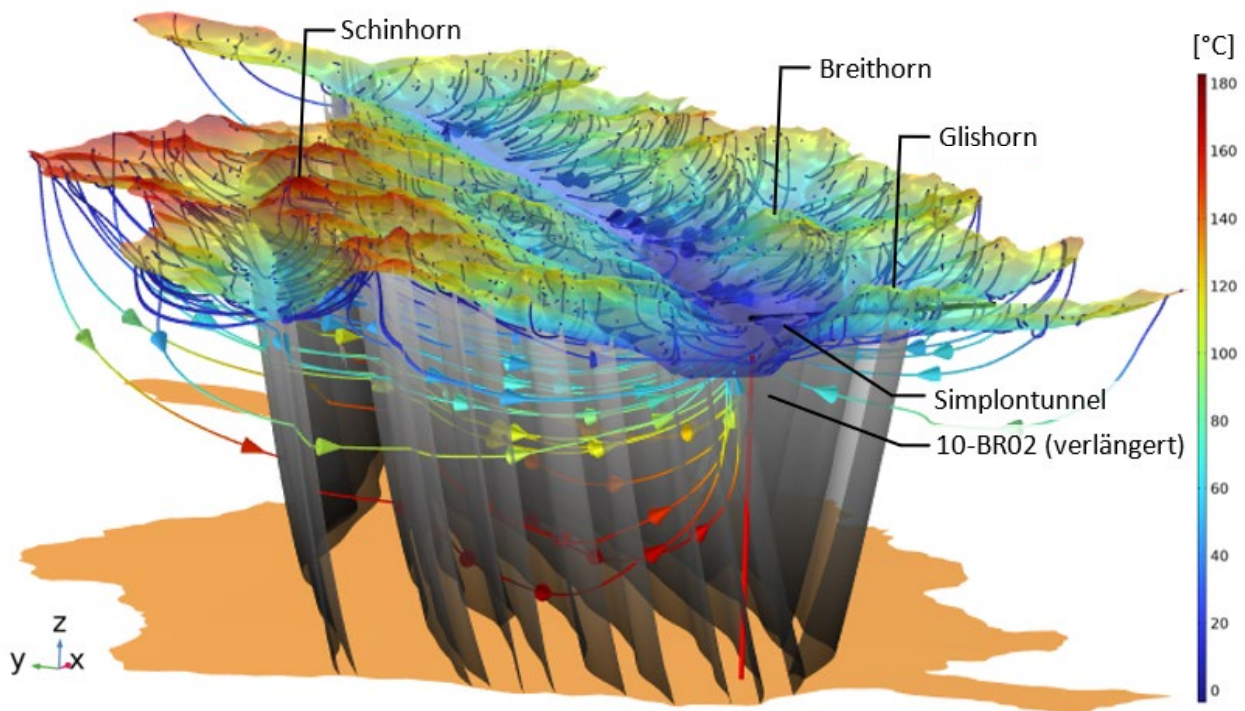


Pilotstudie Brig – Schlussbericht
20.12.2024

Wärmetransport im Tiefengrundwasser – Erschliessung geothermischer Potenziale im Kanton Wallis



Autoren

PD Dr. Jannis Epting, AUG, Universität Basel

Dipl. Hyd. Stefan Scheidler, AUG, Universität Basel

Prof. Dr. Oliver S. Schilling, Forschungsgruppe Hydrogeologie, Universität Basel

Dr. Pierre Guillaume Christe, EnergieSchweiz

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.

Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

Wärmetransport im Tiefengrundwasser - Erschliessung geothermischer Potenziale im Kanton Wallis

Pilotstudie Brig – Schlussbericht

Datum

20.12.2024

Auftraggeber

Kanton Wallis, Dienststelle für Energie und Wasserkraft
Avenue du Midi 7
1950 Sitten

Projektverantwortlicher

PD Dr. Jannis Epting

Projektleitung

Dipl. Hyd. Stefan Scheidler

Projektbearbeitung

Dipl. Hyd. Stefan Scheidler
PD Dr. Jannis Epting
Prof. Dr. O. Schilling (review)
Dr. Eric Zechner (review)
Dr. Horst Dresmann (review)
MSc. Michel Walde (review)

Projektbegleitung BFE (energieschweiz)

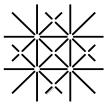
Dr. Pierre Guillaume Christe
Dr. Christian Minnig

Projektbegleitung Kanton Wallis

Frédéric Zuber

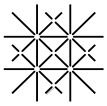
Angewandte und Umweltgeologie
Forschungsgruppe Hydrogeologie
Departement Umweltwissenschaften
Universität Basel
Bernoullistrasse 32, 4056 Basel
SWITZERLAND
duw.unibas.ch/de/aug/

