Unterhalb der Grenze zeigen Reflektoren geringe Kontinuität und subparallele Anordnung. Die seismische Signatur ist nicht in allen Profilen eindeutig entwickelt.
- Basis Tertiär (B_T, entspricht Top Oberjura): Wechsel zwischen den Segmenten 1 und 2
- Top Unterjura (T_JL): Untere Begrenzung der Zone mit schwächeren Reflektoren innerhalb des Segments 2
- Top Paläozoikum (T_B): Wechsel zwischen den Segmenten 2 und 3

In Bayern konnten zudem folgende Horizonte in den Seismikprofilen erfasst werden:

- Basis Obere Süßwassermolasse (B_OSM): gut verfolgbarer Reflektor in guter Korrelation zu Bohrmarkern
- Basis Obere Jüngere Meeresmolasse (B_OMMJ = Baltringen-Fm.): ausreichend gut verfolgbarer Reflektor in guter Korrelation zu Bohrmarkern

- Basis Untere Jüngere Molasse (B_UMJ): ausreichend bis weniger gut verfolgbarer Reflektor in ausreichender Korrelation zu Bohrmarkern
- Top Mitteljura (T_JM): ausreichend gut verfolgbarer Reflektor in guter Korrelation zu Bohrmarkern

Eine phasengenaue Erfassung von lithologischen Grenzflächen unter Verwendung von synthetisch errechneten Seismogrammen ist mit den vorliegenden Daten nicht zu erreichen, da trotz sorgfältiger Reprozessierungsschritte (vgl. Kap. 4.4.2) auch nach der Datenaufbereitung z.T. Polaritäts- und Laufzeitunterschiede an Kreuzungsstellen verbleiben. Die generell limitierenden Faktoren einer Verwendung von synthetischen Seismogrammen für die 2D-Seismikinterpretation großräumiger Untersuchungsgebiete mit unterschiedlicher Tiefenlage und fazieller Ausprägung der seismisch erkennbaren lithologischen Grenzflächen werden z. B. in Roth et al. (2010) für den Tafeljura und das Molassebecken in der Schweiz im Detail beschrieben.

Zusammen mit den seismisch erkennbaren lithologischen Grenzflächen wurde in allen Seismikprofilen der Verlauf von Störungen erfasst. Die Versatzbeträge an den Störungen sind im Allgemeinen gering. Störungen konnten insbesondere an Unterbrechungen oder Änderungen im Verlauf oder der Amplitude von starken Reflektoren im Segment 2 (mesozoische Gesteine) erkannt werden. In diesem Bereich als sog. „Fault sticks“ erfasste Störungen ließen sich z.T. nach oben innerhalb des Segments 1 anhand von Ausbuchtungen (sagging) oder Unterdrückung von Reflektoren in der Verlängerung der „Fault sticks“ weiterverfolgen. Die obere Begrenzung der meisten Störungen im Segment 1 ist jedoch generell schwer zu bestimmen, sofern keine weiteren Informationen aus Bohrungen oder Schichtlagerungskarten vorliegen. Daher musste für die weitere Modellierung hier ein schematischer Ansatz verfolgt werden (vgl. Kap. 4.4.4).

Für den nördlichen und zentralen Teil des Schweizer Teilgebiets lag aus dem Projekt der Nagra (Roth et al. 2010) die Interpretation von 7 Horizonten digital vor. Diese Interpretation wurde in die Interpretationssoftware IHS Kingdom importiert und um die Horizonte Top Impressamergel-Fm. (Top Lower Malm) und Top Keuper ergänzt. Eine Beschreibung der Markerhorizonte, die sich auf die Charakteristika im gesamten von der Nagra bearbeiteten Gebiet bezieht, ist in Roth et al. (2010) zu finden. Hierin wird auch auf die Schwierigkeit verwiesen, bei regionalen Studien, die auf der Grundlage eines relativ heterogenen seismischen Datensatzes durchgeführt werden, für jeden Markerhorizont jeweils einen interpretierten Loop anzugeben. Die

verschiedenen seismischen Kampagnen mit ihren unterschiedlichen Erkundungszielen und unterschiedlichen Parametern bei der Aufnahme der Linien sowie die stark variierende Tiefenlage der Schichten durch ihr Abtauchen nach Süden unter den alpinen Deckenstapel führen zu erforderlichen Wechseln des gepickten Loop eines Markerhorizonts (Roth et al. 2010).

Die Interpretation der im Süden des Schweizer Teilgebiets neu hinzugekommenen Seismiklinien orientierte sich an der vorliegenden Interpretation der Nagra, indem an Kreuzungspunkten der von der Nagra gewählte Reflektor übernommen und entlang der zusätzlichen Linie weiterverfolgt wurde. Basierend auf neuen Informationen aus der Tiefbohrung St. Gallen wurde die Interpretation der St.-Gallen-Störungszone angepasst.

4.4.3. Auswertung der Bodensee-Seismik

AUG und LGRB interpretierten gemeinsam drei Horizonte (Basis Tertiär, Top Unterjura und Top Paläozoikum) sowie Störungsspuren der Bodensee-Seismik. Bayern und Vorarlberg verzichteten wegen der jeweiligen relativ geringen See-Anteils bzw. der eher schlechten Qualität der Linien im Süden des Sees nahe der Rheinmündung auf eine Interpretation. Eine Interpretation von Horizonten innerhalb des Tertiärs erfolgte nicht.

Die Anbindung zur Landseismik gestaltete sich schwierig, da nur ein See-Seismikprofil die Landseismiklinie erkp_8803 am Nordostufer kreuzt. Da es darüber hinaus keine Tiefbohrungen gibt, erfolgte die Interpretation der Reflektoren im relativen Vergleich mit der Landseismik. Die Interpretation wurde im weiteren Verlauf des Projekts von der Universität Basel um zusätzliche mesozoische Horizonte ergänzt. Ebenso wurden weitere Linien nach ihrer Digitalisierung und Migration in die Interpretation mit einbezogen.

Die Qualität der Bodensee-Linien ist im Allgemeinen deutlich schlechter als die der verwendeten 2D-Landseismik-Linien. Die vertikale Auflösung ist geringer und auch die Kontinuität der Reflektoren ist meist nicht besonders gut ausgeprägt, was die Interpretation, besonders die der Störungsspuren, erschwert. Allgemein ist die Qualität der Linien im Nordwesten besser als im Südosten. Besonders schlecht ist sie im Süden an der Rheinmündung, worauf auch schon im Bericht von 1982 hingewiesen wurde (Schulz et al. 1982). Dennoch konnten die Horizonte und Störungen konsistent interpretiert werden. Die mesozoischen Horizonte und die Basis Tertiär zeigen, wie in der Landseismik auch, ein



sanftes Einfallen nach Südosten in Richtung Alpenrand. Deutliche Störungsversätze waren allerdings nur selten erkennbar. Es scheinen eher Flexuren und wellige Lagerung vorzuherrschen. Die Korrelation der Störungsspuren zu den Störungsflächen war dadurch oft nicht möglich oder erschien als extrem unsicher. Deshalb wurden nur im baden-württembergischen Teilmodell zwei Bodenseeuferparallele Störungsflächen, eine bei Meersburg am Übergang Obersee in den Überlinger See und eine zweite bei Immenstaad, modelliert. Eine weitere Störungsfläche ließ sich im Bereich des Überlinger Sees zwar korrelieren, liegt jedoch außerhalb des LCA-Pilotgebiets und ist dadurch nicht Teil des 3D-Modells. Eine Korrelation von Störungsspuren der Schweizer Landseismik mit der Bodensee-Seismik sowie die Verfolgung bekannter Störungen vom Land, wie z. B. der St.-Gallen-Störungszone, unter den See war nicht möglich.

Da die Anbindung zwischen See- und Landseismik schwierig war, erfolgte zunächst eine Mistie-Korrektur aller bis zu diesem Zeitpunkt digital vorliegenden Bodenseelinien durch linienkonstante vertikale Verschiebungen untereinander. Danach wurden sie en bloc um einen Zeitbetrag von 110 ms vertikal verschoben. Dieser wurde unter der Annahme bestimmt, dass im Nordwesten (Landlinie SEAGU8401 mit Bohrung Kreuzlingen-1) die mesozoischen Reflektorpakete von der Land- zur See-Seismik kontinuierlich und ohne größeren Versatz verlaufen, sie also bei ungefähr horizontaler oder nur sehr schwach geneigter Lagerung auf annähernd gleicher Höhe (Zeit) zu liegen kommen. Die erst im weiteren Verlauf des Projektes digitalisierten und migrierten Bodenseelinien wurden in diese so ausbalancierten Bodenseelinien eingehängt.

Für einen Vergleich der Tiefenlage der interpretierten Horizonte auf Land- und Seelinien eignet sich aufgrund der besseren Datenlage das südwestliche Seeufer. Auf der nordöstlichen Seeseite sind die Distanzen zwischen Land- und Seelinien, insbesondere im Südosten, mit 2 bis 4 km relativ groß. Der Vergleich im Westen zeigte, dass am Südwestufer des Bodensees die Interpretation der Seeseismik in der Zeit-Domäne deutlich höher zu liegen kommt als auf der Landseismik (ein Versatz, der sich nicht allein aus der Distanz zwischen Land- und Seelinien erklären lässt). Allerdings kann aus diesem Versatz nicht sicher auf eine seeuferparallele Störung im Südwesten des Bodensees geschlossen werden. Denn wäre der Verschiebungsbetrag für die See-seismik statt im Nordwesten im Südwesten bestimmt worden, wäre das Resultat eine scheinbare seeuferparallele Störung im Nordwesten des Sees mit dem See als Tiefscholle gewesen. Generell sind seeuferparallele Störungen durchaus vorstellbar, da der

See ungefähr parallel zu den Störungen der Freiburg-Bonndorf-Bodensee-Störungszone verläuft und der südliche Rand des inneren Bodenseebeckens nördlich und nordwestlich von Romanshorn steil in ca. NW-SE Richtung verläuft (Schreiner 1975). Doch die Frage nach möglichen Seeufer-parallelen Störungen zwischen Land- und See-Seismik ließ sich mit den vorliegenden Daten im vorgegebenen Zeitrahmen nicht beantworten.

Aus zeitlichen Gründen konnte der Ursache des unklaren Bezugsniveaus im Detail nicht nachgegangen und Einflussfaktoren, wie statische Korrekturen und Geschwindigkeiten nicht getestet werden. Dies wäre aber wegen der fehlenden Nachvollziehbarkeit der von Prakla-Seismos im Rahmen des Surveys durchgeführten Korrekturen notwendig (schriftl. Mitt. Philippe Roth 25.08.2014).

Im Rahmen der 3D-Modellierung im LCA-Gebiet wurde aufgrund der Datenqualität darauf verzichtet, die Interpretation der Bodensee-Seismik bei der geologischen Modellierung zu berücksichtigen. Es wäre sinnvoll, die Frage eines möglichen Störungsversatzes im Bereich der Uferzone im Rahmen eines Anschlussprojektes zu bearbeiten.

4.4.4 Modellierung von Störungen

Die in den einzelnen Seismikprofilen erfassten Störungen („Fault sticks“) wurden in Baden-Württemberg und Bayern bereits in der Zeitdomäne räumlich miteinander korreliert und zu dreidimensionalen Störungsflächen modelliert. Die Festlegung des räumlichen Verlaufs der Störungen erfolgte dabei nach folgenden Kriterien:

- plausible Geometrie der Störungsfläche, d. h. gleich gerichtetes Einfallen von „Fault sticks“ mit vergleichbaren Einfallswinkeln, verwindungsfreie Störungsflächen (vgl. Abb. 4-6)
- Störungskontakte in einem sinnvollen geometrischen und genetischen Zusammenhang, keine sich kreuzenden Störungsflächen
- Berücksichtigung regionalgeologischer Kenntnisse der Entwicklung des Molassebeckens mit vorherrschenden beckenparallelen, synthetischen und antithetischen Abschiebungen
- Einbeziehung von Strukturmarkern aus Bohrungen
- Beachtung unterschiedlicher Positionen von Schichtmarkern in benachbarten Bohrungen
- Einbeziehung der Störungsspuren aus der Geologischen Karte

- Einbeziehung der Störungsverläufe aus Strukturkarten oder Störungen aus interpretierten Seismikprofilen („Line drawings“)

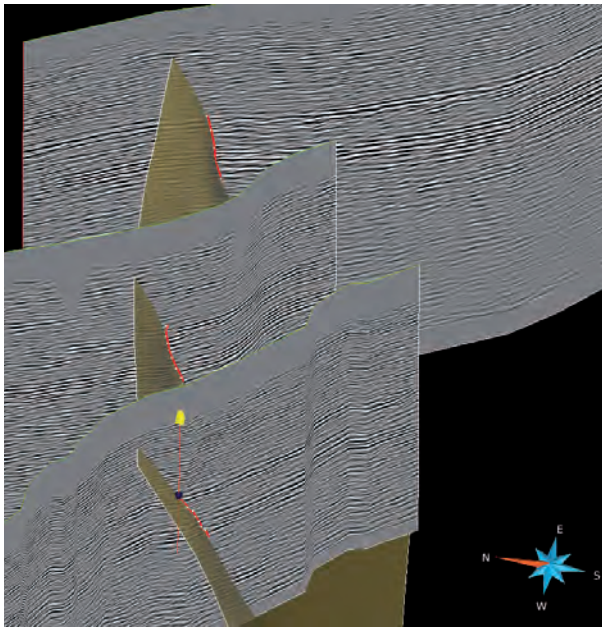


Abb. 4-6: Modellierung von Störungen basierend auf der Korrelation von „Fault sticks“ in der Seismik (rote Linien) und Bohrmarkern (GeoMol Team 2015): Das gleich gerichtete Einfallen der „Fault sticks“ ist Voraussetzung für die Modellierung verwindungsfreier Störungsflächen.

Die Störungsflächen wurden in Baden-Württemberg mit Hilfe des „Structural Modeling Workflow“ in Gocad erstellt. In Bayern wurde der „Structure and Stratigraphy Workflow – SnS“ in SKUA benutzt. Die seitlichen Begrenzungen der Störungsflächen wurden, ausgehend von den am Rande gelegenen „Fault sticks“, um 500m in Streichrichtung verlängert. Vereinfachend wurden alle Störungsflächen mit dem Einfallswinkel des tiefstreichenden „Fault stick“ bis in 5.000ms Teufe und damit bis weit unterhalb der tiefstgelegenen Modelleinheit (Top Paläozoikum) modelliert. Bei einem erkennbaren Versatz der Basis Tertiär wurde in Baden-Württemberg die obere Begrenzung der Störungsfläche mit dem Einfallswinkel der jeweiligen „Fault sticks“ auf 300ms (= obere Begrenzung des Modellblocks in Zeitdomäne) nach oben verlängert. Bei Störungen, die die Tertiärbasis erkennbar nicht versetzen, wurde das obere Ende des höchstreichenden „Fault stick“ als obere Begrenzung festgelegt.

Auf diese Weise konnten im baden-württembergischen Teilgebiet insgesamt 350 in den Seismikprofilen erfasste „Fault sticks“ zu 87 Störungsflächen modelliert werden. Nur im Falle sich

durchkreuzender oder unmittelbar aneinander grenzender Störungsflächen wurden die Kontakte mit den Möglichkeiten des Structural Modeling Workflow weiter geometrisch bearbeitet und in Haupt- bzw. Nebenstörungen unterteilt. In allen anderen Fällen repräsentieren die Störungsflächen Einzelobjekte mit graduell abnehmendem Versatz der modellierten Horizontflächen an den Störungsrändern. Insgesamt konnten 29 „Fault sticks“ nicht korreliert werden und wurden in der weiteren geologischen Modellierung nicht berücksichtigt.

Im bayerischen Teilgebiet wurden Hunderte in den Seismikprofilen erfasste „Fault sticks“ zu Störungsflächen modelliert. Wie auch im LCA-BW Gebiet wurden im Falle sich durchkreuzender oder unmittelbar aneinander grenzender Störungsflächen die Kontakte mit den Möglichkeiten des „SnS“-Workflow weiter geometrisch bearbeitet und in Haupt- bzw. Nebenstörungen unterteilt. Etliche „Fault sticks“ konnten auch in Bayern nicht korreliert und daher bei der weiteren geologischen Modellierung nicht berücksichtigt werden.

Nach der Konvertierung der seismischen Interpretationsobjekte in die Tiefendomäne wurden die Störungsflächen analog zur oben beschriebenen Vorgehensweise in der Tiefendomäne rekonstruiert. In Baden-Württemberg wurden die oberen Begrenzungen der Störungsflächen nach folgenden Kriterien weiter differenziert:

- Störungsspur in Geologischer Karte vorhanden: Modellierung der oberen Begrenzung bis zum Digitalen Geländemodell
- Versatz der Basis Obere Meeresmolasse (B_OMM) in einem oder mehreren Seismikprofilen erkennbar: Modellierung der oberen Begrenzung 10m unterhalb der Basis Obere Süßwassermolasse (B_OSM)
- Versatz an der Basis Tertiär (B_T) in einem oder mehreren Seismikprofilen erkennbar: Modellierung der oberen Begrenzung 10m unterhalb der Basis Obere Meeresmolasse (B_OMM)
- Kein erkennbarer Versatz an der Basis Tertiär: oberes Ende des höchstreichenden „Fault stick“ als obere Begrenzung festgelegt

In Bayern entsprechen die oberen Begrenzungen der Störungen Unterbrechungen oder Amplituden-Änderungen deutlich erkennbarer Reflektoren. Als untere Begrenzung der Störungsflächen wurde in Baden-Württemberg ein Wert von -4.500m in der Tiefendomäne definiert, in Bayern wurde ein Wert von -7.000m NN gewählt.



Im Schweizer Teilgebiet erfolgte die Korrelation der Störungsspuren zu Störungsflächen in der Zeitdomäne in der Interpretationssoftware IHS Kingdom. In dem von der Nagra bearbeiteten Bereich basierte sie, mit kleinen Änderungen wie z. B. bei der St.-Gallen-Störungszone, auf den Strukturkarten in Roth et al. (2010). Weitere Störungsflächen wurden hauptsächlich im Süden des Modellgebiets korreliert.

Bedingt durch die Methodik der Zeit-Tiefen-Konvertierung mit Hilfe von Geschwindigkeitsrastern und durch die Verwendung von Intervallgeschwindigkeiten für die mesozoischen Einheiten konnten weder die Störungsflächen noch die Störungsspuren direkt in die Tiefendomäne konvertiert werden. Hier mussten die Störungen aus den Sprüngen der Horizonte angenähert rekonstruiert und modelliert werden. Um die Störungsflächen nicht direkt an den sie begrenzenden Störungsspuren enden zu lassen, sind sie in Abhängigkeit ihrer Länge zu jeder Seite um bis zu 500m verlängert und der Versatz zum Störungsende hin auslaufend modelliert worden.

Eine Ausnahme bilden die innerhalb der tertiären Schichtenfolge liegenden und keinen Modellhorizont versetzenden Hauptstörungen der Triangelzone. Für sie wurden die Störungsspuren aus der Seismikinterpretation unter Verwendung des Rasters der Durchschnittsgeschwindigkeiten Basis Tertiär in die Tiefe konvertiert. Danach wurden die Störungen in Gocad aus diesen konvertierten Störungsspuren zusammen mit dem Ausbiss der Störungen nach den geologischen Karten modelliert.

Die Berlingen-Störung (Zaugg et al. 2008) im Norden des Teilgebiets LCA-CH, die aufgrund von Bohrinformationen (unterschiedliche Tiefenlage des Horizontes Basis Obere Süßwassermolasse in den Bohrungen Berlingen-2 und Berlingen-3) ableitbar ist, wurde wegen ihrer randlichen Lage zu den Seismiklinien nicht in der Seismik interpretiert, sondern entlang ihrer interpretierten Störungsspur auf dem GA25 Blattnummer 112 Steckborn (Zaugg & Geyer 2008, Zaugg et al. 2008) und mit einem angenommenen Einfallswinkel von 80° modelliert. Da unbekannt ist, ob die Störung bis in die mesozoischen Schichten reicht oder innerhalb des Tertiärs ausläuft, wurde sie nur mit Versatz an Basis Obere Süßwassermolasse und Basis Obere Meeresmolasse modelliert und endet unterhalb dieses Horizonts.

St.-Gallen-Störungszone

Die Ergebnisse der Tiefbohrung St. Gallen zeigen, dass ein lineares Verbinden der Störungsspuren aus der 2D-Seismik die tatsächliche Störung nur sehr vereinfacht darstellt (vgl. Kap. 3.2). Im Zuge

der Modellierung von Störungsflächen aus den interpretierten Störungsspuren musste die Krümmung der Störungsfläche im Bereich der Tiefbohrung St. Gallen so gewählt werden, dass die Basis der Bohrung, entsprechend der Bohraufnahme, in der Tiefscholle zu liegen kommt.

Ein Unterschied zur Darstellung auf den Nagra-Strukturkarten (Roth et al. 2010) ist die Abtrennung des nördlichsten Teils der östlichen Störung, der ungefähr in N-S-Richtung verläuft, und damit seine Interpretation und Modellierung als eigenständige Störung. Die westliche Störung ist, abweichend von Roth et al. (2010), nach Südwesten verlängert worden. Begründet ist dies durch einen zusätzlichen Befund auf einer seismischen Linie, welche südwestlich des Nagra-Projektgebiets liegt und Roth et al. (2010) nicht vorlag.

Weil für das Projekt GeoMol die Ergebnisse der 3D-seismischen Untersuchung nicht zur Verfügung standen, konnte die St.-Gallen-Störungszone nicht detailliert modelliert werden und ihre Darstellung erfolgt analog Roth et al. (2010) vereinfacht als zwei Störungen mit Extensionscharakter.

Triangelzone

Die die Triangelzone begrenzenden Hauptstörungen (Frontale Überschiebung der Subalpinen Molasse, Rücküberschiebung der Triangelzone und Basale Überschiebung der Triangelzone) konnten in mehreren Seismiklinien anhand diskordanter Reflektoren interpretiert werden, wobei die Interpretation der Basalen Überschiebung der Triangelzone mit den größten Unsicherheiten behaftet ist. Auf den Kartenblättern der Geologischen Spezialkarte 128 „Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps“ (Pfiffner et al. 2010) verläuft die südvergente Frontale Überschiebung der Subalpinen Molasse als einzelne Überschiebung von Westen kommend in das Teilgebiet LCA-CH hinein und teilt sich dann in zwei subparallel verlaufende und das ganze Gebiet LCA-CH querende Störungen auf. Auch diese Störung konnte in der Seismik interpretiert und modelliert werden. Die interne Struktur der Triangelzone war nicht oder nur teilweise interpretierbar.

Weitere Störungen im Schweizer Teilgebiet

Im Südosten des Arbeitsgebiets wurde über eine Länge von ca. 16 km eine SW-NE verlaufende Abschiebung modelliert. Aufgrund der großen Distanz zwischen den seismischen Linien zueinander, stellt die Korrelation ihrer Störungsspuren zu einer zusammenhängenden Störungsfläche vermutlich

eine starke Vereinfachung dar. Diese Korrelation wurde nur deshalb durchgeführt, weil die scheinbaren Versätze bis zu 70 ms (Top Muschelkalk) eine markante Struktur vermuten lassen und keine andere, näherliegende Möglichkeit der Korrelation dieser Störungsspuren vorhanden war.

4.4.5 Modellierung von Horizonten

Die in den einzelnen Seismikprofilen erfassten lithologischen Grenzflächen (Horizonte, „Horizon picks“, vgl. Tab. 4-1) wurden in den Teilgebieten Baden-Württemberg und Bayern bereits in der Zeitdomäne zu dreidimensionalen Flächen modelliert. Die Horizontflächen wurden in Baden-Württemberg mit Hilfe des „Structural Modeling Workflow“ in Gocad erstellt. Für die Berechnung des TINs wurde ein Größenwert von 300m vorgegeben, um eine gleichmäßige Dreiecksvermaschung zu erreichen. In Bayern wurde die Software SKUA für die Modellierung der Horizonte genutzt. SKUA ist im Gegensatz zu Gocad volumenorientiert ausgerichtet. Daher werden alle Flächen des Horizontstapels als voneinander abhängige Einheiten immer gleichzeitig mit derselben Maschenweite berechnet. Um den Rechenaufwand der zahlreichen Iterationsschritte in einem überschaubaren Rahmen zu halten, wurden die Horizontflächen mittels des SKUA „Structure and Stratigraphy“-Workflow mit einer Maschenweite von 700m erstellt.

Nach dem Aufbau des Geschwindigkeitsmodells 2 (vgl. Kap. 4.4.6) und der Konvertierung der seismischen Interpretationsobjekte in die Tiefendomäne wurden die Horizontflächen analog zur oben beschriebenen Vorgehensweise sowie unter Verwendung der Bohrmarker in der Tiefendomäne neu erstellt und weiter bearbeitet.

Auf Grundlage der aus der Seismik interpretierten Horizonte wurden die zusätzlichen Modellflächen (vgl. Tab. 4-1) mit Hilfe der in Kap. 4.3.4 beschriebenen Mächtigkeitsverteilungen modelliert (vgl. Abb. 4-7). Die Mächtigkeit einer Schichtenfolge wurde dabei zur Tiefenlage des bereits modellierten Referenzhorizonts addiert bzw. von dieser subtrahiert. Nach dem Entfernen überstehender Flächenpartien in Störungsbereichen fanden die so errechneten Top- bzw. Basisflächen als Punktdatensätze Eingang in den Workflow. Die Flächen wurden hier analog zu den bereits bestehenden Horizontflächen gebildet und an Störungen ggf. manuell editiert.

Abschließende Arbeiten an allen Horizontflächen beinhalteten das exakte Heranziehen und Fixieren der Flächen an die Bohrmarker und das Schneiden der Flächen mit den Verbreitungspolygonen.

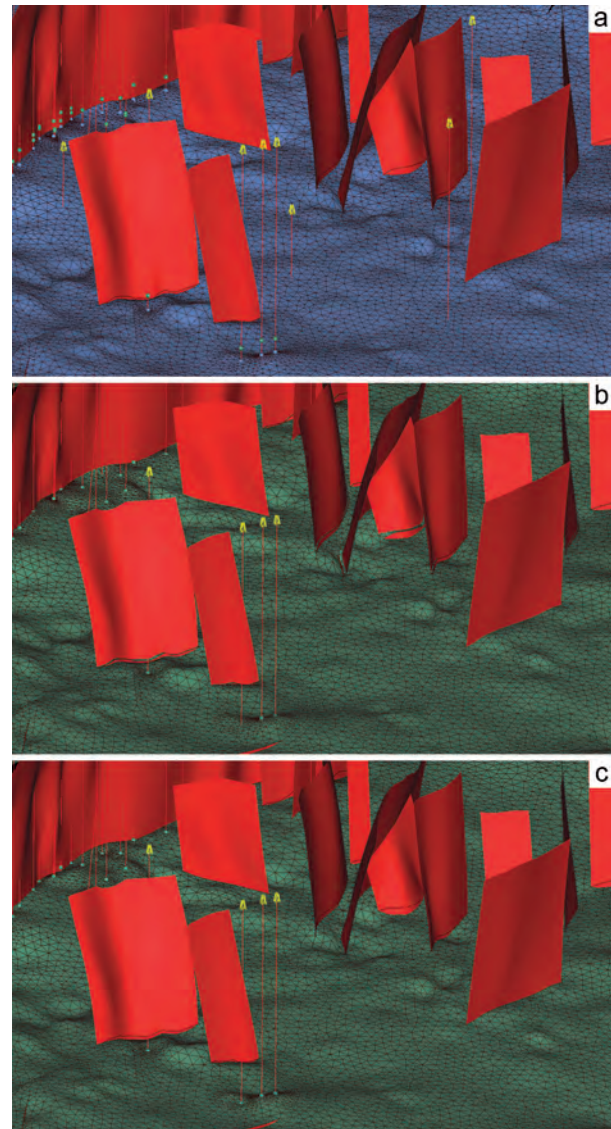


Abb. 4-7: Perspektivischer Blick in nordöstliche Richtung auf einen Teilausschnitt des LCA-Modells in Baden-Württemberg (3-fach überhöht): (a) zeigt den aus der Seismik modellierten und an Bohrmarker (blau) und Störungsflächen (rot) angepassten Horizont Top Unterjura als blaue Fläche mit sichtbarer Dreiecksvermaschung. Auf Grundlage dieses Horizonts und der rekonstruierten Mächtigkeitsverteilung für den Mitteljura erfolgte die Modellierung des Horizonts Top Mitteljura: (b) zeigt die Tiefenlage des Top Mitteljura nach Addition der Mächtigkeit des Mitteljura (grüne Fläche mit sichtbarer Dreiecksvermaschung), (c) die endgültige Modellfläche Top Mitteljura nach der Bearbeitung in Störungsbereichen und Anpassung an Bohrmarker (grün).

Im Schweizer Teilgebiet wurden die Horizonte in einem Prozess mit mehreren Teilschritten aus der Seismikinterpretation und den Bohrungen mit den Programmen IHS Kingdom, ArcGIS und Gocad gebildet. Zu den größeren Teilschritten gehören 1) Rasterung der Seismikinterpretation, 2) Zeit-Tiefen-Konvertierung, 3) Anpassung an die Bohrmarker, 4) Modellierung Kontakt Horizont – Störungen,



5) Modellierung Ausstrich an der Geländeoberfläche (nur Top Obere Meeresmolasse und Top Untere Süßwassermolasse) und 6) Grenzabgleich mit den Flächen der Pilotgebietspartner.

Die Anpassung der Schweizer Horizonte an die Bohrmarker erfolgte in zwei Schritten. Zuerst wurden nur die Bohrungen berücksichtigt, die auch in das Geschwindigkeitsmodell eingegangen sind (vgl. Kap. 4.4.6). Aus der Differenz der Bohrmarker zum Horizont, gegebenenfalls unter Einbeziehung von Hilfspunkten mit angenommenen Werten, wurde pro Horizont ein Korrekturraster gerechnet und auf die Horizonte angewendet. Dieser Schritt entspricht einer Korrektur des Geschwindigkeitsmodells. In einem zweiten Schritt wurden die Horizonte lokal an die Bohrungen ohne Geschwindigkeitsinformationen angepasst. Bei der Modellierung des Kontakts Horizont–Störung wurden Artefakte aus der Rasterung und Zeit-Tiefen-Konvertierung entfernt und Lücken geschlossen.

Zwei Horizonte (Top Heilbronn-Formation und Top Unterkeuper), welche nicht in der Seismik interpretiert wurden, sind mit einer aus Bohrdaten ermittelten mittleren vertikalen Mächtigkeit in den Horizont-Stapel eingefügt und lokal an die Bohrmarker angepasst worden.

Die Modellierung der Basis Quartär (B_Q) unterscheidet sich aufgrund des regional stark variierenden Eingangsdatenbestandes generell von den Arbeitsabläufen zur Modellierung anderer Horizonte. Die Horizontfläche wurde für das baden-württembergische Teilgebiet aus dem geologischen Übersichtsmodell übernommen, um die Konsistenz beider in GeoMol erstellten Modelle zu gewährleisten (vgl. Kap.4.5). Im bayerischen Gebietsanteil standen für die Basis Quartär Isolinien aus dem Fachdatenpool des Bayerischen Bodeninformatonssystems (BIS-BY) zur Verfügung.

In der Schweiz wurde die Basis Quartär (Top Fels) basierend auf Bohrdaten, geologischen Karten, geologischen Publikationen und bestehenden Felsisohypsenkarten und Felsmodellen in ArcGIS erstellt. Dieses digitale Höhenmodell der Felsoberfläche besteht aus einem Raster mit einer Maschenweite von 50m.

4.4.6 Geschwindigkeitsmodellierung

Im Rahmen von GeoMol wurden in Bayern und Baden-Württemberg zwei Geschwindigkeitsmodelle für die Konvertierung von Daten zwischen Tiefen- und Zeitdomäne erstellt. In der Schweiz beschränkte sich die Geschwindigkeitsmodellierung

auf ein Modell für die Zeit-Tiefenwandlung der Horizonte. Die Interpretation der Horizonte in den Seismikprofilen wird im Wesentlichen an Bohrmarkern kalibriert. Dafür müssen die Bohrdaten von der Tiefen- in die Zeitdomäne umgerechnet werden. Da nicht für alle Bohrungen Informationen aus Geophonversenkungsmessungen vorliegen, ist ein Geschwindigkeitsmodell in der Tiefendomäne notwendig, um die Daten entsprechend konvertieren zu können.

Nach der Modellierung der in der Seismik detektierbaren Störungen und Horizonte müssen diese Objekte von der Zeit- in die Tiefendomäne überführt werden. Für diesen Zweck wurde ein zweites Geschwindigkeitsmodell in der Zeitdomäne erstellt. Für diese Aufgabe standen die bereits im ersten Modell genutzten Geophonversenkungs- und Aufzeitmessungen zur Verfügung. Zudem konnte in Baden-Württemberg das in der Zeitdomäne erstellte 3D-Modell in Kombination mit Bohrungen und Angaben aus dem GeoMol Übersichtsmodell in der Tiefendomäne für die Berechnung zusätzlicher Geschwindigkeitsstützstellen herangezogen werden. Durch die erhöhte Eingangsdatendichte ist das zweite Geschwindigkeitsmodell komplexer gebaut und weist einen höheren Detaillierungsgrad auf.

Geschwindigkeitsmodellierung im Teilgebiet LCA-BW

Die Generierung der Geschwindigkeitsmodelle folgt in Grundzügen dem bereits im Oberrheingraben entwickelten und erfolgreich getesteten Arbeitsablauf und ist in GeORG-Projektteam (2013) in den Berichtsteilen 1 und 3 ausführlich beschrieben.

Die Geschwindigkeitsmodelle wurden auf der Grundlage regelmäßiger, orthogonaler 3D-Gitter mit einer lateralen Gitterweite von 1000 m und einer vertikalen Auflösung von 5 m (erstes Geschwindigkeitsmodell) bzw. 5 ms (zweites Geschwindigkeitsmodell) in der 3D-Modellierungssoftware Gocad entwickelt (vgl. Abb. 4-8). Sie erstrecken sich über das gesamte Projektgebiet. Das 3D-Gitter wird in einem ersten Arbeitsschritt mit den Zweiwegelaufzeiten t_{wt} (two way travel time in ms) bzw. der Position unter Gelände s (in m) initialisiert. Ziel der Geschwindigkeitsmodellierung ist die Parametrisierung aller Gridzellen mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit v_{av} (in m/s), die sich mit folgender Formel berechnet: $v_{av} = s/t_{wt} * 2000$.

Für die Regionalisierung der Eingangsparameter t_{wt} bzw. s wurden zunächst Zeit- bzw. Weginkremente Δt_{wt} bzw. Δs für die Gridzellen kalkuliert. Diese Vorgehensweise sichert mit zunehmender

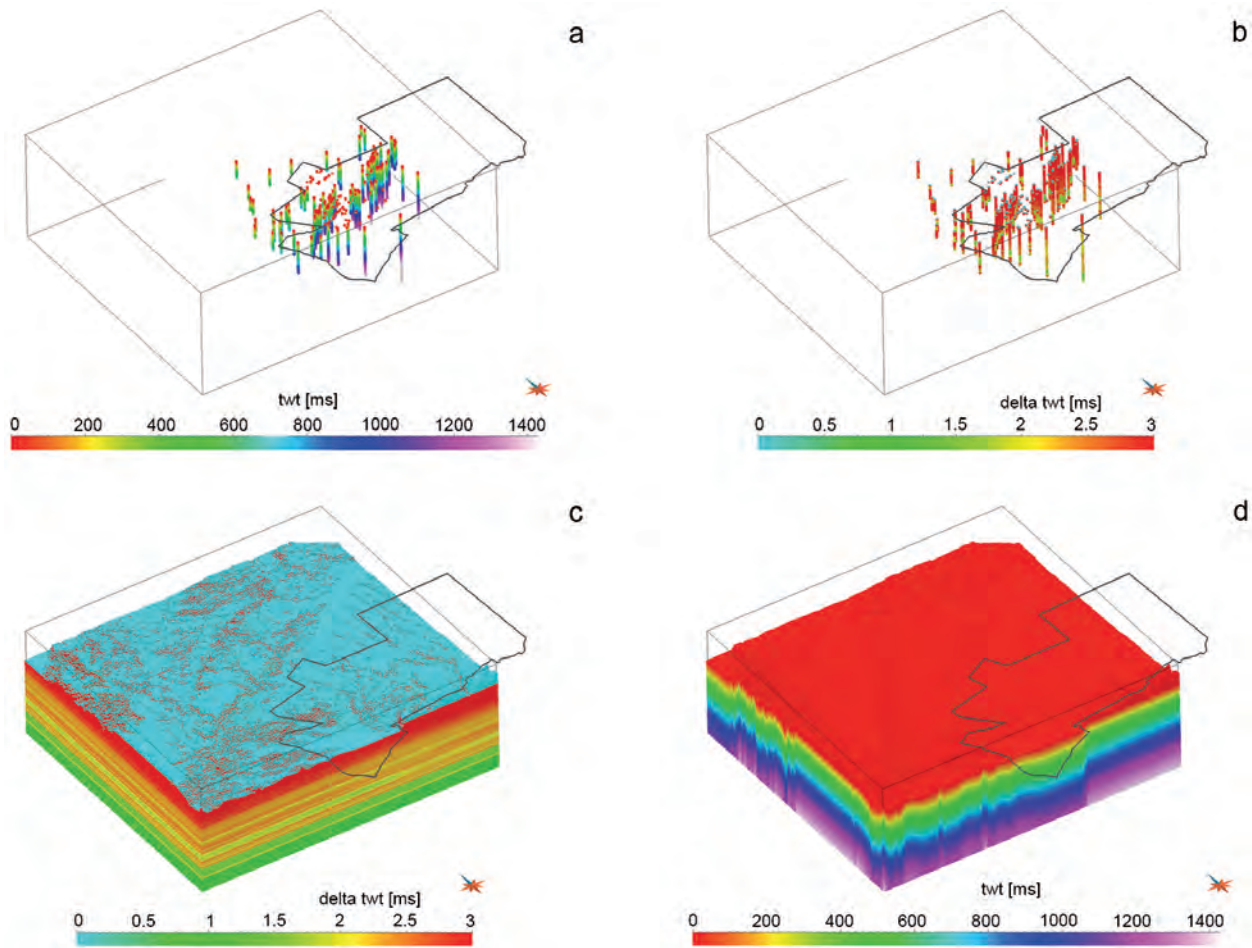


Abb. 4-8: Erstellung des Geschwindigkeitsmodells 1 in Baden-Württemberg (der schwarze Umriss markiert die Grenze des LCA-Pilotgebiets): a) zeigt die räumliche Verteilung der Eingangsdatensätze (Zweiwegelaufzeiten twt aus GVM und Aufzeitmessungen); b) aus den Zweiwegelaufzeiten berechnete Zeitinkremente Δtwt ; c) mit der Inversen Distanzenmethode regionalisierte Zeitinkremente Δtwt ; d) aus Δtwt zurückgerechnete Zweiwegelaufzeiten als Voraussetzung zur Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeit v_{av} .

Entfernung eine stetige Zunahme von Laufzeit und Weg, die bei der nachfolgenden Regionalisierung mit der inversen Distanzenmethode ansonsten nicht gewährleistet wäre. Abschließend werden die Weg- und Laufzeitinkremente von der Geländeoberfläche ausgehend wieder zurückgerechnet. Für die Konvertierung der Bohrungen, Seismikinterpretation und der 3D-Objekte wurden die Funktionalitäten von Gocad genutzt.

Geschwindigkeitsmodellierung in den Teilgebieten LCA-BY/LCA-A

Das im bayerischen Teilgebiet für die Tiefen-Zeit-Konvertierung, insbesondere von Bohrungen ohne Geschwindigkeitsinformationen, verwendete erste Geschwindigkeitsmodell stammt aus der Interpolation von Geophonversenkungsmessungen aus der gesamten bayerischen Molasse und enthält strukturelle Informationen in Form eines Gitters,

welches die Grundgebirgsoberfläche nachbildet. Hierdurch ist die Interpolation der Geschwindigkeitswerte bereits an das Abtauchen der Einheiten nach Süden hin angepasst.

Die Erstellung des zweiten Geschwindigkeitsmodells in der Zeitdomäne erfolgte mit den geostatistischen Methoden von SKUA. Die GVM- und Stapelgeschwindigkeiten in der Zeitdomäne wurden hierfür in Durchschnitts- und Intervallgeschwindigkeiten (Dix 1955) umgerechnet, nachdem sie zuvor auf das verwendete Bezugsniveau von 500 mNN pauschal mit 2.700 m/s korrigiert wurden, sofern nicht exakte Daten aus den originalen Geschwindigkeitsberechnungen vorhanden waren. Die Daten wurden nach Werten außerhalb eines sinnvollen geophysikalischen Bereiches gefiltert (Werte <1.000 m/s und >8.000 m/s wurden vernachlässigt). Die Daten wurden jeweils getrennt trendbereinigt (nach Z), mit unterschiedlichen vertikalen Trendkurven je nachdem, ob die Bohrung resp. Stapelgeschwindigkeit



innerhalb oder außerhalb der Triangelzone im Süden liegt, da diese Zone tendenziell höhere Geschwindigkeiten aufweist. Anhand dieser trendbereinigten Daten wurden regionale Variogramme für innerhalb und außerhalb der Triangelzone jeweils für Durchschnitts- und Intervallgeschwindigkeiten aus GVM- bzw. Stapelgeschwindigkeitsdaten erstellt.

Hierfür und für die nachfolgende räumliche Interpolation dieser Daten wurde ein einfaches ungestörtes 4-Schicht Strukturmodell in der Zeitdomäne anhand der Zeitinterpretationen aufgebaut (3 Schichtgrenzen: Top Paläozoikum, Top Mitteljura, Basis Tertiär). Das Modell hat eine horizontale Auflösung von 500 m x 500 m und vertikal 25 ms, im Grundgebirge 250 ms (entspricht 237 x 192 x 158 = 7.189.632 Zellen).

Die Bohrungen mit GVM-Daten wurden in zwei gleichverteilte Zufalls-Klassen im Verhältnis 20 % (14 Bohrungen) zu 80 % (52 Bohrungen) aufgeteilt. Der kleinere Datensatz stellte für alle Interpolationen den Testdatensatz dar. Es wurden eine Reihe statistischer Modelle nur mit dem Modellierdatensatz aufgebaut. Nach Auswahl des bestmöglichen statistischen Modells anhand eines einfachen Delta- Vergleichs mit den Testdaten wurde die Interpolation erneut mit allen zur Verfügung stehenden Daten mit dem ausgewählten statistischen Modell durchgeführt.

Ebenso wurden die Stapelgeschwindigkeiten in Bayern in einen Testdatensatz mit 3.261 Datenpunkten und 13.164 Modellpunkten aufgeteilt. Hinzu kommen noch Stapelgeschwindigkeiten aus den benachbarten Ländern Baden-Württemberg und Österreich. Diese erleichtern den Anschluss der Interpolation an deren Geschwindigkeitsmodelle. Außerdem wurden Stapelgeschwindigkeiten aus zwei 3D-Seismikfeldern in Bayern (Mindelheim und Schwaben) genutzt, was zusammen einem Gesamtumfang von 36.781 gültigen Modellierpunkten entspricht.

Die Interpolation erfolgte mehrstufig und unterschiedlich je nach Lage innerhalb oder außerhalb der Triangelzone, welche durch eine komplexe vertikale Grenzfläche definiert wurde und das Modellgitter in zwei Teilmodelle aufteilt. Innerhalb der Triangelzone ist die Datendichte der Bohrungen mit GVM sehr gering. Daher wurden dort die Stapelgeschwindigkeiten in z-trendbereinigte Intervallgeschwindigkeiten umgerechnet und zusammen mit den z-trendbereinigten GVM-Daten mittels Ordinary Kriging und einem gerichteten Variogramm interpoliert. Schließlich wurde der vertikale Trend der GVM-Daten wieder auf das Ergebnis addiert.

Außerhalb der Triangelzone wurden die (nicht trendbereinigten) GVM-Daten mittels Kriging mit

externer Drift (zu Intervallgeschwindigkeiten konvertierte Stapelgeschwindigkeiten als Driftfunktion) mit einem gerichteten Variogramm regionalisiert.

Die so modellierten Intervallgeschwindigkeiten wurden in Durchschnittsgeschwindigkeiten umgerechnet und mit einem 3 x 3 x 3 -Fenster Median-gefiltert.

Nach Zeit-Tiefen-Konvertierung der Interpretationen ergeben sich weitere Durchschnittsgeschwindigkeiten an Bohrungen mit bekannten Tiefeninformationen im Vergleich zu der Zeit-Interpretation. Diese Diskrepanz wurde in Form eines Korrekturfaktors separat regionalisiert (DSI-Algorithmus innerhalb SKUA) und auf das Modell der Durchschnittsgeschwindigkeiten beaufschlagt.

Geschwindigkeitsdaten, Modellierung und Zeit-Tiefenumwandlung im Teilgebiet LCA-CH

Die Markerhorizonte innerhalb der Region LCA-CH wurden mit einer Stapelgeschwindigkeitsmethode und einem seismischen Referenzniveau (SRD) bei 500 m NN von Zeit in Tiefe umgewandelt. Diese Methode verwendet Zweiweg-Laufzeitraster und Geschwindigkeitsraster in einem Top-Down-Verfahren. Dieses Verfahren wurde bei früheren Projekten im Schweizer Molassebecken (SMB) verwendet, wie z. B. bei dem "Seismic Atlas of the Swiss Molasse Basin" Projekt (Sommaruga et al. 2012) und bei verschiedenen Untersuchungen der Nagra (Roth et al. 2010, Meier 2010).

Das Geschwindigkeitsmodell besteht aus einem vertikalen Stapel von zweidimensionalen Geschwindigkeitsrastern für die stratigraphischen Einheiten. Der Stapel beinhaltet sowohl Durchschnitts- (Vave) als auch Intervallgeschwindigkeitsraster (Vint). Zur ersten Methode gehören Raster für die Tertiärintervalle, zur Letzteren gehören die sechs mesozoischen Intervalle.

Die Geschwindigkeitswerte zur Modellierung wurden aus den verfügbaren Check shots, Sonic Logs und Check shot korrigierten Sonic Log Daten, aus den mehr als 40 Tiefbohrungen innerhalb und angrenzend zu der Region, erzeugt. Zwölf davon befinden sich in Baden-Württemberg, der Rest im östlichen Teil des Schweizer Molassebeckens.

Alle Zeit-Tiefen-Tabellen wurden an das seismische Referenzniveau angepasst, bevor sie zur Generierung der Zeit-Tiefen-Paare für die entsprechenden Tops bzw. Bottoms der relevanten Horizonte verwendet wurden. Diese Zeit-Tiefen-Paare wurden dann zur Berechnung der Vave- und Vint-Werte für die notwendigen Intervalle benutzt.

Die Vave- und Vint-Raster wurden aus den berechneten Geschwindigkeitswerten und wo nötig mit Hilfe von eingesetzten Stützpunkten erzeugt. Diese wurden zur Steuerung des Rasters an Stellen mit geringer oder fehlender Datendichte verwendet. Geschwindigkeitswerte für die Stützpunkte wurden aus den Geschwindigkeits-Tiefen-Diagrammen oder Geschwindigkeits-Zeit-Diagrammen abgeleitet.

Die Geschwindigkeitsraster mit einem Rasterabstand von 500m wurden in ArcGIS (ArcMap 10.2) mit dem Werkzeug „Radial Basis Functions“ (Erweiterung Geostatistical Analyst) und dem Interpolationsparameter „thin-plate spline“ erstellt. Wegen der geringen Datendichte stellen diese Raster einen Überblick – nicht ein detailliertes Bild – der Trends der Geschwindigkeiten dar.

4.4.7 Kombination der Teilgebiete zum LCA-Gesamtmodell

Voraussetzung für passgenaue Teilmodelle ist ein Austausch von Eingangsdaten und Zwischenschritten der Seismikinterpretation und 3D-Modellierung. Im Rahmen der Pilotgebietsmodellierung sicherten folgende Maßnahmen weitestgehende Konsistenz an den LCA-internen Gebietsgrenzen:

- Austausch grenznaher Bohrdaten, teilweise gemeinsame Interpretation der petrographischen Beschreibungen und geophysikalischen Messungen
- Austausch von Geschwindigkeitsdaten (GVM, Stapelgeschwindigkeiten, Geschwindigkeitsmodelle)
- Absprachen zum Ablauf der Reprozessierung der Seismik und Harmonisierung der technischen Parameter (Bezugsniveau, Replacement Velocity)
- Workshops zur Seismikinterpretation beinhalteten Absprachen zu Interpretationsprinzipien sowie die gemeinsame Interpretation grenzüberschreitender Profile
- Workshops zur gemeinsamen, grenzüberschreitenden Korrelation von Horizonten und Störungen in der Zeit- und Tiefendomäne

Die finalen Teilgebietsmodelle wurden schrittweise zu einem Gesamtmodell kombiniert.

Zunächst wurden die vier im Zuge der Seismikinterpretation konstruierten Horizonte sowie die Störungsflächen des österreichischen Gebietsanteils (vgl. Kap. 4.2.1) durch eine entsprechende

Erweiterung der Modellumgrenzung in das bayerische Modell integriert und angepasst. In Bayern seismisch gepickte, in Österreich aber nicht erkennbare Horizonte wurden mit Hilfe des SKUA-Workflows „Structure and Stratigraphy“ strukturkonform auf den österreichischen Anteil extrapoliert. Zur Validierung des Ergebnisses stand auf österreichischer Seite allerdings nur eine Bohrung zur Verfügung.

In einem nächsten Schritt wurden das schweizerische Modell an die österreichisch-bayerischen Horizonte und Störungen angepasst. Für die Angleichung wurden die schweizerischen Teilflächen östlich der östlichsten Seismiklinie ausgeschnitten und im Übergangsbereich an die österreichischen Horizonte angepasst, wobei die restliche schweizerische Fläche und die Vorarlberger Fläche als Bezugspunkte genutzt wurden. Eine technische Vereinigung zu einer Gesamtfläche fand jedoch noch nicht statt.

Die nordvergente Rücküberschiebung und die Basale Überschiebung der Triangelzone auf österreichischer Seite wurden dem Schweizer Projektpartner als fertig modellierte Störungen in der Tiefendomäne bereitgestellt. Wie bei der Anpassung der Horizonte wurden die Störungsflächen auf Schweizer Seite östlich der durch Seismik gesicherten Lage gekappt und im Übergangsbereich neu trianguliert. Die Basale Überschiebung der Triangelzone liegt im Schweizer Teilgebiet allerdings deutlich tiefer als in Vorarlberg. Ob die unterschiedliche Raumlage rein methodisch begründet ist oder auch geologische Ursachen eine Rolle spielen, konnte im Rahmen dieses Projektes nicht geklärt werden.

Abbildung 4-9 zeigt den letzten Schritt der Modellharmonisierung zwischen der baden-württembergischen und bayerischen Gebietsgrenze und im Bereich des Bodensees. Die Teilflächen zwischen Bayern und Baden-Württemberg wurden beiderseits der Grenze in einer 2 km breiten Zone ausgeschnitten und die entstehende Lücke mit einer neuen Fläche ausgefüllt.

Da die Ergebnisse der Bodensee-Seismik aufgrund der ungeklärten Unterschiede der Tiefenlage der Horizonte zwischen Land- und See-Seismik nicht in die Modellierung einbezogen werden konnten (vgl. Kap. 4.4.3), wurde der Grenzabgleich als Interpolation zwischen den Landflächen der Partner unter dem See hindurch ausgeführt.

Die Horizonte und Störungen des Gesamtmodells liegen als Gocad-Objekte vor.

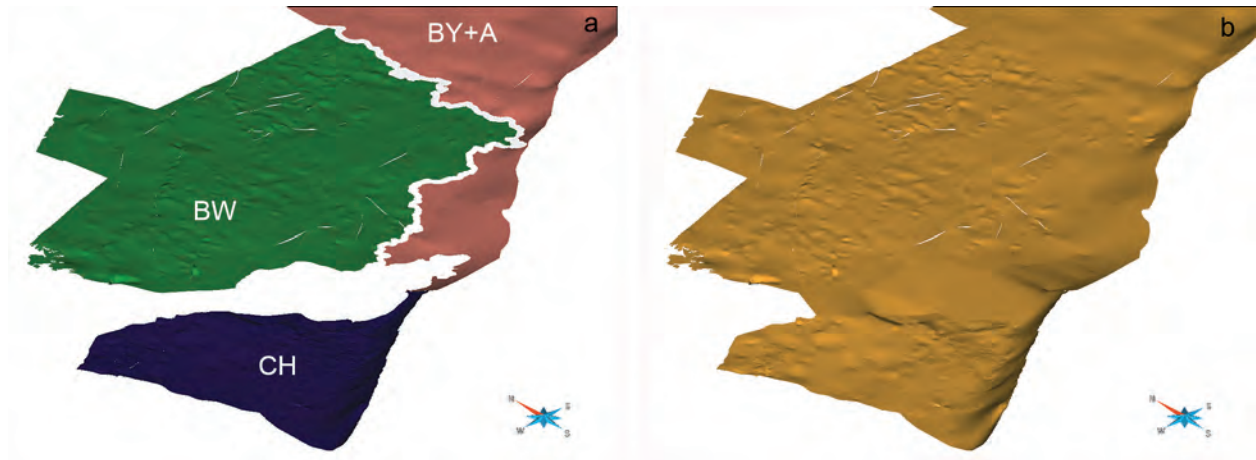


Abb. 4-9: a) Kombination der Basis Tertiär zu einer Gesamtfläche: Der österreichische und bayerische Anteil ist bereits abgeglichen und technisch vereinigt. Die schweizerische und österreichische Teilfläche passen aneinander, sie sind jedoch noch nicht vereinigt. Die Interpolation im Bereich des Bodensees sowie in der 2 km breiten Zone beiderseits der Grenze zwischen Baden-Württemberg und Bayern steht noch aus. b) Finale Version des Horizonts Basis Tertiär; die in (a) fehlenden Bereiche wurden ergänzt und die Teilflächen technisch in ein Gesamtobjekt überführt.

4.5 Geologisches Übersichtsmodell Baden-Württemberg

4.5.1 Eingangsdaten

Der baden-württembergische Anteil am geologischen Übersichtsmodell wurde auf der Grundlage zwei bereits existierender 3D-Modelle erstellt. Das Landesmodell Baden-Württemberg (Rupf & Nitsch 2008) enthält die lithostratigraphischen Haupthorizonte von der Basis Quartär bis zum Top des Kristallinen Grundgebirges in einem Übersichtsmaßstab. Allerdings weist dieses Modell keine Untergliederung der tertiären Molasseeinheiten auf.

Das zweite für die Modellierung genutzte Modell wurde ursprünglich im Rahmen des Informationssystems für oberflächennahe Geothermie entwickelt (ISONG-Modell, Rupf & Armbruster 2008). Es ist u. a. für die Ableitung des Potenzials für flache Geothermie konzipiert und beinhaltet neben der känozoischen Sedimentfüllung des Molassebeckens den Oberjura. Ältere mesozoische Einheiten fehlen hingegen. Die Modelle stammen aus den Jahren 2007 und 2008. Neuere Datensätze wurden seitdem nicht eingepflegt.

Des Weiteren wurden die im Rahmen von GeoMol harmonisierten Bohrbefunde und weitere Daten aus der Aufschlussdatenbank des LGRB für die Implementierung des Übersichtsmodells genutzt. Informationen zum Ausstrich der geologischen Einheiten an der Geländeoberfläche liefert der digitale Datensatz der integrierten geowissenschaftlichen Landesaufnahme Baden-Württemberg (GeoLa,

LGRB 2015a) insbesondere für das Quartär und die Tertiäreinheiten.

4.5.2 3D-Methoden und Konzepte für das geologische Übersichtsmodell Baden-Württemberg

Im Gegensatz zum LCA-Pilotgebietsmodell fand die Implementierung des geologischen Übersichtsmodells in Baden-Württemberg komplett in der Tiefendomäne statt. Der Arbeitsablauf lässt sich in drei grundlegende Teilschritte untergliedern:

1. Aufbereitung der Eingangsdaten
2. 3D-Modellierung der Störungen und Horizonte
3. Konsistenzchecks und lokale Anpassung der Modellobjekte

Die Aufbereitung der Eingangsdaten, wie die Konstruktion von Verbreitungspolygonen und Mächtigkeitsverteilungen wurde für das Pilotgebietsmodell und das Übersichtsmodell gleichzeitig durchgeführt. Die Methodik ist bereits im Kapitel 4.4.1 beschrieben.