Schlussbericht BGA-Wallis-25
DOI 10.5451/unibas-ep96838

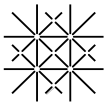


Inhalt

1	Zusammenfassung	10
2	Ausgangslage	14
2.1	Auftrag und fachliche Koordination	14
2.2	Wärmetransport im Tiefengrundwasser	16
2.3	Vorausgehende Untersuchungen und offene Fragen	16
3	Zielsetzungen	20
4	Projektperimeter & geologische Datengrundlagen	21
5	Geologisches 3D-Modell	24
6	Thermisch-hydraulisches Modell (3D-THM)	26
6.1	Erstellen des Berechnungsnetzes («Mesh»)	26
6.2	Hydraulische und thermische Untergrundeigenschaften	27
6.2.1	Anisotropie	27
6.2.2	Tiefenabhängige hydraulische Durchlässigkeit (k-Wert)	33
6.2.3	Tiefenabhängige thermische Leitfähigkeit	35
6.3	Hydraulische und thermische Randbedingungen	35
6.3.1	Topografie als Grundwasserspiegel	36
6.3.2	Grundwasserentnahme	36
6.3.3	Thermische Randbedingungen	36
7	Sensitivitätsanalyse	38
7.1	Auswertung Sensitivitätsanalyse	40
7.2	Resultate Sensitivitätsanalyse	43
7.2.1	Szenario A1 – S1: Hydraulische Durchlässigkeit (k-Werte)	43
7.2.2	Szenario A1 – S2: Porosität	46
7.2.3	Szenario A1 – S3: Spezifische Wärmekapazität	47
7.2.4	Szenario A1 - S4: Thermische Leitfähigkeit	48
7.2.5	Szenario A2 – S5: Apertur	50
7.2.6	Szenario A2 – S6: k-Wert der alpinen Hauptüberschiebungen	53
7.2.7	Szenario A3 – S7: Anisotropie	57
7.2.8	Szenario A3 – S8: tiefenabhängige k-Werte	59
8	«Best Fit» Modell	63



8.1	Kalibrierung	63
8.2	Resultate der Kalibrierung	66
8.3	Validierung der Grundwasserneubildung und Aufenthaltszeiten	67
9	Ergebnisse	70
9.1	Grundwasserzirkulation	70
9.1.1	3D Grundwasserzirkulation	70
9.1.2	2D Profilschnitte Hydraulik und Grundwasserzirkulation	72
9.2	Grundwasserneubildung	76
9.3	Grundwasserabsenkung	77
9.4	Gegenseitige Beeinflussung zweier geothermischer Nutzungen	83
9.4.1	Vergleich unterschiedliche Entnahmetiefen	84
9.5	Temperaturverteilung	85
9.6	Thermisches Potenzial	87
10	Diskussion	90
10.1	Zielerreichung	91
10.1.1	Beschreibung Energieziele	91
10.1.2	Direkte, kurzfristige Wirkung	93
10.1.3	Indirekte, langfristige Wirkung	94
10.1.4	Messen der Zielerreichung (Erfolgsindikatoren)	96
10.2	Neue Werkzeuge zur Erschliessung geothermischer Potenziale	97
10.2.1	Anwendung des 3D-THM	99
10.2.2	Übertragbarkeit & Upscaling	100
10.3	Raumplanerische Perspektive	101
10.4	Multifunktionales Grundwasser	102
11	Ausblick	105
11.1	Situation der Geothermie im Wallis	106
11.1.1	Gegenwärtige Vollzugspraxis	108
11.1.2	Lehre aus dem Projekt Tiefe Geothermie Brig-Glis AG (TGBG AG)	109
11.1.3	Nutzbare Potenziale nutzen	110
11.2	Konsolidierte Dokumentation des kantonalen Untergrunds	111
11.2.1	Relevanz der geologischen Daten	111
11.2.2	Herausforderung Untergrund	112



11.3	Entwicklung von Leitlinien & Vorschriften	113
11.3.1	Ausgangslage	114
11.3.2	Grobskizze Musterverfahren «Geothermiebohrungen»	114
	Anhang: Referenzen	115
	Anhang: Abbildungen und Tabellen	118

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Konzeptionelles 3D-Modell, welches ein Beispiel einer tiefen Grundwasserzirkulation in einem verkarsteten, geklüfteten Aquifer mit Mischungsprozessen in den quartären Ablagerungen und dem Aufstieg des thermalen Wassers entlang von Bruchstrukturen darstellt (Sonney, 2010). .	16
Abb. 2:	Perimeter (oberirdisches Einzugsgebiet der Rhone bis unterhalb von Brig) und lithologische Karte der Schweiz (Gesteinsgruppen 1:500'000; Swisstopo), einschliesslich Oberflächengewässer.	21
Abb. 3:	Perimeter des Untersuchungsgebiets mit geologischen Profillinien der Swisstopo und geologischer Atlas der Schweiz (grün), den Alpenen Hauptüberschiebungen, einschliesslich den Grossstrukturen «Alpine Hauptüberschiebungen» und «Rote Kuh Gampel Bruch» (rot) und der Oberflächentopografie in Relief-Darstellung.	22
Abb. 4:	Alpine Hauptüberschiebung, Hauptbrüche und detaillierte Bruchstrukturen (Daten: Universität Bern) sowie lithologische Karte der Schweiz (Gesteinsgruppen 1:500'000; Swisstopo).	23
Abb. 5:	3D-Ansicht des geologischen 3D-Modells in GOCAD mit georeferenzierten geologischen 2D-Profilen für die Konstruktion der geologischen Grossstrukturen (Rot: Alpine Hauptüberschiebungen und Rote Kuh Gampel Bruch), einschliesslich der Oberflächentopografie (grau; Blick von Südwesten in das hintere Rhonetal).	24
Abb. 6:	Generiertes Mesh des 3D-THM in COMSOL bestehend aus ca. 7.7 Millionen Elementen (Tetraedern) mit einer durchschnittlichen Element-Qualität von 0.67 (die Skala der Abbildung unten rechts zeigt die Qualität für jeden Tetraeder) und der Gaussischen Verteilungskurve (unten links).	27
Abb. 7:	Durch Hauptbrüche getrennte hydrogeologische Einheiten für welche jeweils ein gewichteter k-Wert und die Richtung der Anisotropie ermittelt wurden.	28
Abb. 8:	Profilschnitte der im 3D-THM integrierten durch Hauptbrüche getrennten hydrogeologischen Einheiten. Profillinien sind in Abb. 7 und Abb. 43 dargestellt.	28
Abb. 9:	3D-THM in COMSOL: Projektperimeter mit Bruchstrukturen (Blick von Westen in das hintere Rhonetal).....	29
Abb. 10:	Schema einer Drehung des Anisotropie-Tensors entsprechend einem Winkel α (im Beispiel 72.4°) bei einer Anisotropie von 0.25 (k^y/k^x) (18, 19).	32
Abb. 11:	Tiefenabhängige Abnahme der k-Werte (20). Die Schreibweise $K(z)$ bezieht sich hier nicht auf den vertikalen k-Wert, sondern auf die Tiefe.	34
Abb. 12:	Tiefenabhängiger k-Wert bei einem Basiswert von $k_x = 1E-08 \text{ m s}^{-1}$	35
Abb. 13:	Topografie als hydraulische Head-Randbedingung, Höhenangabe in m ü.M.	37
Abb. 14:	Thermische Randbedingungen. Obere Randbedingung: Mittelwert der Lufttemperatur (1991 bis 2000) in °C, untere Randbedingung: basaler Wärmestrom (0.07 W m^{-2}).	37
Abb. 15:	Bohrung 10-BR02 (gelb) und Simplontunnel (blau) im Modellperimeter. Links: Aufsicht. Rechts: Bruchstrukturen des 3D-THM; die Bohrung wurde über die gesamte Modelltiefe verlängert um entsprechend Fliesslinien berechnen zu können.....	41
Abb. 16:	Szenario A1 – S1: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur in der Bohrung 10-BR02.	44
Abb. 17:	Szenario A1 – S1: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur entlang des Simplontunnels.	44
Abb. 18:	Szenario A1 – S1: Horizontale (oben) und vertikale (unten) Ausdehnung der Fliesslinien.	45
Abb. 19:	Szenario A1 – S3: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur in der Bohrung 10-BR02.	47
Abb. 20:	Szenario A1 – S3: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur entlang des Simplontunnels.	47
Abb. 21:	Szenario A1 – S4: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur in der Bohrung 10-BR02.	49