Das geologische Übersichtsmodell Baden-Württemberg wurde mit der Software Gocad erstellt. In einem ersten Arbeitsschritt wurde das Störungsmuster der Tertiärbasis aus dem Landesmodell Baden-Württemberg als Basis für die Modellierung des strukturgeologischen Inventars genutzt. Nach einer technischen Revision in ArcGIS, wie beispielsweise dem Schließen kleiner Lücken zwischen benachbarten Elementen oder dem Verbinden zusammengehöriger Störungssegmente,

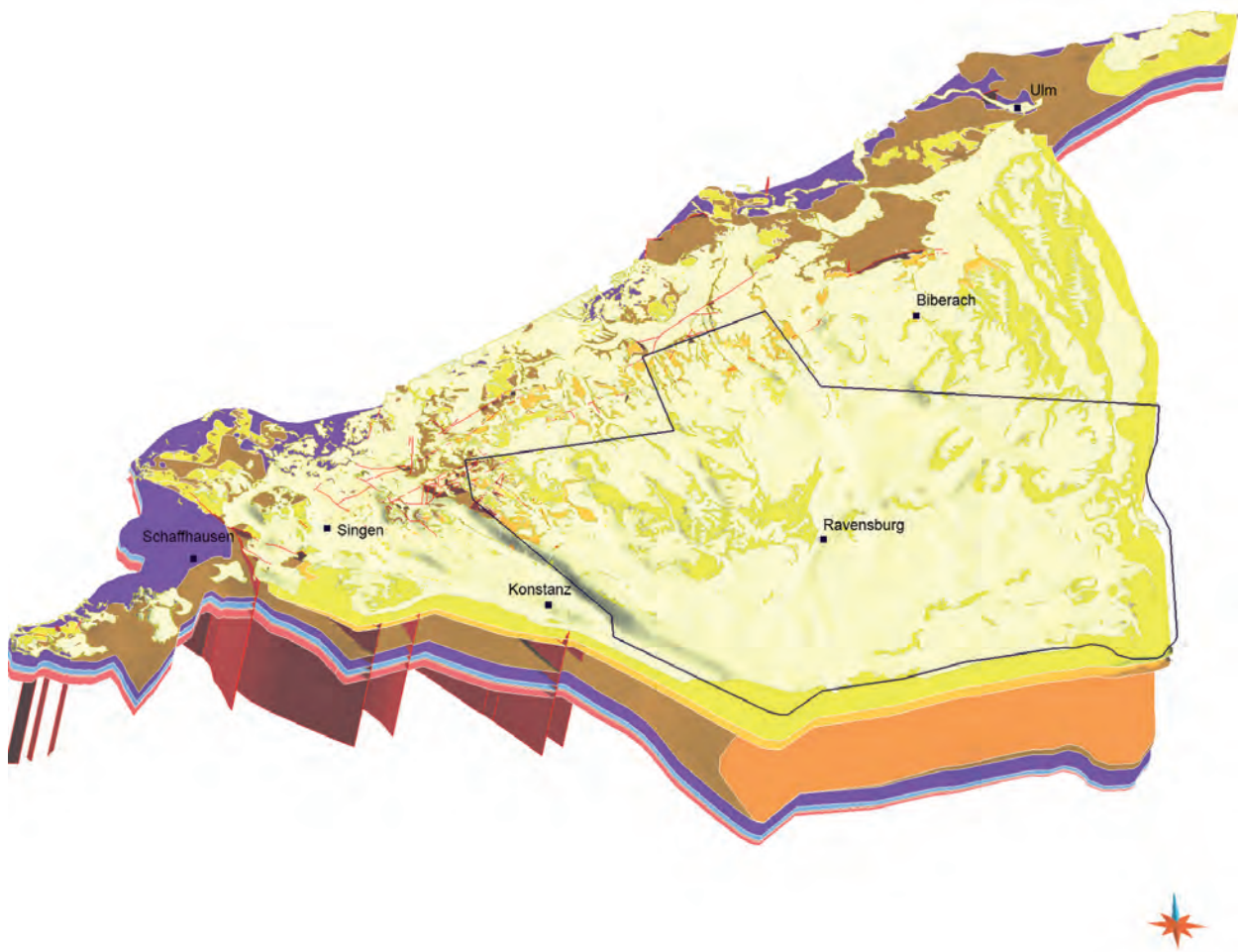


Abb. 4-10: Störungen und Horizonte des geologischen Übersichtsmodells Baden-Württemberg; Känozoische Horizonte im Hangenden in gelben, orangen und braunen Farben, darunter jurassische und triassische Einheiten in lila und rot; gut erkennbar ist das flache Einfallen der Horizonte nach Süden hin. Der Umriss des Pilotgebiets ist als schwarze Linie dargestellt (Abbildung aus GeoMol Team 2015).

konnten die Störungsspuren in die 3D-Modellierungssoftware importiert werden. Da die beiden Vorgängermodelle keine Informationen zu Einfallrichtung und -winkel der Störungen enthalten, wurden auch bei der aktuellen Modellierung die tektonischen Elemente senkrecht implementiert. Die untere Begrenzung ist bei -4.000m NN angesetzt. Die obere Begrenzung wurde nach der Integration der Modellhorizonte in der Regel auf Basis Obere Meeresmolasse beschnitten. Fehlte dieser Horizont, erfolgte der Beschnitt an der Basis Quartär bzw. an der Geländeoberfläche.

Die Konstruktion der Modellhorizonte basierte auf den Informationen beider Vorgängermodelle, Bohrmarkern und einzelnen lokalen Zusatzinformationen. Die Arbeiten konzentrierten sich zunächst auf folgende Horizonte:

- Basis Quartär: ISONG sowie weitere Daten im Bereich des Bodensees (D3 Diskontinuität, LGRB 2015b) und im Gebiet der Argen-Ach-Rinne und

des Isnyer Beckens (LGRB 2010); die Basis Quartär wurde sowohl für das geologische Übersichtsmodell, als auch für das LCA-Pilotgebietsmodell genutzt

- Basis Obere Meeresmolasse: ISONG-Modell, im Südteil Neukonstruktion auf Basis der im Rahmen von GeoMol harmonisierten Bohrmarker
- Basis Tertiär: Konstruktion auf Basis des Landes- und ISONG-Modells
- Basis Wohlgeschichtete Kalke-Formation: ISONG (Hilfshorizont, in der finalen Modellversion nicht enthalten)

Nachfolgend wurden alle anderen Modellhorizonte mit Hilfe von Mächtigkeitsverteilungen in das bestehende Horizont- und Störungsgerüst eingepasst.

Zur Sicherung der Modellqualität wurde nach Abschluss der Arbeiten die Raumlage der Horizonte mit Hilfe von Bohrmarkern überprüft. Bei



Abweichungen von mehr als 5m wurden die Horizonte gegebenenfalls lokal angepasst. Tabelle 4-5 gibt eine Übersicht über die Abweichungen zwischen Bohrungen und Modell.

Insgesamt sind die Abweichungen zwischen den Bohrbefunden und den Modellhorizonten gering. Mit Ausnahme der Basis Quartär ist der Median der Abweichungen kleiner als ein Meter und auch die 25 % und 75 % Perzentile bewegen sich im niedrigen einstelligen Meterbereich.

Es handelt sich um rechtsschiefe Verteilungen, d. h. die Mehrzahl der Bohrmarker liegt über dem Modellhorizont. Verursacht wird diese Rechtsschiefe durch die vereinfachte Modellannahme vertikal stehender Störungen. In der Realität handelt es sich jedoch in der Regel um tektonische Elemente mit einem abschiebenden Vertikalversatz. Dadurch treten in den Bohrungen tektonisch bedingte Schichtverkürzungen auf, die so im Modell nicht wiedergegeben werden können. Die Minimalwerte zwischen 45 und 124m spiegeln daher indirekt den Vertikalversatz der Störungen wider.

Die Tertiärbasis (B_T) passt insgesamt am besten zum Bohrbefund, da sich das Störungsmuster an diesem Horizont orientiert. Bei den Horizonten im Liegenden und Hangenden treten hingegen zunehmende Abweichungen aufgrund der im Modell vertikal stehenden Störungen auf.

Die Basis Quartär weicht hingegen am stärksten vom Bohrbefund ab. Begründet werden diese Abweichungen zum einen in der hohen Anzahl von mehr als 14.000 Bohrungen. Zum anderen treten in den quartären Sedimenten lokal stark schwankende Mächtigkeiten auf, die bei der gegebenen Modellauflösung nicht wiedergegeben werden können.

Nach Abschluss der Bohrmarkerkontrolle wurde das Modell weiterhin auf eventuell auftretende Horizontüberschneidungen getestet und im Bedarfsfall lokal modifiziert.

Ein Vergleich mit den benachbarten Übersichtsmodellen gestaltete sich schwierig, da die Modelle der Partner zunächst in der Zeitdomäne bearbeitet wurden und ein direkter Abgleich an den Landesgrenzen vor der Zeit-Tiefenkonvertierung nicht möglich war. Folgende Kontrollmechanismen verbesserten soweit wie möglich die Passgenauigkeit zwischen den Modellen:

1. Abgleich und Harmonisierung der Störungsmuster
2. Austausch von Bohrmarkern, Verbreitungspolygonen und Mächtigkeitsverteilungen im Nahbereich der Landesgrenzen
3. Austausch der Geschwindigkeitsmodelle
4. Feinjustierung der Horizonte in der Tiefendomäne

4.5.3 Vergleich des Übersichtsmodells mit dem LCA-Pilotgebietsmodell (BW)

Da das geologische Übersichtsmodell und das Pilotgebietsmodell auf zum Teil unterschiedlichen Datenquellen beruhen, ist eine komplette Übereinstimmung zwischen beiden Datensätzen nicht möglich. Größere Unterschiede treten insbesondere beim Störungsmuster auf, das sich im Übersichtsmodell aus dem bereits existierenden Landesmodell herleitet und für das Pilotgebietsmodell durch die Interpretation der Seismikprofile erzeugt wurde. Die Raumlage der Horizonte und die Mächtigkeiten der implementierten lithostratigraphischen Modelleinheiten wurden hingegen gegenseitig angepasst, sodass beide Modelle zusammenpassen.

Tab. 4-5: Abweichungen der Bohrmarker von den Modellhorizonten des geologischen Übersichtsmodells Baden-Württemberg; negative Werte: Bohrmarker liegen höher als der Modellhorizont, positive Werte: Bohrmarker liegen tiefer als der Modellhorizont.

	Min	10 % Perz	25 % Perz	Median	75 % Perz	90 % Perz	Max	Num
B_Q	-76,0m	-52,6m	-16,9m	-2,6m	1,8m	7,7m	13,1m	14.192
B_OSM	-45,3m	-6,5m	-2,5m	-0,4m	1,0m	3,3m	45,3m	342
B_OMM	-72,0m	-14,9m	-4,5m	-0,8m	1,4m	4,0m	45,0m	396
B_UMJ	-63,0m	-35,5m	-4,2m	-0,9m	0,4m	3,6m	35,4m	79
B_T	-123,7m	-1,2m	-0,3m	0,0m	0,2m	0,5m	29,4m	372
T_JU	-119,4m	-2,8m	-0,9m	-0,2m	0,3m	1,8m	9,9m	120
T_JL	-116,4m	-5,7m	-2,2m	0,0m	0,6m	1,9m	3,8m	99
T_Tr	-116,0m	-3,9m	-1,6m	0,0m	0,1m	2,5m	6,5m	92
T_B	-117,5m	-4,5m	-1,6m	0,0m	0,4m	1,5m	3,7m	32

Abbildung 4-11 zeigt exemplarisch Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen dem geologischen Übersichtsmodell und LCA-Pilotgebietsmodell in Baden-Württemberg. Dargestellt ist jeweils die Raumlage von Top Paläozoikum inklusive Störungen. In beiden Modellen ist Top Paläozoikum der jeweils älteste und tiefste Horizont. Auffällig sind die Unterschiede im tektonischen Inventar. Im Südteil des geologischen Übersichtsmodells treten kaum Störungen auf. Im LCA-Pilotgebietsmodell konnte dagegen eine Vielzahl von Bruchstrukturen in den Seismikprofilen interpretiert und korreliert werden. Tektonische Hauptbrüche, wie die Illmensee-Fronhofen-Aulendorf-Störungszone, tauchen hingegen in beiden Modellen auf.

Für die Interpretation der Horizontlage wurden in beiden Fällen die im Rahmen von GeoMol harmonisierten Bohrungen genutzt. Dadurch differiert die Raumlage der Horizonte im arithmetischen Mittel nur um 2 m mit einer Standardabweichung von 34 m voneinander. Die Abweichungen sind nahezu normalverteilt. Abbildung 4-11c zeigt die räumliche Verteilung der Unterschiede zwischen beiden Horizonten. Größere Abweichungen treten vor allem im Bereich der Störungen auf. Insgesamt weist der Pilotgebietshorizont bedingt durch die Seismikinterpretation eine weitaus differenziertere Internmorphologie auf, während das geologische Übersichtsmodell glatter erscheint.

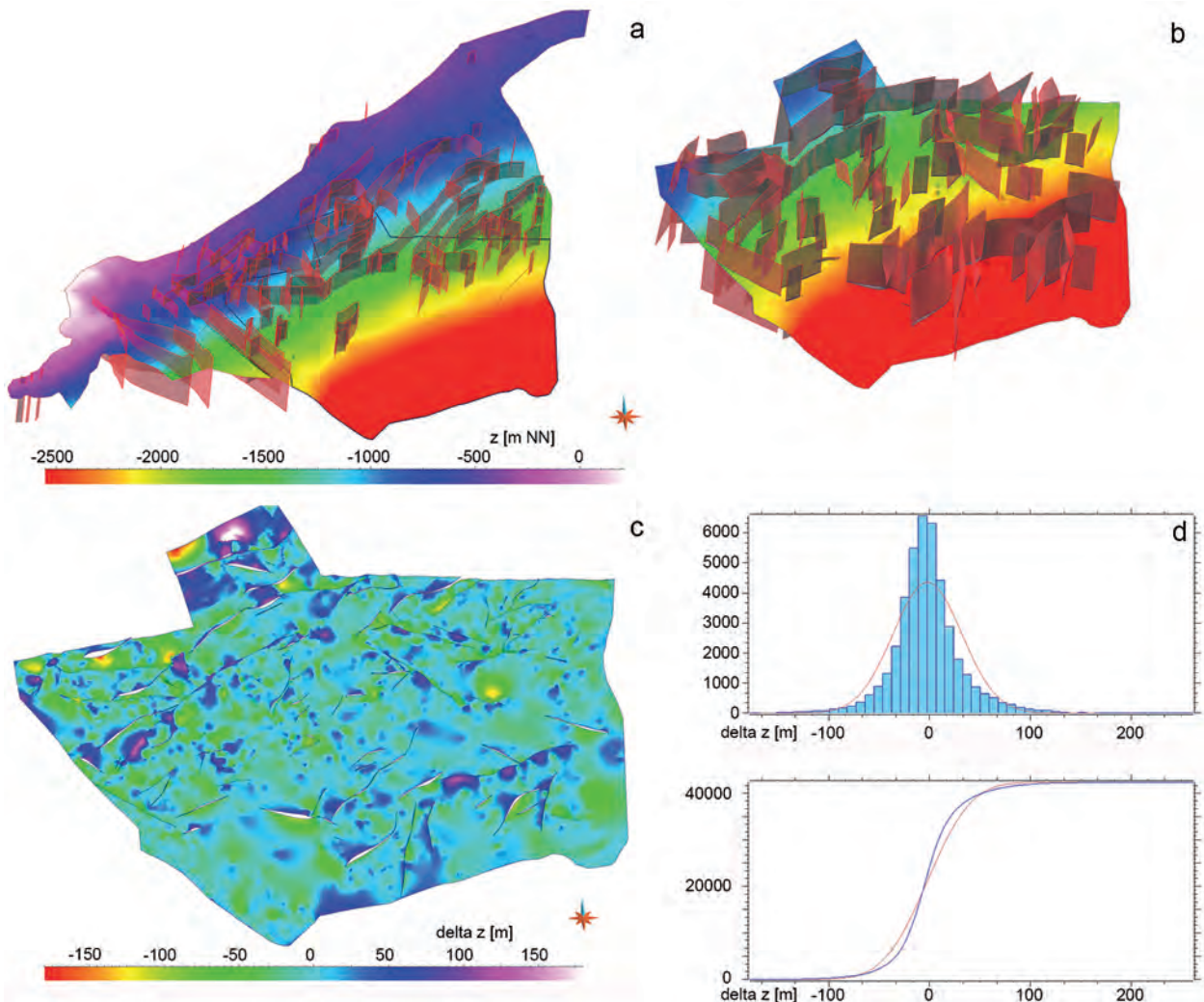


Abb. 4-11: a) Raumlage von Top Paläozoikum und Störungen im geologischen Übersichtsmodell von Baden-Württemberg (Lage des BW-Teils des Pilotgebiets als schwarze Linie), b) Raumlage von Top Paläozoikum und Störungen im LCA-Pilotgebietsmodell, c) Abweichungen der beiden Modellhorizonte, d) Histogramm und Summenkurve der Abweichungen beider Modellhorizonte im LCA-Gebiet (Diskussion im Text).



5 Temperaturmodell

5.1 Einführung

Im LCA-Pilotgebiet stellt das geothermische Potenzial den Fokus der Untersuchungen im Rahmen von GeoMol dar. Um Aussagen über die Temperaturverteilung im Untergrund treffen zu können, wurde ein dreidimensionales geostatistisches Temperaturmodell auf der Basis von Bohrlochmessungen erstellt. Aufgrund der ungünstigen Datenlage in der Schweiz konnte die Modellierung im Schweizer Teil des Pilotgebiets allerdings nicht durchgeführt werden. Schweizer Messwerte flossen jedoch als Eingangsparameter in die Modellierung ein, um Artefakte an den Modellgrenzen zu vermeiden. Für die Modellierung wurde der Ansatz aus dem Projekt GeORG verwendet (GeORG-Projektteam 2013a, 2013c) und an die geologischen und geothermischen Gegebenheiten des Molassebeckens angepasst.

5.2 Eingangsdaten

Die wichtigsten Informationen über die Temperaturverteilung im Untergrund stammen aus Bohrlochmessungen. Kapitel 5.2.1 beschreibt die verwendeten Temperaturdaten aus Archiven und der Literatur sowie aus im Rahmen von GeoMol neu erhobenen Messreihen. Die Qualität der Temperaturwerte hängt unter anderem von der gewählten Messmethode ab. Daher ist eine einheitliche Kategorisierung hinsichtlich der Messmethodik für die weitere Verwendung der Untergrundtemperaturen wichtig.

Ein weiterer wichtiger Eingangsdatensatz für das Temperaturmodell sind die Temperaturen an der Geländeoberfläche (vgl. Kap. 5.2.2). Der Bodensee als größtes Gewässer im LCA-Pilotgebiet wirkt als Kühlkörper auf den Untergrund. Kap. 5.2.3 gibt einen Überblick über die Wassertemperaturen des Bodensees.

5.2.1 Untergrundtemperaturen

Temperaturdaten aus Archiven und der Literatur

Baden-Württemberg und Bayern: Wichtigste Datenquelle für Temperaturdaten stellt in Deutschland das Fachinformationssystem Geophysik (i. F.: FIS-GP, Kühne 2006) dar. Es wurden Daten aus den Subsystemen „Temperatur“ und „Bohrlochgeophysik“ verwendet (Stand 06/2013). In

Baden-Württemberg wurden die Temperaturlogs mit analogen und digitalen Daten des Aufschlussarchivs des LGRB abgeglichen und ergänzt. Temperaturlogs in abgelenkten Bohrungen wurden an den Bohrfad gehängt um den Messwerten die jeweiligen vertikalen Tiefen (TVD, True vertical depth) zuweisen zu können. Zudem ergänzen Temperaturmessungen im Rahmen von Grundwasserprobenahmen aus der Labor-Datenbank des LGRB den baden-württembergischen Datensatz.

Schweiz: Die Schweizer Temperaturdaten stammen aus der „Kompilation von Temperaturmessungen in der Schweiz“ (Schärli & Kohl 2002).

Österreich: Für das Gebiet Vorarlberg standen Temperaturdaten aus fünf Bohrungen zur Verfügung. Diese stammen aus dem Bericht der Vorarlberger Landesregierung (Starck 1989) und von der OMV-Aktiengesellschaft.

Messarten für die Ermittlung von Untergrundtemperaturen und Bewertung hinsichtlich ihrer Qualität

Untergrundtemperaturen werden hauptsächlich in Bohrungen gemessen. Je nach Dauer zwischen der letzten Aktivität im Bohrloch und der Messung (Stillstandszeit) sind die Gesteinstemperaturen durch den technischen Bohrvorgang beeinflusst und wirken sich auf die Qualität der Temperaturmessungen aus. Die im LCA-Pilotgebiet verwendeten Temperaturdaten lassen sich in fünf Messmethoden unterteilen:

Temperaturlogs

Ein Temperaturlog wird in Abschnitten oder über die gesamte Länge eines Bohrlochs gemessen. Je nach Zweck der Messung und Länge der Stillstandszeit werden gestörte und ungestörte Logs unterschieden. So werden beispielsweise Temperaturlogs kurz nach der Zementation im Bohrloch gefahren, um die Tiefenlage des Zementkopfs (das Einsetzen der Zementation) zu bestimmen. Diese Logs werden als „gestörte“ Logs bezeichnet und zeigen unter Umständen große Abweichungen von der wahren Gebirgstemperatur, da das Abbinden des Zements einen exothermen Vorgang darstellt. Steht dagegen ein Bohrloch über längere Zeit

still, so kann sich das Wasser im Bohrloch an die Gebirgstemperatur angleichen. Die Dauer bis sich ein Temperaturgleichgewicht einstellt, hängt dabei von der Tiefe der Bohrung ab und kann Wochen bis Monate betragen. Förster (2001) gibt für eine Bohrung bis 2.000m Tiefe eine erforderliche Mindestzeit von 40 Tagen an. Ungestörte Logs stellen Temperaturmessungen von höchster Qualität dar.

BHT-Werte („Bottom Hole Temperature“)

Die Messung eines BHT-Werts erfolgt meist unmittelbar nach Ende der Bohrarbeiten am jeweils Bohrloch tiefsten („Bottom Hole“). Die beim Bohrvorgang eingesetzte Spülung kühlt das umgebende Gestein in der Regel zwischen 10 und 15 K ab (Deming 1989, Förster 2001, Funnel et al. 1996).

Die gemessenen BHT-Werte müssen daher vor der weiteren Verwendung entsprechend korrigiert werden. Es existieren eine Reihe unterschiedlicher Verfahren zur Korrektur von BHT-Werten. Sie lassen sich je nach Ansatz in statistisch-empirische und mathematische Verfahren unterscheiden. Die mathematischen Ansätze lassen sich weiter unterteilen in graphische Verfahren (Verwendung einer Linienquelle, z. B. Horner 1951, Lachenbruch & Brewer 1959) und numerische Verfahren (Verwendung einer Zylinderquelle, z. B. Middleton 1979, Leblanc et al. 1982). Je nach Verfahren müssen mehrere Messungen in gleicher Tiefe zu unterschiedlichen Zeiten vorliegen sowie weitere Zusatzinformationen (Dauer der Standzeit, Spülungstemperatur, Rohrdurchmesser etc.) bekannt sein. Trotz Korrektur lassen sich BHT-Werte nicht zuverlässig auf die wahre Gebirgstemperatur berichtigen. Auch nach der Korrektur beträgt der Fehler bis zu ± 8 K (Förster 2001). Einen Überblick über die Korrekturmethode geben u. a. Deming (1989) und Goutorbe et al. (2007).

Die BHT-Daten für Bayern und Baden-Württemberg liegen im FIS-GP bereits korrigiert vor und wurden unverändert übernommen. Bei der Mehrzahl der BHT-Werte aus der Schweiz fehlen Angaben zur Art der Korrektur, da in den Originalunterlagen „keine Dokumentation über allfällige BHT-Korrekturen vorhanden“ sind (Schärli & Kohl 2002, S. 3). Die BHT-Werte für Österreich wurden von der GBA nach gängigen Methoden korrigiert.

Probennahmen im Rahmen hydrochemischer Analysen

Im Rahmen von Probennahmen für hydrochemische Analysen werden Temperaturen gemessen.

Aufgrund der verwendeten Messmethodik sind die Daten von recht hoher Qualität.

Fördertests

Unter dem Begriff „Fördertest“ sind hier unterschiedliche Messmethoden im Zuge von Fördertests, Open-Hole-Tests etc. zusammengefasst. Die Datenqualität ist im Allgemeinen recht hoch.

Für die Kategorisierung der Messwerte bezüglich ihrer Güte wurden die Qualitätsklassen nach Clauser et al. (2002) genutzt. Da Clauser et al. ebenfalls Temperaturdaten aus dem FIS-GP verwenden (vgl. Kap. 5.2.1), lassen sich die Messwerte aus Baden-Württemberg und Bayern zum Großteil in diese Kategorien einordnen (vgl. Tab. 5-1). Die österreichischen Daten lassen sich ebenfalls in diese Qualitätsklassen einordnen, da es sich entweder um gestörte Logs oder um korrigierte BHT-Werte nach Korrekturmethode handelt, die auch im FIS-GP verwendet werden.

Für die Schweizer Daten gibt es keine direkte Entsprechung. Die in Schärli & Kohl (2002) verwendete Klassifizierung wurde daher angepasst (vgl. Tab. 5-2).

Abbildung 5-1 zeigt die Verteilung der Untergrundtemperaturen bezüglich ihrer Qualitätskategorie. Insgesamt standen Messreihen oder Einzelmessungen aus 670 Bohrungen zur Verfügung.

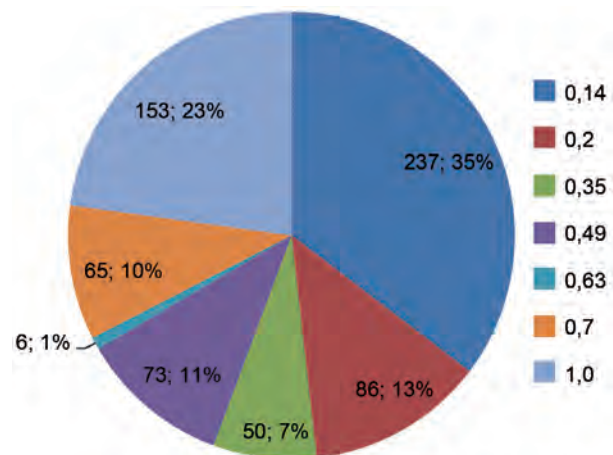


Abb. 5-1: Verteilung der Untergrundtemperaturen bezüglich ihrer Qualitätskategorie (erster Wert: Anzahl der Messungen in der jeweiligen Qualitätskategorie; zweiter Wert: prozentualer Anteil der Messungen).


Tab. 5-1: Qualitätsklassen der deutschen und österreichischen Temperaturdaten (Clauser et al. 2002, erweitert).

Messart	Qualität
Ungestörtes Temperaturlog	1
Gestörtes Temperaturlog	0,2
BHT – mind. 3 Messungen in einer Tiefe, Korrektur: Explosions-Zylinderquellenansatz (Leblanc et al. 1982)	0,63
BHT – mind. 2 Messungen in einer Tiefe, Korrektur: Explosions-Linienquellenansatz (Lachenbruch & Brewer 1959)	0,63
BHT – mind. 2 zeitabhängige Messungen pro Tiefe, Korrektur nach Horner Plot (Horner 1951)	0,49
BHT – eine Messung, Bohrradius und Zeit seit Ende der Zirkulation bekannt	0,35
BHT – eine Messung, Zeit seit Ende der Zirkulation bekannt (Bohrradius unbekannt)	0,35
BHT – eine Messung, Bohrradius bekannt (Zeit unbekannt)	0,14
BHT – eine Messung, weder Zeit seit Ende der Zirkulation noch Bohrradius bekannt	0,14
Fördertest	0,7
Probennahme im Rahmen hydrochemischer Analysen (Labor LGRB)	0,7

Tab. 5-2: Qualitätsklassifizierung der Schweizer Temperaturdaten. Die beiden linken Spalten enthalten die Schweizer Klassifizierung, die mittleren Spalten geben eine evtl. Übereinstimmung mit Clauser et al. (2002) an. In der rechten Spalte ist die entsprechende Qualitätsklasse in GeoMol aufgeführt.

Schärli & Kohl (2002)		Clauser et al. (2002)		GeoMol
Qualität	Erläuterung	Qualität	Erläuterung	Qualität
sehr gut	Temperaturlog, Messintervall < 1 m, ohne Störungen durch Bohrlochaktivitäten oder Wassereintritte	1	ungestörtes Log	1
gut	Temperaturlog, Messintervall 1-10 m	x	keine Entsprechung	0,7
gering	Temperaturlog, Bohrlochaktivitäten und/oder Wassereintritte	0,2	gestörtes Log	0,2
gering	BHT (mit Korrektur, ohne Korrektur und/oder unklar, ob korrigiert)	0,14 – 0,63	unklare Entsprechung	0,14
gut	Hydraulischer Test (artesisch, 1 Eintritt, genau lokalisierbar)	x	keine Entsprechung	0,7
gering	Hydraulischer Test (artesisch, mehrere Eintritte, vermischt)	x	keine Entsprechung	0,2
gut	Hydraulischer Test (Pumpversuch, 1 Eintritt, genau lokalisierbar)	x	keine Entsprechung	0,7
gering	Hydraulischer Test (Pumpversuch, mehrere Eintritte, vermischt)	x	keine Entsprechung	0,2
gut	Hydraulischer Test (Packer-Test)	x	keine Entsprechung	0,7
gering	Art der Messung unklar	x	keine Entsprechung	0,14
gut	Tunnel-Sonde (>2m im Fels, 10 Tage nach Ausbruch)	x	keine Entsprechung	0,7
gering	Tunnel-Sonde (unklare Messverhältnisse)	x	keine Entsprechung	0,14

Temperaturmessungen im Rahmen von GeoMol

Im baden-württembergischen Pilotgebiet wurde im Rahmen des Projekts die Möglichkeit geprüft, ungestörte Temperaturlogs zu messen. Ziel war die Gewinnung hochwertiger Untergrundtemperaturen v. a. in Regionen ohne Daten bzw. mit Daten geringer Qualität. Voraussetzung für ein ungestörtes Temperaturlog ist ein möglichst tiefes, nicht

verfülltes und zugängliches Bohrloch mit einer langen Standzeit (> 1 Jahr). Nur drei Bohrlöcher erfüllten diese Kriterien: „Thermalwasser Ravensburg 1983“ (i. F. mit „GB1 Ravensburg“ abgekürzt), „Thermalwasserbohrung Singen, 1966“ (i. F. mit „TB Singen“ abgekürzt) und „Saulgau GB2“.

Im Juni 2014 wurden in den Bohrungen „GB1 Ravensburg“ und „TB Singen“ Temperaturmessungen



Abb. 5-2: Temperaturlogging in der Bohrung Ravensburg GB1. Links: Schleuse zur Verminderung des artesischen Wasseraustritts und Dreibein zur Kabelführung der Temperatur-Messsonde bei laufender Messung. Gut sichtbar ist der Wasseraustritt rund um die Kabeldurchführung am Schleusenkopf. Rechts: Messaufbau.

durchgeführt. In der Bohrung „GB1 Ravensburg“ wurde mit einer Temperatur- / Salinität- / Flowmetersonde gemessen (vgl. Abb. 5-2). In der Bohrung „TB Singen“ konnte wegen des geringen Durchmessers des Brunnenkopfs nur mit einer Temperatur- / Salinitäts-sonde gemessen werden (vgl. Abb. 5-4).

In der Bohrung „Saulgau GB2“ war aus technischen Gründen eine Messung nicht möglich.

Durchgeführt wurden die Messungen von der Firma „terratec – Büro für Geologie und Geophysik“, Heitersheim.

GB1 Ravensburg

In der Bohrung GB1 Ravensburg wurde wegen des artesischen Auslaufs durch eine Schleuse gemessen (vgl. Abb. 5-2), mit deren Hilfe der ursprüngliche Ausfluss von ca. 2,3l/s auf ca. 0,47l/s reduziert werden konnte.

Die Temperaturmessung erfolgte abwärtsfahrend unmittelbar nach Öffnen der Schleuse, um den artesischen Einfluss so gering wie möglich zu halten. Bei einer Messdauer von 58 min bis zur Endteufe der Messung bei 565,55m flossen insgesamt 2400 l Wasser aus der Bohrung. Die Bohrung ist komplett verrohrt. In drei Bereichen ist die Verrohrung aufgeschossen. Der Hauptwasserzutritt erfolgt nach Flowmetermessung im untersten

aufgeschossenen Abschnitt zwischen 525 und 536 m unter Gelände.

Bedingt durch den artesischen Ausfluss steigt während der Messung die Wassersäule im Bohrloch. Mit fortschreitender Messdauer nimmt somit die Abweichung der gemessenen Temperatur in der Wassersäule von der ungestörten Gebirgstemperatur zu. Die größte Abweichung wird zum Ende der Messung erreicht. Rechnerisch hat sich die Wassersäule im Bohrloch während der Messung um ca. 25m nach oben verschoben. Die sich daraus ergebende Temperaturdifferenz erreicht maximal 0,3°C und liegt damit im Bereich der Messgenauigkeit der Sonde. Die Logdaten wurden daher als ungestörtes Log mit der höchsten Messqualität für die Temperaturmodellierung verwendet.

Für die Bohrung GB1 Ravensburg lag bereits ein älteres Temperaturlog aus den 1980er Jahren mit einer kurzen Stillstandszeit von einer Woche vor. Ein Vergleich der beiden Messdaten zeigt eine deutliche Abweichung der Ergebnisse (vgl. Abb. 5.3).

Durch die kurze Standzeit ist der Verlauf des älteren Logs stark gestört. Dadurch ergeben sich Differenzen bis über 10K zwischen den beiden Messungen in gleicher Tiefe.

Im Umkreis von 14 km liegt kein weiteres ungestörtes Temperaturlog mit einer Messtiefe > 500m vor, die Messung liefert daher wichtige Daten für das Temperaturmodell.

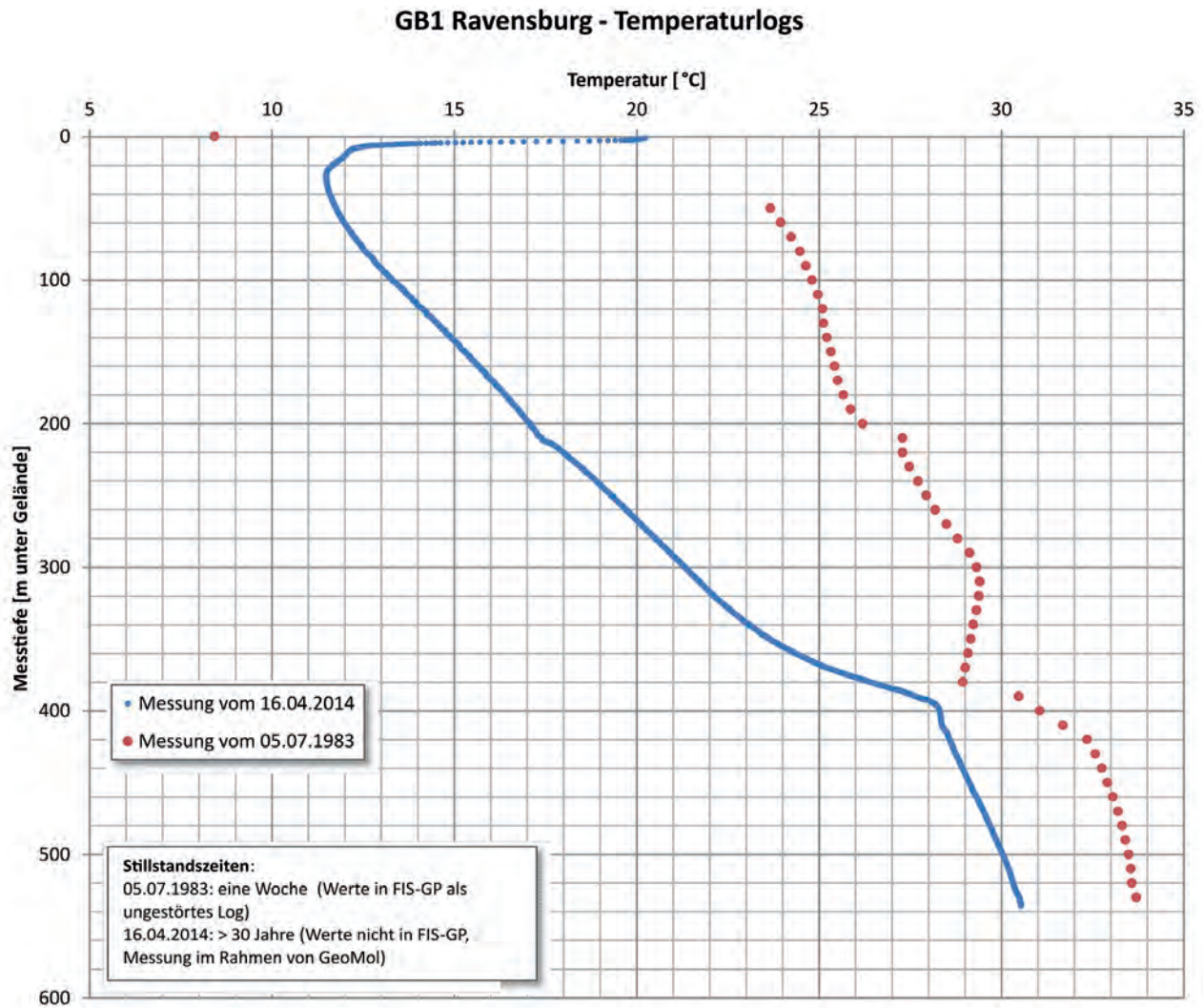


Abb. 5-3: Vergleich der beiden Temperaturlogs von 1983 und 2014 in der Bohrung GB1 Ravensburg. Die Wasserzutritte erfolgen zwischen 525 und 536 m unter Gelände.

TB Singen

Bei der ebenfalls artesischen Bohrung TB Singen wurde aufgrund des geringen Ausflusses von ca. 0,04 l/s auf die Konstruktion und den Einsatz einer Schleuse verzichtet (vgl. Abb. 5-4). Die Temperaturmessung erfolgte abwärtsfahrend. Bei einer Messdauer von 95 min bis zur Endteufe der Messung bei 535 m flossen ca. 200 l Wasser aus der Bohrung. Der maximale Hebungsbeitrag der Wassersäule liegt rechnerisch bei etwa 7 m.

Im Umkreis von 24 km liegt kein weiteres ungestörtes Temperaturlog mit einer Messtiefe > 500 m vor. Damit stellt auch diese Messung eine wichtige Ergänzung der bestehenden Daten dar.

Im Bohrloch TB Singen existieren zwei alte Temperaturlogs aus dem Jahr 1966 (vgl. Abb. 5-5). Laut Bericht des NLFb, das die Messungen damals



Abb. 5-4: Das Foto zeigt den Bohrkopf der Bohrung TB Singen bei laufender Messung. Der geringe artesischer Auslauf ist gut sichtbar, ebenso der geringe Durchmesser der Öffnung, der eine Flowmeter-Messung ausschloss.

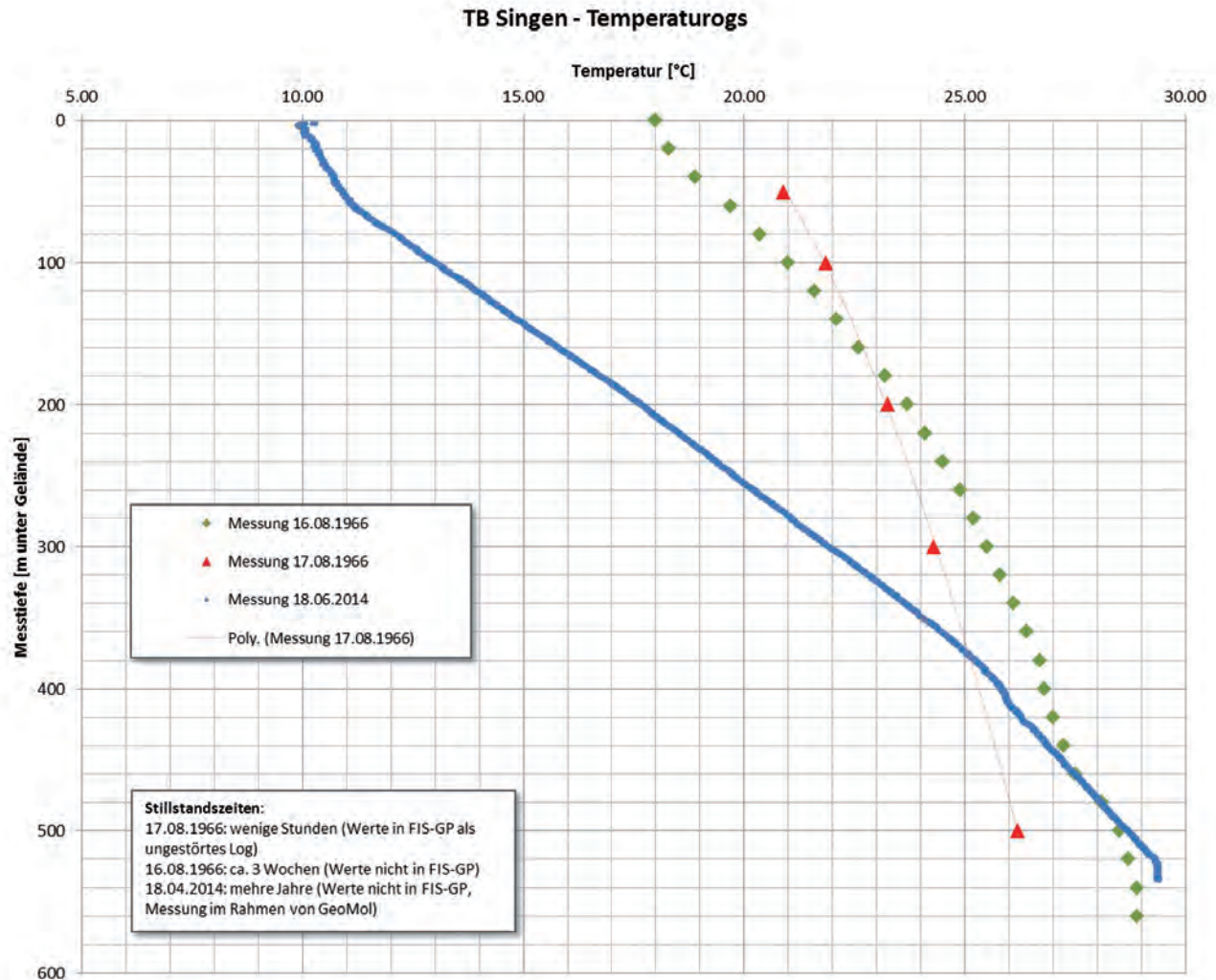


Abb. 5-5: Vergleich der drei Temperaturlogs mit unterschiedlichen Standzeiten in der Bohrung TB Singen. Das Loch stand vor der ersten Messung am 16.08.1966 drei Wochen still. Nach einer Vertiefung des Bohrlochs von 540 m auf 600 m wurde am 17.08. nochmals ein Temperaturlog gefahren, welches einen deutlich kühleren, durch die Bohraktivitäten gestörten Verlauf zeigt. Weitere Erläuterungen finden sich im Text.

durchgeführt hat, stand das Bohrloch vor der ersten Messung am 16.8.1966 ca. 3 Wochen still. Danach wurde das Loch von 540 m auf 600 m vertieft, und daraufhin am 17.8.1966 nochmals ein Temperaturlog gefahren.

Das Diagramm veranschaulicht deutlich den Zusammenhang zwischen Standzeit und Verlauf der Temperaturkurve. Nach wenigen Stunden Standzeit (rote Kurve im Diagramm) sind die Temperaturen im Bohrloch aufgrund der Bohrtätigkeiten stark gestört und zeigen im oberen Bereich zu hohe, im unteren Bereich zu geringe Werte. Der Verlauf der Kurve nach einer Standzeit von drei Wochen (grüne Kurve) ist flacher, aber im Gegensatz zur Messung 2014 noch immer gestört. Die blaue Kurve zeigt den Verlauf des ungestörten Logs mit einer Standzeit von mehreren Jahren. Hier deutet sich in den oberen 60 m der Einfluss der Klimaerwärmung der letzten Jahrzehnte im steileren Kurvenverlauf an. Das

Temperatursignal des erhöhten Jahresmittels der Lufttemperatur „wandert“ im Verlauf der Jahrzehnte von der Oberfläche tiefer in den Untergrund. Die Eindringtiefe dieses Temperatursignals von etwa 60 m deckt sich recht gut mit Angaben aus der Literatur (Schärli 2007, Huber 2014, Henning & Limberg 2012).

Überprüfung und Filterung von Untergrundtemperaturen

Nach der Homogenisierung der Qualitätsklassen und der Überführung aller Untergrundtemperaturen in eine Access Datenbank wurden folgende vorbereitende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Werte mit einer Messtiefe < 50 m werden aussortiert, da sie im Einflussbereich der Schwankungen der Bodentemperatur liegen



- Oberflächentemperaturen (vgl. Kap. 5.2.2) werden an jeder Bohrung mit Temperaturmessungen ergänzt, damit im Temperaturmodell Gradienten ab der Oberfläche berechnet werden können
- doppelte Werte in einer Bohrung in gleicher Tiefe werden entfernt
- alle Werte werden Qualitätsklassen zugeteilt
- im Radius von 2 km um Bohrungen mit einem ungestörten Log werden Temperaturmessungen mit der Qualität 0,14 aussortiert (in vergleichbarer Messtiefe)

Abschließend folgte eine gradientenbasierte Plausibilitätsprüfung der Temperaturen. Zunächst wurden Temperaturwerte für jedes Bohrloch von der Oberfläche bis zum tiefsten Messpunkt in 10m- Schritten interpoliert. Danach wurden alle Messwerte, die in das 10%- oder 90%-Perzentil fallen, auf Plausibilität geprüft und gegebenenfalls aussortiert. Werte, die zu negativen Gradienten führen, wurden aus dem Datensatz entfernt.

5.2.2 Oberflächentemperaturen T_{DEM}

Die Temperatur an der Oberfläche ist ein notwendiger Eingangsdatensatz für die Erstellung des 3D-Temperaturmodells, da sie die obere Grenzbedingung im Modell darstellt. Für die Erstellung eines flächenhaften Datensatzes der Oberflächentemperaturen wurden an Klimastationen gemessene Lufttemperaturen verwendet. Die Datengrundlage bilden langjährige Jahresmitteltemperaturen, die genormt in 2m über Erdboden an den Stationen der Wetterdienste der jeweiligen Länder gemessen werden. Diese stehen kostenlos zur Verfügung (Stand April 2014):

- Deutschland: Deutscher Wetterdienst (DWD) (<http://www.dwd.de>, abgerufen am 08.03.2013)
- Österreich: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) (<http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimauebersichten/klimamittel-1971-2000>, abgerufen am 30.04.2014)

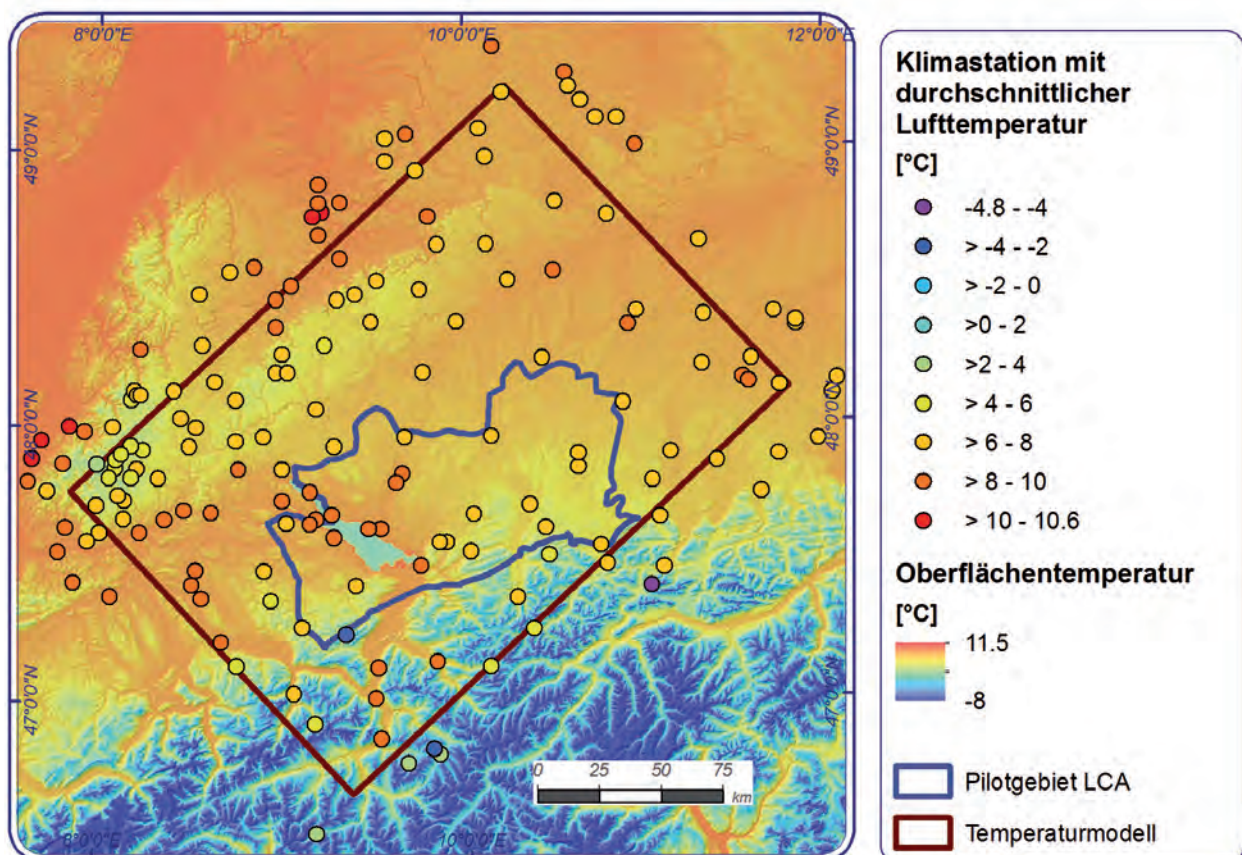


Abb. 5-6: Oberflächentemperaturen im Pilotgebiet. Dargestellt sind die verwendeten Klimastationen, die langjährigen Mittel der durchschnittlichen Lufttemperatur (Klimanormalperiode 1961-1990) und die regionalisierten Oberflächentemperaturen.

- Schweiz: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima_schweiz/tabellen.html, abgerufen am 30.04.2014, „Copyright, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, 2008“).

Die verwendeten Werte beziehen sich auf den Zeitraum 1961–1990 (gültige Klimanormalperiode der Weltorganisation für Meteorologie). Werte aus einer jüngeren Klimaperiode wurden bewusst nicht verwendet, um den bodennahen Einfluss der Klimaerwärmung im Temperaturmodell zu reduzieren (vgl. Diskussion Temperaturlog in der Bohrung TB Singen, Kap. 5.2.1).

Die Berechnung der Oberflächentemperaturen beruht auf dem vereinfachten Ansatz des linearen Zusammenhangs zwischen Lufttemperatur und Geländehöhe. Für die Berechnung wurde ein auf 100x100m resampeltes SRTM-Höhenmodell (vgl. Kap. 4.3.4) verwendet.

Die ermittelte Regressionsgleichung lautet:

$$T_{\text{DEM}} [\text{°C}] = -0,0049 \text{ K/m} \cdot z + 10,521 \text{ °C}$$

mit z = Höhe in mNN.

Wie in anderen Arbeiten (z. B. Smerdon et al. 2006, Agemar et al. 2011, GeORG-Projektteam 2013c) wurden die berechneten Oberflächentemperaturen konservativ um 1 K erhöht, da die Jahresmitteltemperatur der Luft ca. 2-3K unter der Bodentemperatur liegt.

Abbildung 5-6 zeigt die Lage der verwendeten Klimastationen und den jeweiligen langjährigen Jahresmittelwert der Lufttemperatur sowie die interpolierte Oberflächentemperatur. Im Bereich des Bodensees sind die interpolierten Seebodentemperaturen eingefügt (vgl. Kap. 5.2.3).

5.2.3 Wassertemperaturen im Bodensee

Der Bodensee liegt fast vollständig im LCA-Gebiet und bildet mit einer Fläche von 536km² und einer

maximalen Tiefe von 254 m einen großen Wasserkörper im nördlichen Molassebecken. Er ist ein warmomiktischer See mit einer nur oberflächennahen Zirkulation im Winter. Dadurch ist die Wasserschichtung über den Großteil des Jahres hinweg stabil. Die Wassertemperatur nimmt – im Gegensatz zum vorherrschenden positiven Temperaturgradienten im Festgestein – im Bodensee mit der Tiefe ab (vgl. Tab. 5-3). Somit weist der Seeboden deutlich tiefere Temperaturen auf als die Geländeoberfläche der Umgebung (vgl. Abb. 5-7). Um diesen Einfluss im Temperaturmodell abbilden zu können, wurden die Oberfläche des Seebodens und die Temperaturen am Seeboden im Modell implementiert.

Datengrundlage für die Temperaturen am Seeboden bilden die mittleren Wassertemperaturen im Bodensee in unterschiedlichen Wassertiefen sowie ein digitales Höhenmodell des Seebodens (DGM, Echolot-Daten mit 40m Auflösung).

Tab. 5-3: Mittelwerte der Wassertemperaturen im Bodensee in verschiedenen Tiefen für den Zeitraum 1962-2013 (nach: Institut für Seenforschung, Langenargen, LUBW, schriftl. Mitteilung).

Tiefe [m]	Mittelwert bei Seemitte [°C]	Temperaturgradient [K/100m]
0	11,3	
5	10,8	-10 (0-5m Tiefe)
10	9,6	-24 (5-10m Tiefe)
20	7,2	-24 (10-20m Tiefe)
30	5,9	-13 (20-30m Tiefe)
50	5,0	-4,5 (30-50m Tiefe)
100	4,6	-0,8 (50-100m Tiefe)
200	4,4	-0,2 (100-200m Tiefe)
250	4,3	-0,2 (200-250m Tiefe)

Aus dem digitalen Höhenmodell des Seebodens wurden Isobathen in 10m Abstand abgeleitet, mit den mittleren Wassertemperaturen parametrisiert und flächenhaft interpoliert.



Abb. 5-7: Höhenmodell des Seebodens (links) und regionalisierte Seebodentemperaturen des Bodensees (rechts, interpoliert aus Wassertemperaturangaben für verschiedene Tiefen und Höhenmodell). DGM: Institut für Seenforschung, Langenargen (LUBW).

5.3 Topographieeffekt und Kühlwirkung des Bodensees

Einen wesentlichen Einfluss auf den Temperaturgradienten im Untergrund hat die Geländemorphologie, bzw. die Reliefenergie. Untersuchungen im Zuge von Tunnelbauten sowie theoretische Wärmeflussmodellierungen zeigen unterschiedliche Temperaturgradienten zwischen benachbarten Bergen und Tälern (Busslinger & Rybach 1999, Goy et al. 1996, Kohl et al. 2001). Isothermen scharen sich unter den Tälern, während sie unter Gipfeln weiter auseinander liegen. Die Skizze in Abbildung 5-8 erläutert das Prinzip. In Gebieten mit hoher Reliefenergie, wie z. B. den Alpen, ist dieser Unterschied besonders stark ausgeprägt.

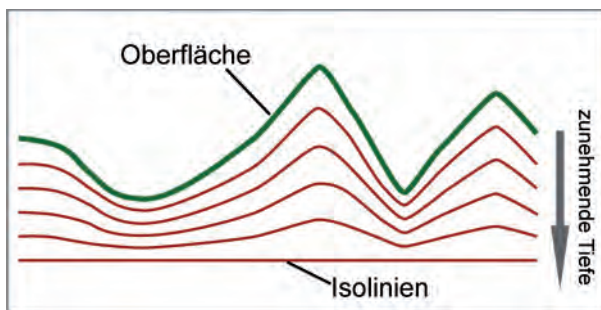


Abb. 5-8: Prinzip Isothermen im Gebirge (nach Szechy 1967 zitiert in Goy et al. 1996).

Felsmessungen im Gotthardtunnel belegen diese Vorstellung (vgl. Abb. 5-9), auch wenn weitere Faktoren den Temperaturverlauf beeinflussen, wie z. B. Wasserführung an Aufstiegs- / Abstiegszonen und

die Ausrichtung der Berghänge. So berichten Kohl et al. (2001) von Messungen im Zuge des Schweizer NEAT-Projekts (Neue Eisenbahn-Alpentransversale), die zeigen, dass die strahlungsbedingten Temperaturunterschiede an der Oberfläche von Nord- und Südhängen eines Berges bis in über 1.000m Tiefe nachgewiesen werden können.

Die Temperaturunterschiede werden mit zunehmender Tiefe geringer und gleichen sich aus. Für den Oberrheingraben wurde diese Tiefe bei -2.110m NN berechnet (GeORG-Projektteam 2013c). Dieser Wert wurde auf der Grundlage von zwei theoretischen Temperaturpfaden für den Oberrheingraben ($Z = 150 \text{ m NN}$, $T_{\text{DEM}} = 10,9^\circ\text{C}$, Temperaturgradient = $4,5 \text{ K}/100 \text{ m}$) und den Feldberg als höchster Erhebung im GeORG-Projektgebiet ($Z = 1.495 \text{ m NN}$, $T_{\text{DEM}} = 4,3^\circ\text{C}$, Temperaturgradient = $3 \text{ K}/100 \text{ m}$) konstruiert. Die beiden Temperaturpfade schneiden sich in einer Tiefe von -2.110 m NN. Da für das Molassebecken und insbesondere für die im südlichen Bereich des Modellgebiets liegenden Alpen keine vergleichbaren Messwerte existieren und eine Literaturrecherche keine verwertbaren Ergebnisse brachte, wurde die Ausgleichstiefe aus dem GeORG-Projekt übernommen.

Aufgrund der niedrigen Wassertemperatur am Grund des Bodensees ist mit einer Kühlwirkung des Bodensees auf den tieferen Untergrund zu rechnen. Um den horizontalen und vertikalen Einflussbereich der Seebodentemperaturen auf den umliegenden Untergrund abzuschätzen, wurde ein stark vereinfachtes

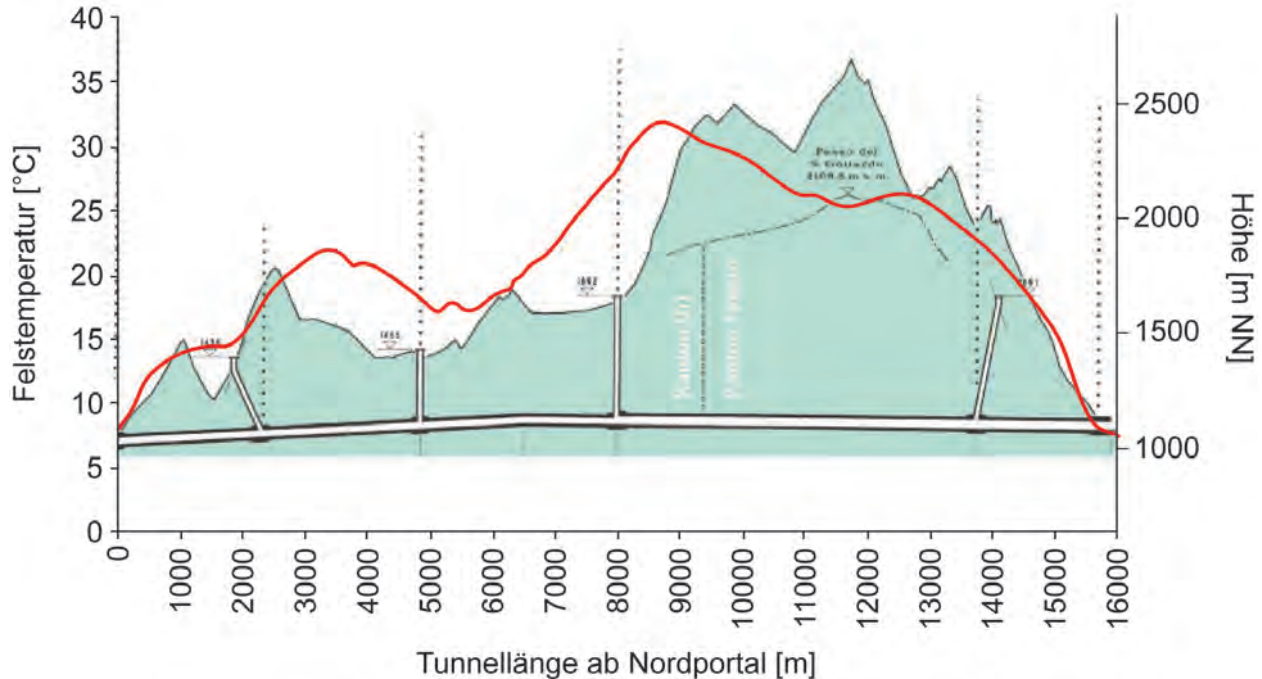


Abb. 5-9: Temperaturprofil (rote Linie) und Höhenprofil im Gotthardtunnel (Quelle Temperaturmodell: Schärli & Kohl 2002, Quelle Höhenprofil: <http://www.gotthard-strassentunnel.ch/Linienfuehrung.20.0.html>, abgerufen am 11.03.2015).