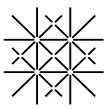


Abb. 22:	Szenario A1 – S4: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur entlang des Simplontunnels.	49
Abb. 23:	Szenario A1 – S5: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur in der Bohrung 10-BR02.	51
Abb. 24:	Szenario A1 – S5: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur entlang des Simplontunnels.	51
Abb. 25:	Szenario A1 – S5: Horizontale (oben) und vertikale (unten) Ausdehnung der Fliesslinien.	52
Abb. 26:	Szenario A2 – S6: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur in der Bohrung 10-BR02.	54
Abb. 27:	Szenario A2 – S6: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur entlang des Simplontunnels.	54
Abb. 28:	Szenario A2 – S6: Horizontale (oben) und vertikale (unten) Ausdehnung der Fliesslinien.	55
Abb. 29:	Szenario A2 –S7: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur in der Bohrung 10-BR02.	57
Abb. 30:	Szenario A2 –S7: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur entlang des Simplontunnels.	57
Abb. 31:	Szenario A2 – S7: Horizontale (oben) und vertikale (unten) Ausdehnung der Fliesslinien.	58
Abb. 32:	Tiefenabhängige k-Werte ausgehend von den jeweiligen Startwerten für die Szenarien der Sensitivitätsanalyse.....	59
Abb. 33:	Szenario A2 – S8: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur in der Bohrung 10-BR02.	60
Abb. 34:	Szenario A2 – S8: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur entlang des Simplontunnels.	60
Abb. 35:	Szenario A2 – S8: Horizontale (oben) und vertikale (unten) Ausdehnung der Fliesslinien.	62
Abb. 36:	Tiefenabhängige k-Werte, links für k_x und k_y , rechts für k_z . Der jeweils erste Wert (Null auf der Ordinate) entspricht dem Basiswert (siehe Tab. 21).	64
Abb. 37:	Tiefenabhängige thermische Leitfähigkeit.....	65
Abb. 38:	Vergleich berechnete - gemessene Temperatur in der Bohrung 10-BR02 (blauer Kasten: Zoom siehe rechts) und projiziert auf Lavey-1 für das "best Fit" Modell.	67
Abb. 39:	Vergleich berechnete - gemessene Temperaturen entlang des Simplontunnels für das «best Fit» Modell.	67
Abb. 40:	Niederschlag und Verdunstung im Bereich des Modellperimeters (Rasterdatensatz R_{norm} von MeteoSchweiz mit einer Auflösung von 1,5 km respektive Hydrologischer Atlas der Schweiz mit einer Auflösung von 1 km).	68
Abb. 41:	Von der Bohrung 10-BR02 ausgehend simulierte Fliesslinien. Links: Blick von Westen in das obere Rhonetal. Fliesslinien von der Bohrung bis zum Bereich der Grundwasserneubildung (Topographie: Farbübergang blau bis rot, untere Modellbegrenzung: orange, Bruchsysteme: grau). Rechts oben: Aufsicht projizierter Fliesslinien (grün). Rechts unten: Projektion Fliesslinien auf Tiefenprofil (grün).	70
Abb. 42:	Grundwasserzirkulation bei gleichmässiger Verteilung der Partikel über die Topographie (Topographie: Farbübergang blau bis rot, untere Modellbegrenzung: orange, Bruchsysteme: grau, 10-BR02: rot, Simplontunnel; dunkelblau). Blick von Westen in das obere Rhonetal. Die Fliesslinien sind entsprechend ihrer tiefenabhängigen Temperatur eingefärbt.	71
Abb. 43:	Vergleich von simulierten Grundwasserhöhen mit der Topographie. Die schwarze Linie zeigt den Verlauf der Topographie, während die grüne Linie das Druckpotenzial des (Tiefen-)Grundwassers darstellt. In Talbereichen können teilweise artesische Grundwasserhältnisse beobachtet werden.....	72
Abb. 44:	Fliesslinien (blau) entlang der Profilschnitte A-A' und B-B' (Lage siehe Abb. 43). Farbige dargestellt: Darcy-Geschwindigkeitsverteilung.	73
Abb. 45:	Vertikaler Grundwasserdurchfluss (Darcy flux) von unten nach oben.....	74
Abb. 46:	Vertikaler Grundwasserdurchfluss (Darcy flux) von oben nach unten.....	75
Abb. 47:	Berechneter Bereich im welchem die wesentliche Grundwasserneubildung stattfindet.....	76