Konzeptmodell mit FEFLOW gerechnet. Es zeigt einen horizontalen Einfluss von maximal 2 km sowie einen vertikalen Einfluss von maximal 4,25 km.

5.4 Methodik und Workflow des geostatistischen Temperaturmodells

Für das LCA-Pilotgebiet wurde auf der Grundlage der in Kap. 5.2 vorgestellten Eingangsdaten ein geostatistisches Temperaturmodell erstellt. Dies erfolgte unter Berücksichtigung des Topographieeffekts sowie des kühlenden Einflusses des Bodensee-Wasserkörpers (vgl. Kap. 5.3). Die geostatistische Temperaturmodellierung basiert auf der Annahme, dass sich Untergrundtemperaturen mit zunehmender Tiefe annähernd linear erhöhen. Daher liegt es nahe, die Temperaturen in eine lineare Komponente und die Abweichung der Messdaten von der Linearkomponente, den sogenannten Residualanteil, aufzuspalten und getrennt voneinander zu analysieren.

Im ersten Schritt werden die lineare Komponente ausgewertet und verschiedene Varianten des A-Priori-Modells erzeugt und bewertet (vgl. Kap. 5.4.2).

Die Abweichungen des A-Priori-Modells von den gemessenen Temperaturen sind annähernd normalverteilt und werden in einem zweiten Schritt

mit einem Krigingverfahren regionalisiert. Auch in diesem Arbeitsschritt wurden verschiedene Varianten des Residualmodells auf der Grundlage der Qualitätskategorien der Untergrundtemperaturen erzeugt, verglichen und bewertet.

Der dritte Schritt besteht in der Kombination der jeweils ausgewählten A-Priori- und Residualmodellvariante zu einem Gesamtmodell. Dieses gibt die gemessenen Temperaturen wieder, liefert aber auch in gering beprobten Gebieten eine erste Temperaturprognose auf Grundlage des A-Priori-Modells.

Die Temperaturmodellierung wurde in der Software Gocad durchgeführt.

5.4.1 Modellaufbau

Das geostatistische Temperaturmodell basiert auf einem regelmäßigen orthogonalen 3D-Gitter, dessen Parameter in Tabelle 5-4 angegeben sind. Sein Perimeter ist in Abbildung 5-12 dargestellt. In der Modellierungssoftware Gocad lässt sich das 3D-Gitter in inhaltlich definierte Regionen untergliedern, die bei der weiteren Bearbeitung getrennt editiert werden können. Der gesamte Modellkörper baut sich aus mehr als 171 Millionen Rasterzellen auf, während der für die weitere Parametrisierung und Modellierung relevante Teilkörper unterhalb der Geländeoberfläche aus etwa 125 Millionen Zellen



besteht. Eine in der Modellierung getrennt behandelte Region ist der Bodensee, deren Geometrie und Temperaturen auf der Grundlage der Angaben des Instituts für Seenforschung Langenargen in das Modell eingepflegt wurden (vgl. Kap. 5.2.3).

Das Gitter wurde mit den Bodentemperaturen sowie den Messwerten für den Untergrund (getrennt nach Qualitätsklasse) parametrisiert.

Tab. 5-4: Parameter des geostatistischen Temperaturmodells im LCA-Pilotgebiet.

Parameter	Value
Modellausdehnung	242 km x 168 km x 10,5 km
Anzahl der Rasterzellen	484 x 336 x 1052
Größe der Rasterzellen	500m x 500m x 10m
Summe der Rasterzellen	171.080.448
Rasterzellen unter dem DGM	125.624.991
Rasterzellen Bodensee	20.374

5.4.2 Erstellung und Analyse verschiedener A-Priori-Modelle

Das A-Priori-Modell bildet den linearen Temperaturanstieg im Untergrund ab, der sich aus den gemittelten Temperaturgradienten der gemessenen Temperaturen ergibt. Einfachste Möglichkeit ist ein modellweit einheitlicher Temperaturgradient, der in der Modellvariante APM1 implementiert wurde. Bei der räumlichen Darstellung des mittleren Temperaturgradienten der Messreihen fällt eine Nord-Südgerichtete Abnahme des Parameters auf. Diese systematische Reduktion ist auf die Krustenverdickung des alpinen Deckenstapels und der damit einhergehenden relativen Tieflage der Moho erklärbar. Modellvariante 2 (APM2) mit regional variierenden Temperaturgradienten bildet dieses Phänomen ab. Des Weiteren wurden die Temperaturgradienten getrennt nach geologischen Formationen an ausgewählten ungestörten Temperaturlogs analysiert. Dabei fielen einige signifikante Unterschiede zwischen den tertiären Molassesedimenten einerseits und verschiedenen mesozoischen Einheiten andererseits auf. Dementsprechend wurden in Modellvariante 3 (APM3) lithostratigraphische Informationen aus dem geologischen Übersichtsmodell für die Gridparametrisierung herangezogen. Da während des Testzeitraums ausschließlich im baden-württembergischen Anteil des LCA-Pilotgebiets Daten aus dem 3D-Übersichtsmodell vorlagen, musste für APM3 der Modellkörper entsprechend verkleinert werden.

In allen drei Modellvarianten wurden der Topographieeffekt und der Einflussbereich des Bodensees (vgl. Kap. 5.3) implementiert. Auf der Grundlage des Topographieeffekts wurden die Temperaturgradienten bis in eine Tiefe von -2.110m NN angepasst. Unterhalb dieses Levels treten keine topographiebedingten Temperaturunterschiede mehr auf.

Nach dem konduktiven Prinzipmodell wirkt der Wasserkörper des Bodensees bis 4.250m unter dem Seeboden kühlend auf die Gesteine des Untergrundes. Dementsprechend höhere Temperaturgradienten sind unterhalb des Sees zu erwarten. Dieser Zusammenhang wurde mit folgender Formel in einer separaten Region „Bodensee_Einfluss_vertikal“ implementiert (vgl. Abb. 5-10):

$$\text{Temperaturgradient [K/100m]} = (T_{s=4.250m_unter_see} - T_{s=0m_unter_see}) / 4.250m * 100$$

mit $T_{s=4.250m_unter_see}$: Temperatur in 4.250m unter dem Seeboden und $T_{s=0m_unter_see}$ Temperatur am Seeboden.

Die Temperaturgradienten unterhalb des Bodensees liegen im Mittel bei 4K/100m.

Der laterale Einfluss des Bodensees wurde nach dem konduktiven Prinzipmodell mit 2km Umfang angenommen. Für die Implementierung dieser Variation des Temperaturgradienten wurde der Seeperimeter um 2km erweitert und als äußere Begrenzung des Einflussbereichs bis in 4.250m Tiefe vom Rest des Modells abgetrennt. Die innere Begrenzung setzt sich aus dem Bodensee selbst und im Untergrund mit der bereits parametrisierten

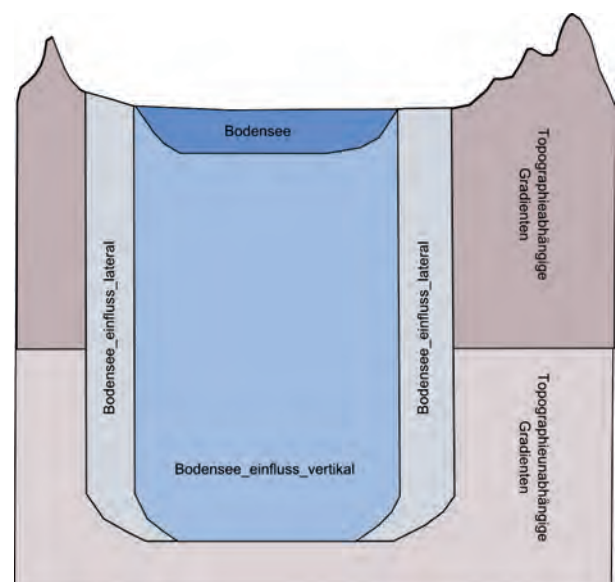


Abb. 5-10: Implementierung der Kühlwirkung des Bodensees in den A-Priori-Modellen, nähere Erläuterungen befinden sich im Text.

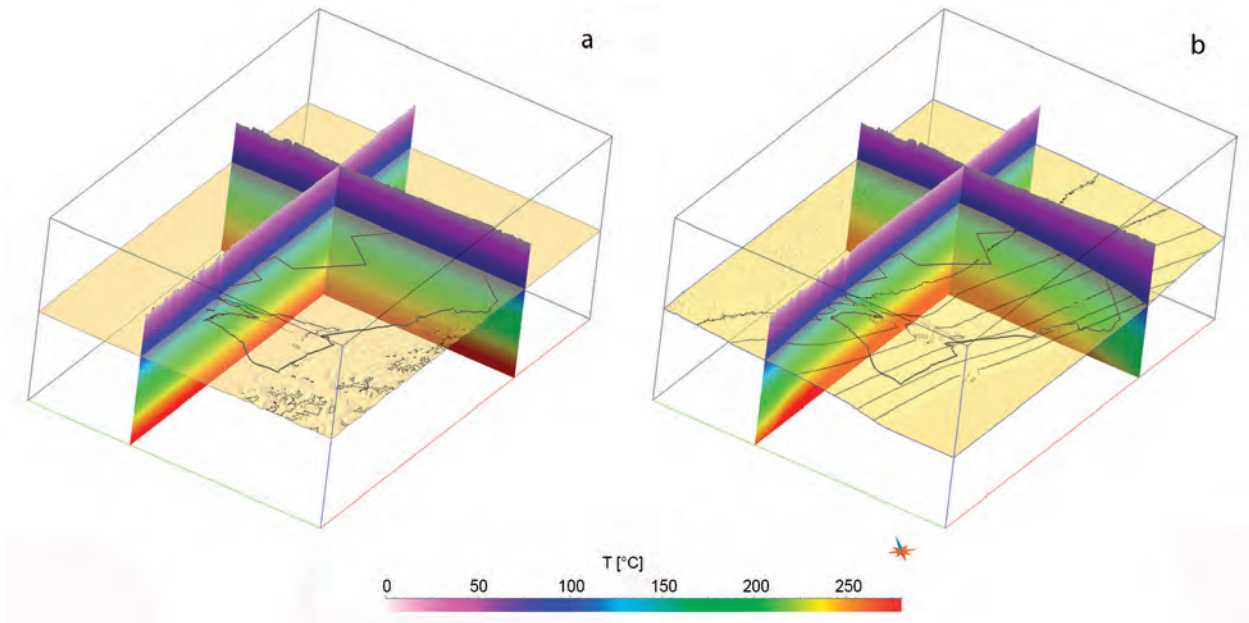


Abb. 5-11: Screenshots aus den Temperaturmodellen in der Modellierungssoftware Gocad – a) APM1; b) APM 2. Die Darstellungen zeigen exemplarisch jeweils zwei Profilschnitte durch das Temperaturmodell und die 100 °C-Isothermenflächen durch die AP-Temperaturmodelle (weitere Erläuterungen im Text).

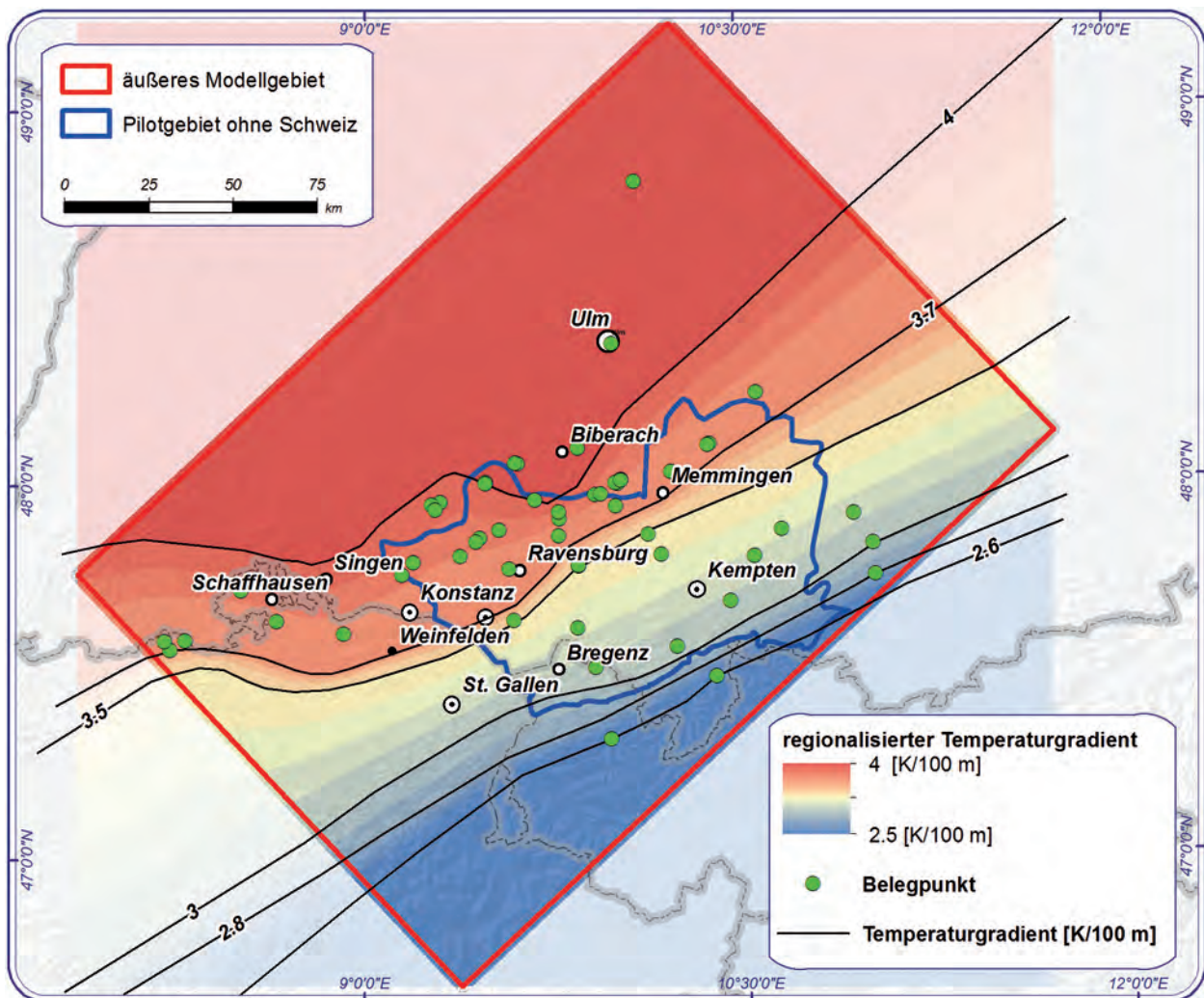


Abb. 5-12: Ortsabhängige Variation des Temperaturgradienten, Abnahme zur Überschiebungsfrent der Alpen hin.



Region „Bodensee_einfluss_vertikal“ zusammen. In der dadurch entstehenden Manschette wurden die Temperaturgradienten linear interpoliert.

A-Priori-Modell mit einheitlichem Temperaturgradient (APM1)

In der Modellvariante APM1 wurde ein einheitlicher Temperaturgradient im gesamten Projektgebiet angenommen. Unterhalb des topographiebeeinflussten Bereichs treten dadurch keine Temperaturunterschiede im A-Priori-Modell auf. Der mittlere Temperaturgradient ergibt sich aus dem Median der gemessenen Temperaturen der Datenqualität 1,0 und liegt bei 3,7K/100m. Der Topographieeinfluss und die Kühlwirkung des Bodensees wurden nach dem im Kapitel 5.3 beschriebenen Prinzip im Modell implementiert. Die Temperaturspanne bei APM1 liegt zwischen -3,5°C an der Geländeoberfläche im Permafrostbereich der Alpen und 290°C an der Modellbasis bei -7.000m NN. Eine beispielhafte Darstellung zweier Temperaturprofile und der 100°C-Isothermenfläche findet sich in Abbildung 5-11. Die Isothermenfläche liegt konstant bei -1.900m NN. Nur im Bodenseegebiet und in den alpinen Hochlagen im Süden ergeben sich regionale bzw. lokale Minima, die sich aus dem kühlenden Einfluss des Seekörpers und den geringeren geothermischen Gradienten unter Gebirgsstöcken begründen.

A-Priori-Modell mit regional variierendem Temperaturgradient (APM2)

Abbildung 5-12 zeigt die ortsabhängige Variation des Temperaturgradienten, die auf der Grundlage der Mittelwerte der ungestörten Logs (Qualität 1,0), der Fördertests und hydrochemischen Analysen (Qualität 0,7) sowie in Bereichen mit niedriger Datendichte ausgewählter Temperaturmessungen geringerer Qualität erstellt wurden. Der Temperaturgradient nimmt von 4K/100m nördlich von Biberach bis auf 2,6K/100m in Richtung der alpinen Überschiebungsfront ab. Die niedrigsten Werte wurden in der Bohrung V-AU_001 in Vorarlberg und den Bohrungen Hindelang 1 und Immenstadt 1 im bayerischen Projektgebiet gemessen. Ursache ist die Krustenverdickung im Bereich des alpinen Deckenstapels und der damit einhergehenden relativen Tieflage der Moho. Ein ähnlicher Gradientenverlauf ist auch im Temperaturmodell im GeoMol-Pilotgebiet Oberösterreich-Oberbayern zu beobachten (GBA 2015).

Die Temperaturgradienten des APM2 wurden analog der in Abbildung 5-12 dargestellten Verteilung implementiert. Der Topographieeffekt und der Einfluss des Bodensees flossen auch in dieses Modell wie in Kapitel 5.3 beschrieben ein.

Die Temperaturspanne bei APM2 liegt zwischen -3,5°C und 312°C. Abbildung 5-11 zeigt exemplarisch die 100°C-Isothermenfläche. Durch die nach Süden hin abnehmenden Temperaturgradienten sinkt die Fläche von -1.600m NN im Norden bis auf -2.900m NN im Süden ab. Die lokal schwankende,

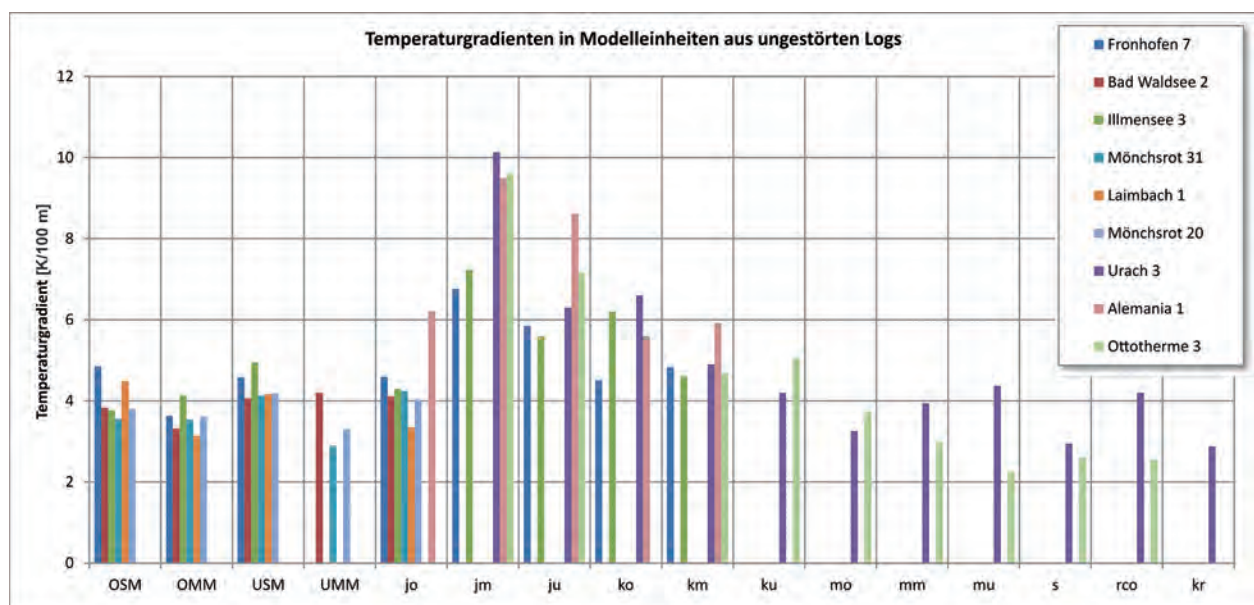


Abb. 5-13: Formationsabhängige Temperaturgradienten aus ungestörten Logs.

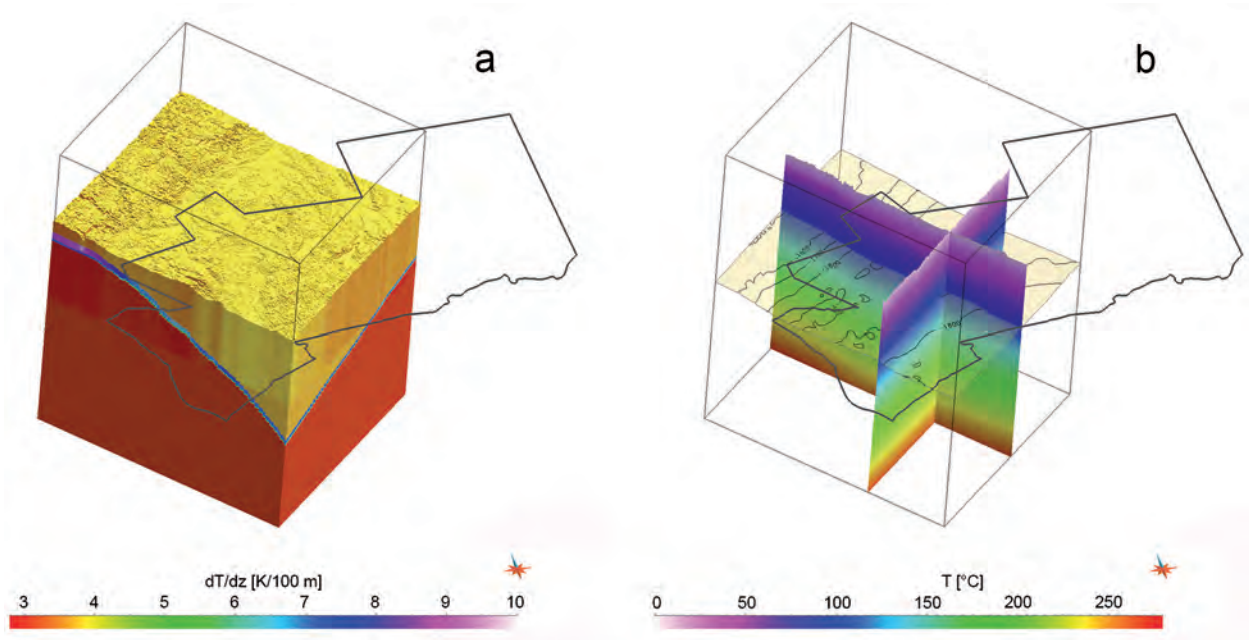


Abb. 5-14: Screenshots aus den Temperaturmodellen in der Modellierungssoftware Gocad – a) APM3 mit formationsbedingten Temperaturgradienten; b) Berechnete Temperaturen in APM3 mit zwei exemplarischen Profilschnitten und der 100°C-Isothermenfläche (beige, weitere Erläuterungen im Text).

unruhige Raumlage der Isotherme oberhalb von -2.100mNN begründet sich mit dem Einfluss der Topographie. Im Gegensatz zur 100°C-Isotherme des APM1 liegt der Südteil der Fläche bereits so tief, dass die verringerten geothermischen Gradienten im Bereich der Alpen keine Auswirkungen mehr zeigen. Die kühlende Wirkung des Bodensees ist in der Tiefe der Isotherme hingegen ebenfalls erkennbar.

A-Priori-Modell mit formationsbedingtem Temperaturgradient (APM3)

Die Auswertung der ungestörten Temperaturlogs (Qualität 1,0) zeigte signifikante Unterschiede in verschiedenen Modelleinheiten (vgl. Abb. 5-13). Die Temperaturgradienten in den tertiären Molasseeinheiten liegen zwischen 3,5 und 4K/100m. Bei ihnen ist kein klarer regionaler Trend erkennbar. Im Mittel- und Unterjura steigen die Temperaturgradienten auf 8,6K/100m deutlich an. Die höchsten Werte lassen sich im Bereich der Schwäbischen Alb erkennen (Urach 3, Alemania 1, Ottotherme 3). Die Temperaturgradienten nehmen unterhalb der jurassischen Einheiten wieder auf 3,1K/100m ab. Allerdings sind diese Aussagen nicht belastbar, da in diesen Modelleinheiten nur zwei Messreihen (Urach 3, Alemania 1) existieren.

Voraussetzung für die Implementierung der formationsabhängigen Temperaturgradienten ist ein geologisches Strukturmodell, das zum Bearbeitungszeitpunkt allerdings nur im baden-württembergischen Anteil des Projektgebiets vorlag. Daher wurde für

Testzwecke das Bearbeitungsgebiet für APM3 entsprechend verkleinert. Der Modellraum unterteilt sich auf Basis des geologischen Übersichtsmodells in vier Regionen und wurde mit folgenden Temperaturgradienten belegt (vgl. Abb. 5-14):

- 1 Quartär, Tertiär und Oberjura: einheitlich 3,7K/100m
- 2 Mitteljura: Schwäbische Alb: 10K/100m, Molassebecken: 7K/100m
- 3 Unterjura: Schwäbische Alb: 7,5K/100m, Molassebecken: 6K/100m
- 4 Trias, Permokarbon und Grundgebirge: 3,1K/100m

Der Topographieeffekt wurde wie in den anderen A-Priori-Modellen berechnet. Der Bodensee liegt im verkleinerten APM3 außerhalb des Bearbeitungsraums.

Die Isothermenflächen unterhalb des topographisch beeinflussten Bereichs weisen aufgrund der Raumlage der geologischen Einheiten und variierenden Schichtmächtigkeiten komplexe Strukturen auf. In Abbildung 5-14 ist die 100°C-Isotherme dargestellt. Ihre relative Hochlage im Norden bei rund -1.500mNN begründet sich aus den hohen geothermischen Gradienten der mittel- und unterjurassischen Gesteine in Kombination mit deren hohen Schichtmächtigkeiten. Nach Süden hin nehmen die Mächtigkeiten der jurassischen Gesteine



ab. Dadurch sinkt die Isotherme auf -1.900m NN ab, bevor sie ganz im Süden durch die hohen Schichtmächtigkeiten des obersten Modellabschnitts (Quartär, Tertiär, Oberjura) und einem Temperaturgradienten von 3,7K/100m wieder ansteigt.

Vergleich der A-Priori-Modelle

Tabelle 5-5 vergleicht die Abweichungen zwischen den verschiedenen A-Priori-Modellen und den tatsächlich gemessenen Temperaturen für alle Messwerte und für die Datenqualität 1,0. Der Vergleich der Modelle bringt folgende Ergebnisse:

- die Modelle zeigen insgesamt ähnliche Mittelwerte und Abweichungen
- APM1 weist für alle Messwerte und für Qualität 1,0 die höchsten Abweichungen auf (Perzentile und Standardabweichungen); APM3 liefert die besten Ergebnisse
- im Mittel sind die Modelle bezogen auf alle Messwerte etwas zu warm
- betrachtet man nur die höchste Datenqualität, sind die Modelle etwas zu kühl (u. U. auf die Unterschätzung der Temperaturen bei der Korrektur der BHT-Werte zurückzuführen)

Tab. 5-5: Abweichungen zwischen den A-Priori-Modellen und den tatsächlich gemessenen Temperaturen im oberen Teil für alle Messwerte und im unteren Abschnitt ausschließlich für Qualität 1,0; alle Angaben in K, außer für Num (Anzahl); negative Temperaturwerte: A-Priori-Modell ist kühler als tatsächlich gemessene Werte, positive Temperaturwerte: A-Priori-Modell ist wärmer als tatsächlich gemessene Werte.

		Min	25% Perz	Median	75% Perz	Max	arith. Mittel	Stdabw.	Num
alle Messwerte	APM1	-28,3	-2,2	0,45	3,2	54,57	1,0	7,2	52.841
	APM2	-24,8	-1,8	0,6	3,0	25,8	0,56	5,3	52.841
	APM3	-21,855	-2,48	0,3	2,66	24,5	0,22	5,3	27.021
Q1	APM1	-27,07	-3,76	-0,58	1,0	13,3	-2,4	5,72	6.192
	APM2	-24,8	-2,5	0,3	1,8	14,4	-1,0	5,1	6.192
	APM3	-15	-3,1	-0,23	1,35	13,65	-1,28	4,33	3.112

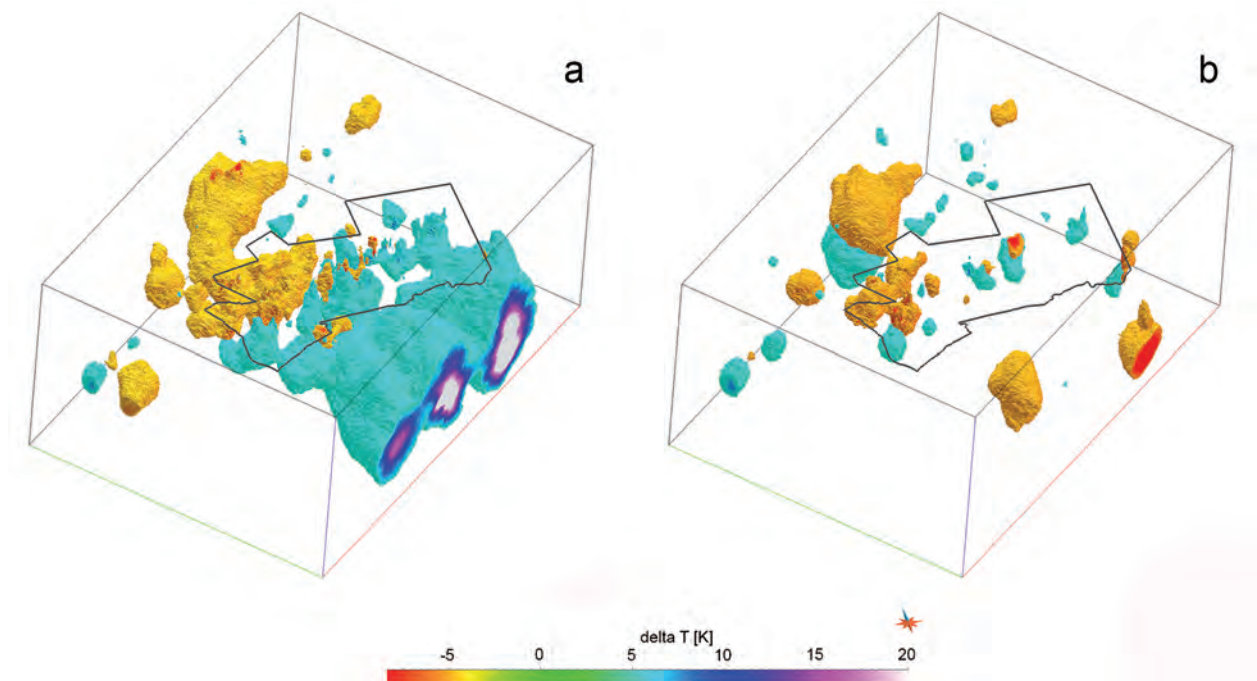


Abb. 5-15: Vergleich der Abweichungen der A-Priori-Modelle APM 1 (a) und APM 2 (b) von den gemessenen Temperaturen. Perimeter in schwarz: Grenze LCA-Pilotgebiet auf einer Höhe von 0 m NN. Blaue Regionen: Gemessene Temperaturen sind niedriger als Modell. Rote Bereiche: Messwerte liegen höher als die Modellannahmen, Diskussion vgl. Text.

Abbildung 5-15 zeigt die räumliche Verteilung der Abweichungen der A-Priori-Modelle APM1 und APM2 von den tatsächlich gemessenen Temperaturen. Visualisiert werden in orange-rot die Regionen, in denen das A-Priori-Modell um mehr als 5K höhere Temperaturwerte als gemessen aufweist. Ist das Modell hingegen mehr als 5K kälter, sind die Bereiche blau-violett gekennzeichnet. Bei APM1 ist die systematische Überschätzung der Temperaturen im Süden des Modellgebiets klar erkennbar, während vor allem im Norden der mittlere Temperaturgradient von 3,7K/100m zu niedrig angesetzt wurde. In APM2 gibt es deutlich weniger Regionen, in denen das A-Priori-Modell stärker als 5K von den Messreihen abweicht. Durch die systematische Verringerung der Temperaturgradienten zur alpinen Überschiebungsfront hin ist APM2 besser an die realen Verhältnisse angepasst.

Resultat: APM3 mit formationsbezogenen Temperaturgradienten gibt den Temperaturverlauf im Untergrund am besten wieder, da es sowohl formations-spezifische Eigenschaften als auch eine regionale Variation des Temperaturgradienten berücksichtigt. Allerdings konnte APM3 während der Projektlaufzeit nicht implementiert werden, da das geologische Modell nicht im Gesamtgebiet vorlag. Daher wurde die Modellvariante APM2 mit regionalisierten Temperaturgradienten für die weitere Bearbeitung genutzt.

5.4.3 Erstellung und Analyse verschiedener Residualmodelle

Nach der Implementierung des A-Priori-Modells mit regional variierenden Temperaturgradienten wurden die verbleibenden Differenzen zu den gemessenen Temperaturen analysiert. Abbildung 5-16 (links) zeigt die Verteilung der Residualtemperaturen als Histogramm. Der arithmetische Mittelwert für alle Messwerte liegt bei 0,56K und die Standardabweichung beträgt $\pm 5,3$ K. Die maximalen Abweichungen liegen bei 25K. Die Daten sind annähernd normalverteilt.

Abbildung 5-16 (rechts) stellt die räumlichen Beziehungen der Residualtemperaturen zu ihren Nachbarwerten in einem Variogramm dar. Die Temperaturen sind bis zu etwa 20 km Entfernung miteinander korrelierbar (Reichweite oder Range). Der Sill liegt bei 19,2K. Die Reichweite des vertikalen Variogramms ist nicht bestimmbar. Sie wurde daher wie im GeORG-Projekt mit 1.600m angenommen. Das Variogramm-Modell wurde für die Regionalisierung der Residualtemperaturen mit einem Simple Kriging Verfahren innerhalb des „Reservoir Properties Workflows“ in der Software Gocad genutzt.

Um den Einfluss niedriger Qualitätskategorien von Untergrundtemperaturen auf die Temperaturverteilung zu untersuchen, wurden insgesamt sieben Residualmodelle mit verschiedenen Eingangsdatenkombinationen erzeugt und bewertet (vgl. Tab.5-6). Das Modell g mit allen Qualitätskategorien zeigte lokale Variationen von bis zu 20K auf Distanzen von wenigen km. Diese Schwankungen finden sich vor allem im Bereich von Kohlenwasserstoff-Feldern mit vielen Temperaturmessungen niedriger Datenqualität. Da die KW-Felder im LCA-Gebiet an antithetische Fallenstrukturen gebunden sind, ist prinzipiell mit störungsgebundenen Fließwegen des Grundwassers und damit einhergehenden Modifikationen des Temperaturfelds zu rechnen. Wahrscheinlicher sind jedoch Artefakte durch fehlerhaft korrigierte BHT-Messungen oder gestörte Logs. Diese Eingangsdaten sollten in diesem Fall vor der Modellierung entfernt werden.

In Modell a sind ausschließlich hochwertige Messdaten der Qualitätskategorie 1,0 eingeflossen. Dadurch kann man bei diesem Residualmodell von einer hohen Datenqualität ausgehen. Allerdings liegen der Berechnung nur 6.192 mit Eingangswerten parametrisierte Gridzellen zu Grunde, sodass die Datendichte sehr gering ist und in der Gesamtdarstellung über weite Strecken das A-Priori-Modell wiedergegeben wird. In den Modellen b bis g wurden neben Qualität 1,0 zunehmend niedrigere

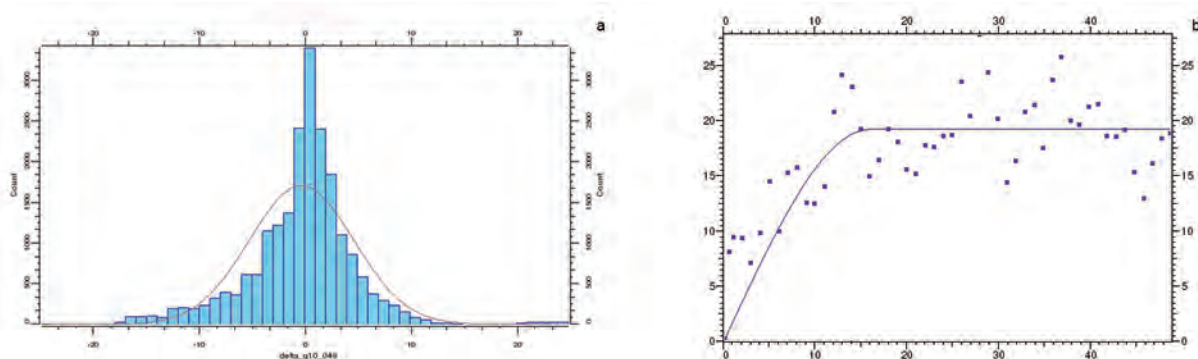


Abb. 5-16: Histogramm Residualtemperaturen und Variogramm (horizontal).

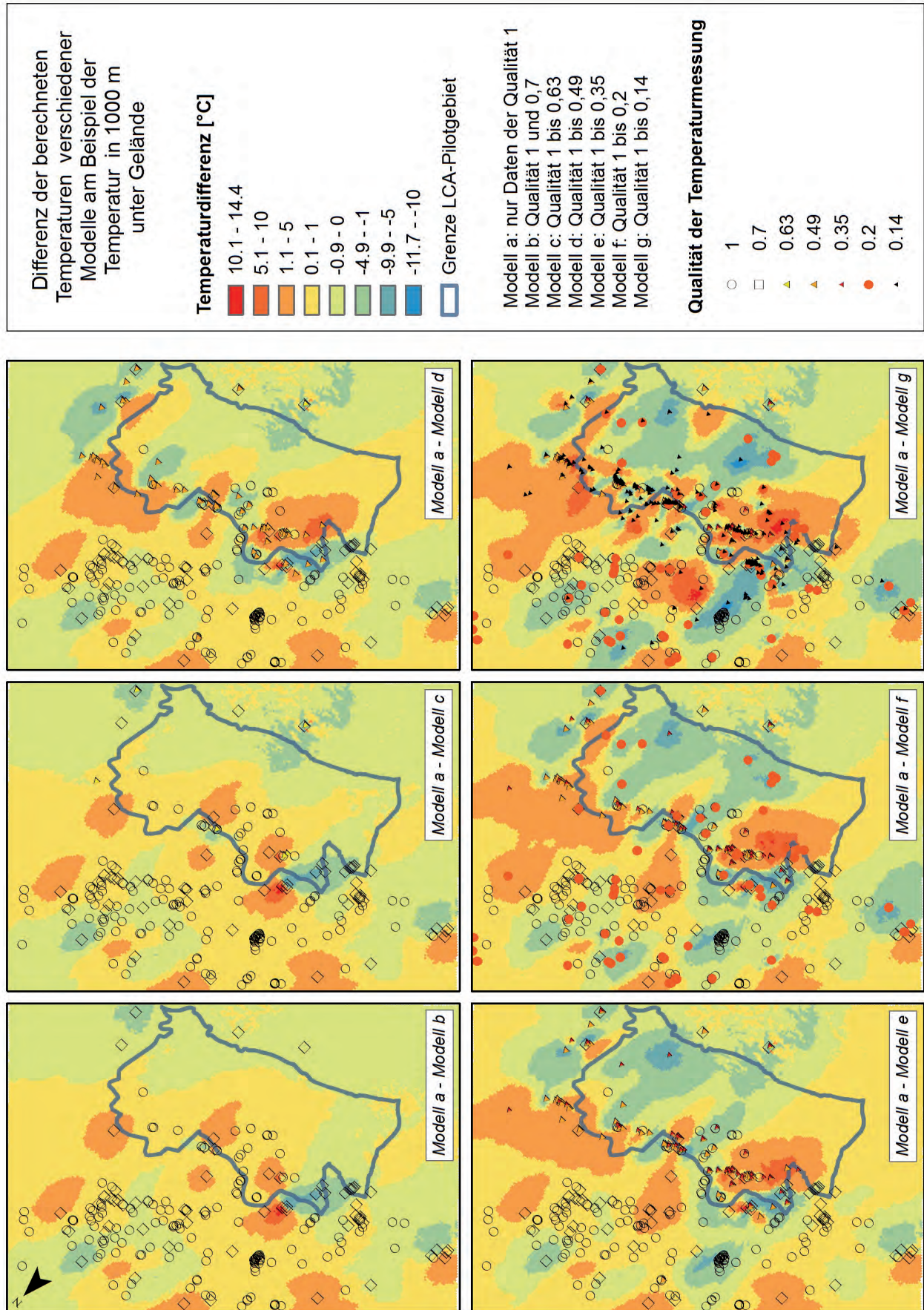


Abb. 5-17: Vergleich der gerechneten Modellvarianten. Diskussion vgl. Text.

Tab. 5-6: Eingangsdaten der Residualmodelle mit unterschiedlichen Qualitätskategorien und deren Abweichungen zum Referenzmodell a.

Modell	einbezogene Qualitätskategorien	parametrisierte Zellen	mittlere Abweichung zu Modell a in K	Standardabweichung zu Modell a in K
Modell a	1,0	6.192	-	-
Modell b	0,7 – 1,0	10.183	0,05	0,61
Modell c	0,63 – 1,0	11.176	-0,1	1,0
Modell d	0,49 – 1,0	21.230	0,04	1,4
Modell e	0,35 – 1,0	25.219	0,07	1,6
Modell f	0,2 – 1,0	28.732	-0,02	1,9
Modell g	0,14 – 1,0	52.841	0,07	2,2

Qualitätskategorien für die Berechnung der Residualmodelle herangezogen. Sie weichen in zunehmendem Maß von der Modellvariante a ab. So beträgt die Standardabweichung der Modelle a und g (Qualität 1,0 vs. Gesamtdatensatz) 2,2K. Diese Differenzen sind einerseits in realen Anomalien des Temperaturfelds begründet. Andererseits stellen diese, wie eingangs bereits diskutiert, aber auch aus den Eingangsdaten stammende Artefakte dar. In Abbildung 5-17 sind die Differenzen beispielhaft zwischen den einzelnen Modellen in einer Tiefe von 1.000 m unter Gelände dargestellt. Lokale Schwankungen zeigen sich verstärkt in den Modellen e bis g. Daher wurden für die finale Berechnung die Qualitätskategorien 0,35, 0,2 sowie 0,14 (BHT-Werte mit nur einem Korrekturparameter und gestörte Logs) nicht genutzt. Die Modellvariante d ist mit 21.230 parametrisierten Gridzellen der Qualitätskategorien 1,0 bis 0,49 ein Kompromiss zwischen der Anzahl der Eingangsdaten und den Qualitätsansprüchen des Residualtemperaturmodells. Es wurde für die finale Fassung des Temperaturmodells und die nachfolgende Produktableitung benutzt.

5.4.4 Finales Temperaturmodell

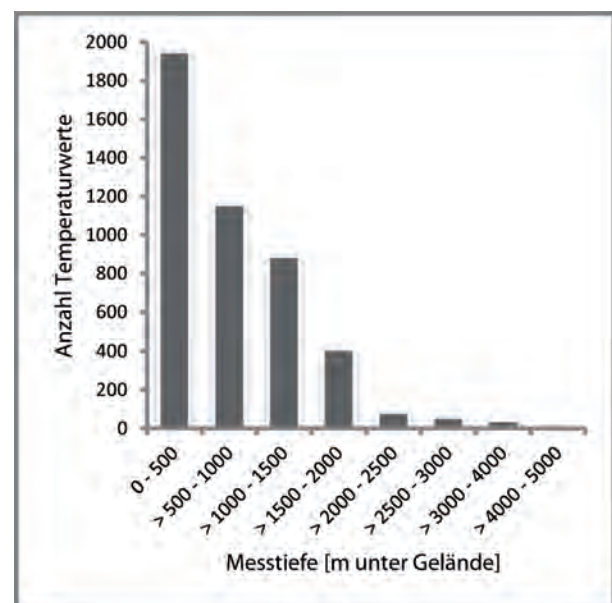
Tabelle 5-7 gibt einen Überblick über die Verteilung der final verwendeten Messwerte auf die Qualitätsklassen und die Anzahl der verwendeten Bohrungen. Aufgrund der häufig kurzen Messabstände in Temperaturlogs (v.a. GB1 Ravensburg und TB Singen) ist die Anzahl der Messwerte der Qualität 1,0 sehr hoch (13.284 bzw. 85,8%), die Anzahl der Bohrungen mit ungestörten Temperaturlogs demgegenüber geringer (153 bzw. 51 %).

Die Eingangsdaten sind in der Mehrzahl von guter bis sehr guter Qualität, jedoch sehr inhomogen im Modellgebiet verteilt. Das betrifft sowohl die horizontale als auch die vertikale Verteilung. Betrachtet man die Verteilung mit der Tiefe (vgl. Abb. 5-18), so fällt die starke Abnahme von Messdaten ab einer

Tiefe von 2.000 m unter Gelände auf. Unterhalb dieser Tiefe lassen sich auf Grundlage von Messdaten nur lokale Aussagen zur tatsächlichen Untergrundtemperatur machen.

Tab. 5-7: Anzahl der finalen Eingangsdaten, aufgeteilt nach Messmethode (die vertikalen Messabstände bei ungestörten Logs schwanken zwischen 1 cm und 100 m).

Messmethode	Qualitätsklasse	Anzahl Bohrungen	Anzahl Messwerte
ungestörte Logs	1,0	153	13.284
Fördertest	0,7	65	513
BHT	0,63	6	8
BHT	0,49	73	100


Abb. 5-18: Häufigkeit der Messwerte je nach Messtiefe (final verwendete Messdaten, Temperaturlogs GB1 Ravensburg und TB Singen von 2014 wurden aus Darstellungsgründen auf 10m Messschritte reduziert).



Aus der Karte der horizontalen Verteilung von Bohrungen mit Temperaturmessungen (vgl. Abb. 5-19) wird deutlich, dass ein Großteil der eher flachen ungestörten Temperaturlogs im nordwestlichen Bereich des Temperaturmodells nördlich einer Linie von Schaffhausen nach Ulm liegt. Südlich dieser Linie sind die Temperaturlogs tiefer, aber ungleichmäßiger verteilt. Im Bereich der ehemaligen KW-Felder häufen sich lokal Bohrungen mit Temperaturmessungen. Südöstlich der ehemaligen KW-Felder existieren so gut wie keine Daten.

A-Priori-Modell

Der Temperaturgradient variiert regional zwischen 2,6 K/100 m im Süden und 4 K/100 m im Norden (vgl. Kap 5.4.2). Der mittlere Temperaturgradient liegt bei 3,7 K/100 m. Der Modellblock zeigt eine Temperaturspanne zwischen -3,5 °C an der Geländeoberfläche im Bereich der Alpen und 312 °C bei -7.000 m NN. In

Abbildung 5-20 (links) sind exemplarisch zwei horizontale Schnitte bei -1.000 m NN und -2.000 m NN durch das Modell gelegt. Die Temperaturen bei -1.000 m NN variieren zwischen 49 °C im Südosten und 74 °C im Nordwesten. Die Isothermen verlaufen begründet durch den Topographieeffekt unruhig. Der Bereich unterhalb des Bodensees ist durch kühlere Temperaturen als die Umgebung gekennzeichnet.

In -2.000 m NN machen sich topographiebedingte Einflüsse hingegen kaum noch bemerkbar. Die Temperaturen nehmen von 113 °C im Nordwesten auf 75 °C im Südosten ab. Der kühlende Einfluss des Bodensees tritt hingegen auch in dieser Tiefe noch auf.

Residualmodell

Für die Berechnung des Residualmodells wurden die Temperaturabweichungen der gemessenen

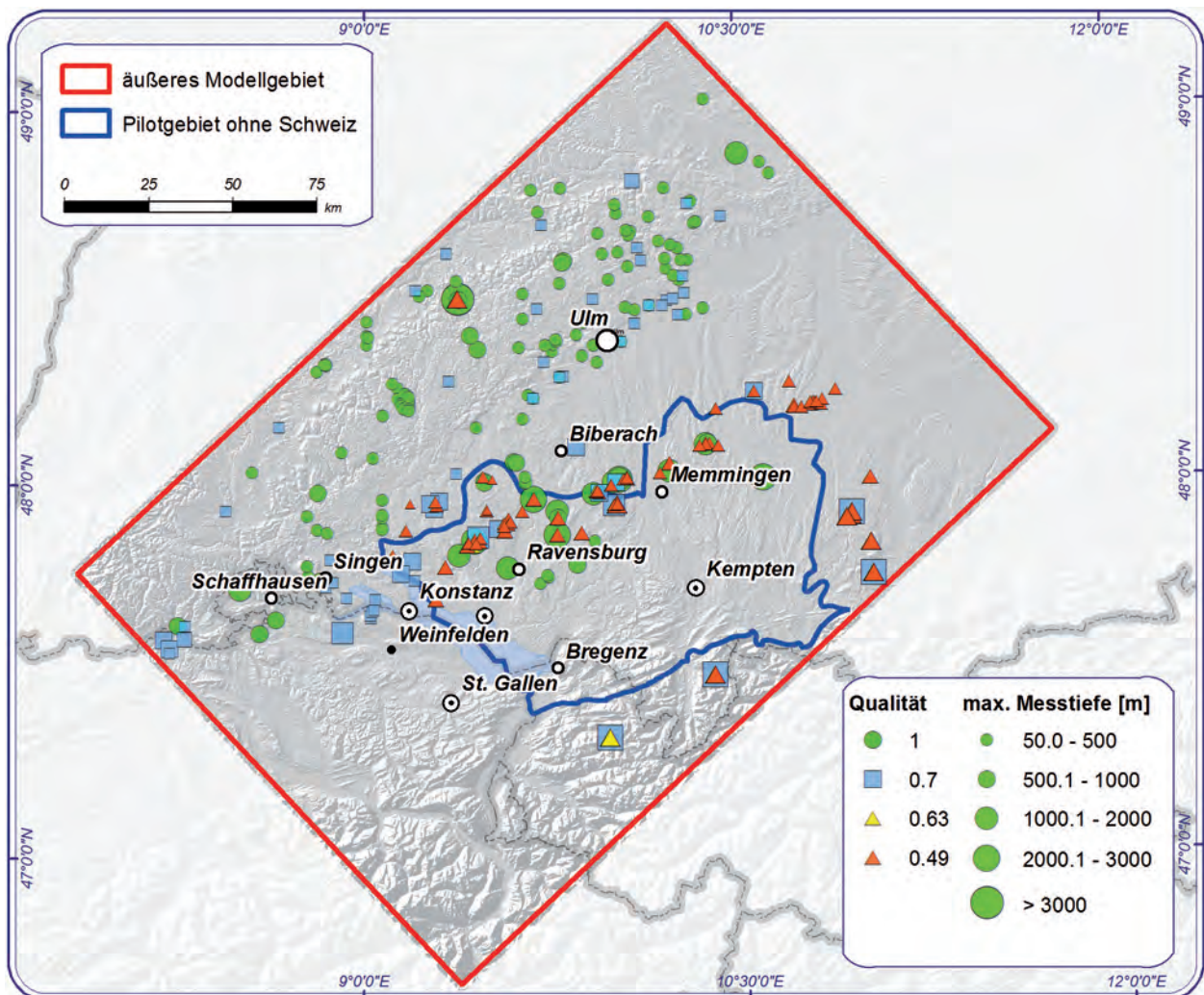


Abb. 5-19: Lage, Qualität und maximale Messtiefe der im finalen Modell verwendeten Temperaturwerte.

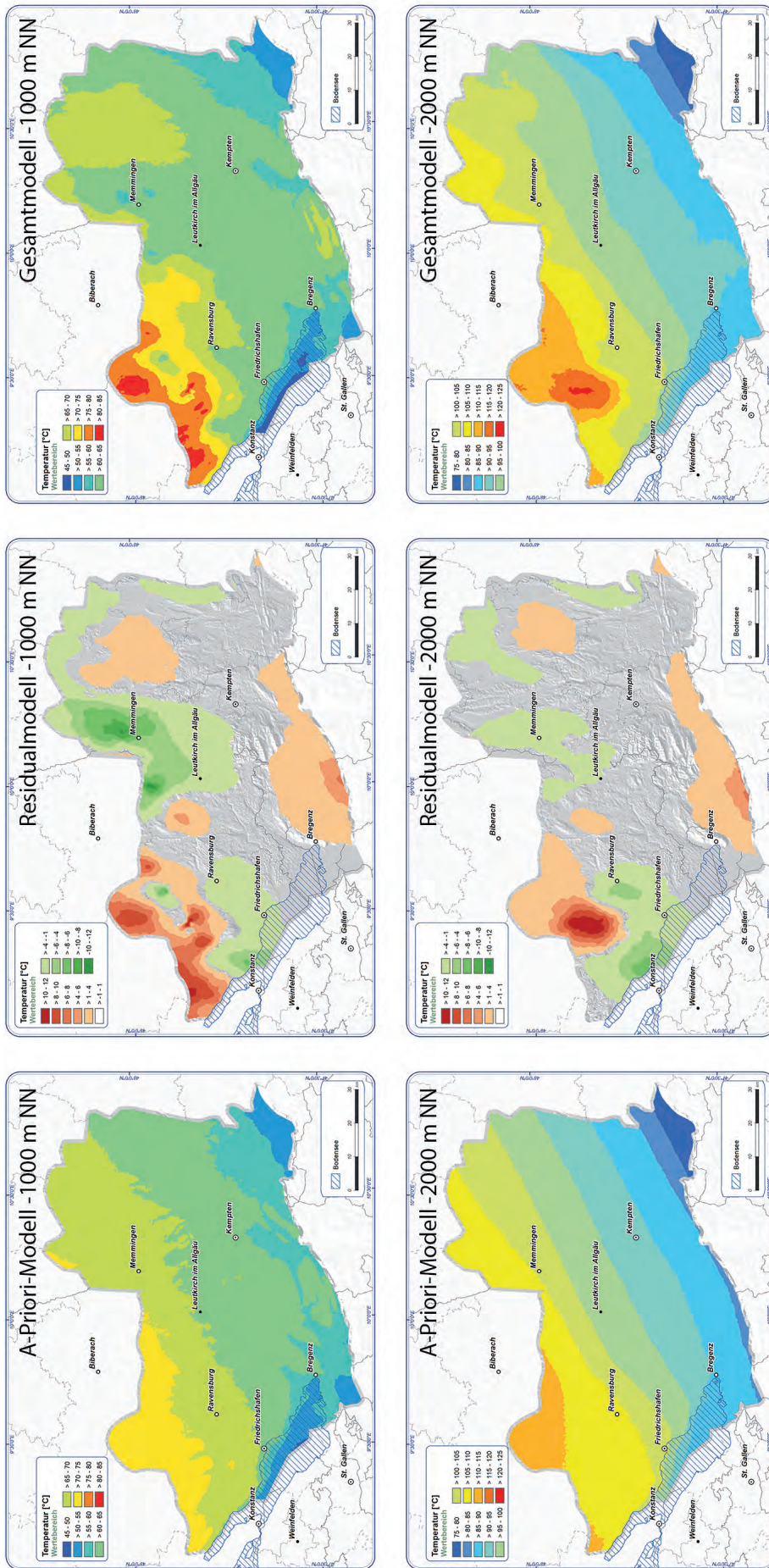


Abb. 5-20: Horizontalschnitte durch das finale Temperaturmodell bei -1.000 m NN und -2.000 m NN. Im Vergleich werden jeweils das A-Priori-Modell, die in den Residualmodellen regionalisierten Abweichungen von den Messwerten und die Kombination beider Modelle zum Gesamtmodell gezeigt (weitere Erläuterungen im Text).



Untergrundtemperaturen der Datenqualität 1,0 bis 0,49 mit Hilfe eines Krigingverfahrens regionalisiert (vgl. Kap. 5.4.3). Die maximalen Abweichungen der Messwerte vom A-Priori-Modell betragen ± 25 K. Das arithmetische Mittel liegt bei -0,1 K, die Standardabweichung bei 1,7 K.

Insgesamt weichen 19% der Gridzellen des Residualmodells um mehr als 1 K vom A-Priori-Modell ab, bei 2,7% liegen die Abweichungen höher als 5 K.

In Abbildung 5-20 (mitte) sind die Residualmodelle für die Horizontalschnitte bei -1.000 m NN und -2.000 m NN dargestellt. Sie schwanken zwischen ± 11 K in -1.000 m NN und -7 bis 12 K in -2.000 m NN. Für weiterführende Erläuterungen zu regionalen Temperaturanomalien sei auf Kap. 7.3 verwiesen.

Gesamtmodell

A-Priori-Modell und Residualmodell werden abschließend zum Gesamtmodell addiert. Die Ergebnisse sind exemplarisch in Abbildung 5-20 (rechts) wiedergegeben. In beiden Tiefenstufen sind regionale Variationen, v.a. im Nordwesten und an der Südgrenze gegenüber dem A-Priori-Modell erkennbar, während im zentralen Bereich kaum Änderungen auftreten. Die Temperaturen schwanken in -1.000 m NN zwischen 47 °C und 83 °C sowie in -2.000 m NN zwischen 76 °C und 121 °C. Weitere Ableitungen aus dem finalen Temperaturmodell werden im Kapitel 7.3 diskutiert.

5.5 Produktableitungen aus dem geostatistischen Temperaturmodell

Zur Ableitung flächenhafter Informationen zum geothermischen Potenzial und zur Darstellung der Ergebnisse in Kartenform wurden digitale Datensätze aus dem Temperaturmodell, teilweise in Kombination mit dem geologischen 3D-Modell, abgeleitet und in einem GIS-Workflow aufbereitet.

Folgende digitale (Raster-)Datensätze wurden erstellt:

- Temperaturen für die Tiefenstufen 500, 1.000, 1.500, 2.000, 3.000 und 4.000 m unter Gelände
- Tiefenlage [in m unter Gelände] für die Isothermen 60, 100 und 150 °C
- Temperaturen an der Oberfläche der geothermischen Einheiten Obere Meeresmolasse, Oberjura und Oberer Muschelkalk

Die Ergebnisse werden ausführlich in Kapitel 7 besprochen. Die abgeleiteten Kartenthemen sind im GeoMol-Kartenviewer <http://maps.geomol.eu> zu finden.