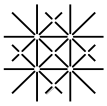
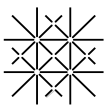
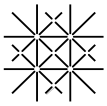


Abb. 48:	Oben: Darstellung der Isohypsen ohne Grundwasserentnahme in Bohrung 10-BR02. Unten: Profile mit hydraulischer Druckverteilung auf 600 m ü.M.	78
Abb. 49:	Oben: Darstellung der Isohypsen bei einer Grundwasserentnahme von 2.5 l s^{-1} . Unten: Profile mit hydraulischer Druckverteilung auf 600 m ü.M. ohne (grün) und mit Absenktrichter (blau).	79
Abb. 50:	Oben: Darstellung der Isohypsen bei einer Grundwasserentnahme von 5.0 l s^{-1} . Unten: Profile mit hydraulischer Druckverteilung auf 600 m ü.M. ohne (grün) und mit Absenktrichters (blau).	80
Abb. 51:	Oben: Darstellung der Isohypsen bei einer Grundwasserentnahme von 20.0 l s^{-1} . Unten: Profile mit hydraulischer Druckverteilung auf 600 m ü.M. ohne (grün) und mit Absenktrichters (blau).	81
Abb. 52:	Oben: Absenktrichter (Isohypsen der Absenkung in m) und gegenseitige Beeinflussung durch die zusätzliche Grundwasserentnahme in der virtuellen Bohrung. Unten: Profile mit hydraulischer Druckverteilung auf 600 m ü.M., die blau eingezeichneten Isohypsen zeigen die Situation, wenn nur aus der Bohrung 10-BR02 gefördert wird.	83
Abb. 53:	Schema der integrierten virtuellen Bohrung mit den jeweiligen Filterstrecken und den virtuellen Druckflächen.	84
Abb. 54:	Vergleich von unterschiedlichen Entnahmetiefen (Filterstrecken) der virtuellen Bohrung mit der Bohrung 10-BR02 bezogen auf zwei verschiedene Tiefen (virtuelle Druckflächen).	85
Abb. 55:	Flächen gleicher Temperatur. Blick von Westen in das obere Rhonetal.	86
Abb. 56:	Temperaturverteilung auf 150, -350 und -1'350 m ü.M.	86
Abb. 57:	Normierter vertikaler Wärmefluss in unterschiedlichen Tiefen (150, -350, -1'350 m ü.M.)	87
Abb. 58:	Thermische Peclet-Zahl in unterschiedlichen Tiefen (150, -350, -1'350 m ü.M.)	89
Abb. 59:	Schematischer Ablauf der Etappen eines Geothermieprojektes von der Erkundung bis zum wirtschaftlichen Betrieb. Über das Bundesgesetz über die Reduktion der CO ₂ -Emissionen (CO ₂ -Gesetz) können Projekte zur direkten Nutzung der Geothermie für die Wärmebereitstellung finanziell unterstützt werden (Quelle: BFE).	107



Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Meilensteine & Zwischenresultate	15
Tab. 2:	Meilensteine	15
Tab. 3:	Zielsetzungen	20
Tab. 4:	Ergebnis der Analyse der strukturellen Kennwerte separat für die verschiedenen hydrogeologischen Einheiten auf Grundlage der detaillierten Daten zu den Bruchstrukturen. Die Bezeichnung «Rest» steht für Bereiche südlich der Rhone für welche keine detaillierten Daten existieren, hier liegt der Mittelwert der übrigen Bereiche zugrunde.....	31
Tab. 5:	Gewichteter k-Wert (k_x und k_y in $m s^{-1}$) der einzelnen hydrogeologischen Einheiten, wobei der Wert k_y aufgrund der Anisotropie von 0.25 entsprechend reduziert ist. Die k-Werte k'_x und k'_y geben die entsprechend der Drehmatrix angepassten Werte an.	33
Tab. 6:	Übersicht der hydraulischen und thermischen Parameter sowie Randbedingungen für die verschiedenen Szenarien der Sensitivitätsanalyse.	39
Tab. 7:	Szenario A1 – S1: Berechnete Güte-Kennwerte (grau hinterlegt: Basiswert).	44
Tab. 8:	Szenario A1 – S1: Berechnete Aufenthaltszeiten des Tiefengrundwassers.....	45
Tab. 9:	Szenario A1 – S2: Berechnete Aufenthaltszeiten des Tiefengrundwassers.....	46
Tab. 10:	Szenario A1 – S3: Berechnete Güte-Kennwerte (grau hinterlegt: Basiswert).	48
Tab. 11:	Szenario A1 – S4: Berechnete Güte-Kennwerte (grau hinterlegt: Basiswert).	50
Tab. 12:	Szenario A1 – S5: Berechnete Güte-Kennwerte (grau hinterlegt: Basiswert).	51
Tab. 13:	Szenario A1 – S5: Berechnete Aufenthaltszeiten des Tiefengrundwassers.....	52
Tab. 14:	Szenario A2 – S6: Berechnete Güte-Kennwerte (grau hinterlegt: Basiswert).	54
Tab. 15:	Berechnete Aufenthaltszeiten des Tiefengrundwassers.	55
Tab. 16:	k-Werte der gewichteten (Formel 1) und gedrehten (Formel 6 und 7) Basiswerte, unter Berücksichtigung der Anisotropie für jede durch eine alpine Hauptüberschiebung getrennte hydrogeologische Einheit (Formeln siehe Kapitel 6.2).	56
Tab. 17:	Szenario A2 –S7: Berechnete Güte-Kennwerte (grau hinterlegt: Basiswert).	58
Tab. 18:	Szenario A2 – S7: Berechnete Aufenthaltszeiten des Tiefengrundwassers.....	58
Tab. 19:	Szenario A2 – S8: Berechnete Güte-Kennwerte (grau hinterlegt: Basiswert).	61
Tab. 20:	Szenario A2 – S8: Berechnete Aufenthaltszeiten des Tiefengrundwassers.....	61
Tab. 21:	Basiswerte für die k-Werte. Die tiefenabhängige Anpassung erfolgt entsprechend Abb. 36. Die mit (k) gekennzeichneten Werte sind separat kalibriert worden, da für diese Bereiche die k-Werte aufgrund mangelnder Daten der Bruchstrukturen nicht wie in Kapitel 6.2 beschrieben definiert werden konnten.....	64
Tab. 22:	Hydraulische und thermische Randbedingungen und Parameter für das «best Fit» Modell.	65
Tab. 23:	Gemessene Pumpraten, Absenkbeträge und Temperaturen (aus Solexperts (25).	77
Tab. 24:	Absenkung (Differenz im Vergleich zur Situation ohne Entnahmen) aufgrund unterschiedlicher Grundwasserentnahmen im Zusammenhang mit zunehmender Entfernung zur Bohrung 10-BR02.	82
Tab. 25:	Auswertung der Temperaturen, einschliesslich Temperatur-Differenz im Vergleich zur Situation ohne Entnahmen, entlang der Bohrung 10-BR02 bei unterschiedlichen Entnahmemengen.	82
Tab. 26:	Zielerreichung	91



Glossar

AGEPP – Alpine Geothermal Power Productions

AUG – Angewandte und Umweltgeologie

BFE – Bundesamt für Energie

DEWK – Dienststelle für Energie und Wasserkraft

DRE – Dienststelle für Raumentwicklung

DUW – Dienststelle für Umwelt Kanton Wallis

EWS – Erdwärmesonden

GWP – Grundwasser-Wärmepumpen

TGBGAG – Tiefe Geothermie Brig-Glis AG

THM – thermisch-hydraulisches-Modell

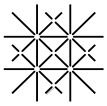
1 Zusammenfassung

Der Energiebedarf unserer modernen Gesellschaft steigt stetig, gleichzeitig sollen CO₂-Emissionen reduziert werden. Das Potenzial der geothermischen Energie im Alpenraum ist noch weitgehend unbekannt, dabei begünstigen die geologischen Bedingungen die Nutzung produktiver hydrothermaler Systeme. Es ist daher notwendig, quantitative hydrogeologische Instrumente zu entwickeln, die es erlauben die Wechselwirkung zwischen oberflächennaher und tiefer Grundwasserzirkulation zu charakterisieren und geothermische Potenziale abzuschätzen. Solche Instrumente ermöglichen es auch die Machbarkeit von Geothermieprojekten zu überprüfen sowie mögliche wechselseitige Beeinflussungen zwischen bestehenden und neuen Nutzungen zu bewerten.

Im Rahmen des Forschungsprojektes «Wärmetransport im Tiefengrundwasser – Erschliessung geothermischer Potenziale im Kanton Wallis – Pilotstudie Brig» wurde das Gebiet um die Thermalquellen von Brig im Kanton Wallis, als eine der vielversprechendsten Regionen der Schweiz in Bezug auf das geothermische Potenzial, untersucht. Eine weitere mögliche geothermische Nutzung in Brig hängt dabei wesentlich davon ab, wie gross das geothermische Potenzial ist und ob eine nachhaltige Nutzung, insbesondere in Verbindung mit den Anforderungen des Grundwasserschutzes, möglich ist.

Ziel der Pilotstudie ist die Einschätzung des geothermischen Potenzials und insbesondere der Ergiebigkeit des alpinen Tiefenaquifers mit stark erhöhter Grundwassertemperaturen unter expliziter Berücksichtigung der grossräumigen regionalen Grundwasserfliesssysteme. Es soll aufgezeigt werden, wie tiefe Grundwasserzirkulation und Wärmetransport durch numerische 3D-thermohydraulische Modelle (3D-THM) abgebildet werden können und wie unterschiedliche hydraulische und thermische Randbedingungen sowie Eigenschaftsverteilungen die berechneten Grundwasserströmungs- und Wärmeregime beeinflussen.

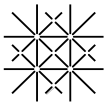
Als strukturelle Grundlage für das 3D-THM wurde ein geologisches 3D-Modell basierend auf der Kenntnis geologischer Grosstrukturen und 2D-Profillinien erstellt. Nördlich des Rhonetals konnte ein detaillierter Datensatz zum Bruchmuster, bereitgestellt durch die Universität Bern, berücksichtigt werden. Aufgrund der regionalen Betrachtung und der heterogenen Datenlage (südlich des Rhonetals fehlen detailliert Informationen zum Bruchmuster) lag bei der Erstellung des geologischen 3D-Modells der Schwerpunkt auf grossräumigen Bruchstrukturen wie die alpinen Hauptüberschiebungen, der Rote Kuh Gampel Bruch, sowie vergleichbaren Strukturen. Vorausgehende Arbeiten im Untersuchungsgebiet deuten darauf hin, dass eine regionale Grundwasserzirkulationen bis in Tiefen von 10 km zu erwarten ist (Diamond et al. (2018) und Egli et al. (2018)), weshalb diese vertikale Ausdehnung entsprechend für die 3D-Modellierungen, trotz grosser Unsicherheiten, berücksichtigt wurde. Da insbesondere in grösseren Tiefen (tiefer als ca. 500 m) das Wissen



über den Untergrund sehr begrenzt und von Annahmen geprägt ist, musste für die Umsetzung des geologischen 3D-Modells eine starke Vereinfachung der geologischen Strukturen angewendet werden. Mit dem 3D-THM wurde aber mittels expliziten Sensitivitätsanalysen untersucht, welche hydraulischen und thermischen Randbedingungen und welche Komplexität von geologischen Strukturen (Alpine Hauptüberschiebung, Dichte, Orientierung, Konnektivität der Kluftsysteme, hydraulische und thermische Gesteinsparameter) relevant sind, um Aussagen zur vertikalen Verteilung der Temperaturen und der regionalen Grundwasserzirkulation sowie geothermischer Potenziale vornehmen zu können. Der Ansatz erlaubt somit auch wichtige Rückschlüsse für zukünftige Modellverbesserungen, falls die kantonalen Behörden die geologische und geothermische Prospektion im Raum Brig vorantreiben wollen.

Auf Grundlage des 3D-THM konnten für das am besten angepasste Modell («best Fit» Model) verschiedene charakteristische Tiefenbereiche (150, -350 und -1'350 m ü.M.) die Temperaturverteilung, der Darcy-Flux als Mass für die Grundwasserströmung, einschliesslich auf- und abwärtsgerichteter Grundwasserströmung (Up- and Downwelling), sowie der Wärmefluss aus der Tiefe berechnet werden. Als Resultat der regionalen Grundwasserzirkulation ist für die verschiedenen Tiefenbereiche zu beobachten, dass die Temperaturen im Talbereich deutlich höher sind als in den benachbarten höheren Lagen, wobei der Unterschied mit der betrachteten Tiefe zunimmt. Bereits in Tiefen von 150 m ü. M. liegen die simulierten Temperaturen im Raum Brigerbad bei über 50 °C, in einer Tiefe von -350 m ü. M. bei über 70 °C und in einer Tiefe von -1'350 m ü. M. sogar bei ca. 100 °C.

In Betracht der geringen Datengrundlage und der damit verbundenen grossen Unsicherheiten wurden neben einer Angabe der Bandbreite absoluter Werte des Wärmeflusses ($W\ m^{-2}$) auch eine Normierung des Wärmeflusses vorgenommen und dieser für die oben genannten Tiefenbereiche dargestellt. Darüber hinaus wurde die thermische Peclet-Zahl bestimmt, die angibt, ob advective oder konduktive Wärmetransportprozesse dominieren. Die Peclet-Zahl ermöglicht auch das Potenzial der Realisierung von «offenen» (hohe Peclet-Zahl) oder «geschlossenen» (geringe Peclet-Zahl) geothermischen Systemen zu bewerten. Die Kenntnis der Grundwasserströmung (Up- and Downwelling), der normalisierten Wärmeströme und der Peclet-Zahl ermöglichen es, Gebiete zu identifizieren, in denen ein grösseres oder kleineres Potenzial bzgl. Grundwasserangebot (Fündigkeit) und thermischem Wärmefluss besteht. Solche Informationen sind nicht nur für die Planung von Geothermiebohrungen entscheidend, sondern vereinfachen auch wichtige raumplanerische Aufgaben an der Oberfläche. So können die für die Erkundung und Nutzung von Georessourcen geeigneten Sektoren im kantonalen Untergrund identifiziert und in die entsprechenden Nutzungspläne überführt werden.

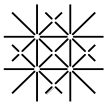


Mit dem 3D-THM wurden die hydraulischen und thermischen Auswirkungen der Grundwasserentnahme im Bereich der Bohrung 10-BR02, die 2010 für die Bedürfnisse der Therme Brigerbad abgeteufte wurde, sowie einer möglichen weiteren Geothermiebohrung, die von der Tiefe Geothermie Brig-Glis AG (TGBGAG) seit längerem geplant ist, beurteilt. Für verschiedene Entnahmemengen wurde die horizontale und vertikale hydraulische Reaktion der Grundwasseroberfläche (Absenktrichter) simuliert und ausgewertet. Auch die gegenseitige thermische Beeinflussung konnte quantifiziert werden. Damit ist das 3D-THM ein funktionales und flexibles Werkzeug, um die gegenseitige Beeinflussung verschiedener bestehender und neuer Bohrungen zu quantifizieren und Konflikte zwischen geothermischen Nutzungen vor dem Hintergrund des steigenden Nutzungsdrucks zu vermeiden. Zudem können Standorte neuer geothermischer Bohrungen auf Basis der Kenntnis des geothermischen Potenzials und der Simulationen mit dem 3D-THM optimiert werden. Die erarbeiteten Werkzeuge selbst bieten ein hohes Mass an Flexibilität, was viele Vorteile bei der Planung einer effektiven Erkundungskampagne bietet, da nicht nur die technischen, sondern auch die für die Wirtschaftlichkeit wichtigen Parameter abgeleitet werden können.