6 Fallstudie zum Geopotenzial der mitteltiefen bis tiefen Erdwärmesonden-Geothermie im baden-württembergischen Teil des LCA-Pilotgebiets

6.1 Einleitung

Neben der oberflächennahen und der tiefen Geothermie kann auch die mitteltiefe bis tiefe Erdwärmesonden-Geothermie (MTEWS-Geothermie) einen Beitrag zur Deckung des Energiebedarfs durch regenerative Energiequellen liefern (z. B. Bartels et al. 2010). Die oberflächennahe Geothermie nutzt die Untergrundtemperaturen bis in 400 m Tiefe. Darunter schließt die tiefe Geothermie an (PK Tiefe Geothermie 2007, VDI 2010). Nach dem Personenkreis (PK) Tiefe Geothermie umfasst die tiefe Geothermie Systeme, bei denen die geothermische Energie über Tiefbohrungen erschlossen wird und deren Energie direkt (d. h. ohne Niveauanhebung) genutzt werden kann. Der PK empfiehlt, von tiefer Geothermie im eigentlichen Sinn erst bei Tiefen von über 1.000 m und bei Temperaturen über 60 °C zu sprechen.

Die mitteltiefe Erdwärmesonden-Geothermie wird vielfach zwischen 400 und 1.000 m angesiedelt (PK Tiefe Geothermie 2007, Michalzik 2013). Beispiele für die geothermische Nutzung in diesem Tiefenbereich finden sich z. B. bei Fritsche & Kött (2012) und BfE (2010). Die tiefe Erdwärmesonden-Geothermie reicht in Tiefen bis 3.000 m, wobei die Grenze zur mitteltiefen Erdwärmesonden-Geothermie fließend ist. Sowohl in Deutschland, als auch in der Schweiz liegen mit solchen Anlagen bisher nur wenige Erfahrungen vor. Tiefe Erdwärmesonden sind z. B. seit 1994 in Weggis (CH, 2.300 m tief, BfE 2003) und seit 2011 im Triemli Quartier in Zürich (CH, Bohrung 2.708 m tief, Sondeneinbau bis 2.366 m, Ewz 2014) in Betrieb. Der Einsatz solcher Sonden bietet sich insbesondere zur geothermischen Nachnutzung von fehlgeschlagenen Thermalwasserbohrungen oder tiefen Kohlenwasserstoffbohrungen an, bei denen weder Erdöl noch Erdgas gefunden werden konnten oder keine wirtschaftliche Produktion mehr zu erwarten ist (RAG 2013). So wurde z. B. die Bohrung Mühlleiten ML-002 der Rohöl-Aufsuchungs-Aktiengesellschaft (RAG) im Gemeindegebiet der österreichischen Stadt Neukirchen a. d. Vöklä folgegenutzt. Sie wurde 2009 fertig gestellt und war aus Sicht der Förderung nicht wirtschaftlich nutzbar. Mit einer Tiefentemperatur von 105 °C ist die 2.850 m tiefe Bohrung aber für die Gewinnung von Erdwärme geeignet.

6.1.1 Fragestellung und Zielsetzung der Studie

Im Rahmen der Nutzerbefragung im GeoMol-Projekt (vgl. Kap. 2.1.1) wurde vom Regionalverband Bodensee-Oberschwaben angeregt, das geothermische Potenzial der MTEWS-Technologie im Verbandsgebiet zu untersuchen. Die Studie konzentrierte sich deshalb auf den baden-württembergischen Bereich des LCA-Pilotgebiets.

Ziel der Studie ist es, das geothermische Potenzial (bzw. die gewinnbare Wärmemenge) ausgewählter standardisierter MTEWS-Anlagentypen für definierte Lastfälle abzuschätzen und die Abhängigkeit des geothermischen Potenzials von den standortspezifischen Untergrundeigenschaften wie z. B. der Wärmeleitfähigkeit und dem geothermischen Gradienten zu untersuchen. Die Ergebnisse dienen dazu, Angaben über die Größenordnungen der gewinnbaren Wärmemenge für geothermische Nutzungen zu machen und unterschiedliche thermische Ergiebigkeiten in Abhängigkeit von den geologischen und geothermischen Standortbedingungen aufzuzeigen. Die Angaben können jedoch nicht als Grundlage für konkrete Planungsvorhaben genutzt werden. Hierzu müssen die projektspezifischen Nutzeranforderungen, die bedarfsorientierte Auslegung der MTEWS-Anlage sowie die standortbezogenen wasserwirtschaftlichen und hydrogeologischen Verhältnisse berücksichtigt werden. Daran orientieren sich unter anderem die erforderlichen bohr- und ausbautechnischen Maßnahmen zum Schutz der (tiefen) Grundwasservorkommen sowie zur Minimierung bohrtechnischer Risiken. Diese standortbezogenen Randbedingungen müssen bei der objektbezogenen Planung berücksichtigt werden.

Neben dem Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) und dem Regionalverband Bodensee-Oberschwaben waren an der Studie die Hochschule Biberach (Institut für Gebäude- und Energiesysteme), die tewag GmbH Starzach sowie Baugrund Süd, Bad Wurzach beteiligt.

6.1.2 Sondensysteme und Funktionsweise von MTEWS-Anlagen

MTEWS nutzen die Untergrundwärme. Die vertikal geschlossenen Wärmetauscher werden in Bohrungen von mehr als 400m Tiefe installiert. Bei MTEWS wird das Bohrloch zu einer Koaxial- (vgl. Abb. 6-1) oder Doppel-U-Sonde (vgl. Abb. 6-2) ausgebaut. Dabei können vorkonfektionierte Systeme eingesetzt werden. Daneben besteht die Möglichkeit, das vollverrohrte Bohrloch durch den Einbau einer Steigleitung als Koaxialsonde auszubauen.

Vorkonfektionierte Sonden werden grundsätzlich als fertige Sonden (Einheit aus Sondenrohr und Sondenfuß) komplett ab Werk geliefert. Produktions- und transportbedingt müssen jedoch sehr lange Sonden in mehreren Teilstücken angeliefert und auf der Baustelle zusammengebaut werden. Bei Verwendung dieser Sondensysteme ist eine vollständige Verrohrung des Bohrlochs nicht grundsätzlich erforderlich. Vorkonfektionierte Sonden-systeme mit Einbautiefen von maximal 1.500m werden in Deutschland derzeit nur von einem Hersteller angeboten.

Beim Ausbau einer Bohrung mit einer Steigleitung als Koaxialsonde kommen als Rohrmaterialien GFK-Rohre (glasfaserverstärkte Kunststoffrohre), PE-/PP-Rohre (Polyethylen-/ Polypropylen-Rohre) oder Stahlrohre in Frage, die grundsätzlich mit einer zusätzlichen Dämmung und einem äußeren Mantelrohr versehen werden können. Aufgrund verschiedener Vorteile (geringe Wärmeleitfähigkeit, standardisierte Schraub- und Steckfittingsysteme, langjährige Verwendung und Erfahrung im Brunnenbau sowie in der Erdöl- und Erdgasindustrie, vergleichsweise günstige Wärmeerschließungskosten) wurde in der vorliegenden Studie der Ausbau einer Bohrung mit einer Steigleitung aus GFK-Rohren als eine der betrachteten Varianten untersucht (GFK-Koaxial-Ausbau, vgl. Kap. 6.3.2).

In allen Sondentypen zirkuliert ein Wärmeträgermedium, dessen Temperatur nach dem Wärmeentzug mehrere Kelvin unter der Untergrundtemperatur um die Bohrlochwand liegt. Dadurch wird dem Untergrund konduktiv (durch Wärmeleitung) Wärme entzogen. Das Wärmeträgermedium hat keinen direkten Kontakt mit (hydrothermale) Grundwasser, dem Gestein oder Fluiden. Die Wärmeübertragung vom Untergrund zum zirkulierenden Fluid in der Sonde bewirkt die Ausbildung eines Temperaturgradienten, der zum Nachfließen von Wärme aus der weiteren Bohrlochumgebung führt. Das Wärmeträgermedium wird aus den Sondenrohren über Rohrleitungen zu Wärmetauschern bzw. Wärmepumpen geführt, dort

abgekühlt (thermisch genutzt) und erneut in die Sonde zurückgeführt. Insgesamt wird bei MTEWS auf das technisch ausgereifte Prinzip flacher Erdwärmesonden zurückgegriffen.

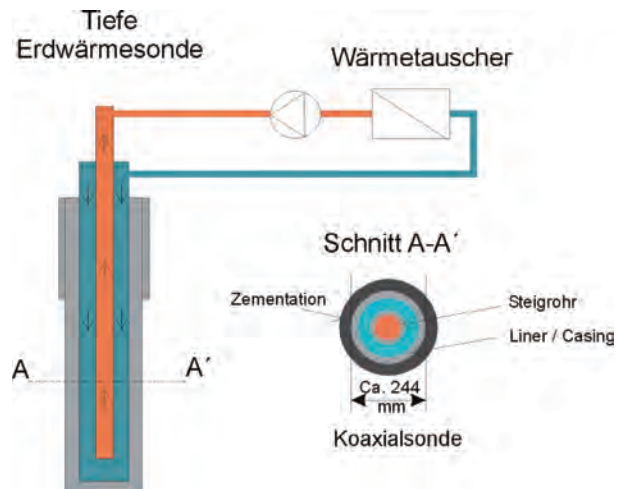


Abb. 6-1: Schematische Darstellung einer koaxialen Erdwärmesonde.

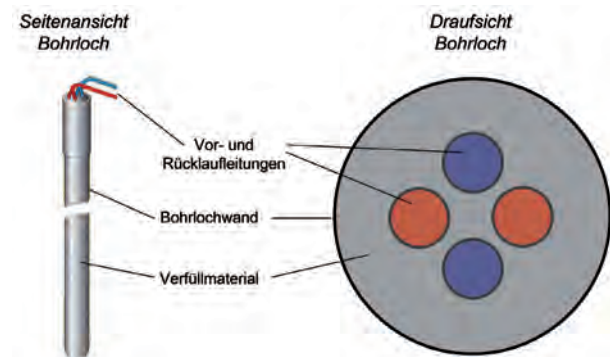


Abb. 6-2: Schematische Darstellung einer Doppel-U-Erdwärmesonde.

6.1.3 Randbedingungen beim Einsatz mitteltiefer bis tiefer Erdwärmesonden

Die Nutzung der MTEWS-Geothermie ist unter anderem durch folgende Randbedingungen gekennzeichnet:

- Mit Ausnahme wasserwirtschaftlich begründeter Ausschlussflächen können MTEWS grundsätzlich überall unabhängig vom geologischen Untergundaufbau eingerichtet und damit verbrauchernah installiert werden.
- Eine Grundwasserführung im Gebirgsabschnitt, der durch die Erdwärmesondenbohrungen erschlossen wird, ist nicht erforderlich.



- MTEWS nutzen die Erdwärme über geschlossene Systeme. Eingriffe in Stoffgleichgewichte des Grundwassers durch die Anlage erfolgen bei bestimmungsgemäßer und störungsfreier Nutzung nicht; Lösungs- oder Fällungsreaktionen sind dadurch ausgeschlossen. Thermische Auswirkungen sind auf die nähere Umgebung der MTEWS beschränkt.
- Die durch die MTEWS gewonnenen Temperaturen sind vielfach für eine direkte Wärmenutzung zu niedrig.
- Die durch die MTEWS gewonnenen Temperaturen sind in vielen Fällen für eine direkte Gebäudekühlung zu hoch.
- Zum Schutz bestehender Grundwassernutzungen sowie dem vorsorglichen Schutz tiefer, nutzbarer Grundwasservorkommen muss beim Abteufen der Bohrungen ein stockwerksübergreifender Grundwasserfluss ausgeschlossen und mit dem Ausbau der Bohrung der ursprüngliche Stockwerksbau dauerhaft wiederhergestellt werden.
- Die größeren Bohrtiefen erfordern einen hohen bohr- und ausbautechnischen Aufwand (z. B. größerer Anfangsdurchmesser, mehrfaches Teleskopieren, Vorkehrungen bei artesisch gespannten Grundwässern, dauerhaftes Absperren verschiedener Grundwasserstockwerke). Damit sind deutlich höhere Herstellungskosten und ein größeres Investitionsrisiko verbunden.
- Erforderlichenfalls notwendige Sanierungsmaßnahmen oder der Rückbau der MTEWS sind aufwändig und kostenintensiv.

6.2 Methodik

Die vorliegende Studie umfasst sechs Arbeitsschritte, die zum Teil ineinandergreifen (vgl. Abb. 6-3):

1. Bedarfsanalyse und Aufstellen von Nutzungskonzepten (Verbindung zu den Arbeitsschritten 2 und 3)

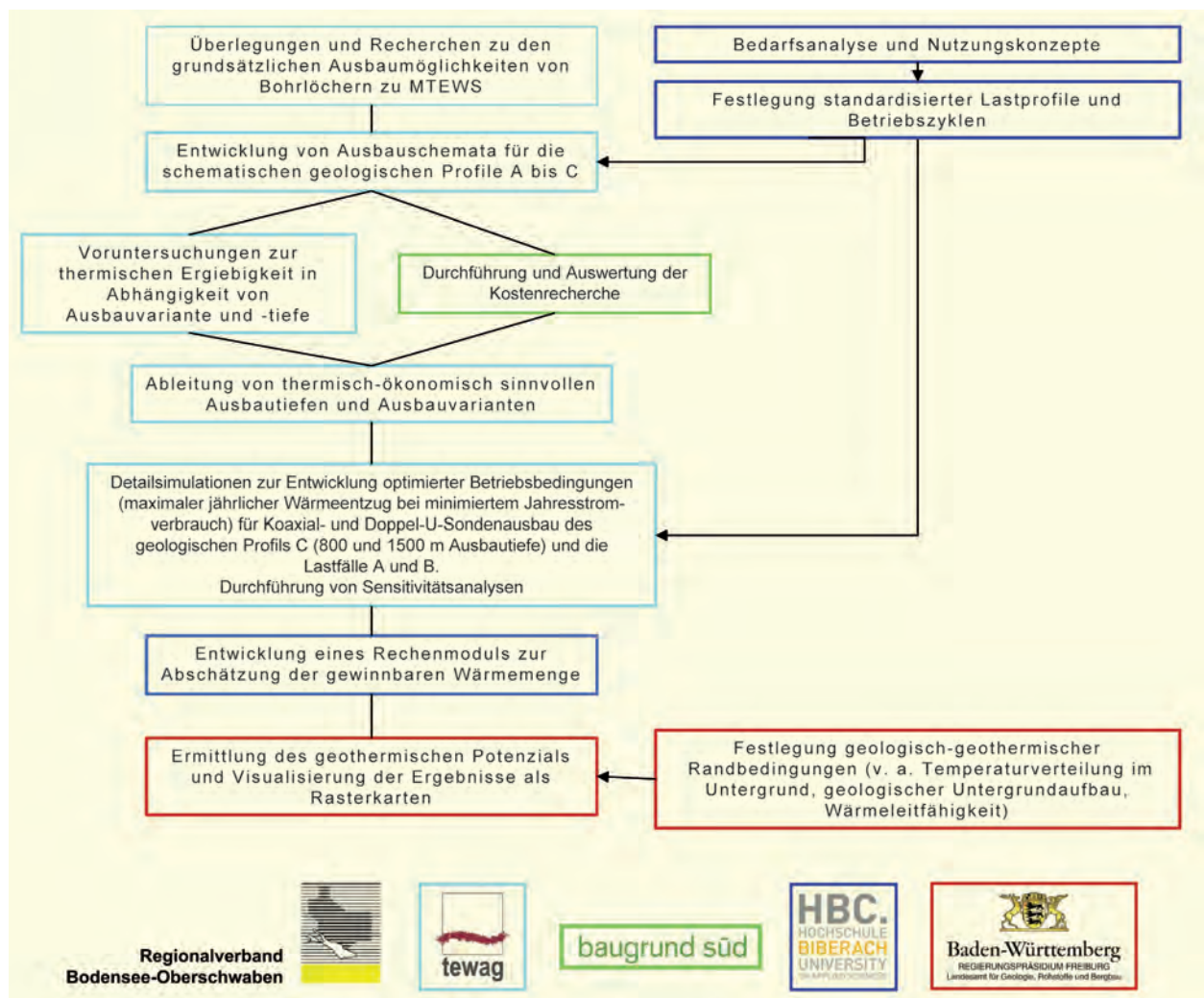


Abb. 6-3: Ablaufdiagramm zur Ermittlung des Geopotenzials der MTEWS-Geothermie (farblich markiert: beteiligte Stellen).

2. Festlegung der bohr- und ausbautechnischen Randbedingungen, Kostenabschätzung (v.a. Bohr- und Ausbaudesign, Sondenart, Hinterfüllung)
3. Entwicklung optimierter Betriebsbedingungen (Vorstudie)
4. Entwicklung eines Rechenmoduls zur rasterbasierten standortbezogenen Abschätzung der gewinnbaren Wärmemenge für standardisierte Nutzungsszenarien
5. Festlegung geologisch-geothermischer Randbedingungen (v.a. Temperaturverteilung im Untergrund, geologischer Untergrundaufbau, Wärmeleitfähigkeit)
6. Ermittlung des geothermischen Potenzials und Visualisierung der Ergebnisse als Rasterkarten

Die einzelnen Arbeitsschritte werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

6.3 Entwicklung standardisierter Nutzungsszenarien

Bei der Beurteilung der Nutzungsmöglichkeiten der MTEWS-Technologie wurden neben den geologisch-geothermischen Randbedingungen (Arbeitsschritt 5) auch die Ergebnisse der Bedarfs- und Nutzungsanalyse (Arbeitsschritt 1) berücksichtigt. Dabei wurden auch Aspekte zur Festlegung der bohr- und ausbautechnischen Randbedingungen (Arbeitsschritt 2) sowie die Entwicklung optimierter Betriebsbedingungen (Arbeitsschritt 3) einbezogen, da Wärmebereitstellung und -nutzung im Kontext zu sehen sind. Die Ergebnisse der Recherche zu den Bohr- und Ausbaukosten wurden in die Betrachtungen zur Festlegung thermisch-ökonomisch sinnvoller Ausbautiefen berücksichtigt. Weitergehende wirtschaftliche Aspekte der Bereitstellung geothermischer Wärmeenergie durch MTEWS standen bei der Potenzialstudie nicht im Vordergrund.

6.3.1 Identifikation von Betriebs-szenarien (Lastprofile)

Im Rahmen des GeoMol-Projekts wurden Wärmeverbraucher recherchiert, die von Wärmequellen mit Temperaturen von bis zu 50 °C direkt oder indirekt versorgt werden können. Hierzu wurde eine Kurzstudie zur Bedarfsanalyse und zu Nutzungskonzepten für den möglichen Einsatz der MTEWS-Geothermie beauftragt (HBC 2014). Die maximale Temperatur, die der Betrachtung zugrunde gelegt wurde, wurde durch die marktgängige Verfügbarkeit vorkonfektionierter SONDENSYSTEME vorgegeben. Diese erlauben eine maximale Ausbautiefe von

1.500 m. In dieser Tiefe sind nach den Ergebnissen der Temperaturmodellierung im Untersuchungsgebiet Temperaturen von bis zu 50 °C zu erwarten (vgl. Kap. 5). Die Verbraucher wurden hinsichtlich der Eignung für eine Versorgung über MTEWS bewertet. Daraus wurden zwei Nutzungs- bzw. Betriebs-szenarien abgeleitet, die als Eingangsparameter für eine Potenzialabschätzung dienen (siehe unten).

Mögliche Wärmeverbraucher sind (Wohn-)Gebäude, Hallen, Nah-/ Fernwärmenetze, industrielle Prozesse, landwirtschaftliche Nutzungen sowie weitere technische Nutzungen wie Regeneration von Wärmequellen oder Frostfreihaltung. Nutzungen im (Wohn-)Gebäudebereich sind sinnvoll, wenn die Versorgung durch die MTEWS möglichst auf die Grundlast ausgelegt wird. Eine Nutzung in der Landwirtschaft ist zwar prinzipiell denkbar, sie ist jedoch aufgrund der verhältnismäßig teuren Wärme nicht wirtschaftlich. Die meisten industriellen Nutzungen müssen ausgeschlossen werden, da deren Temperaturniveau meist über 50 °C liegt.

Aus wirtschaftlichen Gründen sind die Sonden und deren Nutzung grundsätzlich auf einen möglichst hohen Energieertrag zu optimieren. Dies bedeutet zum einen, dass die Sonden auf einem möglichst niedrigen Temperaturniveau ohne Frost (minimale Fluideintrittstemperatur in die Sonde 5 °C) betrieben werden sollten. Zum anderen sollten die Sonden möglichst durchgängig mit niedriger Leistung betrieben werden (Grundlastbetrieb). Anhand der beiden Kriterien Temperaturniveau und zeitliche Verteilung des Wärmebedarfs wurden geeignete Nutzungen identifiziert.

Prinzipiell sind alle Nutzungen bis zu einem Temperaturniveau von 50 °C und mit einem möglichst gleichmäßigen Betrieb (Grundlast) geeignet. Deshalb wurden zwei Betriebsszenarien entwickelt, die einen Grundlastbetrieb (Szenario A, vgl. Abb. 6-4 und Abb. 6-5) und einen eher entzugsleistungsorientierten Betrieb (Szenario B, vgl. Abb. 6-6 und Abb. 6-7) darstellen.

Die Szenarien sind wie folgt definiert:

- Lastprofil A (vgl. Abb. 6-4 und Abb. 6-5):
Grundlastbetrieb
Dieses Szenario geht von einer Dauernutzung der MTEWS über einen Zeitraum von acht Monaten (Winter und Übergangszeit) aus. Daran schließt eine Regenerationszeit in den vier Sommermonaten an. Die Jahresentzugswärmearbeit verteilt sich bei 5.808 Volllaststunden pro Jahr gleichmäßig auf die acht Betriebsmonate. Das Szenario bildet die Abdeckung der Grundlast eines Nahwärmenetzes mit (Wohn-) Gebäuden oder anderweitigen



Nutzungen auf niedrigem Temperaturniveau bis ca. 50 °C ab. Es zielt auf die Optimierung der maximalen Entzugsenergie ab.

- Lastprofil B (vgl. Abb. 6-6 und Abb. 6-7): Entzugsleistungsorientierter Betrieb
Dieses Szenario geht von einer saisonalen Verteilung der Entzugsarbeit mit einer Betriebszeit von 3.500 Volllaststunden bei ganzjährigem Teillastbetrieb aus. Die Verteilung der Entzugsenergie ist aus der Wärmebedarfsverteilung eines Einfamilienhauses abgeleitet, welche nach der Richtlinie VDI 4655 (2008) für ein Neubau-Einfamilienhaus mit 145 m², einem Heizwärmebedarf von 45 kWh/m²a und einem Warmwasserwärmebedarf von 3 bis 4 Personen ermittelt wurde. Das Szenario bildet die multivalente Heizwärmeversorgung von Gebäuden (bzw. Gebäudegruppen) ab.

Die beiden Szenarien bilden die Grundlage für die thermischen Simulationen (vgl. Kap. 6.7).

Aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus in der Sonde ist eine direkte Nutzung der Erdwärme für

die beiden ausgewählten Betriebsszenarien nicht möglich, sodass in beiden Fällen eine Temperaturerhöhung durch Wärmepumpen erforderlich ist.

6.3.2 Festlegung von Ausbauvarianten und Ausbautiefen

Zur Identifikation thermisch-ökonomisch sinnvoller Ausbauvarianten und Ausbautiefen wurden zunächst die grundsätzlichen Ausbaumöglichkeiten von Bohrlöchern zu MTEWS recherchiert (te wag 2014). Hierfür kommen prinzipiell drei verschiedene Ausbauvarianten der Bohrungen in Frage (vgl. Kap. 6.1.2):

- Einbau einer Steigleitung und Ausbau zur Koaxialsonde. Als Material für die Steigleitung wurde glasfaserverstärkter Kunststoff festgelegt (GFK-Koaxial-Ausbau, vgl. Kap. 6.1.2)
- Einbau einer vorkonfektionierten Koaxialsonde
- Einbau einer Doppel-U-Sonde

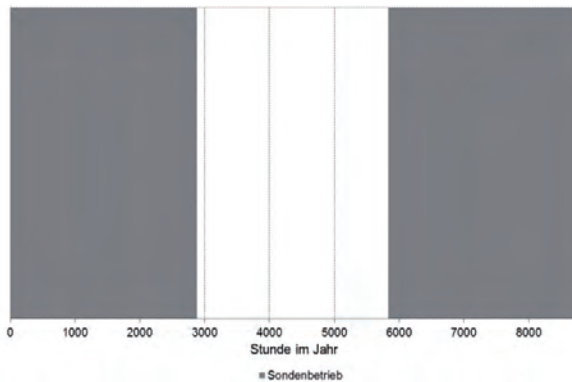


Abb. 6-4: Lastprofil A: Sondenbetriebszeiten.

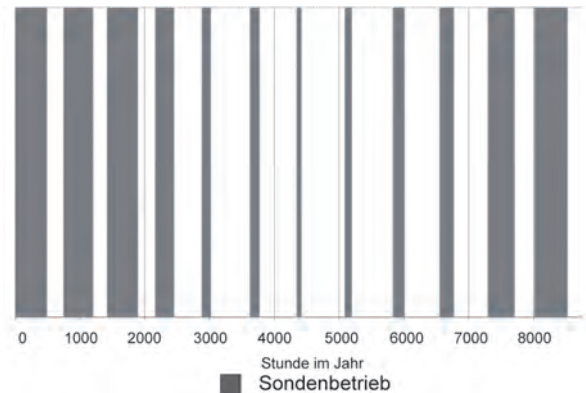


Abb. 6-6: Lastprofil B: Sondenbetriebszeiten.

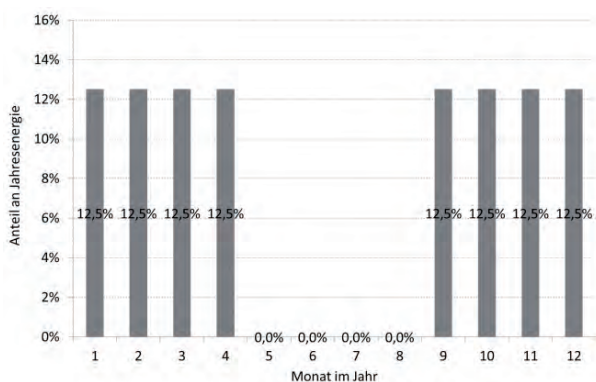


Abb. 6-5: Lastprofil A: Verteilung der Jahresenergie (rechts) bei Dauerlastbetrieb über acht Monate.

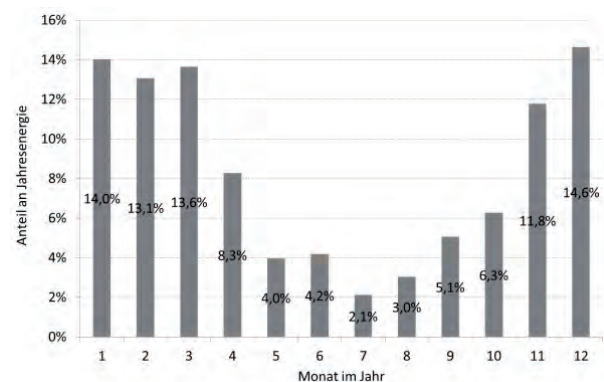


Abb. 6-7: Lastprofil B: Verteilung der Jahresenergie bei ganzjährigem Teillastbetrieb.

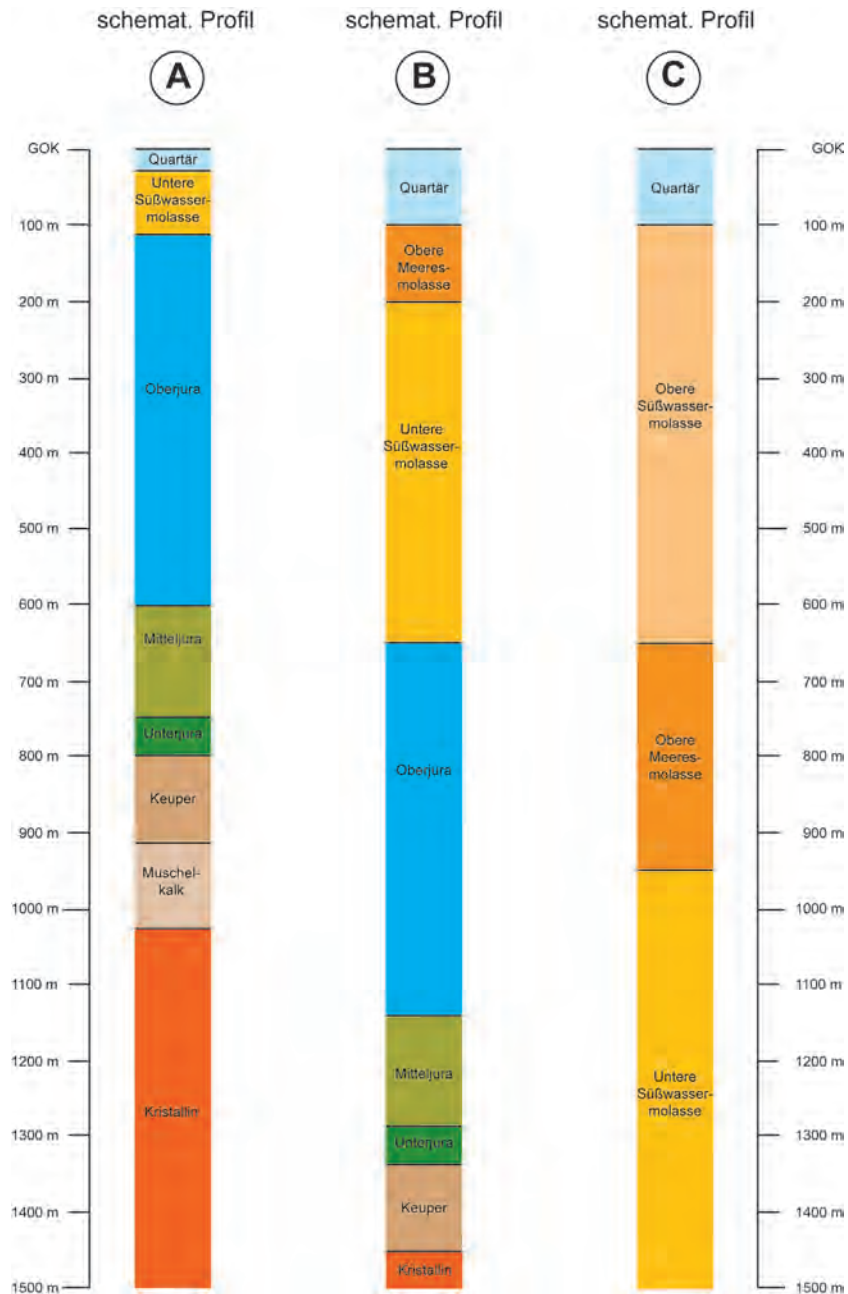


Abb. 6-8: Schematische geologische Säulenprofile. Bedeutende Grundwasserführungen sind grundsätzlich im Quartär, in der Oberen Meeresmolasse, im Oberjura, im Keuper und im Muschelkalk zu erwarten.

Außerdem wurden drei schematische geologische Säulenprofile erstellt, die auf einem annähernd Nordwest – Südost verlaufenden Profil durch das baden-württembergische Molassebecken von Riedlingen im Norden (Profil A) über Bad Buchau (Profil B) bis Vogt im Süden (Profil C) liegen (vgl. Abb. 6-8).

Für die drei Ausbauplanvarianten und die drei schematischen geologischen Säulenprofile wurden Ausbauplanvarianten entwickelt (vgl. z.B. Abb. 6-9 und Abb. 6-10). Hierbei stand der Schutz von bestehenden Grundwassernutzungen und von tiefer

liegenden, potenziell nutzbaren Grundwasservorkommen im Vordergrund. Für folgende geologische Einheiten sind bedeutende Grundwasserführungen zu erwarten: Quartär, Obere Meeresmolasse, Oberjura, Keuper und Muschelkalk. Dies wurde bei der Entwicklung der Ausbauplanvarianten berücksichtigt und bedingt u.a., dass die Bohrungen bis zur Endteufe verrohrt sind. Für ein konkretes MTEWS-Projekt sind das Bohr- und Ausbauplan an die jeweiligen standörtlichen (hydro-)geologischen Gegebenheiten anzupassen.



6.4 Recherche zu den Bohr- und Ausbaurkosten

Zur Ableitung der thermisch-ökonomisch sinnvollen Ausbautiefen und Ausbauvarianten wurden bei qualifizierten Bohrunternehmen die Bohr- und Ausbaurkosten für die MTEWS ermittelt.

Der Preisanfrage wurden Ausbautiefen von 500 bis 1.500 m in 100 m Schritten für die drei im Untersuchungsgebiet liegenden geologischen Profile sowie die drei Ausbauvarianten Doppel-U-Sonde, vorkonfektionierte Koaxialsonde und Koaxialsonde mit Steigleitung aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK-Koaxial-Ausbau) zu Grunde gelegt. Die Kostenrecherche berücksichtigt die erforderlichen

Bohr- und Verrohrungsdurchmesser in Abhängigkeit von der Ausbautiefe und der (hydro-)geologischen Situation (tewag 2014).

Die Auswertung der Kostenrecherche zeigte, dass die Bohr- und Ausbaurkosten und deren Steigerung von der Ausbautiefe und den erforderlichen Verrohrungsschemata in den jeweiligen geologischen Abfolgen bestimmt werden. Letztere verursachen markante Kostensprünge, die jedoch mit zunehmender Tiefe in der Verrohrungsstrecke wieder kompensiert werden. Abb. 6.9 verdeutlicht diese Zusammenhänge.

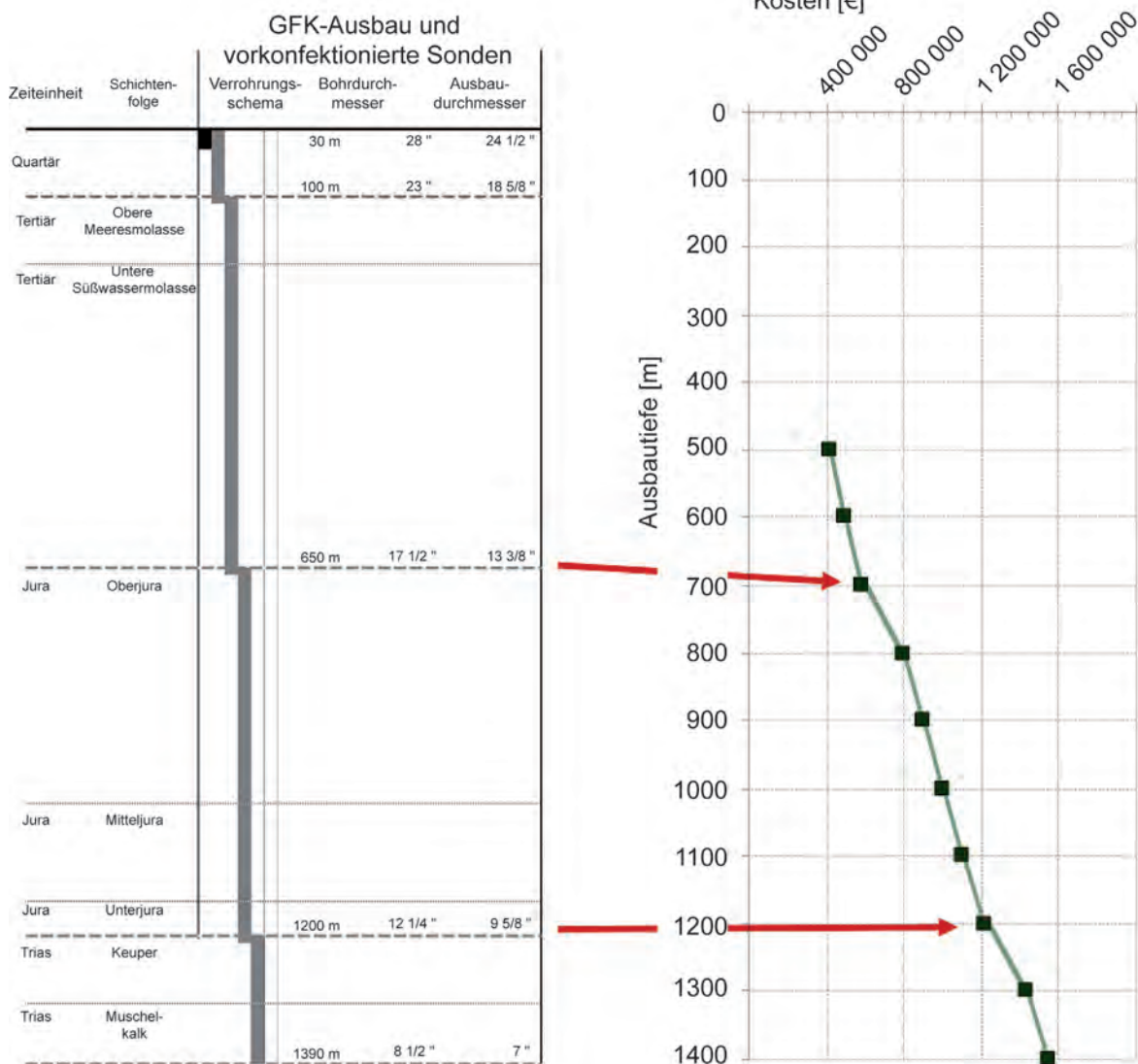


Abb. 6-9: Gegenüberstellung der Verrohrungsschemata für das geologische Profil B und dem Verlauf der Bohr- und Ausbaurkosten in Abhängigkeit der Ausbautiefe.

6.4.1 Voruntersuchungen zur thermischen Ergiebigkeit in Abhängigkeit von Ausbauvariante und Ausbautiefe

Neben den Bohr- und Ausbaurkosten wurde bei der Festlegung thermisch-ökonomisch sinnvoller Ausbaurvarianten und Ausbautiefen auch die thermische Ergiebigkeit im Rahmen einer Vorstudie berücksichtigt.

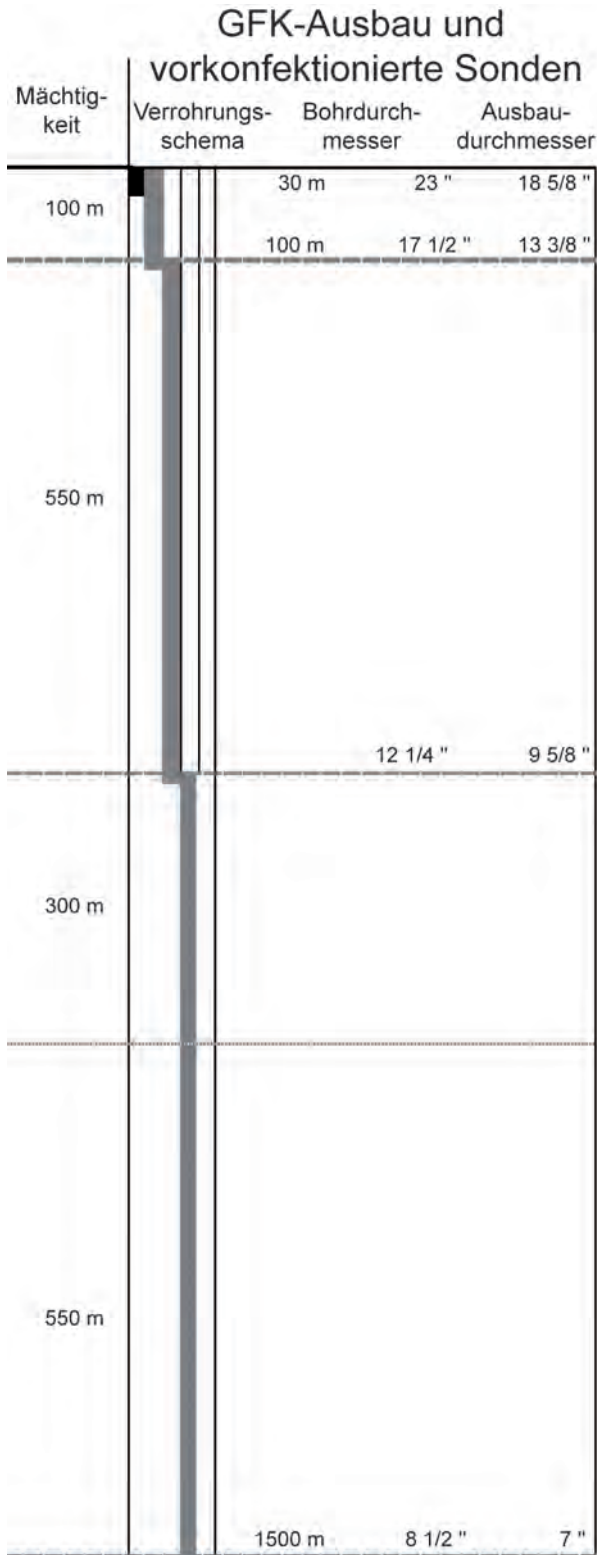


Abb. 6-10: Ausbauschema zu Profil C (vgl. Abb. 6-8).

Tab. 6-1: Parametrisierung des Arbeitsszenarios und der Randbedingungen der Vorstudie.

Parameter	Wert
Mittlere effektive Wärmeleitfähigkeit	2,5 W/(m *K)
Mittlere Wärmekapazität	2,2 MJ/(m³ K)
Jahresdurchschnitt Außentemperatur	10 °C
Geothermischer Gradient	0,03 K/m
Minimale Eintrittstemperatur in die MTEWS	5 °C
Simulationsdauer	1 Jahr

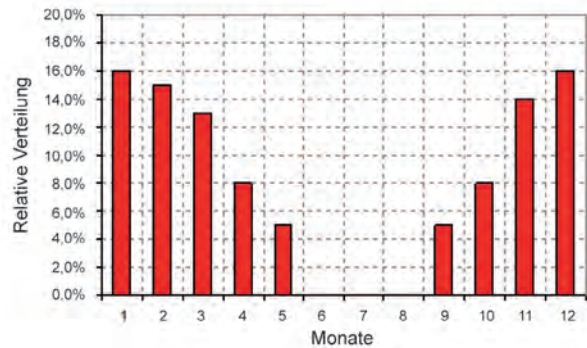


Abb. 6-11: Lastprofil zur monatspezifischen Verteilung der Entzugsarbeit für das Arbeitsszenario der Vorstudie.

Hierzu wurden Simulationen zur Ermittlung der thermischen und hydraulischen Effizienz in Abhängigkeit von der Sondeneinbautiefe und der Ausbauvariante (vorkonfektionierte Doppel-U-Sonde und Koaxialsonde, GFK-Koaxial-Ausbau) durchgeführt (te wag 2014). Den Arbeitsablauf hierzu zeigt Abb. 6-12. Die Parametrisierung des Arbeitsszenarios der Vorstudie sowie die Randbedingungen sind in Tabelle 6-1, das zugrunde gelegte Lastprofil in Abbildung 6-11 dargestellt. Für die thermische Effizienz eines SONDENSYSTEMS sind die thermischen Widerstände beim Wärmeübergang vom Untergrund zum Wärmeträgermedium, das in der Sonde zirkuliert (thermischer Bohrlochwiderstand) ausschlaggebend. Die hydraulische Effizienz wird im Wesentlichen durch die Höhe der Aufwandsenergie (elektrische Pumpenenergie) für die Gewinnung der Wärme bestimmt und ist abhängig vom Druckverlust des SONDENSYSTEMS bei einer gegebenen Zirkulationsrate. Je geringer der Druckverlust, umso geringer ist der Pumpaufwand zur Gewinnung der Wärme.

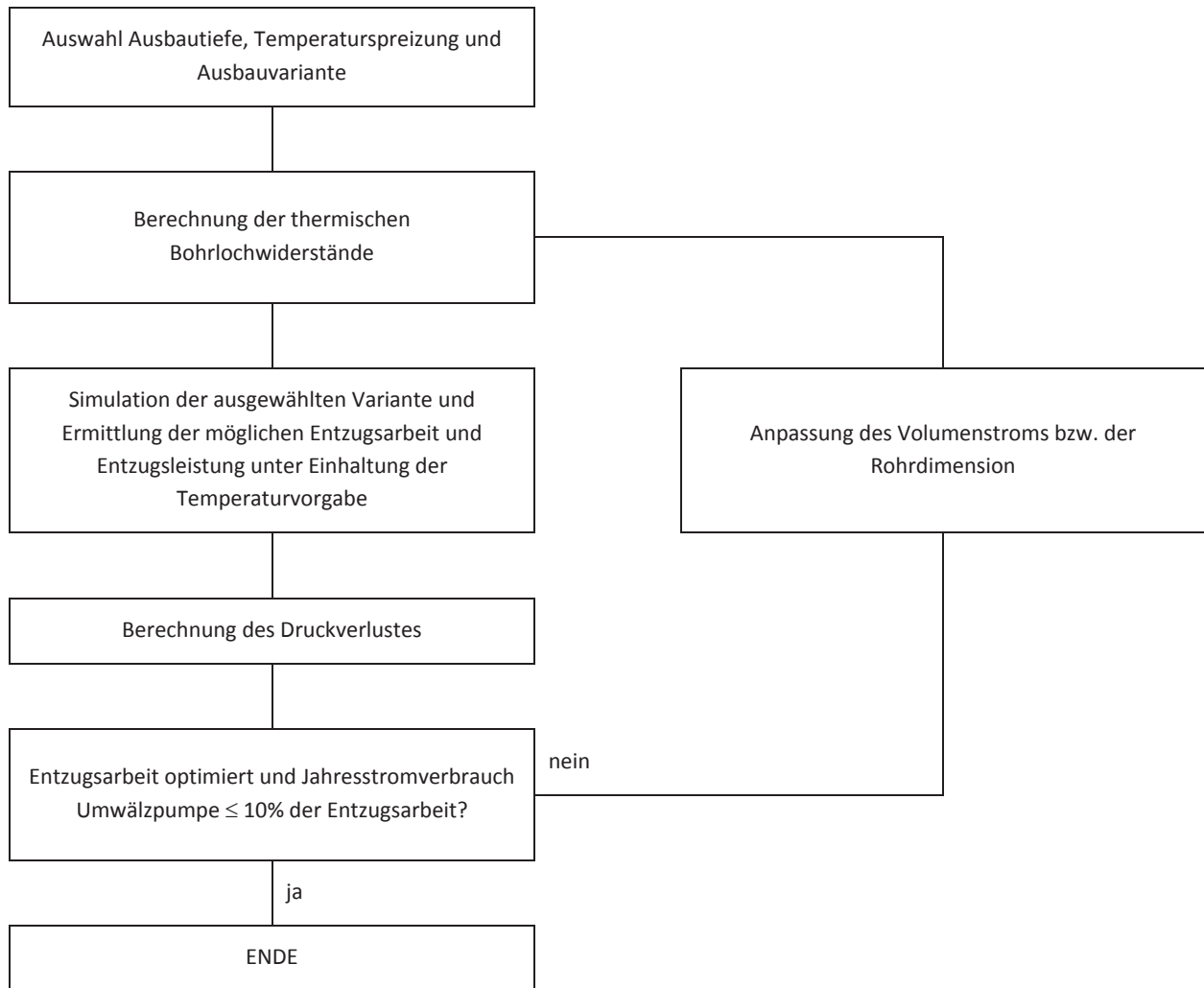


Abb. 6-12: Arbeitsablauf zur Erstbewertung des Ausbaus von Profil C für 500, 700, 1.000 und 1.500 m Tiefe im Rahmen der Vorstudie.

Die Vorstudie wurde am schematischen geologischen Säulenprofil C (vgl. Abb. 6-8) und dem darauf basierenden Ausbauschema (vgl. Abb. 6-10) für Ausbautiefen von 500 m, 700 m, 1.000 m und 1.500 m durchgeführt. Profil C ist bei einer Varianz der Höhenlage der Schichtgrenze zwischen Oberer Süßwassermolasse und Oberer Meeresmolasse um ± 100 m für einen großen Flächenanteil im baden-württembergischen Anteil des LCA-Pilotgebiets repräsentativ.

6.4.2 Ableitung thermisch-ökonomisch sinnvoller Ausbautiefen und Ausbauvarianten

Zur Ermittlung der thermisch-ökonomisch sinnvollen Ausbautiefen und Ausbauvarianten wurden aus der Kostenrecherche die gemittelten Gesamtkosten für die Errichtung einer MTEWS abgeleitet. Hierzu wurde die für das vorgegebene Lastprofil

abgeschätzte thermische Ergiebigkeit der einzelnen Ausbauvarianten durch die zugehörigen tiefenabhängigen Bohr- und Ausbauposten dividiert. Die Auswertung zeigte erwartungsgemäß, dass die so ermittelten Wärmeerschließungskosten (in € pro MWh/a Wärme, Näherungswerte) mit jeder zusätzlich erforderlichen Rohrtour sprunghaft ansteigen (vgl. Abb. 6-13). Beim Verrohrungsschema des Profils B treten solche Kostensprünge zwischen 700 und 800 m sowie 1.200 und 1.300 m auf. Bei gleich bleibendem Ausbaudurchmesser nehmen die Wärmeerschließungskosten mit zunehmender Ausbautiefe ab. Die niedrigsten Wärmeerschließungskosten fallen bei dem GFK-Koaxial-Ausbau an. Aufgrund der hohen Wärmerschließungskosten der vorkonfektionierten Koaxialsonde im Vergleich zu den beiden anderen betrachteten Ausbauvarianten wurde dieser Sondentyp nicht weiter untersucht.

Analog zum geologischen Profil B wurden aus den Wärmeerschließungskosten auch für die Profile A

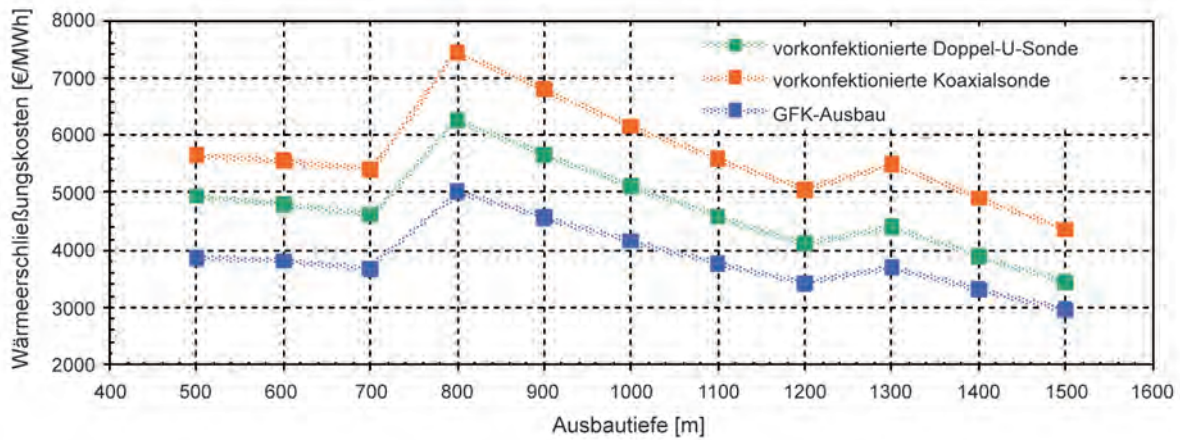


Abb. 6-13: Wärmerschließungskosten in Abhängigkeit von der Ausbauvariante und der Ausbautiefe für das schematische geologische Profil B (vgl. Abb. 6–9).

und C (te wag 2014) thermisch-ökonomisch sinnvolle Ausbautiefen abgeleitet. Die abgeleiteten Ausbautiefen sind in Tabelle 6-2 zusammenfassend dargestellt.

Tab. 6-2: Aus den Wärmerschließungskosten abgeleitete thermisch-ökonomisch sinnvolle Ausbautiefen.

Geologisches Profil (siehe Abb. 6-8)	Thermisch-ökonomisch sinnvolle Ausbautiefen
A	800m und 1.500m
B	700m, 1.200m und 1.500m
C	600m und 1.500m

Auf Basis der Ergebnisse der Kostenrecherche und der Voruntersuchungen zur thermischen Ergiebigkeit wurden für die weiteren Detailsimulationen folgende Ausbautiefen und Ausbauvarianten festgelegt:

1. GFK-Koaxial-Ausbau: Einbau einer Steigleitung aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK-Koaxial-Ausbau) in einem gegenüber dem Untergrund durch einen Zementfuß abgedichtetem Bohrloch (vgl. Abb. 6-1). Ausbautiefe 800 m und 1.500 m.
2. Doppel-U-Erdwärmesonde: Einbau einer vorkonfektionierten Doppel-U-Sonde und anschließende Zementation des Bohrloch-Ringraums (vgl. Abb. 6-2). Ausbautiefe 800 m.

6.4.3 Ermittlung optimierter Betriebsbedingungen

Zur Ermittlung optimaler Betriebsbedingungen, maximal erzielbarer Entzugsleistungen sowie jährlicher Wärmeentzugsarbeiten wurden Detailsimulationen durchgeführt. Unter optimierten

Betriebsbedingungen wird ein maximaler jährlicher Wärmeentzug bei einem möglichst geringen Jahresstromverbrauch der Umwälzpumpe verstanden.

Mit den beiden Lastprofilen A und B (vgl. Kap. 6.3.1), den beiden betrachteten Ausbauvarianten GFK-Koaxial-Ausbau und vorkonfektionierte Doppel-U-Sonde (vgl. Kap. 6.4.2) sowie den beiden Ausbautiefen 800 und 1.500 m ergeben sich insgesamt sechs Referenzszenarien, für die jeweils optimierte Betriebsbedingungen ermittelt wurden:

- GFK-Koaxial-Ausbau, Lastprofil A, Ausbautiefe 1.500 m (1.500 A GFK-KOAX)
- GFK-Koaxial-Ausbau, Lastprofil B, Ausbautiefe 1.500 m (1.500 B GFK-KOAX)
- GFK-Koaxial-Ausbau, Lastprofil A, Ausbautiefe 800 m (800 A GFK-KOAX)
- GFK-Koaxial-Ausbau, Lastprofil B, Ausbautiefe 800 m (800 B GFK-KOAX)
- Vorkonfektionierte Doppel-U-Sonde, Lastprofil A, Ausbautiefe 800 m (800 A DOPPEL-U)
- Vorkonfektionierte Doppel-U-Sonde, Lastprofil B, Ausbautiefe 800 m (800 B DOPPEL-U)

Die Berechnungen wurden mit dem Finite-Differenzen-Modell SBM (Superposition Borehole Model, Eskilson 1986, Hellström 1989, Pahud 2002) durchgeführt (te wag 2014).

Die optimalen Betriebsbedingungen wurden für jedes Szenario ermittelt, indem Zirkulationsvolumenstrom und Temperaturspreizung am Sondenkopf (d.h. die thermische Entzugsleistung) solange variiert wurden, bis nach 50 Betriebsjahren eine minimale Rücklauftemperatur in die Sonde von



Tab. 6-3: Optimierte Betriebsbedingungen und gewinnbare jährliche Entzugswärmearbeit am Beispiel des schematischen geologischen Säulenprofils C (1.500 A GFK-KOAX: Sondenlänge 1.500 m, Betriebsszenario A, glasfaserverstärkte Kunststoff – Koaxialsonde, 800 B DOPPEL-U: Sondenlänge 800 m, Betriebsszenario B, vorkonfektionierte Doppel-U-Sonde).

	1500 A GFK-KOAX	1500 B GFK-KOAX	800 A GFK-KOAX	800 B GFK-KOAX	800 A DOPPEL-U	800 B DOPPEL-U
Vollbenutzungsstunden/a	5.808	3.504	5.808	3.504	5.808	3.504
Spreizung am Sondenkopf [K]	5		3			
Zirkulationsrate [m³/h]	24	30	13	16	11	13
Druckverlust [bar]	4,3	6,4	0,7	1,1	2,1	2,7
Erforderliche Pumpenleistung [ca. kW]	4,3	8,0	0,4	0,7	0,9	1,5
Entzugsleistung im Betrieb [kW]	140	174	45	56	38	45
Entzugswärmearbeit [MWh/a]	811	611	263	196	223	159

+5,0°C gerade nicht unterschritten wurde und der aus dem Druckverlust resultierende Pumpenaufwand zur Umwälzung noch akzeptabel war (Maximierung des Netto-Energiegewinnes als Differenz aus jährlicher Entzugswärmearbeit und Pumpenaufwandsenergie). Die Optimierung wurde bei einer Ausbautiefe von 800m für eine Spreizung von 3K und bei einer Ausbautiefe von 1.500m bei einer Spreizung von 5K am Sondenkopf ermittelt. Abbildung 6-14 zeigt die Temperaturentwicklung dieser Optimierung für das Referenzszenario GFK-Koaxial-Ausbau mit einer Sondenlänge von 1.500 m und dem Betriebsszenario A (1.500 A GFK-KOAX)

Die Ergebnisse der Optimierung für alle sechs betrachteten Referenzszenarien sind in Tabelle 6-3 zusammengefasst.

Aus der Zirkulationsrate und der Temperaturspreizung am Sondenkopf ergibt sich die Entzugsleistung im Betrieb der Anlage, über die jährlichen Vollbenutzungsstunden die Entzugswärmearbeit (Entzugswärmearbeit [kWh/a] = Entzugsleistung [kW] x Vollbenutzungsstunden pro Jahr [h/a]).

In der 1.500 m tiefen glasfaserverstärkten Kunststoff-Koaxialsonde kann mit dem auf einen optimierten

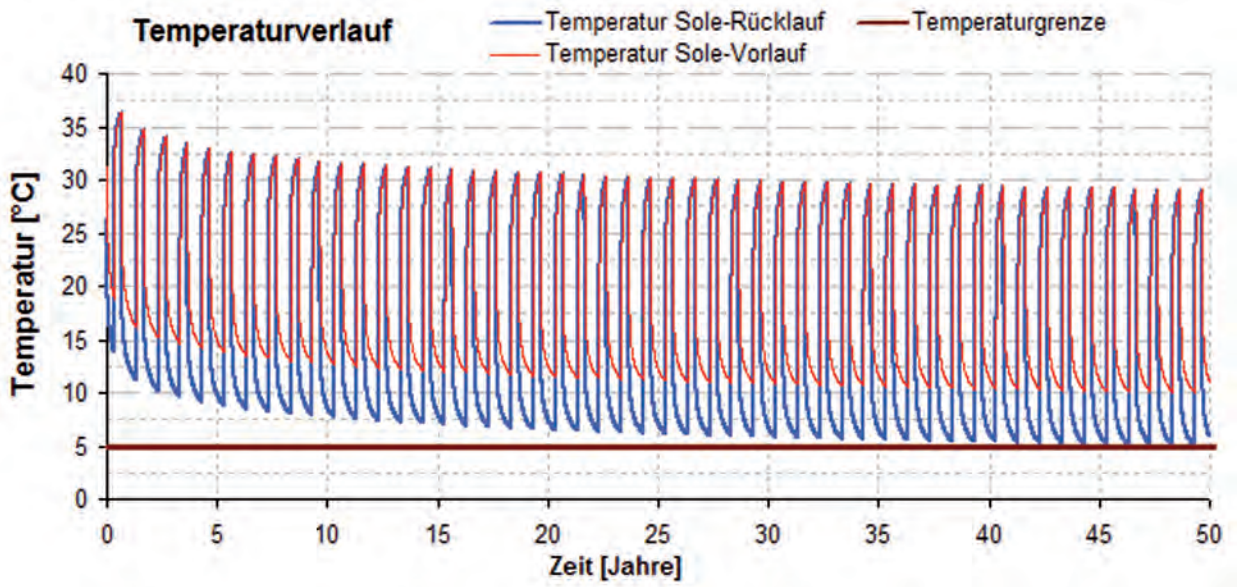


Abb. 6-14: Prognostizierte Temperaturentwicklung im Wärmeträgermedium in der MTEWS im Referenzszenario 1.500 A GFK-KOAX über 50 Jahre Betrieb (Jahresentzugswärmearbeit 811 MWh; Sole-Rücklauf: Eintritt in MTEWS, Sole-Vorlauf: Austritt aus MTEWS; Temperaturspreizung am Sondenkopf: 5K).

Grundlastbetrieb ausgerichteten Lastprofil A eine um ca. 200 MWh/a bzw. ca. 25% höhere Entzugswärmearbeit gewonnen werden als beim Lastprofil B (vgl. Tab. 6-3). Demgegenüber liegt beim entzugsleistungsorientierten Betrieb der GFK-Sonde (Lastprofil B) die Entzugsleistung um 34KW bzw. ca. 20% über der des Vergleichsszenarios des Lastprofils A. In den 800m tiefen Erdwärmesonden ist sowohl bei optimiertem Grundlastbetrieb, als auch beim entzugsleistungsorientierten Betrieb die Energieausbeute beim GFK-Koaxial-Ausbau um ca. 15% (Lastfall A) bzw. ca. 20% (Lastfall B) höher als beim Doppel-U-Sondenausbau.

6.4.4 Sensitivitätsanalysen

Im Rahmen einer Parameterstudie wurden verschiedene Eingangsparameter (Temperaturspreizung am Sondenkopf, Wärmeleitfähigkeit der Steigleitung, geothermischer Gradient bzw. Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gebirges, Bohrlochwiderstand) des Basisszenarios 1.500 A GFK-KOAX variiert und der Einfluss auf den erzielbaren Jahreswärmeentzug untersucht. Im Folgenden werden beispielhaft die Ergebnisse zur Temperaturspreizung am Sondenkopf (vgl. Kap. 6.4.5) und zum Bohrlochwiderstand (vgl. Kap. 6.4.6) beschrieben. Sämtliche Ergebnisse dieser Studie sind in tewag (2014) ausführlich dokumentiert.

6.4.5 Temperaturspreizung am Sondenkopf

Die Temperaturspreizung am Sondenkopf als Differenz zwischen Vorlauf- und Rücklauf-temperatur wurde bereits im Rahmen der Ermittlung der optimalen Betriebsbedingungen variiert (Vorstudie, vgl. Kap. 6.4.1). Eine geringere Spreizung am Sondenkopf erlaubt grundsätzlich eine stärkere Absenkung der Betriebstemperatur der MTEWS ohne Unterschreitung der unteren Temperaturgrenze. Das bedeutet effektiv eine höhere Entzugsleistung aus der Sonde. Eine geringere Spreizung bei höheren Entzugsleistungen erzwingt jedoch höhere Zirkulationsraten, und damit einen höheren Pumpenaufwand zur Umwälzung der Wärmeträgerflüssigkeit in der Sonde. Bei zu kleinen Spreizungen steigt der Energiebedarf für die Umwälzpumpe (elektrischer Jahresstromverbrauch) um ein Vielfaches an, sodass der Betrieb der MTEWS schnell unwirtschaftlich wird. In diese Betrachtung wird daher der prognostizierte Pumpaufwand einbezogen. Abbildung 6-15 zeigt die erreichbare Entzugsleistung sowie die dafür erforderliche Pumpleistung in Abhängigkeit von der Spreizung am Sondenkopf.

Die blaue Kurve zeigt den „Netto-Energiegewinn“, der aus der thermischen Jahreswärmeabzug abzüglich des elektrischen Jahresstromverbrauchs der Umwälzpumpe ermittelt wurde. Erkennbar ist das ermittelte Optimum im Bereich von 4 bis 5K Spreizung, das zu einer Entzugsleistung von 140kW führt. Bei einer Spreizung von 3K steigt der Pumpaufwand deutlich, sodass der Betrieb unwirtschaftlich

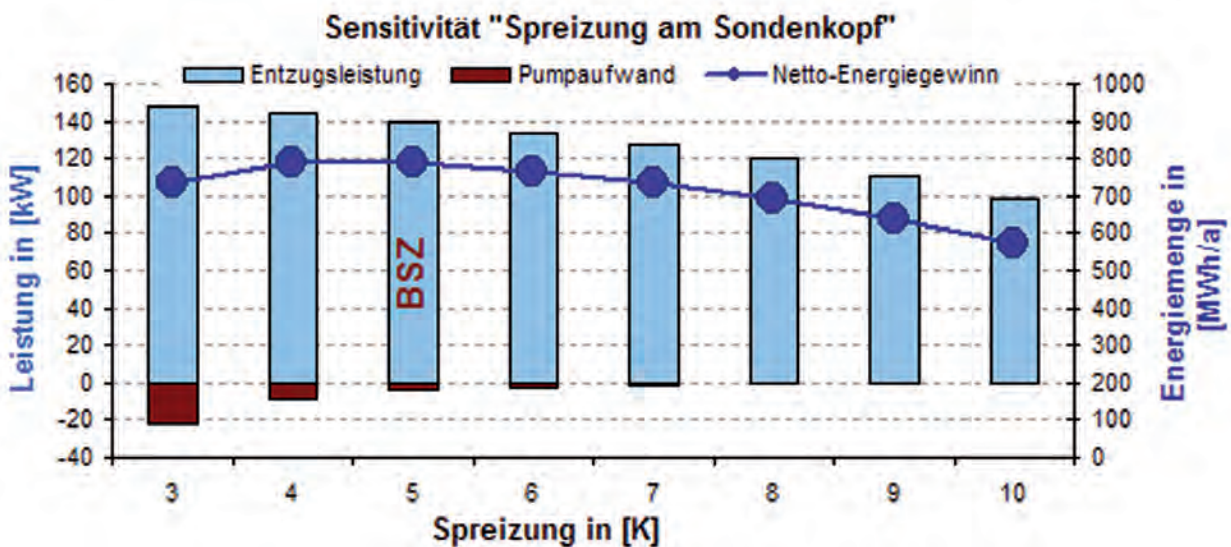


Abb. 6-15: Sensitivität „Temperaturspreizung am Sondenkopf“ (BSZ = Basisszenario).



ist. Bei höheren Spreizungen nimmt der Pumpaufwand merklich ab; allerdings sinkt dann auch die Entzugsleistung deutlich.

6.4.6 Bohrlochwiderstände

Um die Auswirkungen verschiedener Verrohrungsschemata und damit verschiedener Bohrlochwiderstände auf die thermische Ergiebigkeit der MTEWS abzuschätzen, wurden im Rahmen der Parameterstudie zusätzlich zum schematischen geologischen Profil C (vgl. Abb. 6-8) die Bohrlochwiderstände für drei weitere geologische Schichtabfolgen entlang des Nord-Süd-Schnittes im baden-württembergischen Molassebecken und daraus resultierende Ausbauschemata untersucht (tewag 2014). Die effektiven Bohrlochwiderstände, die für diese vier Schichtfolgen und die daraus resultierenden Ausbauschemata ermittelt wurden, zeigen, dass der Einfluss des Verrohrungsschemas auf den effektiven Bohrlochwiderstand und damit auf die Ergebnisse der weiteren Simulationen mit dem Rechenmodul vernachlässigbar ist (vgl. Tab. 6-4). Somit kann bei der rasterbasierten standortspezifischen Abschätzung der gewinnbaren Wärmemenge im Berechnungsmodul GEO-HAND^{pot} ein einheitlicher Wert für den Bohrlochwiderstand zugrunde gelegt werden.

Tab. 6-4: Gegenüberstellung der Bohrlochwiderstände für unterschiedliche geologische Abfolgen und daraus resultierende Ausbauschemata (vgl. auch Anhang 6 in tewag 2014).

	Effektiver Bohrlochwiderstand $R_{b,tot}$
Profil 1	0,036 (m K)/W
Profil 2	0,037 (m K)/W
Profil 3	0,035 (m K)/W
Profil C	0,036 (m K)/W

6.5 Entwicklung des Rechenmoduls GEO-HAND^{pot}

Zur rasterbasierten Abschätzung der gewinnbaren Wärmemenge aus den definierten Standardszenarien für die 800 bzw. 1.500 m tiefen Erdwärmesonden wurde im Rahmen des GeoMol-Projekts von der Hochschule Biberach (HBC) das Rechenmodul GEO-HAND^{pot} programmiert (tewag 2014). Das Programm basiert auf dem am Institut für Gebäude- und Energiesysteme der HBC entwickelten Handrechenverfahren für Erdwärmesonden GEO-HAND^{light} (Koenigsdorff 2011). GEO-HAND^{light} und GEO-HAND^{pot} setzen auf etablierten analytischen

Lösungen für das thermische Verhalten von Erdwärmesonden auf, mit denen die Entwicklung der Fluidtemperatur in einer Sonde in Abhängigkeit von den aufgeprägten thermischen Lasten (Wärmeentzugsprofil) als Überlagerung der kurz-, mittel- und langfristigen Effekte berechnet werden kann. Für gegebene Werte der geologischen und thermischen Parameter am Standort werden für die sechs Referenzszenarien die maximalen Entzugsleistungen (in kW) und maximale jährliche Entzugsenergien (in MWh/a, Jahresentzugswärmearbeit) iterativ berechnet, wobei eine minimale Fluideintrittstemperatur in die Sonden von 5°C nach 50 Jahren gerade noch eingehalten wird. Es wird der sich längerfristig nach 50 Betriebsjahren noch nicht vollständig eingeschwungenen Zustand betrachtet (vgl. Abb. 6-14).

Die standortspezifischen Parameter Untergrundtemperatur und Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Gebirges gehen als tiefengemittelte gewichtete Datensätze in die Berechnung ein. Daneben wird die gemittelte langjährige Oberflächentemperatur berücksichtigt.

GEO-HAND^{pot} dient ausschließlich zur Potenzialabschätzung der gewinnbaren Wärmemengen einzelner MTEWS, die nicht von Nachbarsonden oder -anlagen beeinflusst werden. GEO-HAND^{pot} kann und soll keine detaillierte Planung einer MTEWS-Anlage für den entsprechenden Standort ersetzen.

Zur rasterbasierten Berechnung für größere Untersuchungsgebiete verarbeitet GEO-HAND^{pot} vorgegebene Textdateien, die die Werte der erforderlichen geologischen Parameter (tiefengemittelte Wärmeleitfähigkeit, Jahresmittelwert der Oberflächentemperatur, mittlerer geothermischer Temperaturgradient) für alle Rasterpunkte enthalten. Die vorstehend beschriebene Ermittlung der maximalen Entzugsleistungen und maximalen jährlichen Entzugsenergien wird an jedem Rasterpunkt für jeweils alle vordefinierten Sonden- und Betriebs-szenarien automatisch durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Ausgabe-Textdateien geschrieben, die analog zu den Eingabedateien jeweils Daten für alle Rasterpunkte enthalten.

Die Validierung des Rechenmoduls GEO-HAND^{pot} erfolgte anhand der durchgeführten Detailsimulationen mit dem Rechenmodell SBM für die sechs in Kap. 6.4.3 beschriebenen Szenarien (vgl. Abb. 6-16).

Programmstruktur, Programmablauf, Dateistruktur der Ein- und Ausgabeparameter sowie die Anwendung von GEO-HAND^{pot} sind in tewag (2014) detailliert dokumentiert.

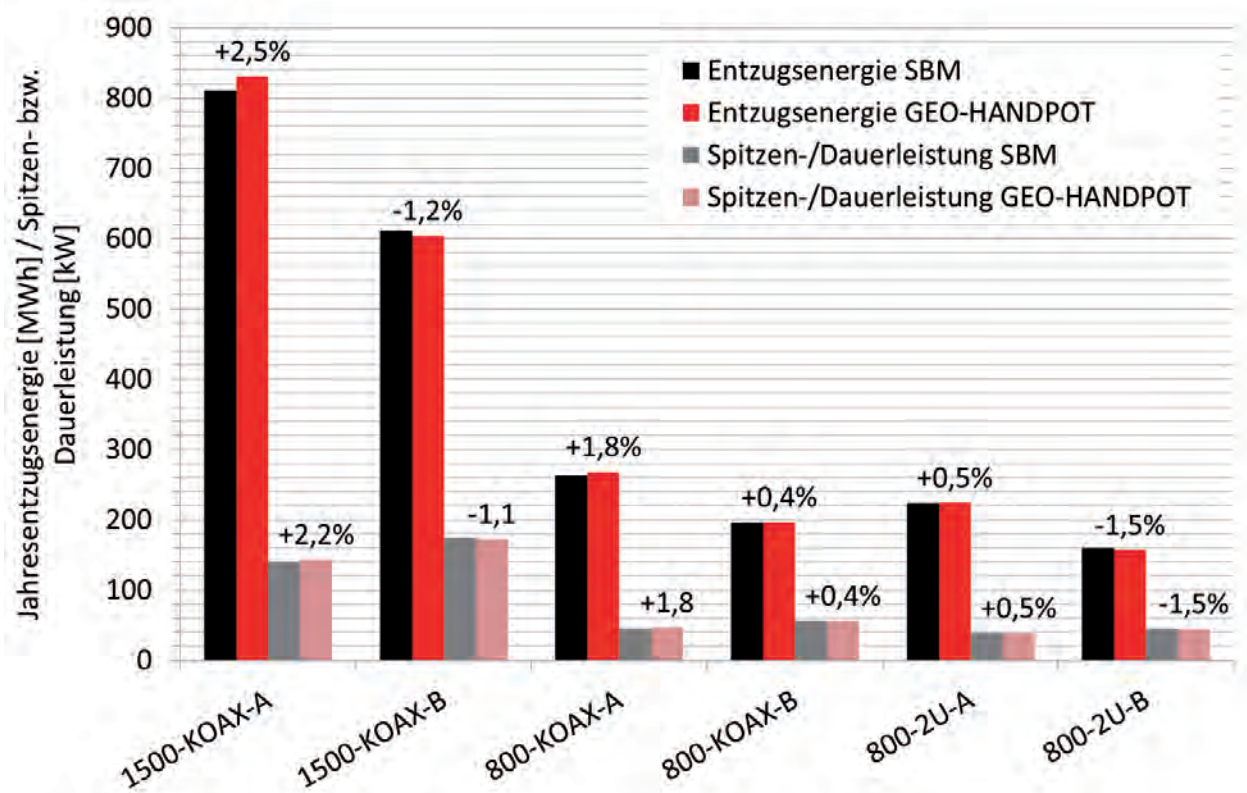


Abb. 6-16: Gegenüberstellung der mit dem Finite Differenzen Modell SBM und mit GEO-HAND^{POT} erzielten Ergebnisse. Die %-Werte geben die Abweichung von GEO-HAND^{POT} gegenüber SBM (Superposition Borehole Model) wieder.

6.6 Festlegung geologisch - geothermischer Randbedingungen

Neben dem Lastprofil, dem Sondentyp und der Ausbautiefe gehen die standortspezifischen geologisch-geothermischen Randbedingungen (geologischer Untergundaufbau, Temperaturverteilung und Wärmeleitfähigkeit der über die Erdwärmesonde erschlossenen Schichtenfolge sowie die langjährig gemittelte Oberflächentemperatur) in die Abschätzung der gewinnbaren Wärmemenge ein. Dabei berücksichtigt das Rechenmodell GEO-HAND^{POT} über die jeweilige Sondentiefe gemittelte Eingangsparameter.

Die Temperaturverteilung, bzw. der über die jeweilige Sondentiefe von 800 bzw. 1.500 m tiefengemittelte geothermische Gradient, werden aus dem Temperaturmodell abgeleitet (vgl. Abb. 6-17). Der Temperaturgradient nimmt von Nordwesten (4,7 K/100m) nach Südosten (2,7 K/100m) ab (vgl. hierzu Kap. 5.4.2).

Die standortspezifische tiefengemittelte Wärmeleitfähigkeit wird aus dem geologischen 3D-Modell (Schichtenfolge und Mächtigkeit, vgl. Kap. 4) und den Wärmeleitfähigkeiten der Modelleinheiten

ermittelt, die jeweils über die Erdwärmesondenbohrung erschlossen werden.

Die Wärmeleitfähigkeiten der Modelleinheiten wurden aus Literaturwerten übernommen (Rath & Clauser 2005, Clauser & Koch 2006). Sie sind in Tabelle 6-5 zusammengestellt. Die Wärmeleitfähigkeiten schwanken zwischen ca. 1,9 W/(m*K) für die quartären Lockersedimente und die mitteljurassischen Ton- und Mergelsteine und ca. 3,3 W/(m*K) für die Kalksteine des Muschelkalk. Die weit verbreiteten und nach Süden zunehmend mächtiger werdenden tertiären Sedimente weisen Wärmeleitfähigkeiten zwischen 2,9 und 3,05 W/(m*K) auf. Mit der Zunahme von Druck und Temperatur verringert sich die gesteinspezifische Wärmeleitfähigkeit (Koch & Clauser 2006). Nach deren Annahmen liegen die Wärmeleitfähigkeiten bei den in 1.500 m Tiefe herrschenden Druck- und Temperaturbedingungen gesteinsabhängig um ca. 5 bis 7% unter den unter Laborbedingungen ermittelten Werten. Tiefengemittelt beträgt die Abnahme über 1.500 m somit lediglich ca. 2,5 bis 3,5%. Sie wurde deshalb nicht berücksichtigt.

Konvektiver Wärmetransport durch zirkulierende (thermale) Grundwasser wurde ebenfalls nicht berücksichtigt.

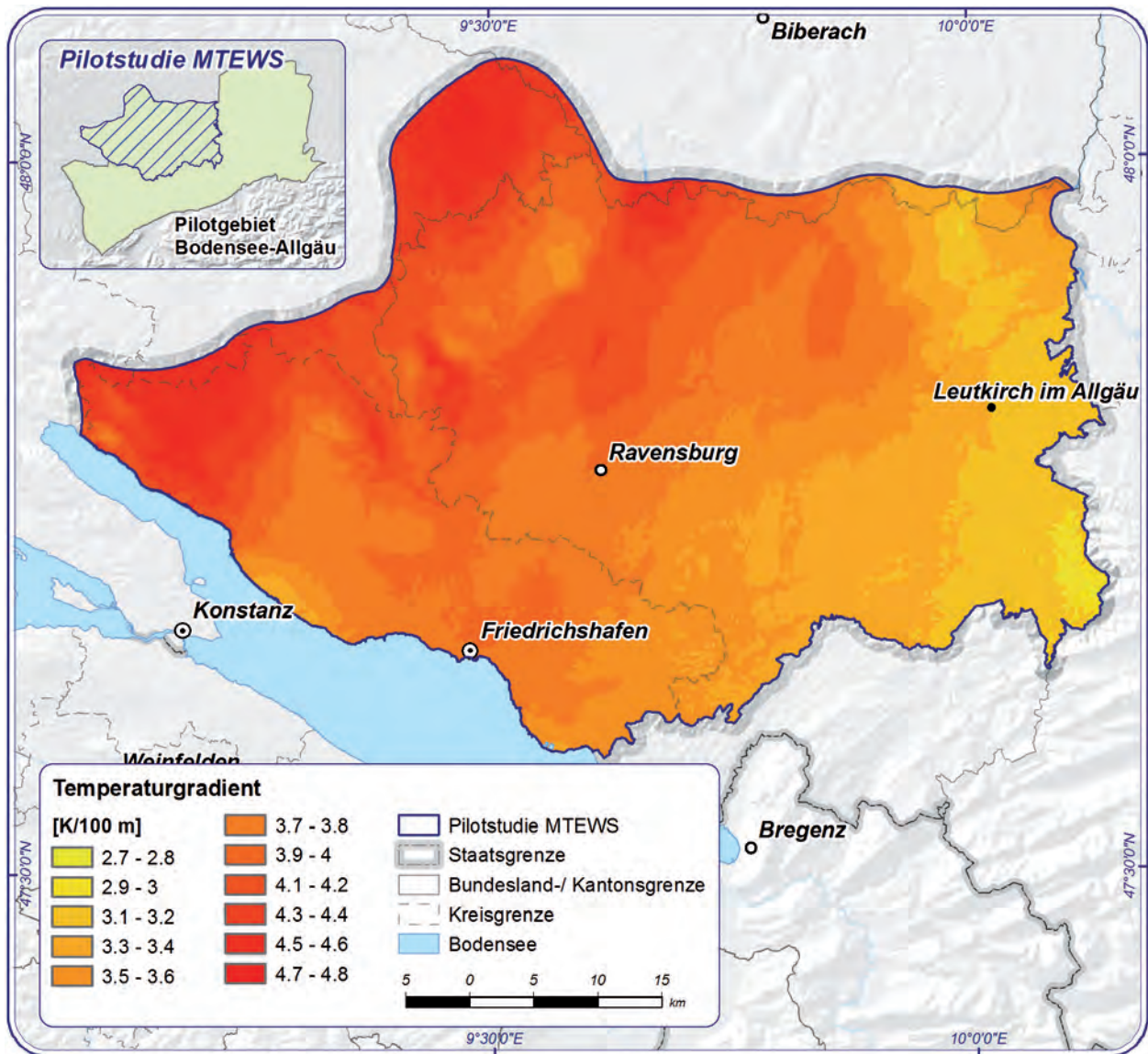


Abb. 6-17: Tiefengemittelter Temperaturgradient [K/100m].

Abbildung 6-18 zeigt die räumliche Verteilung der tiefengemittelten gewichteten Wärmeleitfähigkeit über eine Tiefe von 1.500m unter Gelände. Die Wärmeleitfähigkeiten liegen zwischen 2,4 und 3,0 W/(m*K). Der über das gesamte Gebiet gemittelte Wert liegt bei 2,9 W/(m*K). In der räumlichen Verteilung fallen die vergleichsweise niedrigen Wärmeleitfähigkeiten im nordwestlichen Teil des LCA-Gebiets auf, die auf den höheren Anteil jurassischer Schichten mit geringeren Wärmeleitfähigkeiten an der erschlossenen Abfolge zurückzuführen sind. In südöstliche Richtung werden die tiefengemittelten Wärmeleitfähigkeiten vom zunehmenden Anteil tertiärer Sedimente mit höheren Wärmeleitfähigkeiten dominiert. Quartäre Beckenstrukturen mit bis zu 200m mächtigen Lockersedimentfüllungen zeichnen sich durch niedrigere gemittelte Wärmeleitfähigkeiten ab (z. B. Wurzacher Becken, Waldburg-Rinne östlich von Ravensburg sowie Übergang vom Schussen- in

das Federseebecken zwischen Aulendorf und Bad Waldsee). Die höchsten Wärmeleitfähigkeiten treten in Gebieten mit geringer oder fehlender Quartärüberdeckung auf (dunkelrote Flächen in Abb. 6-18).

6.7 Abschätzung des geothermischen Potenzials der MTEWS-Geothermie im baden-württembergischen Teil des LCA-Gebiets und Darstellung als Rasterkarten

Für die sechs in Kapitel 6.4.3. beschriebenen Referenzszenarien wurden jeweils die maximalen monatlichen Entzugsleistungen und die maximalen jährlichen Entzugsenergien ermittelt. Die sich daraus ergebenden 12 Datensätze wurden in Rasterkarten

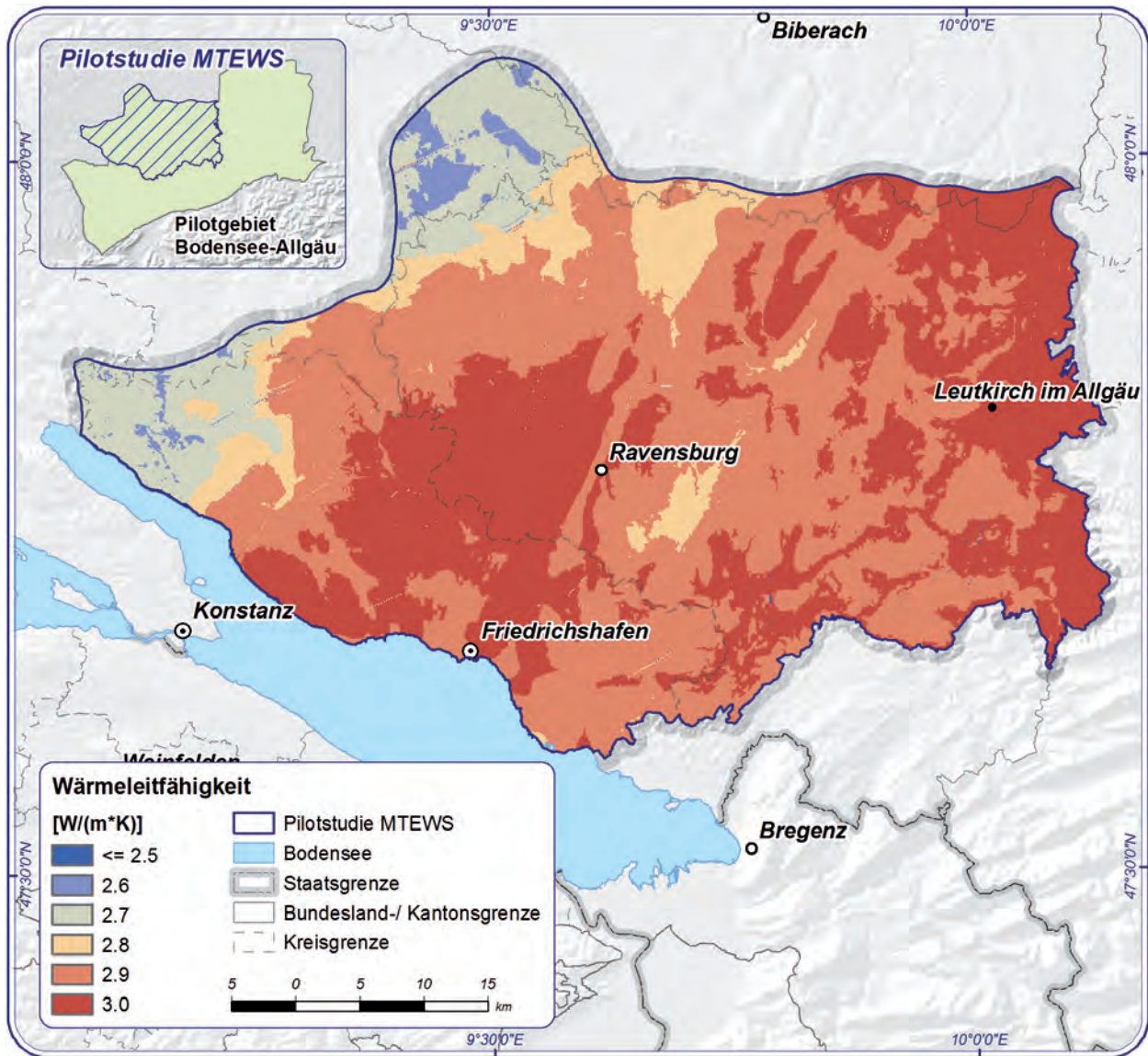


Abb. 6-18: Räumliche Verteilung der tiefengemittelten gewichteten Wärmeleitfähigkeit $[W/(m^*K)]$ über eine Tiefe bis 1500m unter Gelände.

visualisiert, die über den GeoMol-Kartenvier (vgl. Kap. 8.2) zugänglich sind. Der Potenzialabschätzung wurde eine Zellgröße von 100×100 m zu Grunde gelegt. Bei einer maximalen West-Ost-Ausdehnung von 80,8 km und einer maximalen Nord-Süd-Ausdehnung von 54,7 km ergeben sich daraus 441.976 Zellen, für die die Betrachtung durchgeführt wurde. Exemplarisch sind in den Abbildungen 6-19 bis 6-21 die Ergebnisse für die Referenzszenarien Koaxialsonde 1.500 m tief mit Lastprofil A und Lastprofil B sowie Koaxialsonde 800 m tief mit Lastprofil A dargestellt. Eine Übersicht über die Ergebnisse sämtlicher Szenarienbetrachtungen für den baden-württembergischen Teil des LCA-Gebiets gibt Tabelle 6-6.

In Abbildung 6-19 ist für den baden-württembergischen Teil des LCA-Gebiets die Jahresentzugswärmearbeit $[MWh/a]$ dargestellt, die aus einer 1.500 m tiefen

Koaxialsonde (Lastprofil A) gewonnen werden kann. Sie liegt zwischen 448 und 1.020 MWh/a ; der Gebietsmittelwert liegt bei 825 MWh/a und unterscheidet sich mit den höchsten Werten im Nordwesten und den niedrigsten Werten im Südosten des Gebiets regional beträchtlich. Die Gebiete mit der höchsten Jahresentzugswärmearbeit fallen mit den Bereichen zusammen, in denen die höchsten Untergrundtemperaturen und dementsprechend die größten tiefengemittelten Temperaturgradienten vorliegen (vgl. Abb. 6-17). Die tiefengemittelten Wärmeleitfähigkeiten zeichnen sich ebenfalls ab, machen sich in den Beträgen der Jahresentzugswärmearbeit jedoch nicht so gravierend bemerkbar.

In Abb. 6-20 ist für den baden-württembergischen Teil des LCA-Gebiets die Jahresentzugswärmearbeit $[MWh/a]$ dargestellt, die aus einer 1.500 m



Tab. 6-5: Wärmeleitfähigkeiten [W/(m*K)] der geothermischen Modelleinheiten (zusammengestellt aus Literaturwerten).

	Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]	
	nach Rath & Clauser (2005)	nach Clauser & Koch (2006)
Quartär	1,89	
OSM	3,0	
OMM (Steinhöfe-Formation)		3,06 (OMM gesamt)
OMM (Baltringen-Fm)		3,06
OMM (Kalkofen-Formation und Heidenlöcher-Fm)		3,0 (Mittelwert aus Kalkofen-Fm. und Heidenlöcher-Fm)
USM		3,05
UMM (Bausteinschichten)		2,88
UMM (Tonmergelschichten)		2,88 (UMM gesamt)
Oberjura-Aquifer		2,74 (Oberjura gesamt)
Impressamergel-Formation		2,74 (Oberjura gesamt)
Mitteljura		1,82
Unterjura		2,02
Ober- und Mittelkeuper	2,34 (Keuper gesamt)	2,9 (Mittelwert aus Stuttgart-Fm. und Löwenstein-Fm, vormals Schilfsandstein und Stubensandstein)
Unterkeuper	2,34 (Keuper gesamt)	
Oberer Muschelkalk und Diemel-Formation		3,34 (Muschelkalk gesamt)
Mittlerer und Unterer Muschelkalk		3,34 (Muschelkalk gesamt)
Paläozoikum und Kristallines Grundgebirge	3,0	

Tab. 6-6: Übersicht über die mit standardisierten MTEWS gewinnbare Wärmemenge im baden-württembergischen Teil des LCA-Pilotgebiets (1.500 A GFK-KOAX: Sondenlänge 1.500 m, Betriebsszenario A, Glasfaserverstärkte Kunststoff-Koaxialsonde, 800 B DOPPEL-U: Sondenlänge 800 m, Betriebsszenario B, vorkonfektionierte Doppel-U-Sonde).

Szenario	Entzugsleistung [kW] (Spitzen/Dauerleistung)			Jahresentzugswärmearbeit [MWh/a]		
	Höchster Wert im LCA -Gebiet (BW)	Niedrigster Wert im LCA-Gebiet (BW)	Mittelwert für das LCA-Gebiet (BW)	Höchster Wert im LCA -Gebiet (BW)	Niedrigster Wert im LCA-Gebiet (BW)	Mittelwert für das LCA-Gebiet (BW)
1.500 A GFK-KOAX	174	76	141	1.020	448	825
1.500 B GFK-KOAX	210	94	170	731	330	594
800 A GFK-KOAX	60	24	43	353	141	252
800 B GFK-KOAX	72	30	52	254	103	183
800 A Doppel-U	50	21	36	290	122	211
800 B Doppel-U	5.829	25	42	201	85	146

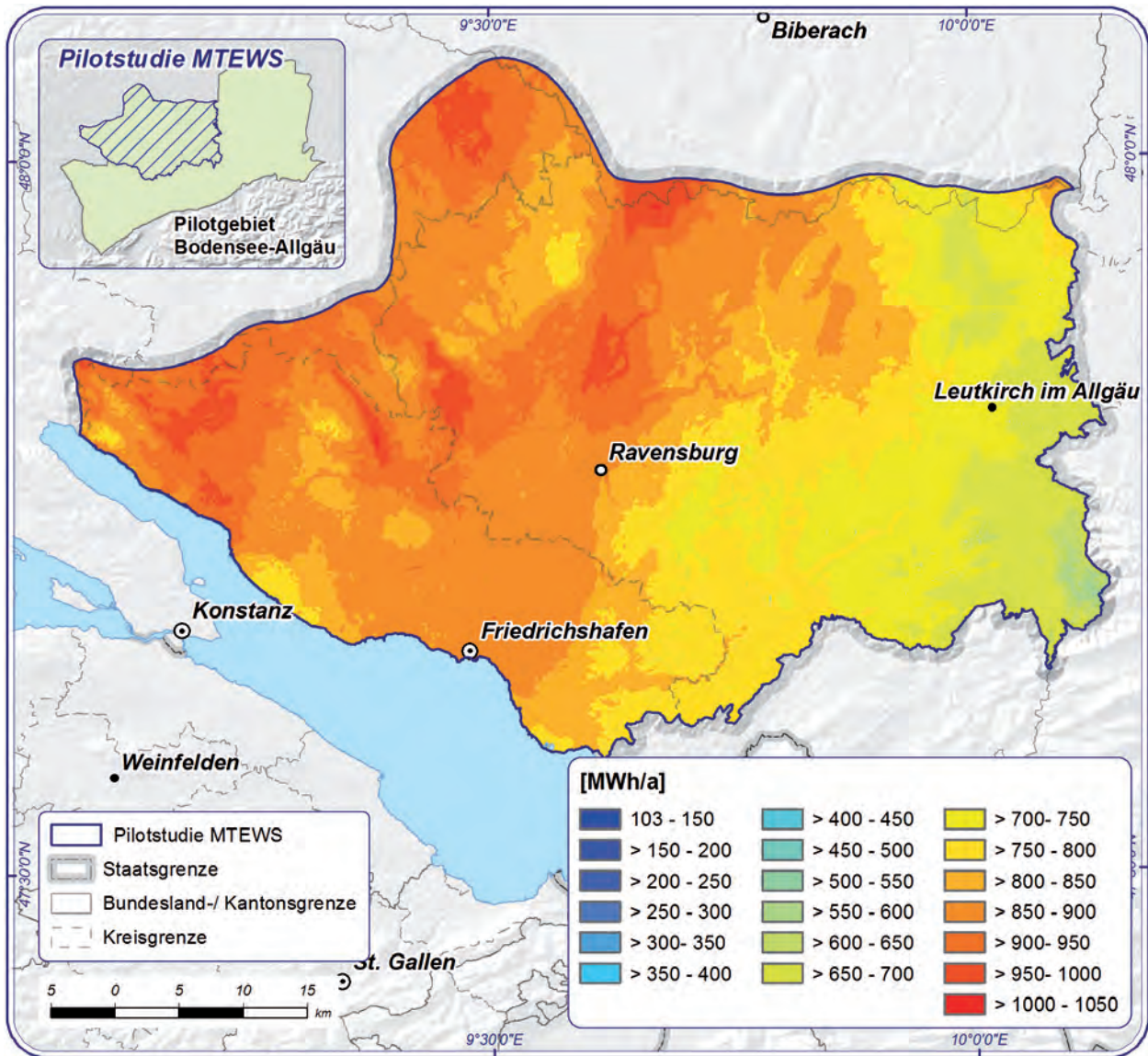


Abb. 6-19: Rasterdarstellung der Jahresentzugswärmearbeit [MWh/a] für das Szenario Koaxialsonde mit 1.500m Ausbautiefe und Lastprofil A.

tiefen Koaxialsonde (Lastprofil B) gewonnen werden kann. Die Entzugswärmearbeit liegt zwischen ca. 330 und ca. 731 MWh/a, der Gebietsmittelwert liegt bei 594 MWh/a. Das Verteilungsmuster der Jahresentzugswärmearbeit entspricht dem des zuvor betrachteten Szenarios.

In Abbildung 6-21 ist für den baden-württembergischen Teil des LCA-Gebiets die Jahresentzugswärmearbeit [MWh/a] dargestellt, die aus einer 800m tiefen Koaxialsonde (Lastprofil B) gewonnen werden kann. Sie liegt zwischen 103 und 254 MWh/a, der Gebietsmittelwert liegt bei 183 MWh/a.

Die Karten enthalten keine Hinweise auf bohr- und ausbautechnische Risiken sowie auf wasserwirtschaftliche Restriktionsflächen. Diese Aspekte sind in einer vorhabensspezifischen Detailplanung zu prüfen und erforderlichenfalls zu berücksichtigen.

Die entwickelte Methodik lässt sich grundsätzlich auch auf andere Gebiete übertragen, wobei die jährliche mittlere Oberflächentemperatur und die geothermischen Untergrundparameter (tiefengemittelte Wärmeleitfähigkeit, geothermischer Temperaturgradient) standortspezifisch zu berücksichtigen sind.

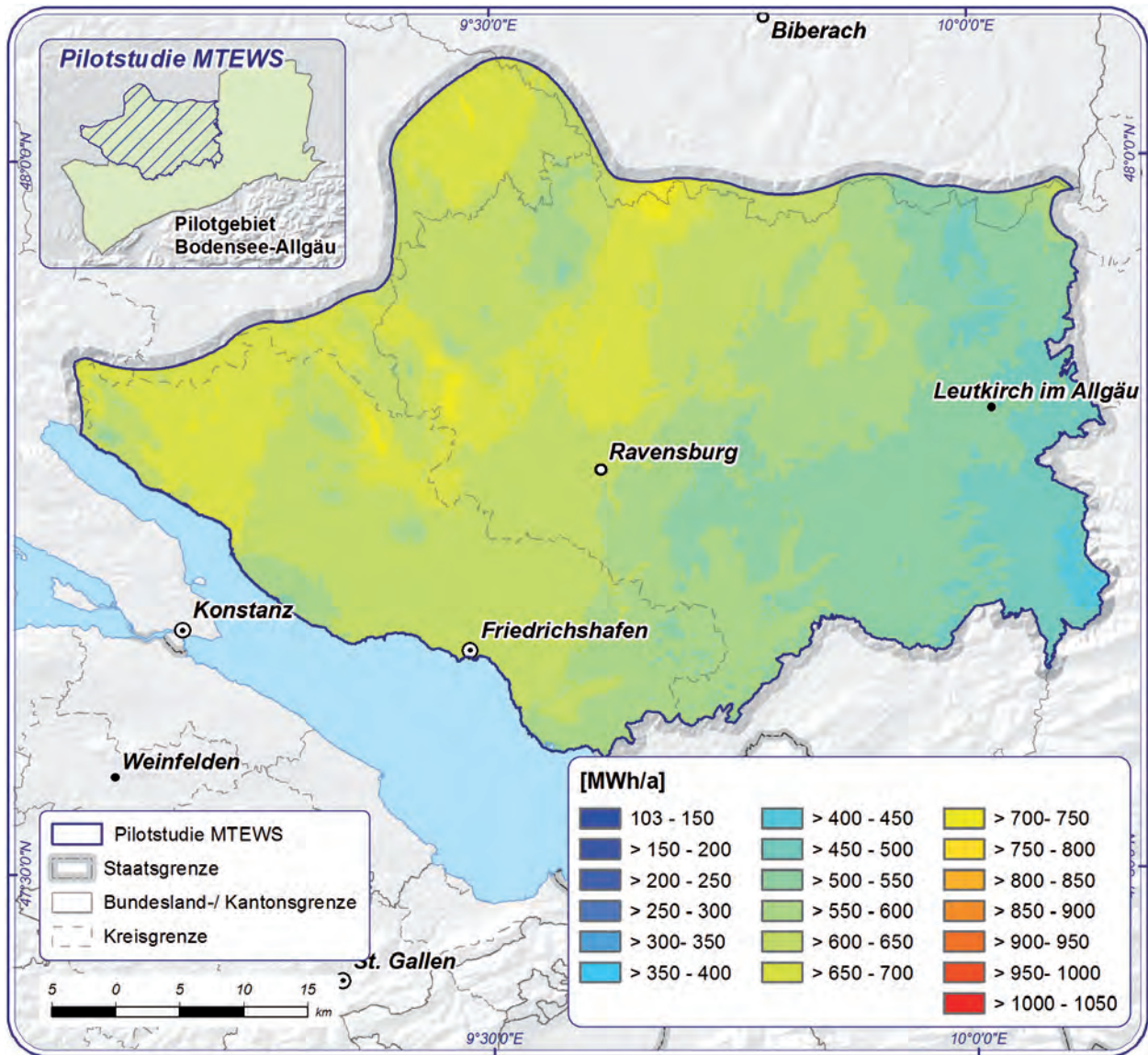


Abb. 6-20: Rasterdarstellung der Jahresentzugswärmearbeit [MWh/a] für das Szenario Koaxialsonde mit 1.500m Ausbautiefe und Lastprofil B.

6.8 Zusammenfassung und Bewertung

Für den baden-württembergischen Teil des LCA-Pilotgebiets wurde in einer Studie das Potenzial der mitteltiefen bis tiefen Erdwärmesonden-Geothermie abgeschätzt. Hierzu wurden in einem ersten Arbeitsschritt mögliche Wärmeverbraucher identifiziert und darauf aufbauend zwei Lastprofile abgeleitet. Lastprofil A liegt ein Grundlastbetrieb mit einer Dauerlast von 8 Monaten, Lastprofil B ein ganzjähriger entzugsleistungsorientierter Teillastbetrieb zugrunde. Als Ausbauvarianten wurden ein Doppel-U-Sonden-Ausbau mit einer Ausbautiefe von 800m sowie ein Koaxialsonden-Ausbau mit einem Steigrohr aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK-Koaxial-Ausbau) und Sondentiefen von

800 und 1.500m festgelegt. Zur flächenhaften Abschätzung des Potenzials der MTEWS wurde das Rechenmodul GEO-HAND^{POT} entwickelt. Dieses Modul berücksichtigt neben dem Lastprofil und bohr- und ausbauspezifischen Randbedingungen den geologischen Schichtaufbau sowie die tiefen gemittelten standortspezifischen Untergrundparameter Temperatur und Wärmeleitfähigkeit.

Bei einem optimierten Betriebsszenario liegt die Sole-Rücklauftemperatur in einer 1.500m tiefen Koaxialsonde im Grundlastbetrieb bei minimal 5 °C. Die maximalen Temperaturen im Vorlauf nehmen von ca. 35 °C im zweiten Betriebsjahr auf ca. 29 °C nach 50 Betriebsjahren ab. Zur Heizwärmenutzung ist eine Anhebung des Temperaturniveaus durch eine zwischengeschaltete Wärmepumpe

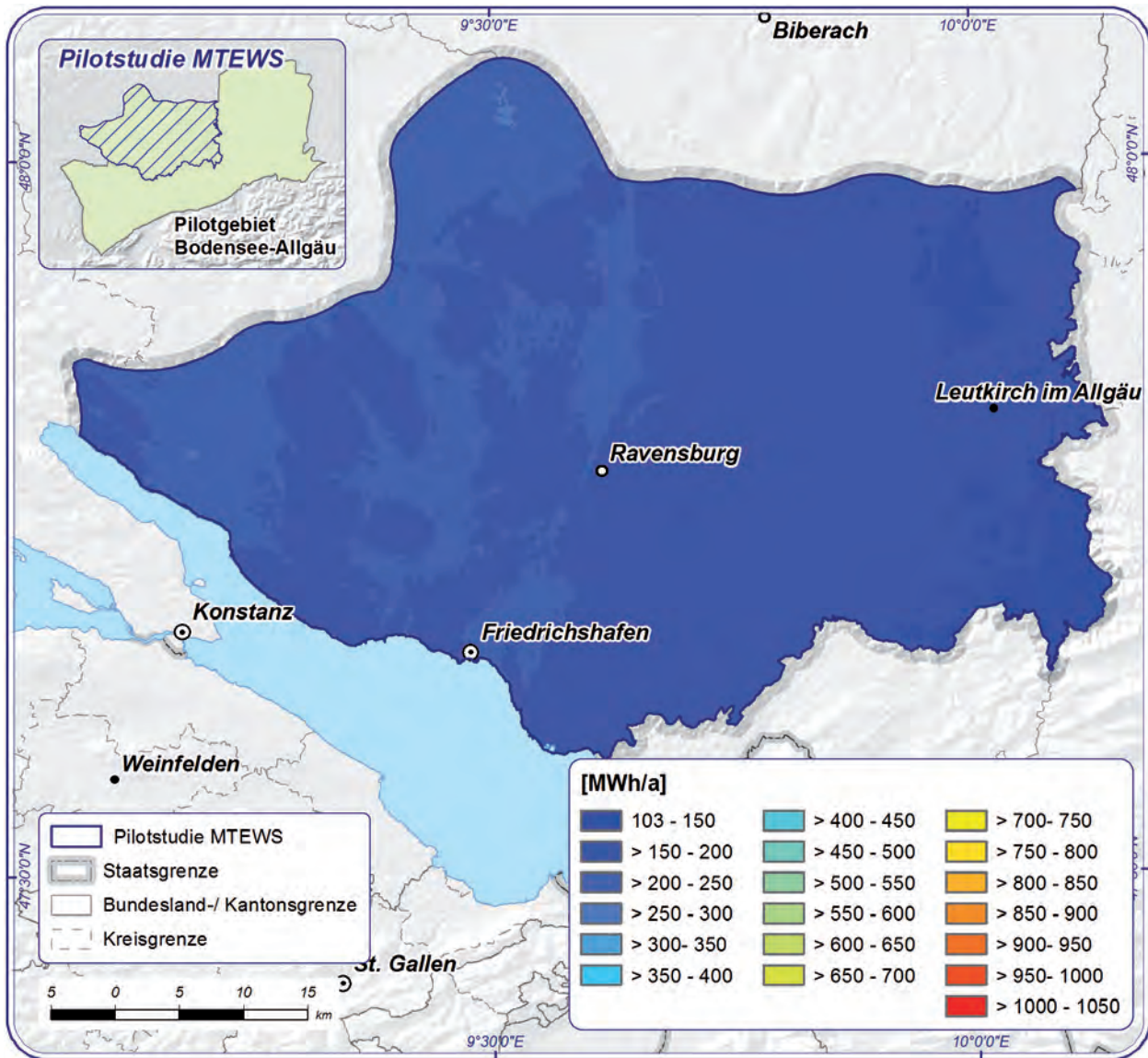


Abb. 6-21: Rasterdarstellung der Jahresentzugswärmearbeit [MWh/a] für das Szenario Koaxialsonde mit 800m Ausbautiefe und Lastprofil B.

erforderlich. Eine direkte Heizwärmegewinnung mit MTEWS ist demnach im Pilotgebiet nicht möglich.

Bei gleicher Bohrtiefe und gleichem Betriebsszenario liegt die gewinnbare Wärmemenge mit GFK-Koaxial-Ausbau über der von Doppel-U-Sonden. Die Entzugsleistung einer 1.500m tiefen Koaxialsonde im Grundlastbetrieb (Lastprofil A) liegt im Untersuchungsgebiet zwischen 141 und 174 kW, im entzugsleistungsorientierten Teillastbetrieb (Lastprofil B) zwischen 170 und 210 kW. Die Entzugswärmearbeit liegt im Lastfall A zwischen 448 und 1.020 MWh/a im Lastfall B zwischen 330 und 731 MWh/a. Die größte Wärmeenergie kann im Nordwesten des Gebiets gewonnen werden; nach Südosten nimmt die gewinnbare Wärmemenge ab.

Aufgrund der vergleichsweise hohen Bohrkosten kann die MTEWS-Geothermie wirtschaftlich nicht mit der flachen EWS-Geothermie oder mit Grundwasserwärmepumpen konkurrieren. Allerdings kann flache Geothermie nicht überall realisiert werden. So können z. B. größere flache EWS-Felder im dicht bebauten innerstädtischen Bereich am hierfür erforderlichen Platzbedarf bzw. die Installation von Grundwasserwärmepumpen an der hierfür erforderlichen Grundwasserführung scheitern. In solchen Fällen sollte geprüft werden, ob die benötigte Wärmemenge durch MTEWS-Anlagen bereitgestellt werden kann.

Die Abschätzung der gewinnbaren Wärmemenge basiert auf der konservativen Annahme eines rein konduktiven Wärmetransports. Im LCA-Gebiet



ist eine (thermale) Grundwasserführung in den Schichten der Oberen Meeresmolasse, des Oberjura und des Muschelkalk bekannt (Bertleff et al. 1988). Sofern bei Bohrungen für MTEWS in diesen Einheiten Grundwasser angetroffen wird, kann die Effizienz der Erdwärmesonden durch konvektiven Wärmetransport erhöht sein.

Die Ergebnisse dieser Studie können nicht als Grundlage für konkrete Planungsvorhaben genutzt werden. Hierzu müssen die projektspezifischen Nutzeranforderungen, die bedarfsorientierte Auslegung der MTEWS sowie die standortbezogenen wasserwirtschaftlichen und hydrogeologischen Verhältnisse berücksichtigt werden. Daran orientieren

sich unter anderem die erforderlichen bohr- und ausbautechnischen Maßnahmen zum Schutz der (tiefen) Grundwasservorkommen sowie zur Minimierung bohrtechnischer Risiken.

Die entwickelte Methodik zur flächenhaften Abschätzung des Potenzials der MTEWS-Geothermie unter Einbeziehung standortspezifischer Untergrundparameter kann auch auf andere Bereiche im GeoMol-Gebiet und darüber hinaus übertragen werden.

7 Nutzung des tieferen Untergrundes

An den Untergrund werden vielfältige Nutzungsansprüche gestellt. Dies gilt sowohl für den oberflächennahen, als auch für den tieferen Bereich. Insbesondere aufgrund zunehmender Nutzungsansprüche hat der tiefere Untergrund in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen und wird auch wegen möglicher Risiken, die mit einigen Nutzungen verbunden sein können, zukünftig noch stärker in den Fokus des öffentlichen Interesses rücken (SGD/BGR/LIAG 2012, Akademie für Geowissenschaften und Geotechnologien 2014).

Die Nutzungsmöglichkeiten des Untergrundes sind mannigfaltig. Infrastrukturmaßnahmen greifen bis mehrere hundert Meter Tiefe in den Untergrund ein. Grundwasser kann sowohl zur Trink- und Brauchwassernutzung, als auch als Mineral-, Heil- und Thermalwasser gewonnen werden. Außerdem verfügt der Untergrund über unterschiedliche mineralische und energetische Rohstoffe. Der unterirdische Raum kann aber auch für Untertagedeponien oder zur Erdgas- und Erdölspeicherung genutzt werden. In den letzten Jahren werden darüber hinaus Möglichkeiten der Nutzung von Geopotenzialen zur Realisierung der Klima- und energiepolitischen Ziele im Rahmen der Umsetzung der Energiewende verstärkt diskutiert. Hierzu zählen die Speicherung von Energieträgern aus erneuerbaren Energien (z. B. Wasserstoff, Methan, Druckluft), die verstärkte Nutzung der Geothermie und eventuell die untertägige Speicherung von Kohlendioxid zur Reduzierung der Freisetzung von Treibhausgasen in die Atmosphäre.

Zur Klärung der vielfältigen Fragen mit geowissenschaftlichem Bezug, die bei der Nutzung des oberflächennahen Bereichs im Rahmen der Raumplanung und Regionalordnung auftreten, liegen belastbare Informationsgrundlagen sowie bewährte und etablierte Bewertungskriterien vor. Eine wichtige Grundlage hierzu liefern geologische, hydrogeologische, bodenkundliche und ingenieurgeologische Kartenwerke sowie weitere geowissenschaftliche Datensätze der Staatlichen Geologischen Dienste.

Die Schaffung einer entsprechenden Datengrundlage zur Bewertung der Nutzungspotenziale sowie eventueller konkurrierender Nutzungen ist auch für den tieferen Untergrund wünschenswert und erforderlich. Sie stößt jedoch wegen des damit verbundenen hohen finanziellen Aufwands und, daraus resultierend, den eingeschränkt vorhandenen und heterogen im Raum verteilten Eingangsdaten

an ihre Grenzen. Dies betrifft einerseits den Differenzierungsgrad und die räumliche Auflösung des Untergrundes. Andererseits müssen die Betrachtungsräume je nach Fragestellung in geologische Homogenbereiche untergliedert werden. Diese wiederum müssen mit physikalischen und chemischen Parametern beschrieben werden, die an die jeweilige Fragestellung anzupassen sind. Daneben gibt es für die meisten Nutzungen noch keine fachlich allgemein anerkannten Kriterienkataloge zur nachvollziehbaren und belastbaren Abgrenzung entsprechender geeigneter unterirdischer Räume. Dabei ist zwischen der unmittelbaren Nutzung und deren eventueller Wirkungsbereiche zu unterscheiden. So können z. B. mit der Injektion von Fluiden oder Gasen – abhängig von den Gesteinseigenschaften (Porosität, Permeabilität) sowie der Injektionsrate und verpressten Gesamtmenge – im Nahfeld der Injektionsbohrung große und mit der Distanz abnehmende Druckerhöhungen auftreten. Die Abschätzung der Nutzungspotenziale erfolgt deshalb meist auf der Grundlage von wenigen definierten Kriterien. Dies führt zum Ausschluss bestimmter unterirdischer Räume bzw. zur Abgrenzung von Räumen, in denen ein grundsätzliches Nutzungspotenzial anzunehmen ist. Diese Bereiche sind somit als untersuchungswürdige Räume zur weitergehenden Abklärung des Nutzungspotenzials zu verstehen.

7.1 Geowissenschaftliche Grundlagen zur Nutzung des tieferen Untergrundes

Um die Nutzungsmöglichkeiten des Untergrundes aus geowissenschaftlicher Sicht hinreichend charakterisieren zu können, werden möglichst fundierte Kenntnisse über den Untergrund benötigt. Die Belastbarkeit der Aussagen ist abhängig von der Verfügbarkeit, Qualität und Dichte der erforderlichen Informationen über den geologischen Bau des Untergrundes, der üblicherweise in geologischen 3D-Modellen abgebildet wird. Daneben sind Informationen über die Untergrundtemperaturen sowie die physikalischen und chemischen Gesteinseigenschaften erforderlich. Dies trifft sowohl für die Abschätzung einzelner Nutzungsmöglichkeiten, als auch für mögliche Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Nutzungen zu, bei der auch die Wirkungsbereiche der Nutzungen berücksichtigt werden müssen. Hierauf ist besonders bei der Injektion und/oder Entnahme von Fluiden und Gasen in tiefen Reservoirs zu achten.

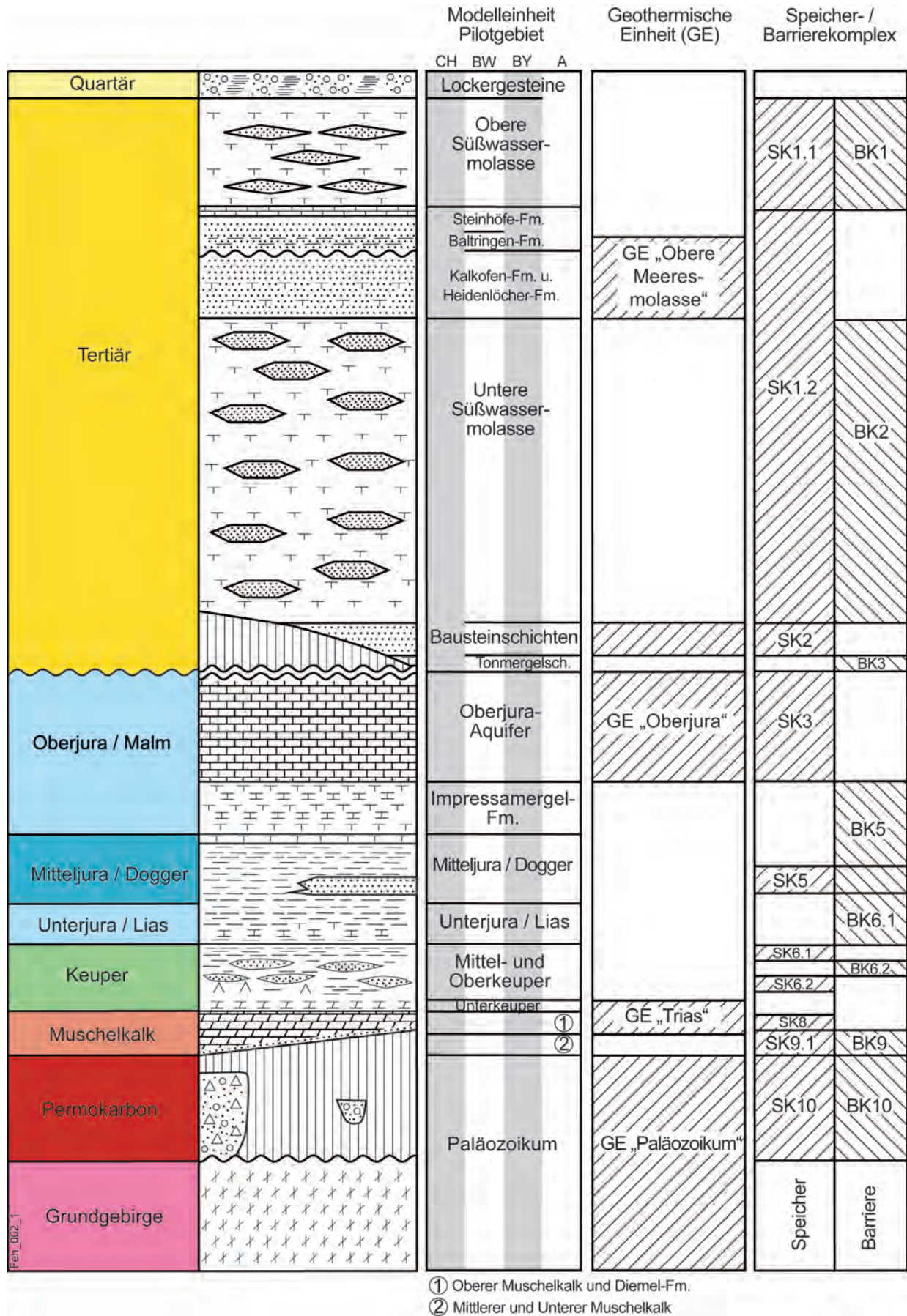


Abb. 7-1: Schichtenfolge im Pilotgebiet mit den modellierten Einheiten des geologischen 3D-Modells, den bearbeiteten geothermischen Einheiten und den Speicher- und Barrieregesteinskomplexen.

Aufgrund solcher Wechselwirkungen können sich Nutzungen grundsätzlich ausschließen. Andere Nutzungen können entweder gleichzeitig oder nacheinander bzw. über- oder nebeneinander stattfinden. Wegen dieser Komplexität können sich die Nutzungsmöglichkeiten innerhalb einer geologischen Einheit von Ort zu Ort unterscheiden. Die vielfältigen Einflussfaktoren (geologische Merkmale, technologische Faktoren, Auswirkungen der Nutzungen) und die großräumige Betrachtungsweise im Projekt GeoMol lassen deshalb nur eine qualitative Abschätzung einzelner Geopotenziale im Pilotgebiet Bodensee-Allgäu zu (theoretisches Potenzial).