Mit den nun vorliegenden Informationen ist es möglich, Bereiche im Untergrund zu lokalisieren, die aufgrund der grossräumigen Grundwasserzirkulation und Temperaturverteilung ein höheres Potenzial für die geothermische Erkundung aufweisen. Dies erlaubt eine zielorientiertere Wahl von Standorten für vergleichsweise teure, mit einem hohen Risiko verbundenen, Erkundungsbohrungen. In einem iterativen Prozess sollten so Informationen aus Felduntersuchungen (z.B. Erkundungsbohrungen, Seismik, Hydrochemie) und Weiterentwicklungen von Modellen als Grundlage für die zielgerichtete Entwicklung von Energierichtplänen unter Berücksichtigung der Potenziale im Untergrund genutzt werden.

Der Bericht ist in zwei Teile gegliedert. Der erste Teil umfasst die Formulierung der Forschungsfragestellungen sowie die geologischen und thermohydraulischen Modellierungsarbeiten. Der zweite Teil des Berichts beinhaltet hauptsächlich eine allgemeine Einordnung der Ergebnisse der Modellierungsarbeiten im Zusammenhang mit der zukünftigen Planung geothermischer Bohrungen auf kantonaler Ebene.

Der erste Teil des Berichts befasst sich mit der Forschungsarbeit. Die Ausgangssituation wird mit einer einführnden Diskussion über den Wärmetransport im Tiefengrundwasser und geht speziell auf die Situation im Kanton Wallis ein. Vorkenntnisse aus früheren Arbeiten und offene Fragen werden zusammengefasst, sowie die Ziele des Forschungsprojektes beschrieben. Anschliessend werden der Projektperimeter und die vorhandene Datengrundlage vorgestellt. In den folgenden Kapiteln wird der Aufbau des geologischen 3D-Modells sowie die Übertragung und die Parametrisierung des 3D-THM beschrieben. Nach einer umfangreichen Sensitivitätsanalyse wird mit Hilfe dieser Ergebnisse im Rahmen der Kalibrierung das «best Fit» Model



entwickelt. Es folgt eine Validierung des 3D-THM anhand der Grundwasserneubildung und der Verweilzeiten. Abschliessend werden die Ergebnisse der Modellierungsarbeiten präsentiert und diskutiert.

Der zweite Teil des Berichts beschreibt wie die Ziele des Forschungsprojekts erreicht wurden. Darüber hinaus regt das BFE eine Diskussion darüber an, wie die kantonalen Behörden und die Gemeinde Brig die jetzt verfügbaren Informationen nutzen können, um gezielte Planungsinstrumente wie Potenzial- oder Eignungskarten zu entwickeln. So könnten die gewonnenen Erkenntnisse direkt in die Instrumente der Raumplanung (Zonenpläne) einfließen und die notwendige Abstimmung mit der energiewirtschaftlichen Planung erleichtern. Es folgen ein allgemeiner Ausblick und Empfehlungen mit konkreten Vorschlägen zur Entwicklung methodischer Instrumente, zur Übertragbarkeit und Skalierung, sowie die Formulierung eines Massnahmenpakets und Vorschläge zur Verbreitung einschliesslich der Bereitstellung von Planungsgrundlagen.

2 Ausgangslage

2.1 Auftrag und fachliche Koordination

Im Jahr 2019 trat die Angewandte und Umweltgeologie (AUG), Arbeitsgruppe der Forschungsgruppe Hydrogeologie der Universität Basel, in Kontakt mit der Dienststelle für Energie und Wasserkraft (DEWK) und regte an, in der Region Brig ein Tiefenmodell nach einer in Davos entwickelten und angewandten Methode zu erstellen. Das Bundesamt für Energie (BFE) hatte diese Forderung vorgängig gestellt, nachdem es mit der Gesellschaft Tiefe Geothermie Brig-Glis AG (TGBGAG) wegen eines Gesuchs um finanzielle Unterstützung Kontakt aufgenommen hatte. Mit diesem Modell sollten die tiefen thermischen Grundwasserzirkulationen auf regionaler Ebene modelliert werden, um das hydrothermale System besser zu verstehen und eine zusätzliche Planungsgrundlage für die Durchführung einer geothermischen Tiefbohrung zu erhalten. Im Vorfeld beschloss der Staatsrat am 17. März 2021, die Arbeiten zur Ausarbeitung eines neuen kantonalen Gesetzes über die Georessourcen¹ wieder aufzunehmen. Die an dieser Arbeit beteiligten kantonalen Dienststellen hielten es daher ebenfalls für sinnvoll, eine gezielte Unterstützung für das Tiefbohrprojekt der TGBGAG in Brig anzustreben, an das seit 2012 hohe Erwartungen geknüpft waren. Mit der vorgeschlagenen Modellierstudie könne auch die Empfehlung der Dienststelle für Raumentwicklung (DRE) dahingehend unterstützt werden, dass der Untergrund Gegenstand einer prospektiven Richtplanung² sein sollte. Die Entwicklung eines numerischen 3D-Modells sollte dabei dem Kanton einen klaren Mehrwert darstellen, um anschliessend die erforderlichen Planungsinstrumente und -grundlagen zu entwickeln. Der Kanton wollte auf diese Weise die Herausforderungen und Bedürfnisse identifizieren, um einen auf die kantonalen Gegebenheiten zugeschnittenen Ansatz zu entwickeln, der auch für Gemeinden, die an der Planung solcher Projekte beteiligt sind, von Nutzen sein könnte. Das DEWK sowie die Dienststelle für Umwelt des Kanton Wallis (DUW) vergaben mit der Unterstützung vom Programm EnergieSchweiz vom BFE daher schliesslich im Herbst 2022 das entsprechende dreijährige Mandat an die AUG zur Durchführung des Projekts «Wärmetransport im Tiefengrundwasser - Erschliessung geothermischer Potenziale im Kanton Wallis - Pilotstudie Brig». Das Projekt umfasst die Entwicklung eines, auf einem geologischen 3D-Modell basierenden, thermisch hydraulischen Modell (THM), mit dessen Hilfe die Dynamik der regionalen Grundwasserzirkulation