Im LCA-Projektgebiet reichen Informationsdichte und -qualität der verfügbaren geowissenschaftlichen Grundlagendaten für eine differenzierte räumliche Bewertung der nutzbaren geothermischen Energie im regionalen Betrachtungsmaßstab nicht aus. In GeoMol wurde deshalb auf der Grundlage des geologischen 3D-Modells und der dreidimensionalen Temperaturverteilung das theoretische geothermische Potenzial des tieferen Untergrundes abgeschätzt. Anhand dieser beiden Kriterien wurden regionale Unterschiede in den Möglichkeiten zur Nutzung dieser Energieform aufgezeigt. Für eine wirtschaftliche Nutzung des geothermischen Potenzials sind darüber hinaus auch Informationen über das Auftreten und die Volumenströme zirkulierender Tiefenwässer sowie über deren Mineralisation von großer Bedeutung. Die Fließsysteme sind in den Festgesteinsaquiferen im Molassebecken überwiegend an Kluft- und Verkarstungsstrukturen gebunden, die heterogen verteilt sind. Die hydraulische Wirksamkeit der Bruchstrukturen hängt im wesentlichen von der strukturgeologischen Gesamtsituation und vom rezenten Spannungsfeld ab. Im regionalen Maßstab liegen keine Informationen über die Rolle der tektonischen Strukturelemente für die Tiefenwasserzirkulation vor.

Modellgestützte Betrachtungen zum großräumigen Strömungssystem tiefer, thermaler Grundwässer im bayerischen und baden-württembergischen Teil des Molassebeckens wurden bereits in den 80er und 90er Jahren des letzten Jahrhunderts angestellt (Kiraly 1990). Die Modellierung von thermischen Prozessen in klüftig-porösen Speichern und in Karstaquiferen wie z. B. dem Oberjura ist auch weiterhin Gegenstand aktueller Entwicklungs- und Forschungsarbeiten. Im zentralen Molassebecken wurden im Großraum München in den letzten Jahren thermisch-hydraulische Modellierungen zur geothermischen Charakterisierung von karstig-klüftigen Aquiferen durchgeführt (Dussel et al. 2011, LIAG 2012). Versuche zur Lokalisierung thermisch aktiver Störungszonen durch den Vergleich eines

rein konduktiven Wärmetransports und in Bohrungen gemessener Temperaturen wurden von Rühak et al. (2010) unternommen. Diese Modellergebnisse werden dahingehend interpretiert, dass die identifizierten Temperaturanomalien auf aufsteigende thermale Wässer entlang von Störungszonen zurückgeführt werden können, die im Kontakt mit dem hoch permeablen Oberjuraaquifer stehen. Eine dieser thermischen Anomalien wird mit der Saugau-Hauptverwerfungszone in räumliche Verbindung gebracht. Die im GeoMol-Projekt erarbeiteten geowissenschaftlichen Datensätze bilden die Grundlage für derartige Modellierungen, um den Kenntnisstand über die tiefreichenden Grundwasserströmungssysteme und den Grundwasserhaushalt wesentlich zu verbessern.

7.1.1 Geothermische Nutzung

Aufgrund seiner bis in große Tiefen und damit in Bereiche hoher Temperaturen reichenden produktiven Aquifere und regional erhöhten Temperaturen (Schellschmidt & Stober 2008, Agemar et al. 2013) wird insbesondere der östliche Teil des Molassebeckens als das bedeutendste Reservoir zur geothermischen Wärme- und Stromerzeugung in Mitteleuropa angesehen (u. a. Paschen et al. 2003). Zur Abschätzung des geothermischen Potenzials wurde deshalb die Region Bodensee-Allgäu im Molassebecken detaillierter untersucht.

Geothermische Energie ist die Energie, die in Form von Wärme unterhalb der Oberfläche der festen Erde gespeichert ist (VDI 2010). Sie kann mit verschiedenen Techniken genutzt werden (vgl. Abb. 7-2). Die Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten oberflächennaher Nutzungsformen wie Erdwärmekollektoren, Zweibrunnensysteme und flache Erdwärmesonden erfordert eine kleinmaßstäbige Betrachtung und war nicht Gegenstand von GeoMol. Detaillierte Informationen hierzu geben z. B. das Informationssystem Oberflächennahe Geothermie Baden-Württemberg (ISONG, <http://isong.lgrb-bw.de/>) sowie die Informationsoffensive Oberflächennahe Geothermie Bayern (IOG, <http://www.lfu.bayern.de/geologie/hydrogeologie/iogi/index.htm>).

Hydrothermale Systeme nutzen die Untergrundwärme durch die Entnahme heißer Fluide (Wasser/Dampf) aus tief liegenden Aquiferen (hauptsächlich geklüftete und/oder poröse Sandsteine oder verkarstete Kalksteine) mit ausreichender Temperatur und Ergiebigkeit. Dabei sind neben zahlreichen anderen Faktoren wie z. B. dem Mineralisationsgrad der Thermalwässer, die die Wirtschaftlichkeit hydrothermalen Systeme beeinflussen können, geklüftete Gebirgsbereiche mit bevorzugten Wegsamkeiten für

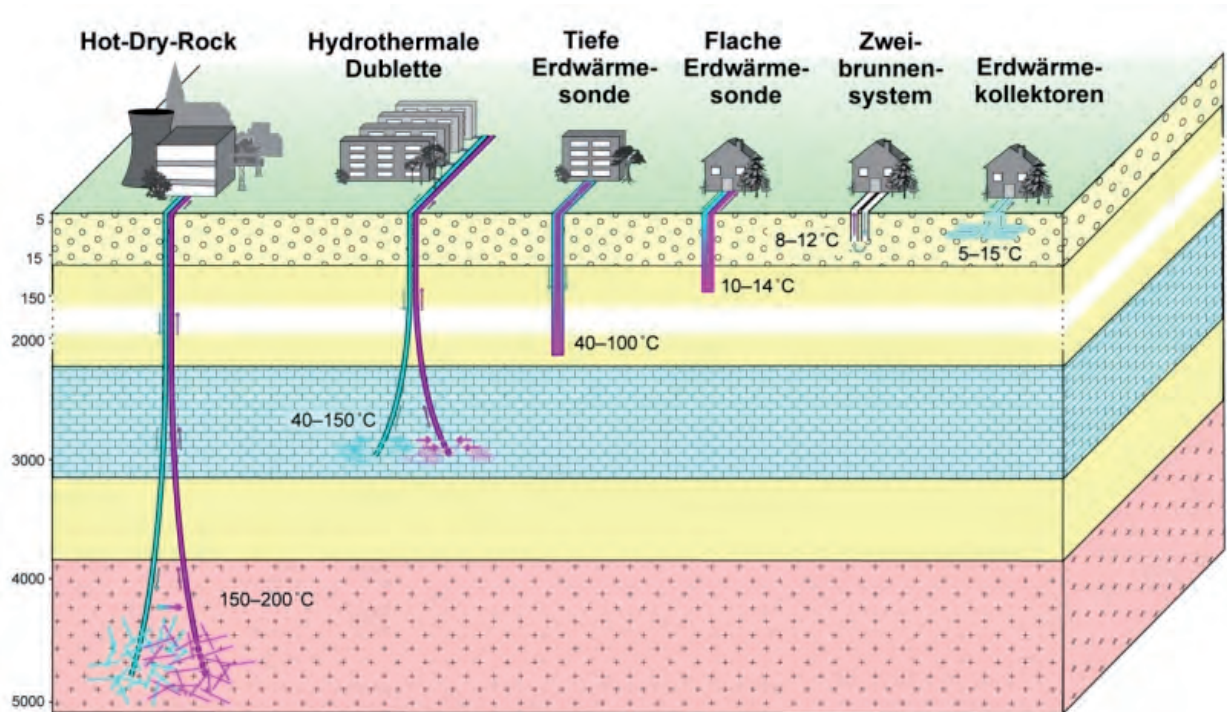


Abb. 7-2: Geothermische Nutzungsformen (<http://www.lfu.bayern.de/geologie/geothermie/index.htm>, abgerufen am 24.09.2015).

heiße, aufsteigende Fluide von besonderer Bedeutung. Störungen sind im Untergrund meist heterogen verteilt. Ihr Auftreten hängt von der Lage des Untersuchungsgebiets im tektonischen Spannungsfeld und der faziellen Ausprägung der Gesteine ab. Darüber hinaus ist die hydraulische Wirksamkeit der Störungszonen für die Ergiebigkeit geothermischer Bohrungen von großer Bedeutung. Da die verfügbare Datenbasis eine verlässliche Vorhersagbarkeit solcher Störungszonen und ihrer hydraulischen Eigenschaften nicht erlaubt, wird diese Gebirgseigenschaft in der vorliegenden Studie bei der Abschätzung des geothermischen Potenzials nicht berücksichtigt. Hierzu sind in einem lokalen bzw. regionalen Betrachtungsmaßstab detaillierte Untersuchungen erforderlich.

Petrothermale Systeme nutzen die geothermische Energie von Gesteinen mit primär niedrigen Permeabilitäten (hauptsächlich Granite und Sandsteine) unabhängig von ihrer Wasserführung. Dabei wird durch Aufweitung bereits bestehender Wegsamkeiten ein Wärmetauscher in der Tiefe geschaffen oder erweitert. Neben dem klassischen Begriff Hot Dry Rock (HDR) werden für diese Nutzungsform auch die Begriffe Deep Heat Mining, Hot Wet Rock oder Stimulated Geothermal System verwendet. Der umfassende Begriff ist Enhanced Geothermal Systems (EGS), der aber auch stimulierte hydrothermale Systeme beinhaltet. Das klassische HDR-Verfahren hat Hochtemperatur-Nutzungen mit Temperaturen von mehr als 150–200°C sowie

Tiefen von mehr als 3.000m zum Ziel. Zielhorizont ist meistens das kristalline Grundgebirge. Inwieweit dichte Sedimentgesteine mit der EGS-Technik genutzt werden können, ist Gegenstand der Forschung und von Pilotprojekten (z.B. Bujakowski et al. 2015).

Mitteltiefe bis tiefe Erdwärmesonden (MTEWS) nutzen dieselbe Technik wie flache Erdwärmesonden. Sie sind zwischen 400 und 3.000m tief. Tiefe Erdwärmesonden können ausreichend hohe Temperaturen zur direkten Wärmenutzung liefern, bei weniger tiefen Erdwärmesonden muss die aus dem Erdreich bereit gestellte Temperatur mittels Wärmepumpen auf ein höheres Temperaturniveau (mindestens 40°C, meist 60°C) angehoben werden. Das geothermische Potenzial der MTEWS-Geothermie wurde in einer Fallstudie für den badenwürttembergischen Teil des LCA-Pilotgebiets näher untersucht (vgl. Kap. 6).

7.1.2 Untergrundspeicherung

Bei der Untergrundspeicherung werden Fluide (z. B. Rohöl, Mineralölprodukte) oder Gase (Erdgas/E-Methan, Flüssiggas, Druckluft, Wasserstoff) zyklisch im Untergrund ein- und ausgespeichert. Für Erdgas und E-Methan (Methan aus erneuerbaren Quellen) dienen als Speichermöglichkeit tiefe Aquifere oder ehemalige KW-Lagerstätten (beides Porenspeicher), Salzkavernen und

ehemalige Bergwerke. Rohöl, Mineralölprodukte und Flüssiggas können in künstlich gesalzenen Kavernenspeichern bzw. in ehemaligen Bergwerken gespeichert werden.

Für eine Erdgasspeicherung nutzbare Schichten müssen über ein ausreichend großes und speicherwirksames Hohlraumvolumen verfügen. Zusätzlich müssen sie von einer abdichtenden Schicht überlagert werden. Grundsätzlich kommen für eine Gasspeicherung alle geologischen Einheiten in Frage, die sich auch für die Einlagerung von CO₂ eignen (vgl. Kap. 7.1.3). Der wirtschaftlich nutzbare Speicherraum zur Speicherung von Erdgas und E-Methan in ehemaligen KW-Lagerstätten und in tiefen Aquiferen liegt in einer Tiefe zwischen 400 und 3.000 m unter Gelände.

7.1.3 Kohlendioxidverpressung

Im Gegensatz zur Untergrundspeicherung mit zyklischer Stoffzufuhr und -entnahme (vgl. Kap. 7.1.2) wird bei der Kohlendioxidverpressung CO₂ zum Klimaschutz dauerhaft in den Untergrund verbracht. Geeignete Zielhorizonte sind ehemalige Kohlenwasserstoff-Lagerstätten sowie tiefe saline Aquifere.

Unterirdische Speichersysteme werden von einem Speichergestein und einer überlagernden Barriere gebildet. Im Rahmen einer bundesweiten Studie zu den Speicherpotenzialen im tieferen Untergrund Deutschlands (Reinhold & Müller 2011) wurden u. a. für den bayerischen und baden-württembergischen Teil des voralpinen Molassebeckens untersuchungswürdige Bereiche für die Speicherung von Gasen ausgeschieden. Als Auswahlkriterien dienten hierbei zwei grundlegende geologische und geotechnische Anforderungen (vgl. hierzu IPCC 2005, Chadwick et al. 2008, Diamond et al. 2010, Reinhold und Müller 2011, GeORG-Projektteam 2013 a, c):

- Der Speicherhorizont muss über eine ausreichende Speicherkapazität (Aufnahmefähigkeit) verfügen. Als Kriterien für die Klassifizierung der Speicherkomplexe wurde eine Gesamtmächtigkeit der untersuchungswürdigen Speichergesteine (Nettomächtigkeit) über 10 m und eine Tiefenlage der Oberfläche von mehr als 800 m unter Gelände festgelegt.
- Über dem Speicherhorizont muss ein Barrierehorizont mit einer sicheren, langzeitwirksamen Abdichtung und Festigkeit gegenüber dem zulässigen Lagerstättendruck vorhanden sein. Als Kriterien für die Klassifizierung der Barriere-

komplexe wurde eine Mächtigkeit über 20 m und eine Tiefenlage der Basis von mehr als 800 m unter Gelände festgelegt.

Für eine weitergehende Bewertung der Eignung des tieferen Untergrundes zur Kohlendioxidverpressung sind zahlreiche weitere geowissenschaftliche und technologische Kriterien von Bedeutung (u. a. Chadwick et al. 2008, Diamond et al. 2010).

7.1.4 Gewinnung von Kohlenwasserstoffen

Kohlenwasserstoffe (Erdöl und Erdgas) migrieren aus organisch reichen Muttergesteinen in Reservoir (poröse Sandsteine oder poröse bis klüftige Karbonatgesteine) und sammeln sich dort dauerhaft in Fallenstrukturen. Erschließungen erfolgen über Bohrungen in diese Fallenstrukturen. Mit der derzeitigen Abbautechnologie werden Tiefen bis 5.000 m erreicht (PK Nutzung tieferer Untergrund 2015).

7.2 Frühere und bestehende Nutzungen

Im Pilotgebiet Bodensee-Allgäu wurden bzw. werden folgende Geopotenziale des tieferen Untergrundes genutzt.

7.2.1 Geothermie

Die Untergrundtemperaturen sind im Pilotgebiet bereichsweise erhöht. Wegen der besonderen geologischen Strukturen im Molassebecken, mit insbesondere im bayerischen Teil des LCA-Gebiets bis in große Tiefen reichenden produktiven Aquiferen, ist oftmals auch der durchschnittliche geothermische Tiefengradient für eine wirtschaftliche Erschließung der Erdwärme ausreichend. Deshalb stellt die geothermische Nutzung das bedeutendste Nutzungspotenzial im LCA-Gebiet dar. Sie erfolgt derzeit ausschließlich durch die Erschließung tiefer thermaler Grundwässer über Brunnen. Thermalwasser ist ein Grundwasser, dessen natürliche Temperatur beim Austritt aus der Lithosphäre mindestens 20°C beträgt (DIN 4049-3).

Besonders im baden-württembergischen Bereich des Pilotgebiets werden Grundwässer mit >20 °C für den Betrieb von Thermalbädern zu balneologischen Zwecken genutzt, häufig mit einer Nebenutzung für die Gebäudebeheizung (vgl. Tab. 7-1). Abbildung 7-3 zeigt die Lage der Standorte tiefengeothermischer Nutzungen im Pilotgebiet. Einige



Tab. 7-1: Standorte tiefengeothermischer Nutzung im Pilotgebiet (ohne Schweizer Teil).

Standort	Temperatur [°C]	Betrieb	Nutzung (Nebennutzung)	genutzter Aquifer
Bad Waldsee 2	69	in Betrieb	Balneologie (Gebäudebeheizung)	Oberjura (Malm)
Bad Waldsee 1	31	in Betrieb	Balneologie (Gebäudebeheizung)	Obere Meeresmolasse
Aulendorf	54	in Betrieb	Balneologie (Gebäudebeheizung)	Oberjura (Malm)
Bad Wurzach	33,7	in Betrieb	Balneologie (Gebäudebeheizung)	Obere Meeresmolasse
Friedrichshafen 1	30,2	in Betrieb	Balneologie (Gebäudebeheizung)	Obere Meeresmolasse
Kißlegg, Ottotherme	31,2	in Betrieb	Balneologie (Gebäudebeheizung)	Obere Meeresmolasse
Konstanz, Bodensee-Therme	26	in Betrieb	Balneologie	Obere Meeresmolasse
Meersburg	26	in Betrieb	Balneologie (Gebäudebeheizung)	Obere Meeresmolasse
Saulgau TB I, TB II	40,9	in Betrieb	Balneologie (Gebäudebeheizung)	Oberjura (Malm)
Überlingen, Bodensee-Therme	36	in Betrieb	Balneologie (Gebäudebeheizung)	Oberjura (Malm)
Bedernau/Breitenbrunn	28 ¹⁾	in Betrieb	Balneologie	Obere Meeresmolasse
Bad Wörishofen Gt 1	37 ¹⁾	in Betrieb	Balneologie	Obere Meeresmolasse
Bad Wörishofen Gt 2	98 ¹⁾	in Betrieb	Balneologie (Gebäudebeheizung)	Oberjura (Malm)
Mauerstetten	ca. 132 ²⁾	in Ausbau	Stromerzeugung, Wärmenutzung	Oberjura (Malm)
¹⁾ Auslauftemperatur, ²⁾ Basis Malm, thermisch gestörte Bohrlochtemperatur				

Thermalwasservorkommen haben auch den Status von Heilquellen (vgl. Kap. 7.2.2).

Für balneologische Zwecke werden tiefe Grundwässer im baden-württembergischen Teil des Pilotgebiets in Bad Saulgau, Aulendorf, Bad Waldsee, Bad Wurzach, Kißlegg, Bad Buchau, Friedrichshafen und Meersburg; im bayerischen Teil in Bedernau/Breitenbrunn und in Bad Wörishofen genutzt. Daneben werden tiefe Grundwässer in Baden-Württemberg auch für die direkte Wärmenutzung verwendet.

Offene Systeme, in denen über einen Entnahmehauptbrunnen heißes Grundwasser aus tief liegenden Aquiferen entnommen wird, werden meist zur direkten Bereitstellung von Wärme genutzt, sofern die Temperaturen zwischen 60 °C und 100 °C liegen. Das größte Potenzial für solche Systeme liegt in den Karbonatgesteinen des Oberjura.

Anlagen zur Stromerzeugung gibt es im LCA-Pilotgebiet bisher nicht. Eine entsprechende Nutzung ist

wegen der hohen Temperaturen für das Geothermieprojekt Mauerstetten vorgesehen (vgl. Tab. 7-1).

7.2.2 Mineral- und Heilwasser

Tiefe Grundwässer werden auch als Mineral- und Heilwässer genutzt.

„**Natürliches Mineralwasser**“ im Sinne des Artikels 5 der Richtlinie 2009/54/EG vom 18. Juni 2009 ist ein mikrobiologisch einwandfreies Wasser, das seinen Ursprung in einem unterirdischen Quell- und/oder Grundwasservorkommen hat und aus einer oder mehreren natürlichen oder künstlich erschlossenen Quellen gewonnen wird. Es unterscheidet sich von gewöhnlichem Trinkwasser deutlich durch seine Eigenart, die durch seinen Gehalt an Mineralien, Spurenelementen oder sonstigen Bestandteilen und gegebenenfalls durch bestimmte Wirkungen gekennzeichnet sind, sowie durch seine ursprüngliche Reinheit. Die Mineral- und Tafelwasserordnung (Min/TafelWV i. d. F. vom 1.12.2006)

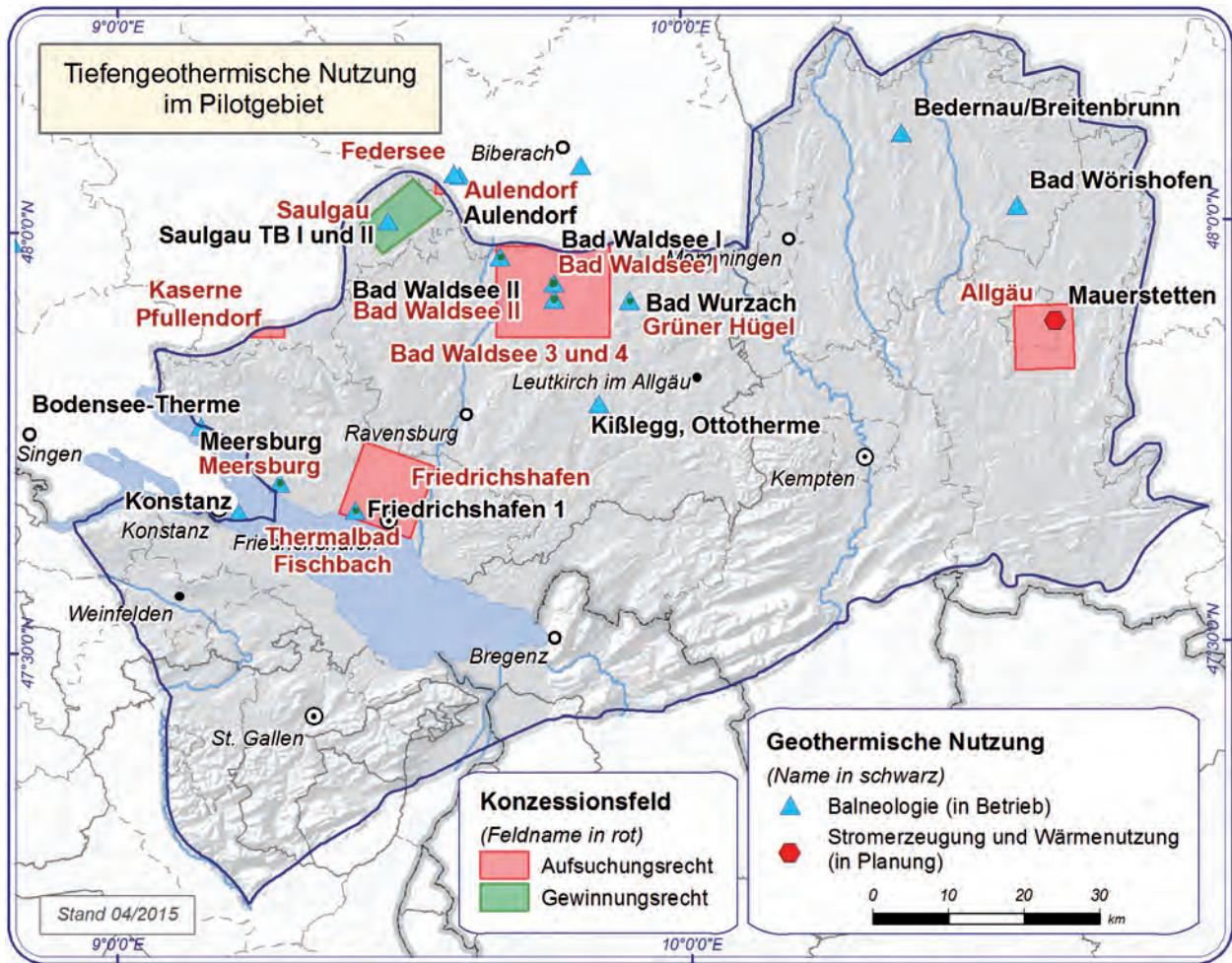


Abb. 7-3: Lage der tiefengeothermischen Nutzungen im Pilotgebiet (in Betrieb bzw. geplant) mit Konzessionsfeldern (Nutzungen im Schweizer Teil nicht dargestellt).

legt fest, welches Wasser als natürliches Mineralwasser bezeichnet werden darf. **Heilwasser** ist ein Mineralwasser, das durch staatliche Anerkennung die allgemeinen Bedingungen des Arzneimittelgesetzes erfüllt.

Abbildung 7-4 zeigt die Standorte der Mineral- und Heilwassernutzung im Pilotgebiet. Genutzte Aquifere sind hierbei das Quartär, die Obere Süßwassermolasse, die Obere Meeresmolasse und der Oberjura.

7.2.3 Erdgasspeicher

Im Pilotgebiet wird Erdgas derzeit nur im Gasspeicher Fronhofen-Illmensee (Baden-Württemberg) eingespeichert (vgl. Abb. 7-5). Der Speicher befindet sich im gleichnamigen ehemaligen KW-Feld. Als Speicher wird die Rottweil-Formation (Trigonodusdolomit) des Oberen Muschelkalk in einer Tiefe von ca. 1.900m unter Gelände verwendet. Eigentümer und Betreiber der Anlage ist die Gaz de France

Produktion Exploration Deutschland (ehemals Preussag Energie GmbH) für die Gasversorgung Süddeutschland GmbH. Der Speicher wird für die Abfederung von Spitzenlasten in den Wintermonaten eingesetzt.

7.2.4 Kohlenwasserstoffe

Zu Beginn der Kohlenwasserstoffexploration in den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts waren im Molassebecken die Hauptzielhorizonte der Erdöl- und Erdgasprospektion die porösen Sandsteine der Oberen Süßwassermolasse und der Unteren Meeresmolasse, des Unteren und Mittleren Jura und des Keuper (Exter-Formation, Rhät). In den 1960er bis 80er Jahren konzentrierte sich die Suche auf die tiefer liegenden triassischen Karbonate der Rottweil-Formation (Trigonodusdolomit) des Oberen Muschelkalk. Die meisten der ehemals ausgebeuteten Öl- und Gasfelder sind an NE-SW verlaufende, nach Norden einfallende Antitheter gebunden. Aufgrund ihrer Öl- und Gasführung sind

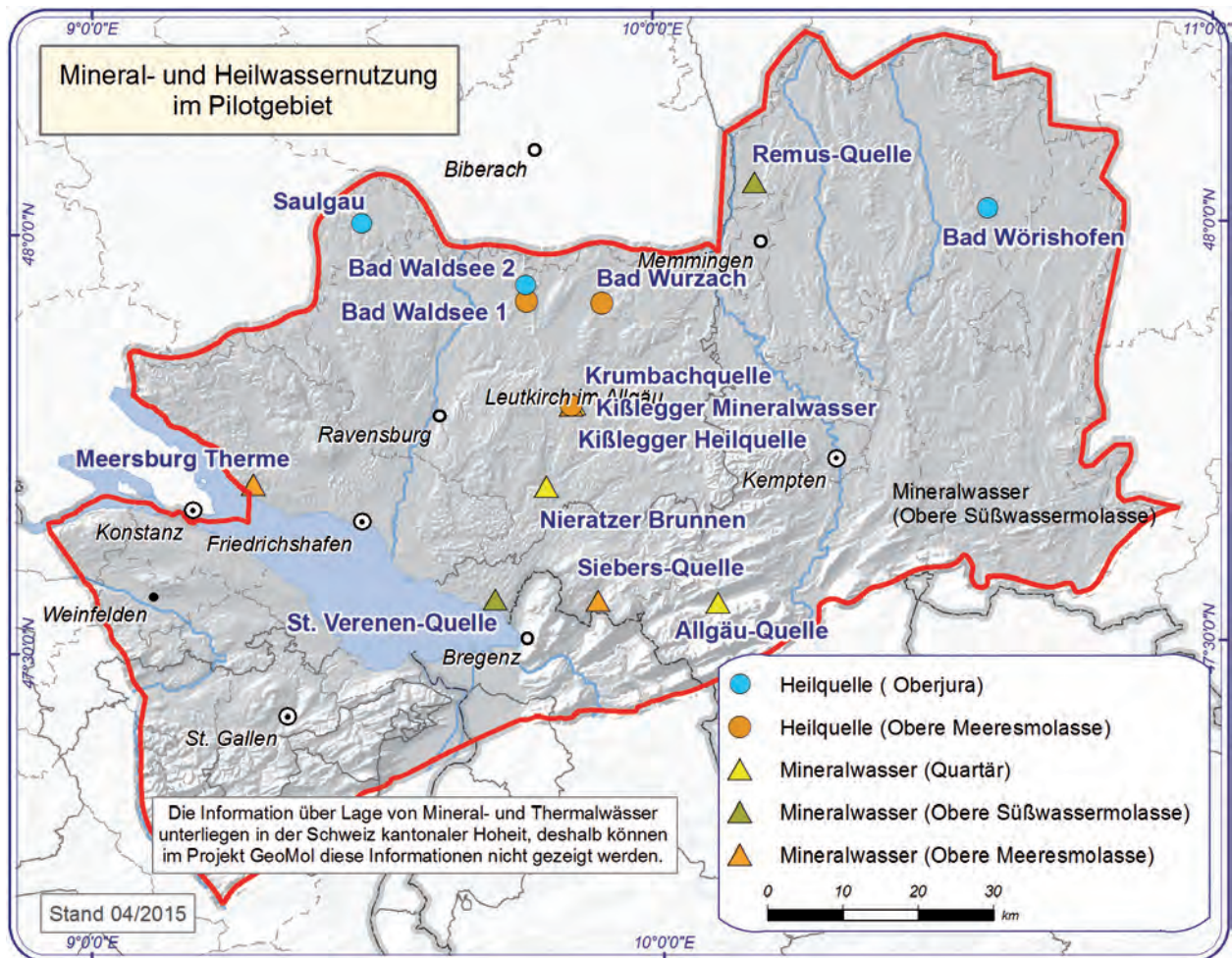


Abb. 7-4: Lage der Mineral- und Heilwassernutzungen im Pilotgebiet (Nutzungen im Schweizer Teil nicht dargestellt).

die bedeutendsten Strukturen in Baden-Württemberg die Saulgau-Hauptverwerfungszone und das Meersburg-Schwabmünster-Lineament.

Im baden-württembergischen Teil des Pilotgebiets gibt es eine Anzahl von kleineren Konzessionsfeldern, vor allem im ehemaligen KW-Feld der Illmensee-Fronhofen-Aulendorf-Störungszone sowie nördlich von Leutkirch im Allgäu (vgl. Abb. 7-5). Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung wurden dort keine Kohlenwasserstoffe gefördert.

Im bayerischen Teil des Pilotgebiets wurde aufgrund der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen die letzte Förderung (Feld Arlesried) Mitte der 1990er Jahre eingestellt. Da in diesem Feld noch Vorräte nachgewiesen sind, wurde zwischenzeitlich eine neue bergrechtliche Bewilligung (Gewinnungsrecht) unter der Bezeichnung „Rieden“ erteilt. Im Jahre 2009 wurde eine erste Bohrung abgeteuft, die die Lagerstätte verwässert antraf. Eine zweite Bohrung wurde im Jahre 2014 niedergebracht. Es steht aber derzeit noch nicht fest, ob sie in Produktion genommen wird.

Auch in den beiden Aufsuchungserlaubnissen zu gewerblichen Zwecken (Feld Mindelheim und Schwaben) liegt der Fokus auf der Wiedererschließung alter Felder bzw. auf der Ausweitung einer bestehenden Öl-Förderung (außerhalb des Pilotgebiets in den Feldern Aitingen und Schwabmünchen). Im Feld Mindelheim wurde 2011 eine 3D-Seismik durchgeführt. Eine erste Bohrung im Bereich des Felds Lauben, das in den 1980er Jahren aufgrund der niedrigen Ölpreise aufgegeben worden war, wurde 2014 abgeteuft. Über eine mögliche Wiederaufnahme der Produktion ist derzeit noch nicht entschieden.

Der bayerische Anteil des Pilotgebiets wird weiterhin von Teilen zweier Erlaubnisse zur großräumigen Aufsuchung überdeckt (Felder Schwaben-Süd und Schongau). Diese Erlaubnisse ermöglichen aber nur Grundlagenuntersuchungen und seismische Messungen, nicht jedoch das Niederbringen von Bohrungen. Eine Überschneidung mit gewerblichen Erlaubnissen (hier: Mindelheim) ist zulässig.

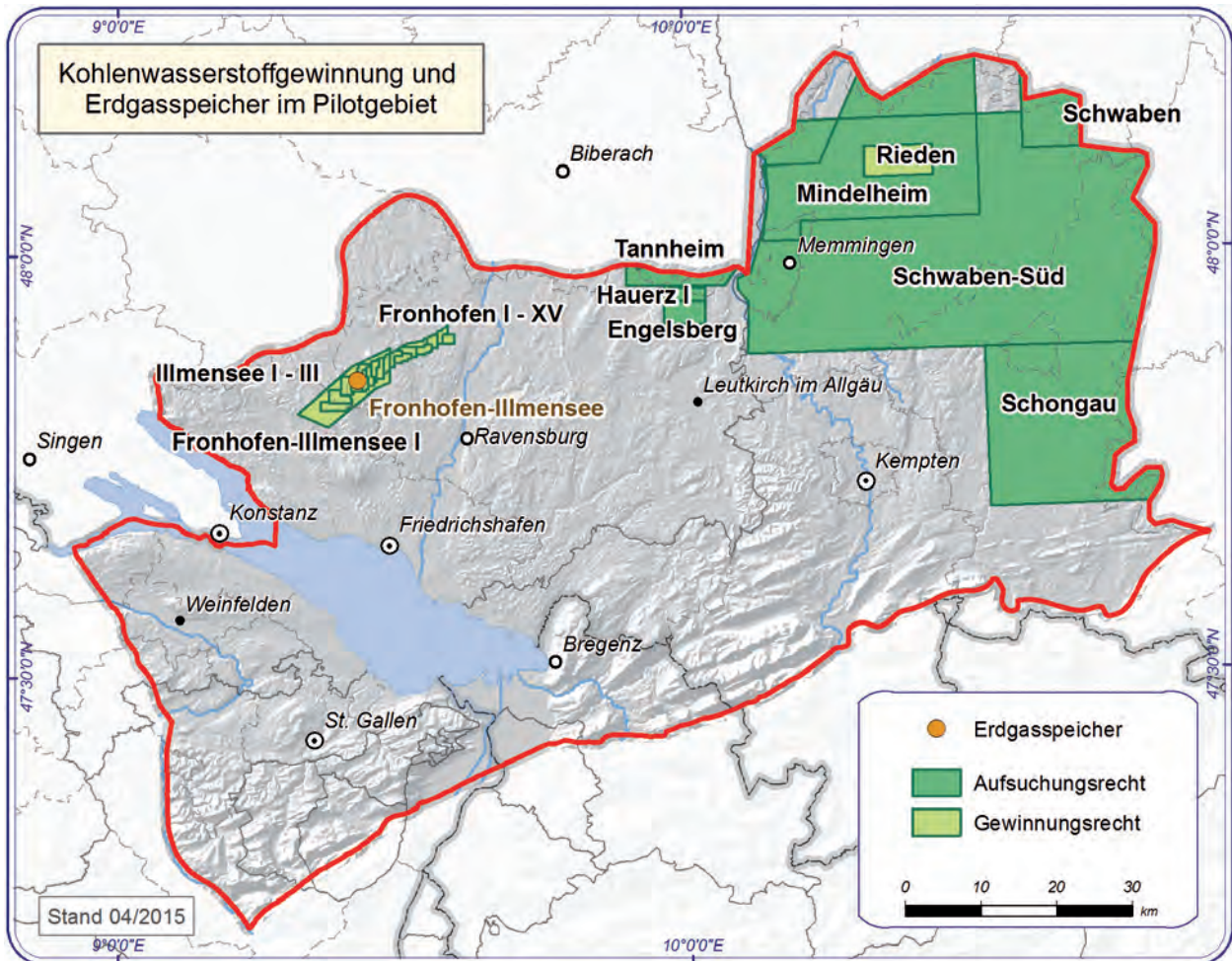


Abb. 7-5: Lage der Kohlenwasserstoff-Konzessionsfelder und Erdgasspeicher im Pilotgebiet.

Zielhorizonte der Exploration sind im Norden Speichergesteine aus dem Tertiär (Bausteinschichten) und dem Jura (Dogger und Malm) sowie im Süden Speichergesteine im basalen Tertiär.

7.3 Geothermisches Potenzial im Pilotgebiet

Zur Abschätzung des geothermischen Potenzials im Pilotgebiet dienen die Ergebnisse der geologischen 3D-Modellierung (vgl. Kap. 4) sowie der Modellierung der Temperaturen im Untergrund (vgl. Kap. 5). Die Ergebnisse der Temperaturmodellierung wurden – z. T. in Kombination mit den Geometrien des geologischen 3D-Modells – in fünf Karthemen umgesetzt:

- Temperatur in einer bestimmten Tiefenlage unter Gelände
- Potenzialabschätzung für geothermische Nutzungen auf Grundlage der Temperatur in einer bestimmten Tiefenlage unter Gelände

- Tiefenlage ausgewählter Flächen gleicher Temperatur (Isothermen)
- Temperaturverteilung an der Oberfläche ausgewählter geothermischer Einheiten
- Potenzialabschätzung für geothermische Nutzungen auf Grundlage der Temperaturverteilung an der Oberfläche ausgewählter geothermischer Einheiten

Unter „geothermischen Einheiten“ werden hier geologische Einheiten zusammengefasst, die bevorzugt durch hydrothermale oder petrothermale Systeme genutzt werden können (vgl. Kap. 7.1.1). Aufgrund der lithologischen Eigenschaften bzw. der grundsätzlichen Möglichkeit der Ausbildung eines durchflusswirksamen Trennflächengefüges lassen hydrogeothermische Nutzhorizonte ein hohes geothermisches Potenzial erwarten. Es handelt sich im Pilotgebiet hierbei vorrangig um die Obere Meeresmolasse, um den höheren Oberjura und um den Oberen Muschelkalk. Daneben können erhöhte Wegsamkeiten auch im häufig alterierten und geklüfteten oberen Abschnitt des kristallinen



Grundgebirges auftreten. Das Kristallin eignet sich grundsätzlich als geothermische Einheit für eine petrothermale Nutzung.

Die Untergrundtemperaturen wurden hinsichtlich der Nutzungsmöglichkeiten klassifiziert. In Abhängigkeit von der Temperatur kann die geothermische Energie für verschiedene Zwecke genutzt werden. Folgende Nutzungsarten werden unterschieden:

Balneologische Nutzung

Grundwässer mit Temperaturen über 20 °C können für balneologische Anwendungen genutzt werden. Die meisten Thermalwässer haben Temperaturen bis zu ca. 60 °C, wenngleich auch einige Vorkommen in Europa deutlich höhere Temperaturen aufweisen (z. B. Aachen: 74 °C, Baden-Baden bis 69 °C, Wiesbaden: 66 °C).

Wärmeversorgung

Die Wärmeversorgung ist derzeit in Deutschland die wichtigste Anwendung von Geothermie. Sie wird überwiegend zur Raumwärmeerzeugung und zur Warmwasseraufbereitung genutzt. Für die direkte Wärmenutzung in Nah- und Fernwärmenetzen eignen sich niedrigthermale Tiefenwässer mit Temperaturen zwischen 40 und 120 °C. Dabei gibt das Thermalwasser einen wesentlichen Teil seiner Wärmeenergie über einen Wärmetauscher direkt an einen zweiten, „sekundären“ Heiznetzkreislauf ab. Liegt die Temperatur des geförderten Thermalwassers unter 40 °C, reicht das Temperaturniveau i. d. R. nicht zur direkten Nutzung aus. Zur Erhöhung der Vorlauftemperatur wird dann das Temperaturniveau mit Hilfe einer Wärmepumpe auf eine Temperatur von meist über 40 °C angehoben.

Stromerzeugung

Bei ausreichend hoher Temperatur (über ca. 80 °C) und Ergiebigkeit ist die technische Möglichkeit der Stromerzeugung grundsätzlich gegeben. Dabei ist eine Nutzung in Kraft-Wärme-Kopplung aus ökologischer und ökonomischer Sicht von Vorteil. Hierbei wird der Stromerzeugung eine geothermische Heizzentrale nachgeschaltet.

Für die Stromerzeugung können sowohl hydrothermale Systeme mit hoher Enthalpie (hoher Druck, hohe Temperatur) als auch petrothermale Systeme genutzt werden.

Als Verfahrenstechniken zur Stromerzeugung kommen der Rankine-Prozess mit organischen Arbeitsstoffen (Organic Rankine Cycle, ORC) und der Kalina-Prozess in Frage. Das ORC-Verfahren kann bereits bei Thermalwassertemperaturen von 80 °C eingesetzt werden, ist jedoch in der Regel erst bei Temperaturen deutlich über 100 °C wirtschaftlich.

Ein bedeutender Vorteil des Kalina-Verfahrens gegenüber ORC-Anlagen ist der höhere thermodynamische Wirkungsgrad und die damit verbundene höhere Stromausbeute, insbesondere bei niedrigen Vorlauftemperaturen (< 140 °C). Das Kalina-Cycle-Verfahren kann daher bereits ab 100 °C wirtschaftlich zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Kalina-Anlagen stehen jedoch noch im Anfangsstadium der Entwicklung.

Bei der durchgeführten Potenzialabschätzung ist zu beachten, dass diese rein auf der Grundlage der Temperaturen erfolgt, die im Untergrund zu erwarten sind. Im Untergrund zirkulierende Fluide gehen nicht in die Potenzialbetrachtung ein. Die Untergrundtemperaturen können deutlich über den Thermalwassertemperaturen liegen, die beim Betrieb der geothermischen Anlage an der Erdoberfläche anliegen. Diese hängen u. a. vom Bohrlochausbau und dem Betriebsszenario der jeweiligen Nutzung ab.

In den Kartendarstellungen zur geothermischen Potenzialabschätzung wurden die Untergrundtemperaturen nach ihren Hauptnutzungsarten wie folgt klassifiziert (vgl. Abb. 7-7 und 7-10):

≤ 40 °C	balneologische Nutzung und indirekte Wärmeversorgung (Wärmepumpe)
> 40–60 °C	balneologische Nutzung und Wärmegewinnung (überwiegend Wärmepumpen, Wärmetauscher)
> 60–100 °C	direkte Heizwärmegewinnung (Wärmetauscher) <i>Hinweis: Stromerzeugung im Organic Rankine Verfahren (ORC) ab 80 °C technisch grundsätzlich möglich</i>
> 100–120 °C	direkte Heizwärmegewinnung (Wärmetauscher) und Stromerzeugung (mittels Kalina-Prozess, eingeschränkt auch ORC)
> 120–150 °C	Stromerzeugung (mittels Kalina-Prozess oder ORC)
> 150 °C	sehr hohes Potenzial für Stromerzeugung

Daneben gibt es noch eine Reihe weiterer Anwendungen thermaler Wässer. Diese werden u. a. im so genannten Lyndal-Diagramm aufgeführt, das die Anwendungsbereiche in Abhängigkeit von der Thermalwassertemperatur aufzeigt (Gudmundsson 1985). Hierzu zählen u. a. industrielle Prozesse, landwirtschaftliche Nutzungen sowie Nutzungen

zur Regeneration von Wärmequellen, Frostfreihaltung oder Kühlung. Eine Übersicht über die Nutzt-temperaturniveaus (außer zur Stromerzeugung) mit Angaben zu den Nutzt-temperaturklassen und zu den Wärmeverbrauchern wurde im Rahmen der Studie zur Nutzung der Mitteltiefen Erdwärmesonden-Geothermie im LCA-Gebiet erstellt (HBC 2014, vgl. Kap. 6).

Die abgeleiteten Kartenthemen sind im Kartenviewer visualisiert (vgl. Kap. 8) und werden in den folgenden Kapiteln an Beispielen vorgestellt.

7.3.1 Temperaturen in verschiedenen Tiefen und Abschätzung des geothermischen Nutzungspotenzials auf Grundlage der Temperaturen

Aus dem geostatistischen Temperaturmodell wurde die Temperaturverteilung in den Tiefen 500, 1.000, 1.500, 2.000, 3.000 und 4.000 m unter Gelände (letztere nur für den bayerischen Teil des Pilotgebiets) abgeleitet und kartenmäßig dargestellt (vgl. auch Kartenviewer). Daneben wurden in den Karten die Stützstellen, die der Temperaturmodellierung in der jeweiligen Tiefenstufe zugrunde liegen, dargestellt. Aufgrund der mit der Tiefe stark abnehmenden Anzahl an Stützstellen nimmt die Unsicherheit der modellierten Temperaturen mit zunehmender Tiefe zu (insbesondere ab ca. 2.000 m unter Gelände, vgl. Kap. 5.4.4). Die Methodik zu Erstellung des Temperaturmodells ist in Kapitel 5 beschrieben.

In allen Tiefenstufen zeichnet sich ein ähnliches generelles Verteilungsmuster mit den jeweils höchsten Temperaturen entlang des nördlichen Modellrandes und abnehmenden Temperaturen in Richtung des südlichen Modellrandes ab (z. B. Abb. 7-6). Der überregionale Temperaturtrend kommt auch im Verteilungsmuster der Temperaturgradienten zum Ausdruck (vgl. Abb. 5-11), der von 4,8 K/100 m im äußersten Norden auf 2,8 K/100 m im äußersten

Südosten des LCA-Gebiets abnimmt. Die Ursache für diesen großräumigen Temperaturtrend liegt in der nach Süden abtauchenden Mohorovičić-Diskontinuität als der Grenzfläche zwischen der Erdkruste und dem Erdmantel und der damit einhergehenden Krustenverdickung im Bereich des alpinen Deckenstapels (vgl. auch Kap. 5). Die kleinräumigeren regionalen Temperaturvariationen sind auf den so genannten Topographieeffekt zurückzuführen, der bedingt, dass die Temperaturgradienten unter Tallagen höher sind als unter Hochlagen (vgl. Kap. 5.3.). Dieser überregionale Trend wird von kleinräumigeren, regionalen Temperaturvariationen überlagert.

In Tabelle 7-2 sind als Ergebnis der Temperaturmodellierung die niedrigsten und höchsten Untergrundtemperaturen in den betrachteten Tiefenstufen im Pilotgebiet (außer Schweizer Teil) zusammenfassend dargestellt. Abbildung 7-6 zeigt beispielhaft die Temperaturverteilung in 1.500 m unter Gelände, die Belegpunkte für diese Tiefenstufe aus dem Temperaturmodell sowie das Störungsmuster aus dem geologischen 3D-Modell. Die Temperaturen reichen von ca. 35 °C im Südosten bis maximal 80 °C im Nordwesten. Die höchsten Temperaturen werden im Bereich nördlich der Linie Friedrichshafen-Ravensburg erreicht. Durch den nach Süden abnehmenden Temperaturgradienten (vgl. Kap. 5.4.2) nimmt die Untergrundtemperatur zum Alpenrand hin ab.

Im Gegensatz zu früher durchgeführten Modellierungen der Untergrundtemperaturen (Schellschmidt & Stober 2008) konnte im vorliegenden Temperaturmodell der Topographieeffekt berücksichtigt werden. Er führt in Gebieten mit ausgeprägtem Oberflächenrelief zu lokal variierenden Temperaturunterschieden bis in größeren Tiefen. In Baden-Württemberg beträgt dieser Temperaturunterschied bei den dort vorliegenden Höhenunterschieden nur wenige Kelvin, im südlichen bayerischen Teil des LCA-Gebiets kann er auf kurzer Distanz bis zu 8 K betragen.

Tab. 7-2: Niedrigste (Min. Temp.) und höchste (Max. Temp.) Untergrundtemperaturen [°C] in verschiedenen Tiefen des Pilotgebiets (außer Schweizer Teil).

Tiefe [m u. Gelände]	Österreich		Baden-Württemberg		Bayern	
	Min. Temp. [°C]	Max. Temp. [°C]	Min. Temp. [°C]	Max. Temp. [°C]	Min. Temp. [°C]	Max. Temp. [°C]
500	14	30	19	36	11	34
1.000	26	46	33	59	23	49
1.500	39	62	47	80	35	69
2.000	53	79	61	102	48	89
3.000	77	111	90	132	72	128
4.000 (nur BY)	-	-	-	-	93	167

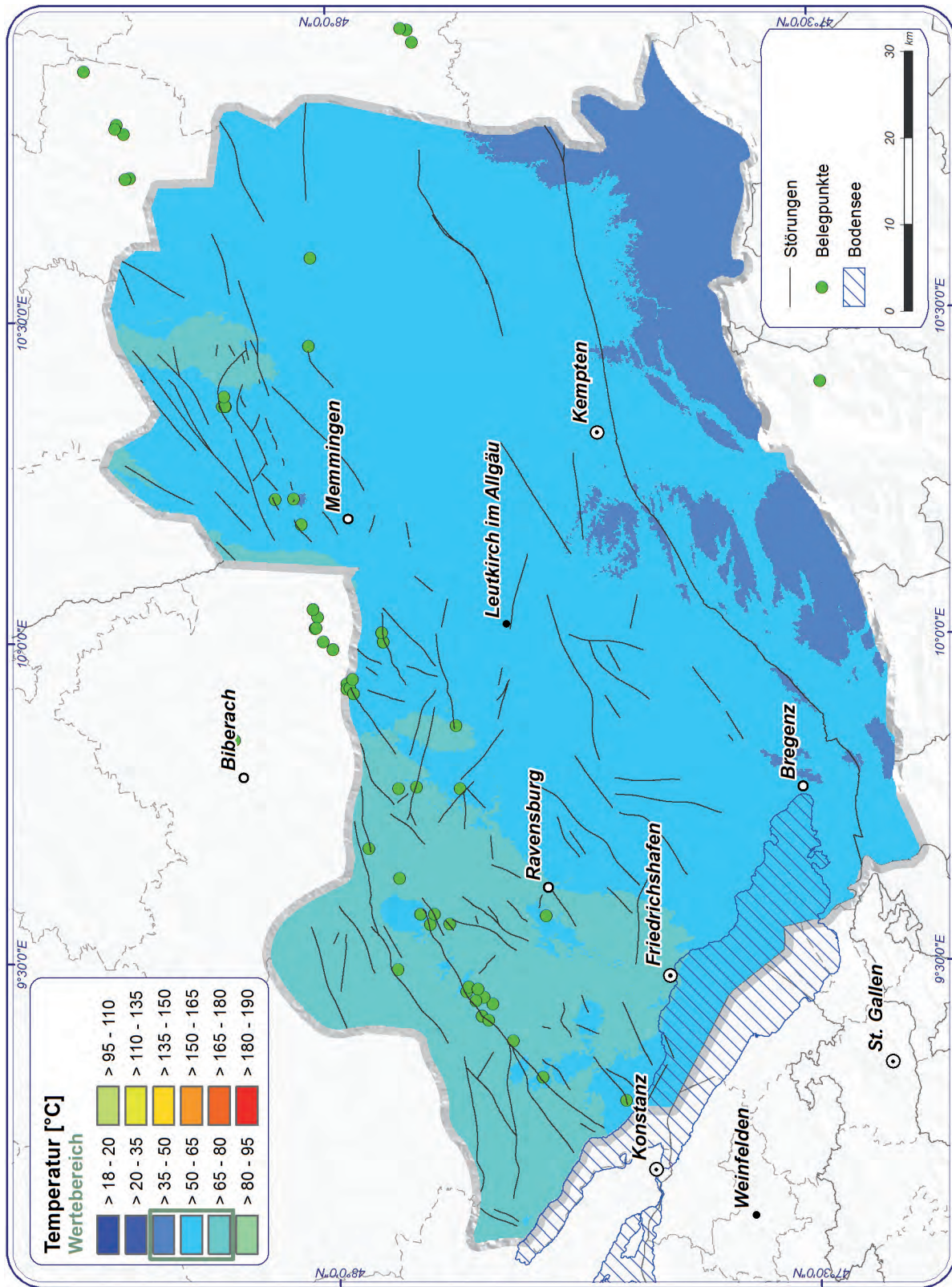


Abb. 7-6: Temperatur in 1.500 m unter Gelände.

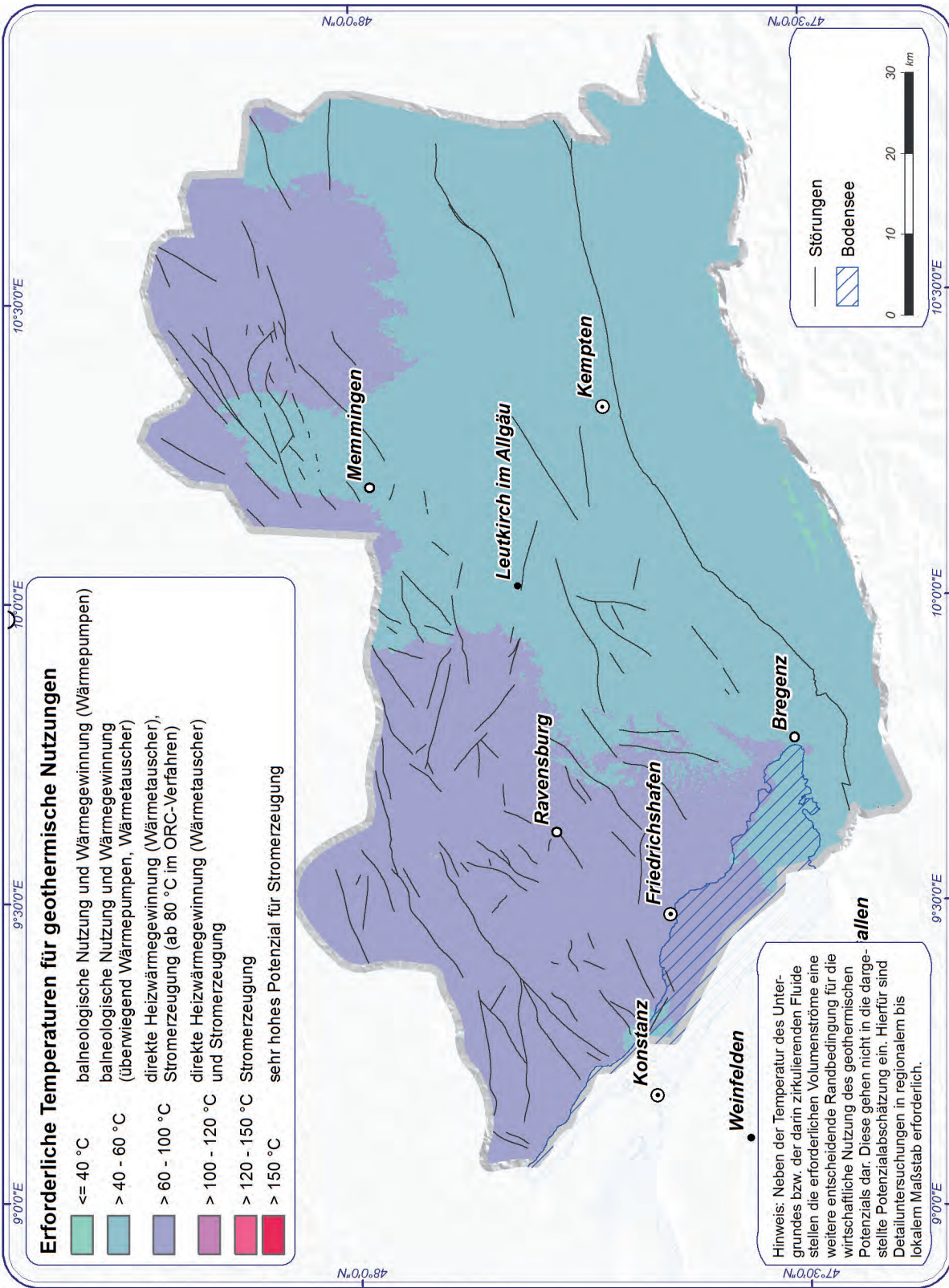


Abb. 7-7: Potenzialabschätzung für geothermische Nutzungen auf Grundlage der Temperatur in 1.500 m unter Gelände.



In der größten betrachteten Tiefe bei 4.000m unter Gelände reichen die Temperaturen im Untergrund des bayerischen Teils des Pilotgebiets bis maximal 167°C.

In 1.000m Tiefe liegen die Temperaturen flächendeckend über 20°C, sodass theoretisch überall eine balneologische Nutzung möglich ist (vgl. Abb. 7-7). Dies setzt allerdings voraus, dass in dieser Tiefe auch Gesteinseinheiten mit der erforderlichen Grundwasserführung zur Gewinnung von Thermalwasser vorhanden sind. Ausreichend hohe Untergrundtemperaturen von über 60°C zur direkten Heizwärmegewinnung treten nur im nordwestlichen und nordöstlichen Bereich des Pilotgebiets auf. Die für Stromerzeugung erforderliche Mindesttemperatur von ca. 100°C wird in 1.500m Tiefe nur im nordwestlichen Randbereich des Pilotgebiets erreicht, im mittleren Teil ab rund 2.000m und am südöstlichen Rand erst bei über 2.700m.

7.3.2 Temperaturen am Top geothermischer Einheiten und Abschätzung des geothermischen Nutzungspotenzials auf Grundlage der Temperaturen

Im süddeutschen Molassebecken sind drei Thermalwasser führende Grundwasserstockwerke entwickelt, die grundsätzlich über ein Potenzial für hydrothermale Nutzungen verfügen. Es handelt sich dabei von oben nach unten um

- den Poren- und Kluftgrundwasserleiter der Oberen Meeresmolasse,
- den Karst- und Kluftgrundwasserleiter des höheren Oberjura und
- den Kluftgrundwasserleiter des Oberen Muschelkalk.

Das höchste geothermische (hydrothermale) Potenzial ist im Karst- und Kluftgrundwasserleiter des Oberjura in schwäbischer Faziesausbildung

zu erwarten (z. B. Bertleff et al. 1988). Die Karbonatgesteine des Oberen Muschelkalk sowie die tertiären Sedimente der Oberen Meeresmolasse sind von geringerer geothermischer Bedeutung. In anderen Horizonten der tertiären Beckenfüllung sowie der mesozoischen und permischen Schichtenfolge kann nach aktuellem Kenntnisstand thermales Grundwasser allenfalls örtlich und nur mit geringem Dargebot erschlossen werden.

Die hydrogeologischen Verhältnisse der drei Grundwasserstockwerke sind für den baden-württembergischen Teil des Molassebeckens bei Bertleff et al. (1988) und Stober & Villinger (1997) ausführlich beschrieben (vgl. hierzu auch Bertleff & Watzel 2002, RVBO/LGRB 2005, Stober & Jodocy 2011, Stober 2013, Stober et al. 2013). Auch für das nord-schweizerische Molassebecken liegen zahlreiche Arbeiten zur Hydrogeologie und zu hydrogeologischen Modellierungen vor (z. B. Rybach et al. 1980, Nagra 1988, Keller 1992, Nagra 2002, Gmünder et al. 2014). Zusammenfassende Darstellungen für den bayerischen Teil des Molassebeckens finden sich u. a. in BayLfW & LGRB (1991) sowie im Bayerischen Geothermieatlas (BayStMIVT 2010).

Als geothermische Einheiten für die petrothermale Nutzung mit der Enhanced Geothermal Systems (EGS)-Technik kommen das kristalline Grundgebirge sowie grundsätzlich dichte Sedimentgesteine in Frage.

Durch die Kombination der Ergebnisse des geologischen 3D-Modells und des geostatistischen Modells wurden die Temperaturen an der Oberfläche der drei oben genannten geothermischen Einheiten dargestellt. Aufgrund der nach Süden zu den Alpen hin in größere Tiefen abtauchenden Schichten nimmt die Gebirgstemperatur in den drei Einheiten von Nordwesten nach Südosten zu. In Tabelle 7-3 sind die niedrigsten und höchsten Untergrundtemperaturen an der Oberfläche der betrachteten Modelleinheiten im Pilotgebiet in den jeweiligen Landesteilen (außer Schweizer Teil) zusammenfassend dargestellt.

Tab. 7-3: Niedrigste (Min. Temp.) und höchste (Max. Temp.) Untergrundtemperaturen [°C] an der Oberfläche der betrachteten Modelleinheiten im Pilotgebiet (außer Schweizer Teil).

Modelleinheit (Oberfläche)	Vorarlberg		Baden-Württemberg		Bayern	
	Min. Temp. [°C]	Max. Temp. [°C]	Min. Temp. [°C]	Min. Temp. [°C]	Max. Temp. [°C]	Min. Temp. [°C]
Oberer Meeresmolasse	15	37	8	40	12	41
Oberjura	125	195	18	132	45	188
Oberer Muschelkalk	151	191	51	150	67	187

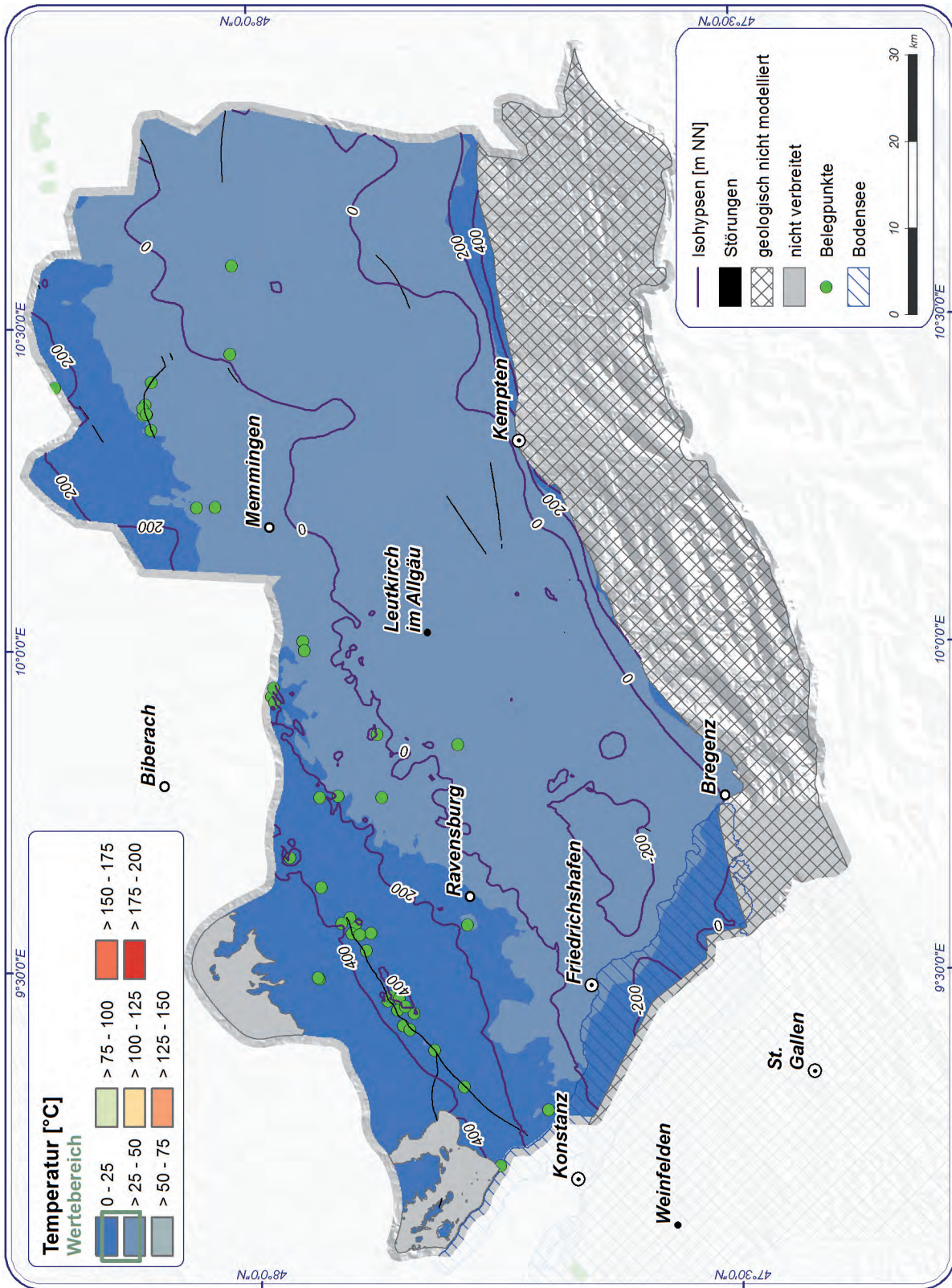


Abb. 7-8: Temperaturen an der Oberfläche der Oberen Meeresmolasse.



Obere Meeresmolasse (OMM)

Die Obere Meeresmolasse (OMM) besteht aus einer Wechselfolge von Mergelsteinen, Feinsandsteinen und Fein- bis Grobsandsteinen. Die 20 bis 100 m mächtige Heidenlöcher-Formation (früher Basissandstein) an der Basis der OMM und die 20 bis 50 m mächtige Baltringen-Formation in der Mitte bilden Teilaquifere aus z. T. geklüfteten Sandsteinen. Sie werden von den generell über 100 bis 300 m mächtigen, geringer durchlässigen Sand- und Mergelsteinen der Kalkofen-Formation (früher Sandschiefer bzw. Sandmergelserie) voneinander getrennt und von der bis zu 50 m mächtigen Steinhöfe-Formation und dem bis zu wenigen Metern mächtigen Albstein nach oben abgeschlossen. Die Sand- und Mergelschichten der Kalkofen-Formation reagieren auf tektonische Belastungen inkompetent und bilden demzufolge keine vertikal durchgehend offenen, wasserwegsam Klüfte aus. Deshalb ist von einer weitgehenden hydraulischen Trennung zwischen den genannten Teilaquiferen auszugehen. Die aus Pumpversuchen ermittelten Transmissivitäten nehmen vom nordwestlichen Beckenrand mit $T \geq 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ zum Beckeninneren auf Werte von $T < 6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ für die Baltringen-Formation bzw. auf $T = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ für die Heidenlöcher-Formation ab (RVBO/LGRB 2005).

Die Temperaturen an der Oberfläche der OMM liegen zwischen 8 und 41 °C. Nördlich einer Linie Uhl-lingen am Bodensee–Bad Waldsee betragen die Temperaturen weniger als 20 °C. Unter dem Bodensee erreichen die Werte knapp 20 °C. Dort macht sich die kühlende Wirkung des Seekörpers bemerkbar (vgl. Kap. 5.3). Die Temperaturen der Grundwässer in der grundwasserführenden Heidenlöcher-Formation und in der Baltringen-Formation liegen um einige Grad über denen an der Oberfläche der OMM. Auslauftemperaturen von Formationswässern der Baltringen-Formation sind in RVBO/LGRB (2005) angegeben. Die höchsten Temperaturen wurden in der Bohrung B12 der Mineralbrunnen AG Überkingen, TBB Krumbach Otto-Therme angetroffen (Krumbachquelle, vgl. Abb. 7-4).

Als Nutzungsformen kommen für die Obere Meeresmolasse theoretisch nur Balneologie und indirekte Wärmeversorgung unter Einsatz von Wärmepumpen in Frage.

Geothermische Einheit „Oberjura“

In der geothermischen Einheit „Oberjura“ werden die Schichten des Oberjura (Malm) oberhalb der Impressamergel-Formation (BW) bzw. Unteren Mergelkalke (BY) zusammengefasst. Sie beinhaltet

die beiden lithologisch stark unterschiedlich ausgeprägten Faziesausbildungen der schwäbischen Fazies im Norden und der helvetischen Fazies im Süden. Die Grenze zwischen diesen beiden Faziesräumen folgt in etwa einer Linie Markdorf–Ravensburg–Leutkirch–Kaufbeuren (vgl. Abb. 3.5). Die beiden Faziesausbildungen unterscheiden sich auch in ihren hydrogeologischen Eigenschaften.

In der schwäbischen Faziesausbildung besteht der Oberjura-Aquifer aus gebankten und massigen Kalksteinen (Schwamm-Mikroben-Bioherme). Die teilweise dolomitisierten Massenkalken, die den eigentlichen Grundwasserleiter bilden, sind deutlich mächtiger ausgebildet als die dazwischen liegenden Bankkalken. Die Grundwasserführung konzentriert sich auf die Dolomite und Dedolomite („zuckerkörniger Lochfels“) in den bis zu 250 m mächtigen Massenkalken, insbesondere wenn sie von Klüften und Karsthohlräumen durchsetzt sind. Somit reduziert sich die Nettomächtigkeit des eigentlichen Aquifers auf 20 bis 60 m (Bertleff & Watzel 2002). Nach Bertleff et al. (1988) nimmt die Verkarstungsintensität mit zunehmender Entfernung von der Donau und zunehmender Überlagerung von Nordwesten nach Südosten ab. Überdies geht im Übergangsbereich zur helvetischen Fazies die Verkarstung stark zurück. Die Zementmergel sowie die Hangende Bankkalk-Formation, die die Massenkalk-Formation überlagern, bestehen in der Regel aus mittel- bis dünnbankigen Kalk- und Mergelsteinen, die nur gelegentlich mit Massenkalken durchsetzt sind. Ihre Grundwasserführung ist im Vergleich zu den vielfach geklüfteten und verkarsteten Massenkalken von untergeordneter Bedeutung. Mit einer bedeutenderen Grundwasserführung in diesen Einheiten ist nur zu rechnen, wenn sie ebenfalls ganz oder teilweise in Massenkalkfazies ausgebildet sind. Die Gesamtmächtigkeit des Oberjura beträgt in Baden-Württemberg 550 m. Der Oberjura (ohne Impressamergel-Formation) in schwäbischer Faziesausbildung ist im baden-württembergischen Teil des Pilotgebiets zwischen ca. 265 und 470 m mächtig und erreicht im bayerischen Teil bis zu 560 m, wobei die größten Mächtigkeiten generell im Verbreitungsgebiet der Massenkalken zu finden sind.

Die helvetische Faziesausbildung ist durch dunkel- bis schwarzgraue, nicht verschwammte Kalksteine gekennzeichnet (vgl. Kap. 3.3.3). Aufgrund ihrer nur geringen Durchlässigkeit ist in der helvetischen Fazies des Oberjura nur eine geringe Grundwasserführung zu erwarten. Dies wurde durch zahlreiche Misserfolge bei der Thermalwassererschließung in diesem Gebiet bestätigt. Die Mächtigkeit der helvetischen Fazies schwankt im Pilotgebiet zwischen ca. 290 und 450 m.

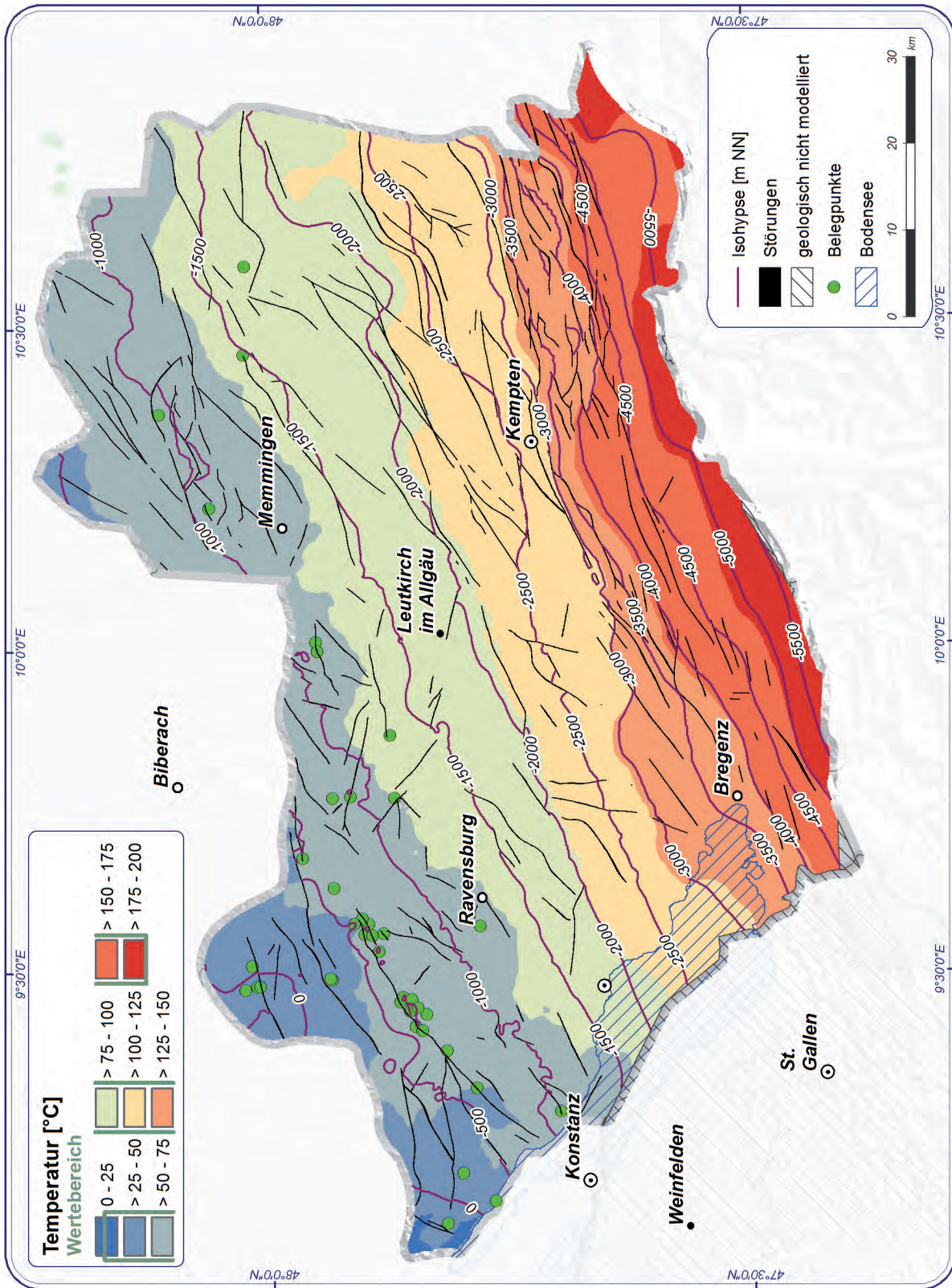


Abb. 7-9: Temperaturen an der Oberfläche des Oberjura.



Aufgrund der geohydraulischen Untersuchungsergebnisse lässt sich der von Molasse überdeckte Kluft- und Karstaquifer des Oberjura in Baden-Württemberg in zwei Strömungs- und Durchlässigkeitsbereiche gliedern (RVBO/LGRB 2005). Der nördliche, beckenrandnahe Bereich weist hohe Transmissivitäten von $T = 3,8 \cdot 10^{-3}$ bis $5,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ auf, der südliche Bereich im Beckenzentrum hat geringere Transmissivitäten von $T = 1,2 \cdot 10^{-4}$ bis $6,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Im offenen Karst der Schwäbischen Alb steigen die Transmissivitäten des Karstaquifers nach Norden weiter an.

Weitere Informationen zur Faziesverteilung in der oberen Unteren Felsenkalk-Formation, zur Durchlässigkeit, zur Grundwasserober- bzw. Druckfläche des Oberjura und zu den Temperaturen im Grundwasserleiter für den baden-württembergischen Teil des Pilotgebiets finden sich u.a. in RVBO/LGRB (2005).

Die Temperaturen an der Oberfläche der Modelleinheit Oberjura steigen als Folge der zunehmenden Versenkungstiefe von ca. 18°C im Nordwesten bis auf ca. 195°C im Süden des Pilotgebiets an (vgl. Abb. 7-9). Die Obergrenze des oberjurasischen Grundwasserleiters liegt im größten Teil Oberschwabens etwa 100 m unter der Oberfläche des Oberjura, sodass die Temperaturen der Thermalwässer in diesem Bereich ca. 3 bis 4 K über denen an der Oberfläche des Jura liegen dürften.

Im Nordwesten des Pilotgebiets liegen die Temperaturen an der Oberfläche des Oberjura unter 40°C . Dort sind lediglich eine balneologische Nutzung sowie eine indirekte Nutzung zur Heizwärme-gewinnung unter Verwendung von Wärmepumpen möglich. Mit nach Süden zunehmenden Untergrundtemperaturen an der Oberfläche des Oberjura sind weitere geothermische Nutzungen grundsätzlich möglich. Allerdings ist mit dem Übergang von der schwäbischen zur helvetischen Fazies (vgl. Abb. 3-5) eine signifikante Verringerung der Transmissivitäten und damit einhergehend der technisch gewinnbaren Grundwassermenge verbunden. Im Süden des Pilotgebiets sind theoretisch alle geothermischen Nutzungsformen möglich (vgl. Abb. 7-10). Durch das generelle Abtauchen der Schichten nach Südosten (vgl. Kap. 3) wird der Oberjura dort jedoch erst in mehreren tausend Metern unter NN erreicht.

Oberer Muschelkalk (einschließlich Diemel-Formation des Mittleren Muschelkalk)

In der geothermischen Einheit „Oberer Muschelkalk“ wurden sowohl die Kalk- und Dolomitsteinserie des

Oberen Muschelkalk als auch die Dolomitsteine der Diemel-Formation des oberen Mittleren Muschelkalk zusammengefasst. Als Aquifer fungiert im Oberen Muschelkalk insbesondere die poröse bis feinkavernöse Rottweil-Formation (früher Trigonodusdolomit). Ihr Anteil an der Gesamtmächtigkeit des Oberen Muschelkalk nimmt von 25 bis 30 m im Norden und Westen der Region auf ca. 50 m nach Südosten hin, und damit auf praktisch 100 % der Gesamtmächtigkeit, zu. Starke Spülungsverluste, die beim Abteufen von Erdöl- und Erdgasbohrungen im Oberen Muschelkalk beobachtet wurden, deuten darauf hin, dass er auch im Westteil des oberschwäbischen Molassebeckens so stark geklüftet ist, dass er als gut durchlässiger Kluftgrundwasserleiter wirkt (RVBO/LGRB 2005, Stober 2013). Am Ostrand seines Verbreitungsgebiets, etwa ab der baden-württembergisch-bayerischen Grenze, liegt der Muschelkalk in sandiger Randfazies vor und keilt nach Osten hin rasch aus (Diepolder & Schulz 2011).

Die Temperaturen an der Oberfläche des Oberen Muschelkalk liegen zwischen ca. 51°C und 191°C (vgl. Abb. 7-11). Die höchsten Temperaturen werden im Süden des Pilotgebiets am österreichischen Alpenrand erreicht. Der Muschelkalk wird dort jedoch erst in ca. 4.000–5.000 m unter NN erreicht. Im baden-württembergischen Anteil des Pilotgebiets liegen die Temperaturen an der Oberfläche des Oberen Muschelkalk bei maximal 150°C , im bayerischen Anteil bei maximal 187°C .

7.3.3 Tiefenlage verschiedener Isothermen

Die Tiefenlagen (in Meter unter Gelände) der Isothermen von 60°C , 100°C und 150°C wurden aus dem Temperaturmodell abgeleitet.

Abbildung 7-12 zeigt die Karte der Tiefenlage der 100°C -Isotherme, die zwischen ca. 1.920 und ca. 2.770 m unter Gelände liegt. Nordwestlich von Ravensburg werden 100°C bereits bei ca. 2.200 m unter Gelände erreicht. Im Südosten am Alpenrand liegt diese Temperatur erst rund 1.500 m tiefer vor. Deutlich sichtbar wird der Einfluss des Bodensees: die 100°C -Isotherme liegt hier um bis zu ca. 200 m tiefer als in den nördlich angrenzenden Bereichen.

Die 150°C -Isotherme wird erst bei ca. 3.470 m unter Gelände erreicht und sinkt nach Südosten in der Subalpinen Molasse bis in Tiefen von maximal ca. 4.230 m unter Gelände ab.

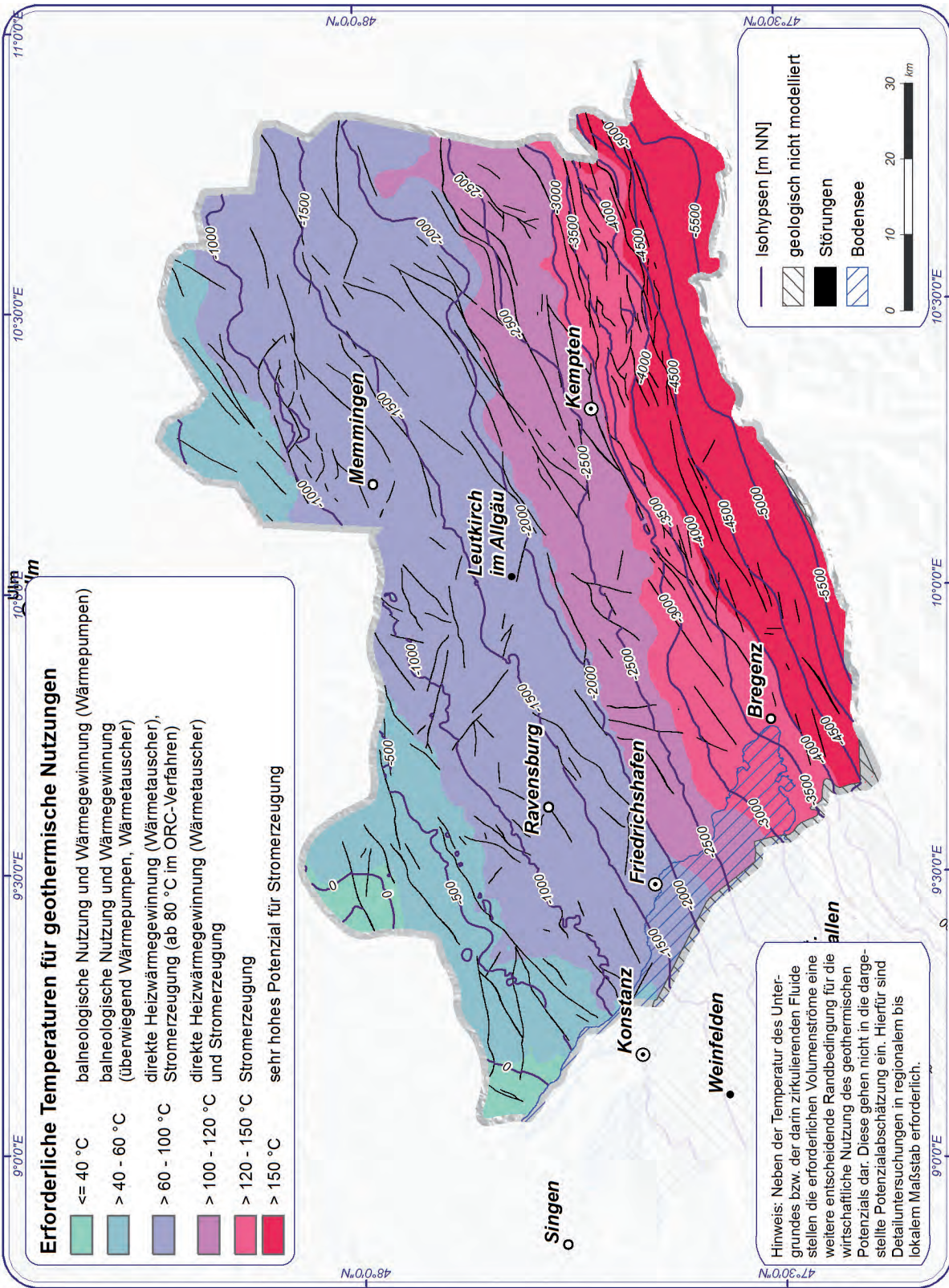


Abb. 7-10: Abschätzung des geothermischen Nutzungspotenzials auf Grundlage der Temperaturen an der Oberfläche des Oberjura.

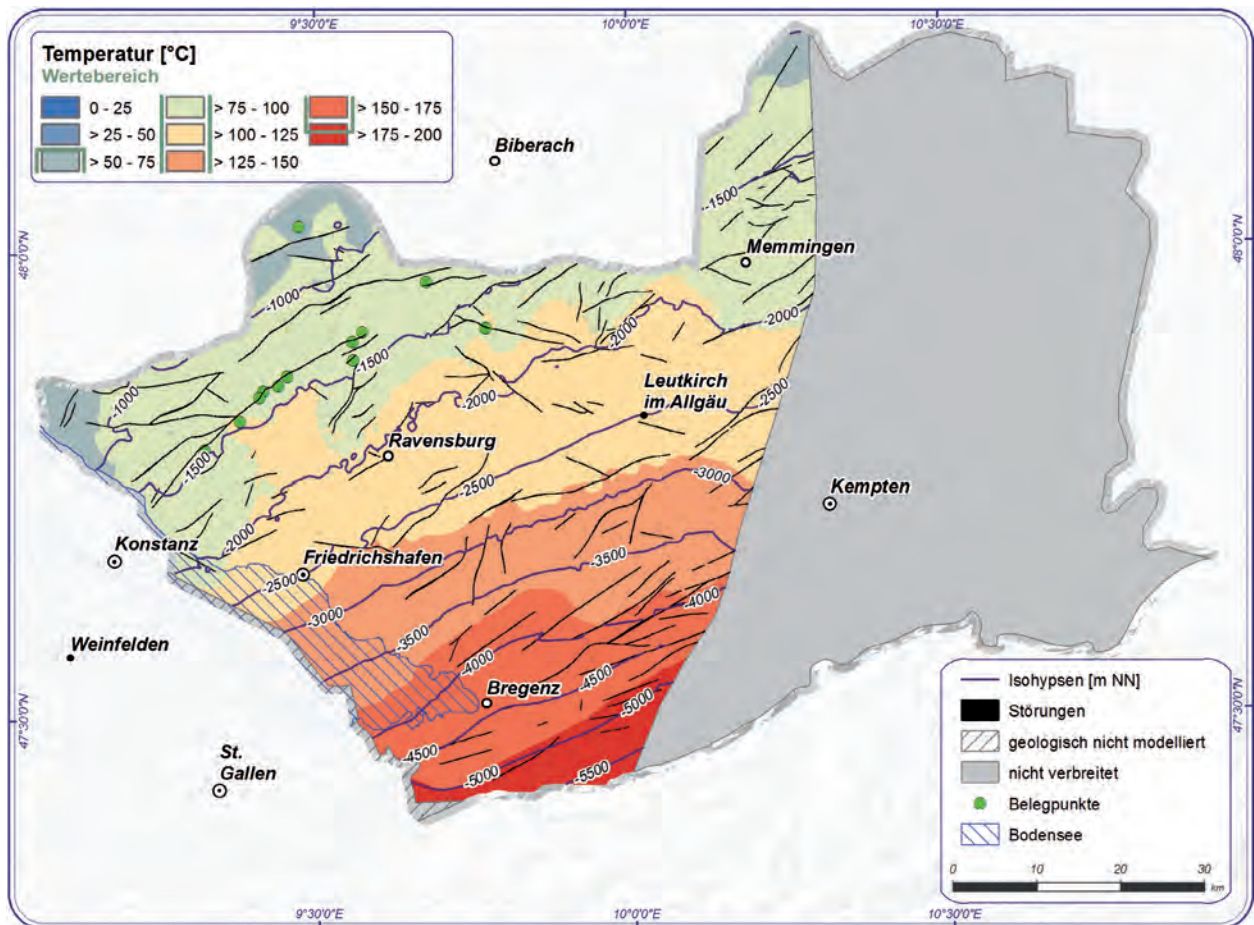


Abb. 7-11: Temperaturen an der Oberfläche des Oberen Muschelkalk.

7.4 Potenzial zur Kohlendioxid-verpressung

Im Rahmen einer Studie zu den Speicherpotenzialen im tieferen Untergrund Deutschlands (Reinhold & Müller 2011) wurde die Schichtenfolge u. a. im bayerischen und baden-württembergischen Teil des voralpinen Molassebeckens hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Eignung als Speicher- bzw. Barrieregestein beurteilt. Als Speichergesteine kommen primär poröse Gesteine sowie sekundär geklüftete und/oder kavernöse Gesteine (Kluft-/Karstspeicher), als Barrieregesteine Tonsteinabfolgen und Salzgesteine mit geringen Gebirgsdurchlässigkeiten in Frage. Daraus wurden so genannte Speicher- und Barrierekomplexe abgeleitet.

Die Kriterien Mindesttieflage und Mindestmächtigkeit (vgl. Kap. 7.1.3) dienen in der bundesweiten Studie dazu, im Bereich des Pilotgebiets für folgende Speicherkomplexe potenzielle Speicherregionen mit größerem Speicherpotenzial zu identifizieren (Fehn & Wirsing 2011, Reinhold & Müller 2011):

- Bausteinschichten (oberer Teil der tertiären Unteren Meeresmolasse)

- Eisensandstein-Formation (Unterer Mitteljura)
- Löwenstein-Formation (Stubensandstein, Oberer Mittelkeuper)
- Rottweil-Formation (Trigonodusdolomit, Oberer Muschelkalk)

Bei den abgegrenzten Regionen handelt es sich um untersuchungswürdige Bereiche, d.h. sie zeigen das theoretische Potenzial auf. Zur weiteren Präzisierung der Eignung dieser Regionen müssen u. a. die von IPCC (2005) bzw. Diamond et al. (2010) definierten Kriterien abgeprüft werden. Hierzu bedarf es in der Regel aufgrund der verfügbaren, meist unzureichenden Datenlage, auf den jeweiligen untersuchungswürdigen Bereich bezogene, aufwändige geowissenschaftliche Untersuchungen zur Erkundung u. a. des Untergrundaufbaus, der tektonischen Situation und der gesteinsphysikalischen Parameter.

Die Ergebnisse für den baden-württembergischen Teil der Studie aus dem Jahr 2011 sind im Kartenviewer des LGRB als Verbreitungskarten visualisiert (<http://maps.lgrb-bw.de/>).

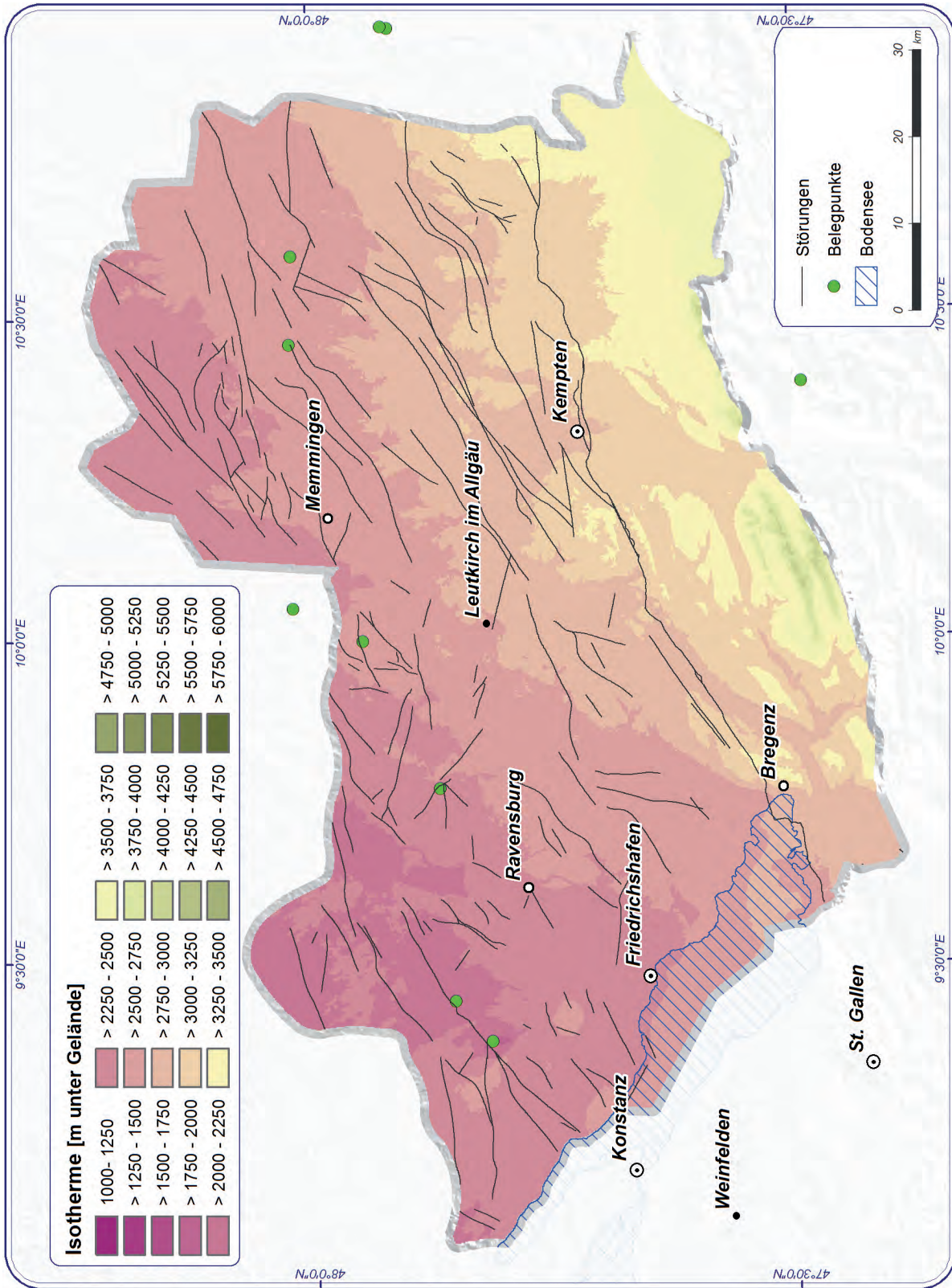


Abb. 7-12: Tiefenlage der 100 °C-Isotherme in Meter unter Gelände.



8 Nutzerzugänge zu den Ergebnissen

8.1 GeoMol-Website

Die für das LCA-Pilotgebiet erarbeiteten Ergebnisse sind über die GeoMol-Website (<http://www.geomol.eu>) öffentlich zugänglich (vgl. Abb. 8-1). Die Website wurde im November 2012 im Rahmen der Auftaktkonferenz des Projekts freigeschaltet und dient als zentrale Internet-Plattform, um sich über Projektziele und -aktivitäten zu informieren und um Zugang zu den Produkten und Webanwendungen für alle Bearbeitungsgebiete einschließlich des LCA-Pilotgebiets zu erhalten.

Allgemeine Informationen zur Projektkulisse und -organisation sowie zu den vorhandenen Geopotenzialen der alpinen Vorlandbecken sind in Englisch sowie in allen Landessprachen der Projektpartner erhältlich. Technische Ausführungen sind zusammen mit den im Projekt veröffentlichten wissenschaftlichen Artikeln und Tagungsbeiträgen in Englisch verfügbar (<http://www.geomol.eu/home/technique/>). Darüber hinaus werden die Präsentationsfolien von Vorträgen der GeoMol-Veranstaltungen (Kick-Off Conference, Brussels Information Day, Mid-term Conference) als Online-PDFs zum freien Download bereitgestellt (<http://www.geomol.eu/events/>).

Alle für den Download und Druck vorgesehenen Ergebnisdokumente, wie der Abschlussbericht des Gesamtprojekts (GeoMol Team 2015), Berichte zur Bearbeitung in den einzelnen Pilotgebieten (u. a. der vorliegende Bericht), stratigraphische Tabellen und im Projekt entwickelte technische Dokumentationen sind in der Rubrik „Report“ zusammengestellt.

Über die Website können außerdem die Webanwendungen MapViewer und 3D-Explorer aufgerufen werden. Der MapViewer (vgl. Kap 8.2) bietet dabei umfangreiche Funktionalitäten, um kartographisch aufbereitete 2D-Daten des Projekts interaktiv zu nutzen. Im MapViewer ist außerdem der Search-Catalogue (vgl. Kap. 8.3) integriert, in dem weitere Informationen zu Dateninhalten und -prozessierungen, Verfügbarkeit von Webdiensten (vgl. Kap. 8.4), Kontaktinformationen sowie eventuelle Nutzungseinschränkungen der 2D-Daten recherchiert werden können.

Der 3D-Explorer (vgl. Kap. 8.5) erlaubt die raumbezogene Ansicht und Analyse von 3D-Daten des Projekts.

8.2 MapViewer

Die Webanwendung zur Visualisierung, Abfrage, Analyse und Ausgabe raumbezogener 2D-Daten des Projekts kann über die Rubrik „MapViewer“ der Website (<http://www.geomol.eu/>) durch Auswahl eines Bearbeitungsgebiets (z. B. Lake Constance-Allgäu) in der „Clickable Map“ gestartet werden. Direkt ist die Webanwendung über die URL <http://maps.geomol.eu> zugänglich.

Die Anwendung wurde sowohl für das Surfen auf dem PC als auch auf mobilen Geräten konzipiert. Die grafische Benutzeroberfläche ist in den Sprachen Deutsch, Englisch, Französisch und Italienisch verfügbar (vgl. Abb. 8-2).

Für das schnelle Auffinden und einfache Visualisieren im MapViewer wurden die 2D-Ergebnisdaten zu thematischen Karten mit einheitlichem Layout der Klassifizierungen, Legenden und Farbdarstellungen aufbereitet und im Themenbaum anhand ihres Bearbeitungsraums und thematischen Inhalts angeordnet. Die Kartenthemen für das LCA-Pilotgebiet umfassen dabei:

- Basisdaten: Ausdehnung des Modellgebiets, Lage von Bohrungen und Seismikprofilen (für das GeoMol Übersichtsmodell und alle Pilotgebiete in jeweils einem Thema gemeinsam dargestellt)
- Schichtlagerungskarten: Verbreitung, Tiefe und Lagerungsverhältnisse von Gesteinshorizonten
- Mächtigkeit des Oberjura-Aquifers
- Geopotenzialkarten:
 - Tiefen-serialisiert: Temperaturen in den Tiefenstufen 500, 1.000, 1.500, 2.000, 3.000 und 4.000 m unter der Erdoberfläche
 - Temperatur-serialisiert: Lage der 60, 100 und 150 °C-Isotherme
 - Horizont-serialisiert: Temperaturen am Top Obere Meeresmolasse, Top Oberjura und Top Oberer Muschelkalk mit Klassifikationskarten zu geothermischen Nutzungsmöglichkeiten
 - Potenzialabschätzung zur Nutzung von mitteltiefen bis tiefen Erdwärmesonden

Der maximale Darstellungsmaßstab beträgt 1:80.000. Als topographische Hintergrundkarte kann der Anwender zwischen einer Raster- und Vektordarstellung wählen und optional eine Reliefdarstellung hinzufügen. Die Koordinaten der



Abb. 8-1: Startseite der GeoMol-Website (<http://www.geomol.eu>) (Stand Juni 2015).

Cursorposition können als geographische Koordinaten (WGS84), im europäischen System ETRS89 UTM sowie in allen länderspezifischen Koordinaten des Bearbeitungsgebiets angezeigt werden. Für das LCA-Pilotgebiet ist somit neben WGS84 und ETRS89 UTM Zone 32 die Anzeige der Cursor-Koordinaten in Gauß-Krüger Zone 3 und Zone 4 für Deutschland, CH1903 LV95 für die Schweiz und MGI Austria GK 28 für den Vorarlberger Raum möglich.

Der Funktionsumfang des MapViewer (z. B. Zoom In / Out / To, Pan, Ortssuche, Anordnung von Karten per Drag & Drop unter „Meine Auswahl“, Einstellung der Transparenz von Karten, Zugriff auf Metadaten, Attributabfrage, Hinzufügen externer WMS-Dienste, Druckfunktion eines definierten Kartenausschnitts mit Legende und Disclaimer) wird auf der GeoMol Website in einem Video-Tutorial in englischer Sprache präsentiert. Detaillierte Erläuterungen in Deutsch zur Nutzung einzelner Funktionen

des MapViewer finden sich in der Hilfedatei der Anwendung.

8.3 SearchCatalogue

Der SearchCatalogue lässt sich innerhalb des MapViewer oder direkt über die URL <http://meta.geomol.eu> aufrufen. Die Anwendung dient der gezielten Recherche nach Karten und Webdiensten des Projekts auf der Basis einer strukturierten Metadatenbeschreibung.

Der Suchkatalog ist in den Sprachen Deutsch, Französisch, Englisch und Italienisch verfügbar und bietet sowohl eine einfache als auch eine erweiterte Suchfunktion. Einfache Recherchen können auf der Basis von Schlagwörtern erfolgen, wobei die Titel, Kurzzusammenfassungen und Schlüsselwörter der Metadaten durchsucht werden. Die Suche kann auch thematisch auf einzelne Bearbeitungsgebiete,

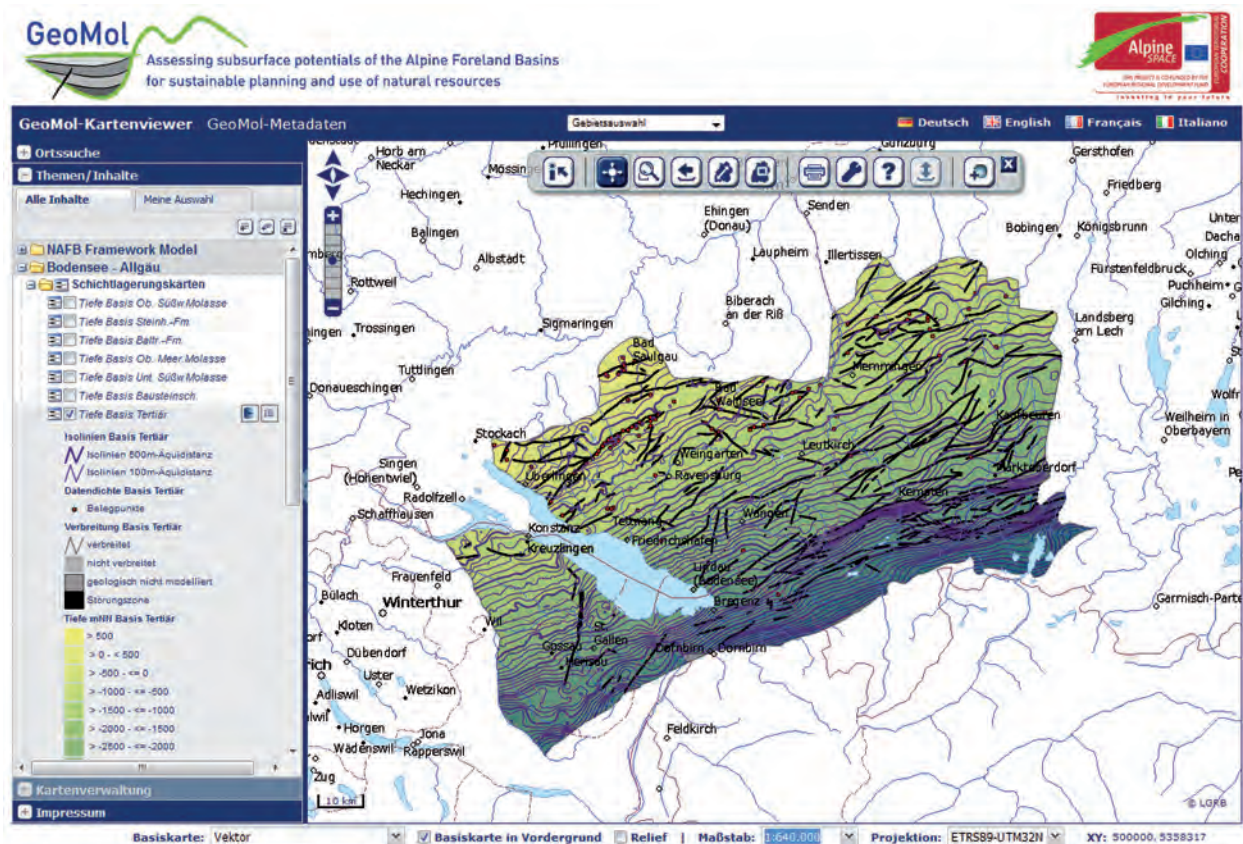


Abb. 8-2: Grafische Benutzeroberfläche des MapViewer (<http://maps.geomol.eu>) (Stand: Juni 2015) mit Darstellung der Schichtlagerungskarte Basis Tertiär für das LCA-Pilotgebiet.

wie z. B. Karten des LCA-Pilotgebiets oder auf thematische Kategorien eingegrenzt werden. Die erweiterte Suchfunktion ermöglicht die gezielte Suche innerhalb bestimmter Felder der Metadatenbeschreibung (vgl. Abb. 8-3).

Nach Auflistung der Suchergebnisse lassen sich die vollständigen Metadatenbeschreibungen von Karten und von Webdiensten anzeigen. Sie enthalten neben Angaben zum thematischen Inhalt und zur räumlichen Ausdehnung u. a. auch Informationen über den Online-Zugang zu den Geodaten und Webdiensten, über weitere Bezugsmöglichkeiten der Geodaten sowie über eventuell bestehende Zugangs- und Nutzungsbeschränkungen. Die Kartenthemen können über die Funktion „Map Preview“ direkt in den MapViewer geladen bzw. hinzugefügt werden.

Die Metadatenbeschreibungen für das LCA-Pilotgebiet entsprechen sowohl den Anforderungen der EU-Initiative INSPIRE als auch nationaler bzw. regionaler Geodateninfrastrukturen (GDI-DE, GDI-BW, E-GEO.CH). Die technische Umsetzung des Geoportals basiert auf dem OGC-Standard CSW 2.0.2 (OGC 2007). Der Webdienst wurde hinsichtlich der

Anforderungen von INSPIRE zur Implementierung von Discovery Services angepasst (INSPIRE 2011).

8.4 Web Map Services (WMS)

Die thematischen Karten innerhalb der Webanwendung MapViewer (vgl. Kap. 8.2) werden für die einzelnen Bearbeitungsräume in GeoMol von verschiedenen Projektpartnern mithilfe standardisierter Web Map Services (WMS) bereitgestellt. Web Map Services lassen sich über das Internet auch in Geoinformationssysteme (GIS) oder andere Web-Kartenanwendungen einbinden. Auf diese Weise können Daten aus GeoMol mit den eigenen Geodaten eines Anwenders oder mit Geodaten anderer Anbieter oder Bearbeiter zusammen visualisiert und weitergehend analysiert werden. Die Struktur und das Layout der Karten (als Rasterbild) sind dabei identisch mit der Darstellung im MapViewer. Die WMS-Dienste in GeoMol ermöglichen auch eine Abfrage von Attributinformationen (GetFeatureInfo).

Für das LCA-Pilotgebiet erfolgte die technische Umsetzung der WMS durch das LGRB mithilfe des UMN Mapserver (Version 6.4) und basiert auf dem

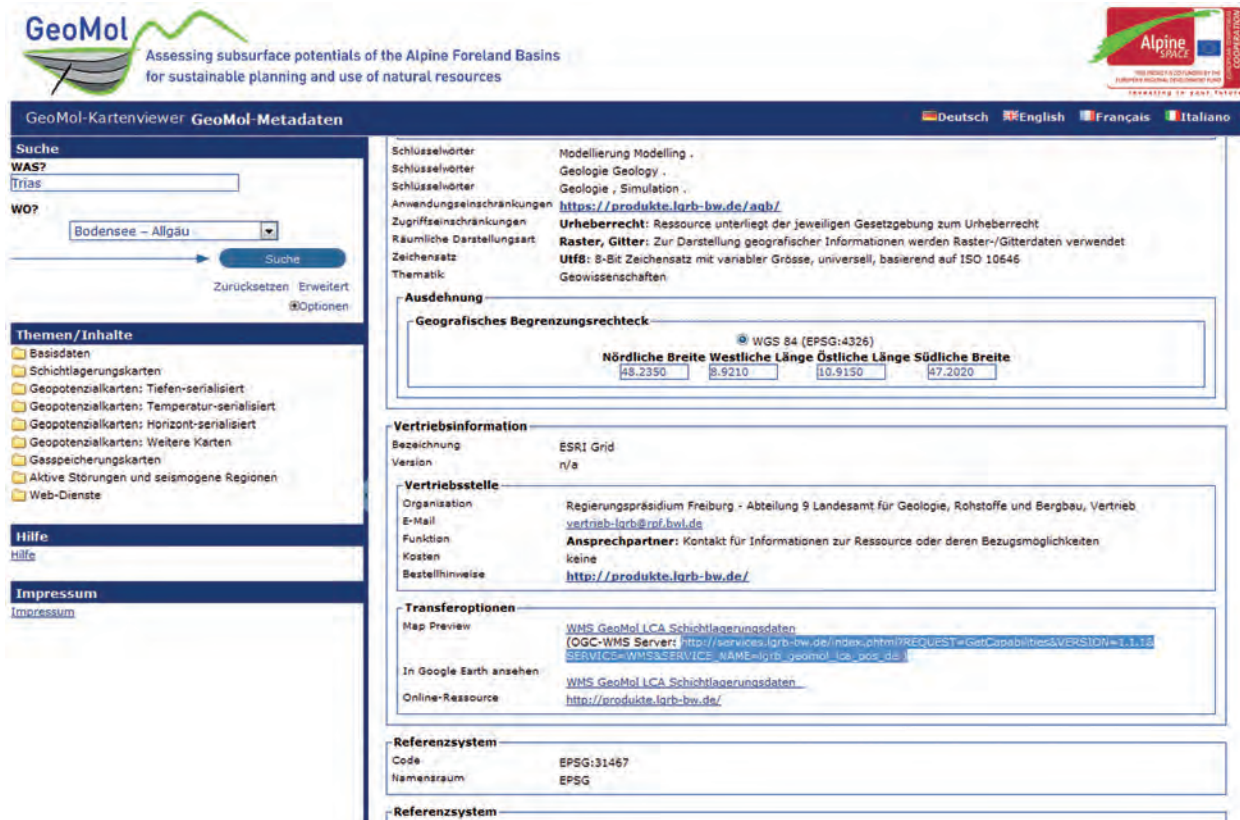


Abb. 8-3: Grafische Benutzeroberfläche des SearchCatalogue (<http://meta.geomol.eu>) (Stand: Juni 2015).

OGC-Standard WMS 1.1.1 (OGC 2002). Insgesamt wurden sieben WMS mit 52 thematischen Karten aufgesetzt.

Um einen WMS des LCA-Pilotgebiets oder eines anderen Bearbeitungsraums in GeoMol außerhalb des MapViewer zu nutzen, müssen zunächst die Parameter für die http-Anfrage seiner GetCapabilities bekannt sein. Sie lassen sich im Search Catalogue recherchieren und sind in den Metadatenbeschreibungen der WMS und der Karten im Abschnitt „Transferoptionen“ angegeben (vgl. Abb. 8-3).

Über die GetCapabilities-Anfrage wird der WMS zunächst nach seinem Leistungsumfang abgefragt. Neben allgemeinen Informationen, z.B. über Kontaktinformationen und mögliche Ausgabeformate, werden als Antwort auch Angaben über die verfügbaren Themen sowie ihre räumliche Ausdehnung und Darstellung in unterschiedlichen Koordinatensystemen geliefert. Die GetCapabilities-Anfrage dient auch zur Ansprache und Einbindung des WMS in Geoinformationssysteme und Web-Kartenanwendungen.

8.5 3D-Explorer

Die im Mai 2015 freigeschaltete Webanwendung 3D-Explorer ermöglicht die Visualisierung und Analyse von geologischen 3D-Daten in gängigen Webbrowsern unter Verwendung der Technologie WebGL (Web Graphics Library). Die Anwendung wurde im Rahmen von GeoMol im Zuge des Aufbaus einer länderübergreifenden Möglichkeit zur 3D-Datenbankhaltung auf Basis der Software GST entwickelt. Weitere Ausführungen zum im GeoMol verfolgten Ansatz der 3D-Datenbankhaltung mit GST finden sich in GeoMol Team (2015). Technische Details und der Funktionsumfang der GST Software werden in Gabriel et al. (2011) beschrieben. Grundlagen zum in GST verwendeten objektrelationalen Datenmodell finden sich in Le et al. (2013).

Für das LCA-Pilotgebiet werden geologische 3D-Daten des länderübergreifend entwickelten Übersichtsmodells im 3D-Explorer zur Verfügung gestellt.



9 Ausblick

Aufgrund der Fortschritte in der Informationstechnologie werden digitale, geologische 3D-Modelle zunehmend für eine integrative Interpretation und Visualisierung der komplexen Untergrundverhältnisse eingesetzt und dienen beispielsweise der Bewertung des Untergrundes hinsichtlich seiner Nutzungspotenziale und eventueller konkurrierender Nutzungen. Die im Rahmen des Projekts GeoMol erstellten Geologie- und Temperaturmodelle liefern somit wichtige Planungsgrundlagen für eine nachhaltige Bewirtschaftung des tieferen Untergrundes in den alpinen Vorlandbecken. Sie basieren auf einer erstmals transnational harmonisierten Datenbasis aus den Archiven der beteiligten geologischen Dienste und regional agierender Firmen, Organisationen und administrativen Einrichtungen und bilden eine fortschreibungsfähige Wissensbasis, auch über das Projektende hinaus. Im Rahmen von GeoMol konnten jedoch auch Areale mit deutlichen Informationsdefiziten identifiziert werden. So sind beispielsweise die geologischen Strukturen unterhalb des Bodensees bisher nur unzureichend mit qualitativ hochwertigen Seismikdaten belegt bzw. durch Bohrungen erkundet.

Für eine umfassende, nachvollziehbare und belastbare Abgrenzung geeigneter unterirdischer Räume und die Beurteilung möglicher Wechselwirkungen von Nutzungen des tieferen Untergrundes fehlen derzeit noch fachlich allgemein anerkannte Kriterienkataloge. Die Untergrundmodelle werden deshalb momentan eingesetzt, um auf der Grundlage weniger ausgewählter Kriterien untersuchungswürdige Bereiche bzw. Räume zu identifizieren. Bei Vorliegen umfassender Kriterienkataloge können die Möglichkeiten der 3D-Modelle als Werkzeuge zur Beurteilung der Nutzungspotenziale des tieferen Untergrundes voll ausgeschöpft werden. Im Pilotgebiet Bodensee-Allgäu liegt ein Schwerpunkt in der Bereitstellung geowissenschaftlicher Daten zur geothermischen Nutzung des tieferen Untergrundes. Die Daten können von Behörden und Planern genutzt werden und kommen Projektentwicklern, Fachberatern und der Wirtschaft zu Gute, ersetzen jedoch keine vorhabensbezogenen Detailuntersuchungen.

Ende der 1970er und Anfang der 1980er Jahre wurden im Pilotgebiet Bodensee-Allgäu mehrere Thermalwasservorkommen erschlossen, die den Ausbau überregional bekannter und wirtschaftlich erfolgreicher Thermalbäder zur Folge hatten. Neben der balneologischen Nutzung wird die dabei anfallende geothermische Energie auch zu Heizzwecken verwendet. Die Möglichkeiten zur Nutzung

des tiefeingeothermischen Potenzials gehen jedoch darüber hinaus. Hinsichtlich der Gewinnung von Erdwärme zur Nahwärmeversorgung und möglicher Stromerzeugung werden große Erwartungen in petrothermale Systeme gesetzt, die die Untergrundwärme bis in mehrere Kilometer Tiefe erschließen sollen. Dies setzt anhaltende bzw. verstärkte Forschungs- und Entwicklungstätigkeit insbesondere im wissenschaftlichen Bereich voraus. Aber auch in geringeren Tiefen liegt ein erhebliches Nutzungspotenzial. Es kann grundsätzlich durch mitteltiefe Erdwärmesonden erschlossen werden, wenngleich diese Form der Energiegewinnung aufgrund der hohen Investitionskosten zumindest derzeit noch keine Verbreitung findet. Mit einer Detailstudie zur mitteltiefen Erdwärmesondengeothermie richtete das Projekt GeoMol ganz bewusst den Blick in die Zukunft und schätzt dieses geothermische Potenzial für verschiedene Szenarien flächenhaft ab. Auch hier gilt es, durch weitere Anstrengungen z. B. auf dem Gebiet der Bohrtechnik, kostengünstigere Wege zu finden, um die Attraktivität dieser Technologie zu erhöhen – allerdings nur unter Einhaltung hoher Sicherheitsstandards, durch die Bohrrisiken vermieden und der Schutz genutzter und nutzungswürdiger tiefer Grundwässer gewährleistet werden kann.

Durch das Projekt GeoMol wurde mit der dreidimensionalen Modellierung und Visualisierung des geologischen Aufbaus und der Temperaturverhältnisse im tieferen Untergrund des voralpinen Molassebeckens ein wichtiger Meilenstein erreicht. Ein weitergehendes Verständnis für die im tieferen Untergrund des Molassebeckens ablaufenden Prozesse setzt voraus, zukünftig auch die tiefen thermalen Grundwasservorkommen in die Betrachtungen einzubeziehen. Diesbezüglich besteht bei Nutzern und Planern großes Interesse und ein hoher Informationsbedarf. Aus zeitlichen und finanziellen Gründen konnte dieser Nachfrage im Projekt GeoMol nicht nachgekommen werden. Sie bildet jedoch einen Ansatzpunkt für künftige anwendungs- und forschungsbezogene Aktivitäten in Richtung eines gekoppelten thermisch-hydrochemischen Grundwasserströmungs- und transportmodells. Aufgrund der komplexen geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse sowie wirksamen Prozesse einerseits, und der begrenzten Verfügbarkeit von Daten über die Untergrundeigenschaften und die Grundwasserbeschaffenheit andererseits, stellt ein solches Grundwassermodell eine große fachliche Herausforderung dar, wobei der enge Praxisbezug der erzielbaren Ergebnisse die Anstrengungen rechtfertigt. Diese Kenntnisse bilden die

Grundlage für ein verbessertes Verständnis und eine fundierte Bewertung der hydrogeologischen und wasserwirtschaftlichen Verhältnisse im tieferen Untergrund. Hiermit würde sowohl den Nutzern der Grundwasservorkommen als auch den Fachbehörden ein Werkzeug zur Beurteilung des natürlichen Grundwasserdargebotes und zur nachhaltigen Bewirtschaftung der mengenmäßig begrenzten Grundwasservorkommen im tieferen Untergrund des Molassebeckens an die Hand gegeben. Darüber hinaus kann es auch zur verbesserten Abschätzung des hydrogeothermischen Potenzials dienen.

Eine dezentrale datenbankbasierte Haltung von 3D-Datensätzen sowie die webbasierte Visualisierung der 3D-Modelle inklusive verschiedener Analysewerkzeuge ist Voraussetzung für eine breite Nutzung der Projektergebnisse. Im Rahmen von GeoMol wurde hierfür mit GST (Geosciences

in Time and Space) eine Softwarelösung weiterentwickelt, die diese Funktionalitäten grundsätzlich erfüllt. Für den tagtäglichen Einsatz als zentrale Drehscheibe für den Austausch von 3D-Informationen und für die Bearbeitung großer Modelle durch mehrere Teammitglieder wird jedoch noch weiterer Entwicklungsbedarf gesehen.

Im Projekt GeoMol haben die beteiligten Akteure gezeigt, dass komplexe geowissenschaftliche Fragestellungen durch die Vernetzung der Fachkompetenz der geologischen Dienste und von Forschungseinrichtungen gelöst werden können. Dieser Weg erscheint auch für zukünftige Fragestellungen und Herausforderungen aussichtsreich und erfolgversprechend. Die im Rahmen des Projekts GeoMol aufgebauten fachlichen Beziehungen bieten hierfür einen wertvollen Anknüpfungspunkt.



10 Danksagung

Das Projekt GeoMol wäre ohne die fachliche Begleitung und Unterstützung von zahlreichen Institutionen und Firmen während der Laufzeit von fast drei Jahren nicht möglich gewesen.

An erster Stelle sei dem INTERREG IV B Programm Alpine Space gedankt, welches das Projekt zu 76 % kofinanziert hat. Ein besonderer Dank geht auch an die externen Beobachter aus der Wirtschaft, regionalen Planungs- und Verwaltungsbehörden und dem universitären Umfeld, die dem Projekt wesentliche Empfehlungen und fachliche Impulse lieferten.

Das Projekt stützt sich u.a. auf zahlreiche extern erhobene Daten, ohne die der Aufbau einer transnational harmonisierten Datenbasis nicht möglich gewesen wäre. Folgende Firmen, Ämter und Organisationen haben dankenswerterweise ihre Daten bzw. Know-How zur Verfügung gestellt: Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e. V. (WEG),

Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), Schweizerische Erdöl AG (SEAG), Sankt Galler Stadtwerke (SGSW), Grob Gemüse, Proseis AG, Institut für Seenforschung Langenargen (LUBW) sowie die Kantone Appenzell Innerrhoden, Appenzell Ausserrhoden, St. Gallen und Thurgau. Die Projektpartner danken allen Beteiligten für ihre geleistete Arbeit, ihre fachlichen Beiträge und die Bereitschaft zur Herausgabe von Daten.

Die Universität Basel dankt IHS Global, Inc. für die Bereitstellung einer Lizenz für die Software IHS Kingdom®.

Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der beteiligten geologischen Dienste und Universitäten sowie deren Verwaltungen haben das Projekt GeoMol mit viel Engagement umgesetzt und zum Erfolg geführt. Ihnen sei an dieser Stelle ausdrücklich gedankt.

Abkürzungen

a	Jahr	GBA	Geologische Bundesanstalt Wien
A	Österreich	GeoLa	Integrierte geologische Landesaufnahme, landesweit harmonisierter, blattschnittfreier, digitaler geologischer Fachdatensatz für Baden-Württemberg
APM	A-Priori-Modell	GeORG	Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben
arith. Mittel	Arithmetisches Mittel	GFK-KOAX	GFK-Koaxial-Ausbau
ArcGIS	Geoinformationssystem der Firma ESRI	GFK-Rohre	Glasfaserverstärkte Kunststoffrohre
ASCII	American Standard Code for Information Interchange	GIS	Geoinformationssystem
AUG	Universität Basel, Abteilung Angewandte und Umweltgeologie	Gocad	3D-Modellierungssoftware der Firma Paradigm
BHT	Bottom hole temperature (Temperaturmessung am Bohrloch tiefsten)	GST	Geosciences in Space and Time, Softwarelösung für eine plattformunabhängige Datenbankhaltung von 3D-Modellen der Firma GiGa Infosystems
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Deutschland)	GVM	Geophonversenkungsmessung
BW	Baden-Württemberg	h	Stunde
BY	Bayern	HBC	Hochschule Biberach
°C	Grad Celsius	HDR	Hot Dry Rock
CH	Schweiz	ISONG	Informationssystem Oberflächennahe Geothermie für Baden-Württemberg
Δs	Weginkrement (Geschwindigkeitsmodellierung)	K	Kelvin
Δt_{wt}	Laufzeitinkrement (Geschwindigkeitsmodellierung)	k	Kilo
DGM	Digitales Geländemodell	KLIP	Klimaprogramm Bayern 2020
DHDN	Deutsches Hauptdreiecksnetz (Triangulationsnetz der Bundesrepublik Deutschland)	K/m	Kelvin pro Meter (Temperaturgradient)
DSI	Discrete Smooth Interpolation Method, Gocadspezifischer Interpolationsalgorithmus	km	Kilometer
EGS	Enhanced Geothermal System	KW	Kohlenwasserstoffe (Erdöl und Erdgas)
EPSG	Geodetic Parameter Dataset (Standardisierter Datensatz für Referenz-Koordinatensysteme)	l	Liter
EWS	Erdwärmesonde	l/s	Liter pro Sekunde, Ausflussrate
FEFLOW	Finite Element subsurface FLOW system der Firma DHI-WASY	LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen
FIS-GP	Fachinformationssystem Geophysik	LCA	Pilotgebiet Bodensee-Allgäu (Lake-Constance-Allgäu)
Fm	Formation	LCA-A	LCA-Teilgebiet Österreich
GA25	Geologischer Atlas der Schweiz 1:25.000	LCA-BW	LCA-Teilgebiet Baden-Württemberg
GB	Geothermiebohrung	LCA-BY	LCA-Teilgebiet Bayern
		LCA-CH	LCA-Teilgebiet Schweiz



LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt	SKUA	3D-Modellierungssoftware der Firma Paradigm
LGRB	Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Abt. 9 im Regierungspräsidium Freiburg	SMB	Schweizer Molassebecken
LK25	Landeskarte der Schweiz 1:25.000	SnS-Workflow	SKUA-spezifischer Workflow für die Modellierung von Störungen und Horizonten
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg	SRTM	Shuttle Radar Topography Mission, weltweit verfügbares digitales Höhenmodell
LV03	Altes Schweizer Koordinatensystem 1903	SRD	Seismisches Referenzniveau
LV95	Neues Schweizer Koordinatensystem 1995	Stdabw	Standardabweichung
m	Meter	swisstopo	Bundesamt für Landestopografie
M	Mega	T	Temperatur
Ma v.H.	Millionen Jahre vor heute	T _{DEM}	Oberflächentemperatur
Max	Maximum	TB	Tiefbohrung
Min	Minimum	TVD	True vertical depth (um die laterale Abweichung korrigierte Tiefenangabe in Bohrungen)
min	Minute	twt	Two way travel time, Laufzeit
Move	3D-Modellierungssystem der Firma der Firma Midland Valley	UTM	Universal Transverse Mercator (globales Koordinatensystem)
ms	Millisekunde	V _{av}	Seismische Durchschnittsgeschwindigkeit
MTEWS	Mitteltiefe bis tiefe Erdwärmemesonde	Vave	Durchschnittsgeschwindigkeitsraster
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Schweiz)	Vint	Intervallgeschwindigkeitsraster
NLfB	Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (seit 2006 LBEG)	W	Watt
NN	Normalnull, Höhe über dem Meeresspiegel	z	Höhe in m NN
Num	Anzahl		
OMV	OMV Aktiengesellschaft, früher Österreichische Mineralölverwaltung		
ORC	Organic Rankine Cycle		
PE-/PP-Rohre	Polyethylen-/Polypropylen-Rohre		
Perz.	Perzentil (Lagemaß in der Statistik)		
R _{b,tot}	Effektiver Bohrlochwiderstand		
RVBO	Regionalverband Bodensee-Oberschwaben		
s	Position unter Gelände		
SBM	Superposition Borehole Model		
SEG-Y	Standardisiertes Datenformat für digitale Seismikdaten		

Literatur

- Agemar, T., Schellschmidt, R. & Schulz, R. (2011): 3D-Modell der Untergrundtemperatur von Deutschland. – Der Geothermie Kongress 2011, 15.-17.11.2011: 9 S.; Bochum. – Online-Ressource: [http://www.geotis.de/homepage/Ergebnisse/F9.5_Agemar_et_al.pdf]
- Agemar, T., Brunken, J., Jodocy, M., Schellschmidt, R., Schulz, R. & Stober, I. (2013): Untergrundtemperaturen in Baden-Württemberg. - Z. Dt. Ges. Geowiss., 164(1): 49–62; Stuttgart (Schweizerbart).
- Akademie für Geowissenschaften und Geotechnologien [Hrsg.] (2014): Geoforum 2013, Raumordnung für den tiefen Untergrund Deutschlands. – AGG Veröffentlichungen Heft 30: 95 S.; Hannover.
- Albert, W. & Bläsi, H.-R. (2001): Stratigraphie Nordostschweiz – Nagra interner Bericht, NIB 00-45: 48 S., 23 Beil. - [unveröff.]
- Bachmann, G.H. & Müller, M. (1981): Geologie der Tiefbohrung Vorderriß 1 (Kalkalpen, Bayern). – Geol. Bavarica, 81: 17–53; München.
- Bachmann, G.H. & Müller, M. (1992): Sedimentary and structural evolution of the German Molasse Basin. – Eclogae Geol. Helv. 85: S. 519-530; Basel.
- Bartels, J., Fritz, J., Gehrke, D., Wirth, W. (2010): Erhöhte Entzugsleistung von Erdwärmesonden durch Salzstockhochlagen, Z. dt. Ges. Geowiss., 161/4: 401–409, 7 Abb., 2 Tab.; Stuttgart.
- BayGLA [Bayerisches Geologisches Landesamt] (Hrsg.) (1996): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 500.000, 4. Aufl., 329 S.; München.
- BayLfU [Bayerisches Landesamt für Umwelt] (2014): Klimaprogramm Bayern 2020 (KLIP): Tiefe Geothermie im bayerischen Molassebecken – 3D-Untergrundmodell zur Minderung der Erschließungs- und Nutzungsrisiken ; Augsburg (LfU). – [unveröff.]
- BayLfW & LGRB [Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft & Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau] (Hrsg.) (1991): Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malmkarstes im süddeutschen Molassebecken. – Schlussbericht zum Forschungsvorhaben 03E-6240 A/B (im Auftrag des Bundesministerium für Forschung und Technologie). – (München (LfW) & Freiburg i.Br. (LGRB).
- BayStMIVT [Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie] (Hrsg.) (2010): Bayerischer Geothermieatlas, 2. Aufl., 104 S., Karten-CD; München.
- Berge, T.B. & Veal, S.L. (2005): Structure of the Alpine foreland. – Tectonics, 24 (TC5011): 10 p.; Washington / DC. – [DOI: 10.1029/2003TC001588].
- Bertleff, B., Joachim, H., Koziorowski, G., Leiber, J., Ohmert, W., Prestel, R., Stober, I., Strayle, G., Villinger, E. & Werner, J. (1988): Ergebnisse der Hydrogeothermiebohrungen in Baden-Württemberg., Jh. Geol. Landesamt Baden-Württemberg, 30, 27–116, 30 Abb., 6 Tab., 1 Tafel, 2 Beilagen; Freiburg i. Br.
- Bertleff, B. & Watzel, R. (2002): Tiefe Aquifersysteme im südwestdeutschen Molassebecken. Eine umfassende Analyse als Grundlage eines zukünftigen Quantitäts- und Qualitätsmanagements., Abh. L.-Amt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, 15, 75-90; Freiburg i. Br.
- BfE (2003): Tiefe Erdwärmesonde Weggis - Messkampagne zur Dokumentierung der neuen Einflüsse beim Ausbau der Abnehmerleistung, Erdwärmesonde, Bundesamt für Energie BFE, 14 fig., 25 S., Schlussbericht November 2003; Bern.
- BfE (2010): Tiefen-EWS Oftringen (706m): Direktheizen mit einer 40-mm-2-Kreis PETiefen-Erdwärmesonde, Bundesamt für Energie BFE, 42 S., Beilagen, Abschlussbericht 15. November 2010; Bern.
- Büchi, U.P. (1975): Wasser- und Energiegewinnung aus der Oberen Meeresmolasse und dem Mesozoikum. – Veröff. Inst. bauwiss. Forsch., Stiftung Kollbrunner/Rodio, 34: 19 S.; Zürich.
- Büchi, U.P., Lemcke, K., Wiener, G. & Zimdars, J. (1965a): Geologische Ergebnisse der Erdölexploration auf das Mesozoikum im Untergrund des Schweizerischen Molassebeckens. – Bull. Ver. Schweizer. Petrol.-Geol. u. -Ing., 32 (82): 7–38; Richterswil.
- Büchi, U.P., Wiener, G. & Hofmann, F. (1965b): Neue Erkenntnisse im Molassebecken auf Grund von Erdöltiefbohrungen in der Zentral- und Ostschweiz. – Eclogae geol. Helv., 58: 87–108, 1 Taf.; Basel.
- Bujakowski, W., Barbackia, A., Miecznika, M., Pająka, L., Skrzypczaka, R. & Sowizdzałb, A. (2015): Modelling geothermal and operating parameters of EGS installations in the lower triassic sedimentary formations of the central Poland area. - Renewable Energy Volume 80: 441–453; Amsterdam.
- Burkhalter, R.M., Bläsi, H.-R. & Feist-Burckhardt, S. (1997): Der «Dogger β» (oberes Aalenien) in den Bohrungen Herdern-1, Berlingen-1 und Kreuzlingen-1 (Nordostschweiz) und seine Beziehung zu den gleichaltrigen Schichten im Nordjura - Eclogae geol. Helv. 90: 269-291; Basel.
- Busslinger, A. & Rybach, L. (1999): Felstemperaturprognose für tiefliegende Tunnel. – Tunnel, 1/99: 24-35; Gütersloh.
- Chadwick, R.A., Arts, R., Bernstone, C., May, F., Thibeau, S. & Zweigel, P. (2008): Bestpractice for the storage of CO₂ in saline aquifers: observations and guidelines from the SACS and CO₂STORE projects. – 267 S.; Keyworth (British Geological Survey).
- Clauser, C., Deetjen, H., Höhne, F., Rühaak, W., Hartmann, A., Schellschmidt, R., Rath, V. & Zschocke, A. (2002). Erken-



- nen und Quantifizieren von Strömung: Eine geothermische Rasteranalyse zur Klassifizierung des tiefen Untergrundes in Deutschland hinsichtlich seiner Eignung zur Endlagerung radioaktiver Stoffe – Endbericht zum Auftrag 9X0009- 8390-0 des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS). – 159 S.; Aachen (RWTH) – Online-Ressource: [http://www.eonerc.rwth-aachen.de/aw/cms/website/zielgruppen/gge/research_gge/geothermik/~txt/geothermische_stroemungsanalyse/?lang=de]
- Clauser, C. & A. Koch (2006): Erstellung statistisch abgesicherter thermischer und hydraulischer Gesteinseigenschaften für den flachen und tiefen Untergrund in Deutschland, Phase 1 - Westliche Molasse und nördlich angrenzendes Süddeutsches Schichtstufenland. Bericht zum BMU-Projekt FKZ 0329985. – Online-Ressource: [http://www.eonerc.rwth-aachen.de/aw/cms/website/zielgruppen/gge/research_gge/geothermik/~vfa/Erstellung_statistisch_abgesicherter_thermischer/?lang=de]
- Deming, D. (1989): Application of Bottom-Hole Temperature Corrections in Geothermal Studies. – *Geothermics*, 18 (5/6): 775–786; Kidlington.
- Diamond, L.W., Leu, W. & Chevalier, G. (2010): Studie zur Abschätzung des Potenzials für CO₂-Sequestrierung in der Schweiz, Potential for geological sequestration of CO₂ in Switzerland. – BFE-Schlussbericht, 31.08.2010: 23 S.; Bern.
- Diebold, P.(1988): Der Nordschweizer Permokarbon-Trog und die Steinkohlenfrage der Nordschweiz. - *Vjschr. natf. Ges. Zürich* 133/1: S. 143-174; Zürich.
- Diebold, P., Naef, H. & Ammann, M. (1991) : Zur Tektonik der zentralen Nordschweiz - NAGRA, NTB 90-04, ca. 300 S. + Beilagenband, Wettingen.
- Diepolder, G. W. & Schulz, U. (2011): Tiefliegende Speicher- und Barrieregesteinskomplexe in Bayern – ein Überblick. - *Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss.* 74: 118–136, 1860-1782; Stuttgart.
- Diepolder, G.W. (2015): Das internationale Projekt GeoMol als Beispiel für die Erkundung von Geopotenzialen – Hintergründe, Implementierung und Rechtshemmnisse. In: Kment, M. (Hrsg.): *Unterirdische Nutzungen – Systematisierung und planerische Steuerung, Gewinnpartizipation und Haftung. Schriften zum Infrastrukturrecht* 3: 1–19; (Tübingen, Mohr Siebeck).
- DIN 4049-3 (1994): Hydrologie- Teil3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie; Berlin (Beuth-Verlag).
- Dix, C.H. (1955): Seismic velocities from surface measurements. – *Geophysics* 20: 68–86; Tulsa.
- Drong, H.J. (2003): Das kristalline Grundgebirge in Bohrungen des nordwestlichen Alpenvorlandes. – *Geol. Bavarica* 108: 13–110; München.
- DSK (2005): Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.) (2005): *Stratigraphie von Deutschland IV. Keuper*. – *Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg* 253: 296 S.; Frankfurt a.M.
- Dussel, M., Lüschen, E., Thomas, R., Agemar, T., Fritzer, T., Sieblitz, S., Schulz, U., Huber, B., Bartels, J., Wolfgramm, M., Wenderoth, F. & Schulz, R. (2011): Entwicklung einer thermisch-hydraulischen Grundwassermodellierung des Malm im Großraum München. – *Tagungsband-CD: F9, Der Geothermiekongress 2011*, 15.-17. Nov. 2011, 11 S.; Bochum.
- DWD (Deutscher Wetterdienst, ohne Jahr): Jahresmitteltemperaturen der Normalperiode 1961–1990. – Online-Ressource: [<http://www.dwd.de/mittelwerte>]
- Eberhard, T. (2012): Interpretation von reflexionsseismischen Messungen am Bodensee aus den Jahren 1980/1981. – *BSc-Arb., Inst. Geol. Paläont. Univ. Innsbruck*: 36 S. – [unveröff.]
- Ellwanger, D., Kimmig, B., Simon, T. & Wielandt-Schuster, U. (2011): Quartärgeologie des Rheingletschergebiets. – *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F.* 93: 387–417; Stuttgart (Schweizerbart).
- Eskilson, P. (1986). *Superposition Borehole Model, Manual for Computer Code*. Department of Mathematical Physics, University of Lund; Sweden.
- Ewz (2014): Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz) - Erkundungsbohrung Sonnengarten im Triemli-Quartier Zürich, Schlussbericht: 44 S.; Zürich.
- Fehn, C. & Wirsing, G. (2011): Speicherpotenziale im tiefen Untergrund Baden-Württembergs. – *Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss.*, 74: 164–175; Hannover.
- Förster, A. (2001): Analysis of borehole temperature data in the Northeast German Basin; continuous logs versus bottom-hole temperatures. *Petroleum Geoscience*, 7, 241–254.
- Franz, M. & Nitsch, E. (2009): Zur lithostratigraphischen Gliederung des Aalenium in Baden-Württemberg. – *LGRB-Informationen*, 22: 124–146; Freiburg i.Br.
- Fritsche J.-G. & Kött, A. (2012): Forschungs- und Entwicklungsprojekt mitteltiefe Erdwärmesonde Groß-Umstadt-Heubach, Jahresbericht 2011 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, 119–124, Wiesbaden.
- Funnell, R., Chapman, D., Allis, R. & Armstrong, P. (1996): Thermal state of the Taranaki Basin, New Zealand. – *J. Geophys. Res.* 101, 25197–25215.
- Gabriel, P., Gietzel, J., Le, H.H. & Schaeben, H. (2011): A network based data store for geoscience data and its implementation. *Proceedings of the 31st Gocad Meeting, Nancy*. – Online-Ressource: [<http://tu-freiberg.de/fakult3/IS4GEO/gOcad2011.pdf>]
- Gander, P. (2004): Geologie und Hydrogeologie der Oberen Süßwassermolasse. Dokumentation des aktuellen Kenntnisstandes. – *Nagra Arbeitsbericht NAB 04-04*: 70 S.; Wettingen.

- GBA (2015): GeoMol – Geologische 3D Modellierung des oberösterreichischen - oberbayerischen Molassebeckens und Anwendungen in der Hydrogeologie und Geothermie im Grenzgebiet Oberösterreich / Oberbayern. Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt (Wien, GBA), in Vorbereitung.
- GeoMol Team (2015): GeoMol – Assessing subsurface potentials of the Alpine Foreland Basins for sustainable planning and use of natural resources – Project Report. 188 S., Augsburg (LfU). – Online-Ressource: [<http://www.geomol.eu/report>]
- GeORG-Projektteam (2013): Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben, Fachlich-technischer Abschlussbericht des INTERREG-Projekts GeORG, Teile 1-4. – Online-Ressource: [<http://www.geopotenziale.eu>]
- GeORG-Projektteam (2013a): Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben, Fachlich-Technischer Abschlussbericht des Interreg-Projekts GeORG, Teil 1. – LGRB-Informationen, 28: 103 S.; Freiburg i. Br.
- GeORG-Projektteam (2013b): Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben, Fachlich-Technischer Abschlussbericht des Interreg-Projekts GeORG, Teil 2: Geologische Ergebnisse und Nutzungsmöglichkeiten. – 346 S.; Freiburg i. Br.
- GeORG-Projektteam (2013c): Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben, Fachlich-Technischer Abschlussbericht des Interreg-Projekts GeORG, Teil 3: Daten, Methodik, Darstellungsweise. – 242 S.; Freiburg i. Br.
- GeotIS: Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (Hrsg.) (Online-Ressource): GeotIS – Geothermisches Informationssystem für Deutschland. – Online-Ressource: [<http://www.geotis.de>]
- Geyer, M., Nitsch, E. & Simon, T. (2011): Geologie von Baden-Württemberg [5. Aufl.]. – 627 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- GGD (2013 a): Ergebnisbericht GeoMol - Seismikreprozessierung Los 1. – 8 S., Geophysik GGD - Gesellschaft für Geowissenschaftliche Dienste; Leipzig. – [unveröff.]
- GGD (2013 b): Ergebnisbericht GeoMol - Seismikreprozessierung Los 2. – 7 S., Geophysik GGD - Gesellschaft für Geowissenschaftliche Dienste; Leipzig. – [unveröff.]
- GGD (2013 c): Ergebnisbericht GeoMol - Seismikreprozessierung Los , Auftraggeber für Bayerisches Landesamt für Umwelt. – 10 S., Geophysik GGD - Gesellschaft für Geowissenschaftliche Dienste; Leipzig. – [unveröff.]
- GGD (2013 d): Ergebnisbericht GeoMol - Seismikreprozessierung Los 2, Auftraggeber für Bayerisches Landesamt für Umwelt. – 19 S., Geophysik GGD - Gesellschaft für Geowissenschaftliche Dienste; Leipzig. – [unveröff.]
- Gmünder, C., Jordan, P. & Becker, J.K. (2013): Documentation of the Nagra regional 3D-Geological Model 2012. – Nagra Arbeitsber., NAB 13–28: 95 S.; Wetztingen (Nagra).
- Gmünder, C., Malaguerra, F., Nusch, S. & Traber, D. (2014): Regional Hydrogeological Model of Northern Switzerland. Nagra Arbeitsbericht NAB 13-23: 116 S.; Nagra, Wetztingen.
- Goutorbe., B., Lucazeau, F & Bonneville, A.(2007): Comparison of several BHT correction methods: a case study on an Australian data set. – Geophys. J. Int., 170: 913–922; Oxford.
- Goy, L., Fabre, D. & Menard, G. (1996): Modelling of Rock Temperatures for Deep Alpine Tunnel Projects. – Rock Mechanics and Rock Engineering, 29 (1): 1–18.
- Graf, R. (2013): Reflexionsseismik in der Planung von Geothermieprojekten. – Vortragsfolien, 2. Internat. Geothermiekongr. 23.05.2013; St. Gallen
- Gudmundsson, J., Freeston, D. & Lienau, P. (1985): The Lindal Diagram. – Geothermal Resources Council Transactions, 9, Part I, 15–19; Davis, California.
- Habicht, K. (1945): Geologische Untersuchungen im südlichen sanktgallisch-appenzellischen Molassegebiet. – Beitr. geol. Kt. Schweiz, N. F. 83: 166 S., 4 Taf.; Bern.
- Haus, H.A. (1960): Mönchsrot als Ölfeld im Westabschnitt der südlichen Vorlandmolasse. – Bull. Ver. schweiz. Petrol. Geol. u. Ing., 26 (71): 49–74; Zürich.
- HBC (2014): Hochschule Biberach. Kurzstudie zur Bedarfsanalyse und zu Nutzungskonzepten für die Mitteltiefe Erdwärmesondengeothermie im Pilotgebiet Lake Constance Allgäu Area. – Endbericht, 28 S., 7 Abb., 3 Tab., Biberach.
- Henning, A. & Limberg, A. (2012): Veränderung des oberflächennahen Temperaturfeldes von Berlin durch Klimawandel und Urbanisierung. Brandenburger geowiss. Beitr. 19, 1: 81–92. Cottbus.
- Hellström, G. (1989): Superposition Borehole Model, IBM PC Version, Supplement to Manual for Computer Code. Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
- Heuberger, S. & Naef, H. (2012): The St. Gallen Fault Zone (NE Switzerland): A long-lived, multiphase structure in the North Alpine Foreland – Insights from high-resolution 3D seismic data. – Swiss Geoscience Meeting, Bern 2012, Abstr. 2.9: 1 p.; Bern.
- Hofmann, F. (1959): Vulkanische Tuffhorizonte der Schienerbergeruptionen auf dem thurgauischen Seerücken. – Eclogae geol. Helv., 52: 461–475; Basel.
- Hofmann, F. (1975): Vulkanische Tuffe auf dem Wellenberg E von Frauenfeld und neue Funde auf dem thurgauischen Seerücken. – Eclogae geol. Helv., 68: 311–318; Basel.
- Horner, D.R. (1951): Pressure build-up in wells. In: Third World Petroleum Congress. The Hague, Netherlands.
- Huber, A. (2014): Bodentemperaturen und geothermischer Wärmefluss in der Schweiz.– Huber Energietechnik AG. www.hetag.ch



- Huwiler, M., Kohl, T., Baujard, C., Ollinger, D., Berli, S., Kramer, M., Wyss, R., Blum, A., Naef, H. & Schäppi, H.J. (2009): Machbarkeitsstudie Tiefengeothermie Stadt St. Gallen; Konzept für die Entwicklung einer Geothermieranlage in der Stadt St. Gallen – Schlussbericht. – Bundesamt für Energie BFE, Projektnr. 102635, Publikationsnr. 290170: 144 S.; Internet (www.bfe.admin.ch). Bern.
- INSPIRE [Infrastructure for Spatial Information in Europe] (2011): Technical Guidance for the implementation of INSPIRE Discovery Services. – Online-Ressource: [http://inspire.jrc.ec.europa.eu/documents/Network_Services/TechnicalGuidance_DiscoveryServices_v3.1.pdf]
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2005): IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage [Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H.C., Loss, M. & Meyer, L.A. (ed.)]. – 422 S.; Cambridge & New York (Cambridge University Press).
- Karich, F. (2010): Erstellung eines Standalone Programms zur Koordinatentransformation von GoCAD-Objekten im Projekt GeORG. – 30 S., BSc Arbeit am Institut für Geophysik und Geoinformatik, TU Bergakademie Freiberg, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau; Freiberg. – [unveröff.]
- Keller, B. (1992): Hydrogeologie des schweizerischen Molasse-Beckens: aktueller Wissensstand und weiterführende Betrachtungen. – *Eclogae Geol. Helv.*, 85: 611–651; Basel.
- Kiraly, L. (1990): Projekt Malmkarst: Programmbeschreibung zum Grundwasserströmungsmodell: 53 S., 38 Abb.; Neuchâtel.
- Knopf, S., May, F., Müller, Ch. & Gerling, J.P. (2010): Neuberechnung möglicher Kapazitäten zur CO₂-Speicherung in tiefen Aquifer-Strukturen. – *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 60. Heft 4: 76–80, 3 Abb., Essen.
- Koenigsdorff, R., Heinrich, S. & Sedlak M. (2006): Test und Weiterentwicklung des Programms GEOSYST und Bemessung von Erdwärmesondenfeldern mit einem daraus abgeleiteten Handrechenverfahren. 6. OTTI-Forum Oberflächennahe Geothermie, Tagungsband,; 117–124, Freising.
- Koenigsdorff, R. (2011): Oberflächennahe Geothermie für Gebäude – Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung. Fraunhofer IRB; Stuttgart.
- Kohl, T., Signorelli, S. & L. Rybach (2001): Three-dimensional (3-D) thermal investigation below high Alpine topography. – *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 126: 195–210.
- Kühne, K. (2006): Das Fachinformationssystem Geophysik und seine Nutzung über das Internet. – In: Merkel, B., Schaeben, H., Wolkersdorfer, C. & Hasche-Berger, A. (Hrsg.): GIS – Geowissenschaftliche Anwendungen und Entwicklungen, 57. Berg- und Hüttenmännischer Tag, 23.06.2006, Wiss. Mitteilungen des Instituts für Geologie, 31: 227–231; Freiberg.
- Lachenbruch, A.H. & Brewer, M.C. (1959): Dissipation of the temperature effect of drilling a well in Arctic Alaska. – *Geological Survey Bulletin* 1083 (C), 73–109.
- Laubscher, H.P. (1970): Grundsätzliches zur Tektonik des Rheingrabens. – In: Illies, J.H. & Mueller, S. (Hrsg.), *Graben Problems*: 79–87; Stuttgart (Schweizerbart).
- LBEG (2007): Bei der Erforschung der Kohlenwasserstoff-Potentiale Süddeutschlands gewonnenen Erkenntnisse über den tieferen Untergrund. Eine erdölgeologische Spurensicherung. Teil 1: Alpen und Alpenvorland. – 2 CDs, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen; Hannover. – [unveröff.]
- Lemcke, K. (1988): Das bayerische Alpenvorland vor der Eiszeit. *Erdgeschichte – Bau – Bodenschätze*. – *Geologie von Bayern*, I: 175 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- Lemcke, K. & Wagner, R. (1961): Zur Kenntnis des vortertiären Untergrundes im Bodenseegebiet. – *Bull. Schweiz. Petrol.-Geol. u. -Ing.*, 27 (73): 9–14; Basel.
- Le, H.H., Gabriel, P., Gietzel, J. & Schaeben, H. (2013): An object-relational spatio-temporal geoscience data model. *Computer & Geosciences*, 57: 104-117. [DOI 10.1016/j.cageo.2013.04.014]
- Leblanc, Y., Lam, H.-L., Pascoe, L.J. & Jones, F.W. (1982): A comparison of two methods of estimation static formation temperature from well logs. – *Geophysical Prospecting* 30: 348–357, Hoboken.
- LGRB (Bearb. Pikulski, A.) (1989): 1. Bericht zum Projekt „Grundwasserbilanz der Oberen Meeresmolasse in Oberschwaben“; Freiburg, unveröff.
- LGRB (Hrsg.) (2010): HGK Argen-Ach-Rinne und Isnyer Becken. – Hydrogeologische Karte von Baden-Württemberg 1 : 50 000; Freiburg.
- LGRB (Bearb. Bertleff, B., Ondreka, J., Plum, H., Storz, R. & Schloz, W.) (2005): Hydrogeologische und geothermische Grundlagen zur Nutzung der tiefen Geothermie/Hydrogeothermie in der Region Bodensee – Oberschwaben: 18 S., 26 Anl.; Freiburg.
- LGRB (2015a): Geologische Karte 1 : 50 000, Geodaten der Integrierten geowissenschaftlichen Landesaufnahme Baden-Württemberg (GeoLa); Freiburg. – Online Ressource: [http://www.lgrbbw.de/aufgaben_lgrb/geola/produkte_geola]
- LGRB (Bearb. Ellwanger, D.) (2015b): Lithostratigrafische Entwicklung des baden-württembergischen Rheingletschergebiets: Übertiefe Becken- und Moränen- Landschaft. – LGRB-Fachbericht; Freiburg.
- LIAG (Bearb. Schulz, R. & Thomas, R. (Hrsg.) mit Beiträgen von Bartels, J., Birner, J., Dussel, M., Luschen, E., Megies, T., Schneider, M., Wassermann, J., Wenderoth, F. & Wolfgram, M) (2012): Geothermische Charakterisierung von karstig-klüftigen Aquiferen im Großraum München – Endbericht. – LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 130 392, 98S.; Hannover.
- Löpfe, R., Zaugg, A., Blass, A. & Kriemler, M. (2012): – Blatt 1113 Ricken, *Geol. Atlas Schweiz* 1 : 25.000, Atlasblatt 142: 1 Kt.; Wabern (Swisstopo).

- Ludwig, A. (1930): Flawil – Herisau – Brunnadern – Schwellbrunn. – Geol. Atlas Schweiz 1 : 25.000, Atlasblatt 4: 1 Kt.; Bern (SGK).
- Ludwig, A., Saxer, F., Eugster, H., Fröhlicher, H. & Meesmann, P. (1949): St. Gallen – Appenzell. – Geol. Atlas Schweiz 1 : 25.000, Atlasblatt 23: 1 Kt.; Bern (SGK). – [unveränderter Nachdruck 1988]
- Mallet, J.-L. (1992): Discrete smooth interpolation in geometric modelling. – *Comput aided design*; 24: 178–191; Amsterdam.
- Marchant, D., Ringgenberg, Y., Stampfli, G., Birkhäuser, P., Roth, P. & Meier, B. (2005): Paleotectonic evolution of the Zürcher Weinland (northern Switzerland), based on 2D and 3D seismic data. – *Ecolgae geol. Helv.* 98/3: S. 345–362; Basel.
- Mazurek, M. & Peters, T., 1992: Petrographie des kristallinen Grundgebirges der Nordschweiz und Systematik der herzynischen Granite. – *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.* 72/1: S. 11–35.
- McQuillin, R., Bacon, M. & Barclay, W. (1979): An introduction to seismic interpretation. – 199 S.; London (Graham & Trotman).
- Meier, B.P. (2010): Ergänzende Interpretation reflexionsseismischer Linien zwischen dem östlichen und westlichen Molassebecken. – Nagra Arbeitsber., NAB 10–40: 48 S.; Wettingen (Nagra).
- Meyer, R.K.F. & Schmidt-Kaler, H. (1989): Paläogeographischer Atlas des süddeutschen Oberjura (Malm). – *Geol. Jb., A* 115: 77 S.; Hannover.
- Michalzik, D. (2013): Mitteltiefe Geothermie – was ist das? – *Geothermische Energie*, Heft 76, 2: 30–31; Berlin.
- Middleton, M.F. (1979): A model for bottom-hole temperature stabilization. – *Geophysics* 44:1458–1462.
- Moeck, I., Bloch, T., Graf, R., Heuberger, S., Kuhn, P., Naef, H., Sonderegger, M., Uhlig, S. & Wolfram, M. (2015): The St. Gallen Project: Development of Fault Controlled Geothermal Systems in Urban Areas. – *Proc. World Geotherm. Congr., Melbourne, Australia*, 19 - 25. April 2015: 5 S.; Melbourne.
- Müller, W. H., Naef, H. & Graf, R. H. (2002): Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitzszenarien Zürcher Weinland. – Nagra Techn. Ber., NTB 99-08: 237 S.; Wettingen (Nagra).
- Naef, H., Birkhäuser, Ph. & Roth, Ph. 1995: Interpretation der Reflexionsseismik im Gebiet nördlich Lägeren - Zürcher Weinland. – Nagra NTB 94-14., ca. 120 S. + Beilagen; Wettingen.
- Naef, H. (2008): Stratigrafie, Mächtigkeit und Lithofazies der mesozoischen Formationen in der Nordschweiz. Eine Kompilation von Bohrungen, Übersichts- und Aufschlussprofilen. – Nagra Arbeitsber., NAB 06-26: 71 S.; Wettingen (Nagra).
- Naef, H. 2013): Das Geothermieprojekt St. Gallen. Vorbereitende geologische und geophysikalische Untersuchungen. – Vortragsfolien, 2. Internat. Geothermiekongr., 23.05.2013; St. Gallen.
- Nagra (1988): Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988, Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz. – Nagra Technischer Bericht NTB 88-25, 456 S. + Beilagen. Nagra, Wettingen.
- Nagra (2002): Projekt Opalinuston. Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. – Nagra Technischer Bericht NTB 02-03. Nagra, Wettingen.
- Nagra, 2008): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Geologische Grundlagen. Textband und Beilagenband. – Nagra Technischer Bericht NTB 08-04: 473 S. Nagra, Wettingen.
- OGC [Open Geospatial Consortium Inc.] (2002): Web Map Service Implementation Specification. OGC 01-068r3, v. 1.1.1. – Online-Ressource: [http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=1081]
- OGC [Open Geospatial Consortium Inc.] (2007): OpenGIS® Catalogue Services Specification. OGC 07-006r1, v. 2.0.2. – Online-Ressource: [http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=20555]
- Ortner, H., Aichholzer, S., Zerlauth, M., Pilser, R. & Fügenschuh, B. (2015): Geometry, amount, and sequence of thrusting in the Subalpine Molasse of western Austria and southern Germany, European Alps. – *Tectonics*, 34: 1–30; Washington / DC. – [DOI: 10.1002/2014TC003550]
- Pahud, D. (2002): Superposition Borehole Model, Complement to the user manual. – SUPSI (Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana); Lugano (interner Bericht).
- Pamer, R. & Diepolder, G.W. (2010): 3D geological modelling in Bavaria – state-of-the-art at a State Geological Survey. – *ZDGG*: 189–203; Stuttgart.
- Paschen, H., Oertel, D. & Grünwald, R. (2003): Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland – Sachstandsbericht. – Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (Hrsg.) (TAB-Arbeitsbericht Nr. 84): 124 S.; Berlin.
- Pfiffner, O.A. (2009): Geologie der Alpen. – 359 S.; Bern (Haupt).
- Pfiffner, O.A. (2011): Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps, including Vorarlberg (Austria) and Haute Savoie (France), 1 : 100 000, Explanatory notes. – *Geol. Spezialkt. [Schweiz]*, 128: 128 S.; Wabern (Swisstopo).
- Pfiffner, O.A., Burkhard, M., Hänni, R., Kammer, A., Kligfield, R., Mancktelow, N.S., Menkveld, J.W., Ramsay, J.G., Schmid, S.M. & Zurbriggen, R. (2010): Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps, including Vorarlberg (Austria) and Haute Savoie (France), 1 : 100 000. – *Geol. Spezialkt. [Schweiz]*, 128: 7 Kt.; Wabern (Swisstopo).



- Pfiffner, O.A., Erard, P.-F. & Stäubli, M. (1997): Two cross sections through the Swiss Molasse Basin (lines E4-E6, W1, W7-W10). – In: Pfiffner, O.A., Lehner, P., Heitzmann, P., Mueller, St., Steck, A. (eds.): Deep structure of the Swiss Alps, results of NRP 20: 64–72; Basel (Birkhäuser).
- PK Nutzung tieferer Untergrund (2015): Charakterisierung der Nutzungspotenziale des geologischen Untergrundes in Deutschland als Bewertungsgrundlage für unterirdische Raumnutzungen. Abschlussbericht.
- PK Tiefe Geothermie (2007): Geothermische Arbeitshilfe der Staatlich Geologischen Dienste. – Online-Ressource: [<http://www.liag-hannover.de/fileadmin/produkte/20061213145907.pdf>]
- RAG (2013): Tiefe Erdwärmesonde – nachhaltige Energie. – Broschüre der RAG Rohöl-Aufsuchungs-Aktiengesellschaft, Schwarzenbergplatz 16, 1015 Wien. – Online-Ressource: [http://www.rag-austria.at/uploads/tx_templavoila/rag_tews_folder_130131_web.pdf]
- Rath, V. & C. Clauser (Ed.) (2005): Erkennen und Quantifizieren von Strömungen: Eine geothermische Rasteranalyse zur Klassifizierung des tiefen Untergrundes in Deutschland hinsichtlich seiner Eignung zur Endlagerung radioaktiver Stoffe - Fortsetzung, Endbericht zum Auftrag 9X0009-8497-2 des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS): 209 S., Geophysica Beratungsgesellschaft mbH; Stolberg.
- Reinhold, K. & Müller, C. (2011): Speicherpotenzial im tieferen Untergrund – Übersicht und Ergebnisse zum Projekt Speicher-Kataster Deutschland. – Schriftenr. Dt. Ges. Geowiss., 74: 9–27; Hannover.
- Roth, P., Naef, H. & Schnellmann, M. (2010): Kompilation und Interpretation der Reflexionsseismik im Tafeljura und Molassebecken der Zentral- und Nordostschweiz. – Nagra Arbeitsber., NAB 10-39: 53 S.; Wettingen (Nagra).
- Rupf, I. & Nitsch, E. (2008): Das Geologische Landesmodell von Baden-Württemberg: Datengrundlagen, technische Umsetzung und erste geologische Ergebnisse. – LGRB-Informationen, 21: 81 S., 10 Beil.; Freiburg i. Br.
- Rupf, I. & Armbruster, V. (2008): Das geologische Modell des Informationssystems Oberflächennahe Geothermie für Baden-Württemberg. – In: Merkel, B., Schaeben, H., Wolkersdorfer, C. & Hasche-Berger, A. (Hrsg.): GIS - Geowissenschaftliche Anwendungen und Entwicklungen, 59. Berg- und Hüttenmännischer Tag 2008, Wiss. Mitt. Institut f. Geologie 37: 179–182; Freiburg i. Br.
- Rühaak, W., Rath, V. & Clauser, Ch. (2010): Detecting thermal anomalies within the Molasse Basin, Southern Germany. – *Hydrogeology Journal.*, 12; 18(8):1897–1915. Springer, Heidelberg. -[DOI: 10.1007/s10040-010-0676-z]
- RVBO/LGRB (2005) Regionalverband Bodensee-Oberschwaben und Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg: Die Nutzung der Erdwärme in der Region Bodensee-Oberschwaben – Oberflächennahe Geothermie und Tiefe Geothermie/Hydrogeothermie.– CD-ROM mit Erläuterungen; Ravensburg. Online-Ressource: [http://www.bodensee-oberschwaben.de/62_Projekte___Geothermie.RVBO?ActiveID=1100]
- Rybach, L., Büchi, U.P., Badmer, P. & Krüsi, H.R. (1980): Die Tiefengrundwässer des schweizerischen Mittellandes aus geothermischer Sicht. – *Eclogae geol. Helv.* 73: 293–310; Basel.
- Saxer, F. (1964): Blatt 1075 Rorschach, Geol. Atlas Schweiz 1 : 25.000, Atlasblatt 45: 1 Kt.; Wabern (Swisstopo).
- Schärli, U. & Kohl, T. (2002): Archivierung und Kompilation geothermischer Daten der Schweiz und angrenzender Gebiete. – In: Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik Nr. 36; Zürich.
- Schärli, U. & Rohner, E. (2007): Thermische Leitfähigkeit: Eichung von in-situ Messungen (d.h. „kabellose Temperatursonde“) mit Laborbestimmungen als Grundlage für die geothermische Kartierung des Kanton ZH und der umliegenden Kantone. Bundesamt für Energie, Publikationsnummer: 270184, 102 S.; Bern.
- Schellschmidt, R. & Stober, I. (2008): Untergrundtemperaturen in Baden-Württemberg. – LGRB-Fachbericht [mit Beiträgen von Schloz, W., Jung, R. & Schulz, R.]: 28 S., 14 Abb., 2 Tab.; Freiburg.
- Schneider, J. (1962): Der Jura in Erdölbohrungen des westlichen Molassetroges. – In: Festschrift Hermann Aldinger: 163–172; Stuttgart (Schweizerbart).
- Schoop, R.W. & Wegener, H. (1984): Einige Ergebnisse der seismischen Untersuchungen auf dem Bodensee. – *Bull. Ver. Schweizer. Petrol.-Geol. u. -Ing.*, 50: 55–61; Richterswil.
- Schreiner, A. (1975): Zur Frage der tektonischen oder glazigen-fluviatilen Entstehung des Bodensees. – *Jber. Mitt. Oberrh. Geol. Ver.*, N. F. 57: 61–75; Stuttgart.
- Schulz, G., Schrader, H.K., Badtke, G., Bodemann, W. & Klonki, S. (1982): Bericht Bodensee 1980/81 über reflexionsseismische Messungen auf dem Bodensee. – *Prakla-Seismos GmbH Hannover, Bericht 810 670*: 54 S. – [unveröff.]
- Schwerd, K., Doppler, G. & Unger, H.J. (1996): Gesteinsfolge des Molassebeckens und der inneralpinen Tertiärbecken. – Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000 (4. Aufl.): 141–187; München (BayGLA).
- SGD/BGR/LIAG (2012): Geologische Informationen und Bewertungskriterien für eine Raumplanung im tieferen Untergrund. – Bericht: 8 S.; Wittenberg.
- Signorelli, S. & Kohl, T., 2006: Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz - Gebiet des nördlichen Schweizer Mittellandes. – *Beitr. Geol. Schweiz, Geophysik*, 39: 94 S.; Zürich.
- Smerdon, J.E., Pollack, H.N., Cermak, V., Enz, J.W., Kresl, M., Safanda, J. & Wehmiller, J.F. (2006): Daily, seasonal, and annual relationships between air and subsurface temperatures. – *J. Geophys. Res.*, 111: D07101. – [doi:10.1029/2004JD005578]
- Sommaruga, A., Eichenberger, U. & Marillier F. (2012): Seismic Atlas of the Swiss Molasse Basin. – *Matér. Géol. Suisse, Géophys.*, 44: 86 S., 9 App., 24 Encl.; Wabern (Swisstopo).

- Starck P. (1989): Untersuchungen über die Möglichkeiten der Nutzung geothermischer Energie in Vorarlberg, unpubl. Report der Landesregierung Vorarlberg, Bregenz.
- Stäubli, M. & Pfiffner, O.A. (1991): Processing, interpretation and model of seismic reflection data in the Molasse Basin of eastern Switzerland. – *Eclogae geol. Helv.*, 84: 151–175; Basel.
- Stober, I., & Villinger, E. (1997): Hydraulisches Potenzial und Durchlässigkeit des höheren Oberjuras und des Oberen Muschelkalks unter dem baden-württembergischen Molassebecken. – *Jahrb. Geol. Landesamt Baden-Württemberg*, 37, 77 – 96, Freiburg i. Br.
- Stober, I. & Jodocy, M. (2011): Geothermische Nutzhorizonte im westlichen Teil des Süddeutschen Molassebeckens. – *Z. Geol. Wiss.* 39 (3/4), 161–172; Heidelberg (Springer).
- Stober, I. & Jodocy, M. (2011): Geothermisches Prognosetool für Baden-Württemberg (GeoTool). – *Grundwasser*, 16; 54–56; Heidelberg (Springer).
- Stober, I. (2013): Die thermalen Karbonat-Aquifere Oberjura und Oberer Muschelkalk im Südwestdeutschen Alpenvorland. – *Grundwasser*, 18 (4): 159–169; Heidelberg (Springer) [DOI 10.1007/s00767-013-0236-2]
- Stober, I., Jodocy, M., Burisch, M. & Person, R. (2013): Tiefenwässer im Oberen Muschelkalk-Aquifer des Oberrheingrabens und des Südwestdeutschen Molassebeckens. – *Grundwasser*, 18 (2): 117–127; Heidelberg (Springer). - [DOI 10.1007/s00767-013-0224-6]
- Stoll-Stefan, M.-L. (1987): Sedimentpetrographische Untersuchungen der Lias alpha- und Rhätsandsteine im westlichen deutschen Alpenvorland. – *Bochumer geol. geotechn. Arb.*, 24: 158 S.; Bochum.
- Suchi, E., Dittmann, J., Knopf, S., Müller, C. & Schulz, R. (2014): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen in Deutschland – *ZDGG* 165/3: 439–453; Stuttgart. - [DOI: 10.1127/1860-1804/2014/0070]
- tewag (2014): GeoMol - Entwicklung standardisierter Bohr- und Ausbaudesigns sowie von zwei Rechenmodulen zur Potenzialabschätzung der Mitteltiefen Erdwärmesonden-geothermie im Pilotgebiet Lake Constance – Allgäu Area. – Abschlussbericht der Fa. tewag, BauGrund Süd und der Hochschule Biberach vom 01.12.2014, 54 S., 26 Abb., 13 Tab., Anhang, Starzach.
- Trusheim, F. (1961): [Diskussionsbeitrag vom 24. September 1960], in: Schmidt-Thomé, P. & Zeil, W.: Bericht über die 112. Hauptversammlung der Deutschen Geologischen Gesellschaft in Bad Tölz (Oberbayern) vom 21. bis 29. September 1960. – *Z. dt. geol. Ges.*, 113: 592–593; Stuttgart.
- VDI (2008): VDI-Richtlinie: VDI 4655 Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen, 2008-05; Beuth Verlag, Berlin.
- VDI (2010): VDI-Richtlinie : VDI-Richtlinie 4640, Blatt 1: Thermische Nutzung des Untergrunds - Grundlagen, Genehmigung, Umweltaspekte. – VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (Hrsg.): 33 S.; Düsseldorf.
- Watzel, R. (2014): Geologische Informationen und Bewertungskriterien für eine Raumplanung im tieferen Untergrund. – *Akad. Geowiss. Geotechn.*, 30: 9–14; Hannover.
- Wolfgramm, M., Bartels, J., Bloch, T., Heuberger, S., Kuhn, P., Naef, H., Voigt, H.-D., Sonderegger, M., Steiger, T. & Uhlig, S. (2014): Charakterisierung eines geklüfteten Kalksteins: Ergebnisse des Geothermieprojektes St. Gallen. – Geothermiekongress DGK 2014 Essen, 11.– 13. November 2014: 12 S.; Essen.
- Wolfgramm, M., Bloch, T., Bartels, J., Heuberger, S., Kuhn, P., Naef, H., Voigt, H.-D., Seibt, P., Sonderegger, M., Steiger, T. & Uhlig, S. (2015): Reservoir-Geological Characterization of a Fractured Limestone: Results Obtained from the Geothermal Well St. Gallen GT-1 (Switzerland). – *Proc. World Geotherm. Congr.*, Melbourne, Australia, 19.–25. April 2015: 12 p.; Melbourne.
- Zaugg, A. & Geyer, M. (2008): Blatt 1033/1034 Steckborn-Kreuzlingen. – *Geol. Atlas Schweiz* 1 : 25 000, Atlasblatt 112: 1 Kt.; Wabern (Swisstopo).
- Zaugg, A. & Löpfe, R. (2011): Blatt 1114 Nesslau. – *Geol. Atlas Schweiz* 1 : 25 000, Erläut. 141: 84 S., 1 Tafel; Wabern (Swisstopo).
- Zaugg, A., Geyer, M., Rahn, M., Wessels, M., Schlichtherle, H., Hasenfratz, A. & Burkhalter, R. (2008): Blatt 1033/1034 Steckborn-Kreuzlingen. – *Geol. Atlas Schweiz* 1 : 25 000, Erläut. 112: 124 S., 1 Tafel; Wabern (Swisstopo).
- Zaugg, A., Löpfe, R., Kriemler, M. & Kempf, T. (2011): Blatt 1114 Nesslau. – *Geol. Atlas Schweiz* 1 : 25 000, Atlasblatt 141: 1 Kt.; Wabern (Swisstopo).

LGRB – Informationen des Regierungspräsidium Freiburg · Abteilung 9

Bis Heft 15 Informationen des LGRB – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg

 Heft 10 (2001)	Wechselwirkungen zwischen Baggerseen und Grundwasser 64 S., 42 Abb., 15 Tab., 1 CD-ROM	10,- €
 Heft 12 (1999)	Freiburg im Breisgau – Geologie und Stadtgeschichte 60 S., 28 Abb., 2 Tab., 1 Taf., Beilage: 2 Kt.	5,- €
 Heft 17 (2005)	Ergebnisse neuer Forschungsbohrungen in Baden-Württemberg 150 S., 17 Abb., 7 Tab., 3 Taf.	10,- €
 Heft 19 (2007)	Hydrogeologischer Bau und Aquifereigenschaften der Locker- gesteine im Oberrheingraben (Baden-Württemberg) 130 S., 118 Abb., 12 Tab.	10,- €
 Heft 20 (2008)	Hydrogeologische Einheiten in Baden-Württemberg 106 S., 79 Abb., 21 Tab., 1 Kt.	15,- €
 Heft 21 (2008)	Das Geologische Landesmodell von Baden-Württemberg: Datengrundlagen, technische Umsetzung und erste geolo- gische Ergebnisse 82 S., 36 Abb., 3 Tab. im Anh., 10 Beil.	15,- €
 Heft 22 (2009)	Beiträge zur Lithostratigraphie in Baden-Württemberg 146 S., 53 Abb., 5 Tab.	15,- €
 Heft 23 (2009)	Natürliche Geogene Grundwasserbeschaffenheit in den hydro- geochemischen Einheiten von Baden-Württemberg 192 S., 43 Abb., 55 Tab., 48 Kt.	15,- €
 Heft 24 (2009)	Geogene Grundgehalte (Hintergrundwerte) in den petrogeo- chemischen Einheiten von Baden-Württemberg 98 S., 62 Abb., 22 Tab., 40 Kt.	15,- €
 Heft 25 (2010)	Beiträge zur Geologie und Bodenkunde in Baden-Württemberg 142 S., 78 Abb., 17 Tab., 1 Beilage	15,- €
 Heft 26 (2012)	Die Forschungsbohrung Heidelberg und Beiträge zum Quartär in Baden-Württemberg 216 S., 107 Abb., 35 Tab., 1 Beil.	20,- €
 Heft 27 (2013)	Rohstoffbericht Baden-Württemberg 2012/2013; Bedarf Gewinnung und Sicherung von mineralischen Rohstoffen 204 S., 228 Abb., 7 Tab.	10,- €
 Heft 28 (2013)	Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben 104 S., 49 Abb., 7 Tab.	10,- €
 Heft 29 (2014)	Geologische Ergebnisse der Geothermiebohrungen Urach 1, Urach 3 und Urach 4 152 S., 38 Abb., 3 Tab., 2 Anh.	15,- €

Preise zuzüglich Versandkosten. Nicht aufgeführte Heft-Nummern sind zurzeit vergriffen.

Bestellungen über den Online-Shop: www.lgrb-bw.de.

Informationen erhalten Sie unter: 0761/208-3000 bzw. -3022 bzw. E-Mail: vertrieb-lgrb@rpf.bwl.de

Teilweise kostenloser Download unter <https://produkte.lgrb-bw.de/schriftensuche/lgrb-informationen/>

Der tiefere Untergrund der alpinen Vorlandbecken birgt eine Vielzahl von natürlichen Ressourcen und Speichermöglichkeiten. Diese sogenannten Geopotenziale können für eine nachhaltige Bewirtschaftung von Energieträgern aus erneuerbaren Energien nutzbar gemacht werden und damit einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende leisten. Die alpinen Vorlandbecken sind in weiten Bereichen sowohl für eine geothermale Energiegewinnung, als auch für die Speicherung von Druckluft, Erdgas oder CO₂ geeignet. Vielerorts steht die Nutzung dieser Geopotenziale jedoch in direkter Konkurrenz zur Grundwasserversorgung oder zur Öl- und Gasgewinnung. Die Bewertung von Geopotenzialen sowie eventuell konkurrierender Nutzungen erfordert aus diesem Grund einen ganzheitlichen und transnationalen Ansatz.

Im Rahmen des Projekts GeoMol arbeiteten daher 14 Partner aus sechs Alpen-Anrainerstaaten am gemeinsamen Aufbau einer länderübergreifend harmonisierten, digitalen Wissensbasis. Neben einem geologischen Übersichtsmodell für das gesamte nordalpine Molassebecken wurden die Untergrundverhältnisse in fünf Pilotregionen vertieft untersucht. Der hier vorliegende Bericht stellt die Eingangsdaten, Methoden und Ergebnisse der im Dreiländereck Deutschland, Schweiz und Österreich liegenden Pilotregion Bodensee-Allgäu vor. Aufgrund seiner insbesondere im Osten bis in große Tiefen und damit in Bereiche hoher Temperaturen reichenden Aquifere weist diese Region ein hohes Potenzial zur Nutzung der geothermischen Energie für die Wärme- und Stromerzeugung auf. Deshalb wurde in der vorliegenden Studie dieses Pilotgebiet zur Abschätzung des geothermischen Potenzials detaillierter untersucht. Schwerpunkte der Arbeiten umfassten neben der Aufarbeitung von Eingangsdatensätzen, die Entwicklung eines geologischen 3D-Modells für das gesamte Pilotgebiet sowie eine geostatistische 3D-Temperaturmodellierung für den deutschen und österreichischen Anteil des Pilotgebiets. Standortbezogene Informationen aus den beiden Modellen flossen auch in die Studie zum Potenzial mitteltiefer Erdwärmesonden im baden-württembergischen Teil des Pilotgebiets ein. Zur flächenhaften Abschätzung des Potenzials wurde im Rahmen des Projekts ein Rechenmodul entwickelt. Informationen über das Pilotgebiet Bodensee-Allgäu sind unter www.geomol.eu in Form eines umfangreichen Kartendatensatzes mit den Schwerpunkten geologische Basisthemen und geothermisches Potenzial frei verfügbar.

Das Projekt wurde innerhalb des Programms INTERREG IV B Alpine Space im Themenschwerpunkt „Environment and Risk Prevention“ von September 2012 bis Juni 2015 bearbeitet. Die Abteilung Geologischer Dienst des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) übernahm die Leitung des Gesamtprojekts. Im Pilotgebiet Bodensee-Allgäu arbeiteten neben Vertretern der geologischen Dienste von Baden-Württemberg, Bayern, der Schweiz und Österreich auch der Regionalverband Bodensee-Oberschwaben als Träger der Regionalplanung mit. Die Aktivitäten im Pilotgebiet Bodensee-Allgäu wurden vom Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB), gesteuert.

Die Projektergebnisse dienen der Sensibilisierung politischer Entscheidungsträger, der Unterstützung von Projektentwicklern sowie der Information der Öffentlichkeit und geben Anregungen zu den Nutzungsmöglichkeiten der natürlichen Ressourcen des tieferen Untergrundes.