¹ Loi sur les géoressources (in Bearbeitung). Die im Rahmen dieser Studien gemachten Angaben beziehen sich auf die Vorlage, die im Laufe des Jahres 2022 vom Kanton Wallis erarbeitet wurden.

² Für eine Sammlung guter Beispiele in der Schweiz, siehe ARE-Bericht «Raumplanung im Untergrund» (2022) <https://www.are.admin.ch/are/de/home/medien-und-publikationen/publikationen/publikationen/strategie-und-planung/raumplanung-untergrund.html>

und das geothermische Potenzial für verschiedene Aquiferbereiche abgeschätzt werden soll. Im Rahmen verschiedener Sitzungen und Besprechungen fand ein fachlicher Austausch, sowie eine kontinuierliche Abstimmung zum Vorgehen und Ziele des Projekts statt³. Beteiligt waren hierbei insbesondere der Kanton Wallis (Frédéric Zuber, Pierre Christe und Julien Richon) und die Universität Basel (Stefan Scheidler, Oliver Schilling, Jannis Epting), sowie für den weiteren fachlichen Austausch und Synergien die Universität Bern (Marco Herwegh, Christoph Wanner, Daniela van den Heuvel, Timothy Schmid, Ferdinando Musso), die EA-WAG (Rolf Kipfer, Sébastien Giroud) und die Swisstopo (Herfried Madritsch).

Der Projektplan mit Arbeitspaketen, Milestones (M) und Zwischenberichten (rote Linien) sind in [Tab. 1](#) und die einzelnen Meilensteine nochmals in [Tab. 2](#) aufgeführt.

Tab. 1: Meilensteine & Zwischenresultate

Start November 2022	2022		2023				2024	
	IV	I	II	III	IV	I	II	
(1.1) Zusammenstellung bestehender Daten, erste Analysen hinsichtlich Perimeter (Aufbau GIS-Projekt, hydraulic modeling)								
(1.2) 3D-Geologische Modellierung Modellierung aller notwendiger geologischer Einheiten		M1						
(2.1) Integration der modellierten Flächen in ein THM, erstellen Berechnungsnetz, Parametrisieren geol. Einheiten								
(2.2) Kalibrierung und Validierung des 3D-THM								
(2.3) Sensitivitätsanalyse, Berechnung des Einflusses verschiedener Parameter (z.B. K-Werte unterschiedlicher geologischer Einheiten)				M2				
(3.1) Visualisierung 3D THM								
(3.2) Ableitung von Fließzellen (Lokalitäten erhöhter GW-Ergiebigkeit und thermischer Potenziale)								
(3.3) Grundwasser- und Wärmebilanzen; Abschätzung des thermischen Nutzungspotenzials (Flux Q, Energie Wärme W)							M3	
(3.4) Szenarienberechnungen verschiedene Entnahmemengen von potenziellen Nutzern (gegenseitige Beeinflussung)								
(4) Interpretation & Abschlussbericht								M4

Tab. 2: Meilensteine

Datum	
1. April 2023	M1: geologische 3D-Modellierung
1. Dezember 2023	M2: Grundwassermodell & Szenarienergebnisse
1. April 2024	M3: Grundwasser-, Wärmebilanzen & Nutzungspotenziale
30. Juni 2024	M4: Interpretation & Abschlussbericht

³ Für Projektpartner, siehe auch Protokolle vom 01.12.2022 und 06.02.2023.

2.2 Wärmetransport im Tiefengrundwasser

Alpine Täler sind oft durch eine typische Abfolge von fluvialen, glazialen Lockergesteinsfüllungen und darunterliegenden glazialen, lakustrischen Ablagerungen gekennzeichnet, die die Talfüllungen gegen die tieferen Gesteinsgrundwasserleiter abdichten und zu gespannten oder artesischen Grundwasserverhältnissen führen. Um eine unkontrollierte Verbindung zwischen zwei oder mehreren Aquiferen zu verhindern bleiben diese Wasserressourcen daher meist ungenutzt.

Abb. 1 zeigt eine schematische Darstellung des geologischen Aufbaus und der tieferen Grundwasserzirkulation. Aufsteigende thermale Tiefengrundwässer, sowie warme und kalte Quellaustritte können damit gut erklärt werden. Solche konzeptionellen Modelle erlauben jedoch weder eine quantitative Analyse noch die Untersuchung des Einflusses von Veränderungen (existierende und künftige Grundwasserentnahmen).

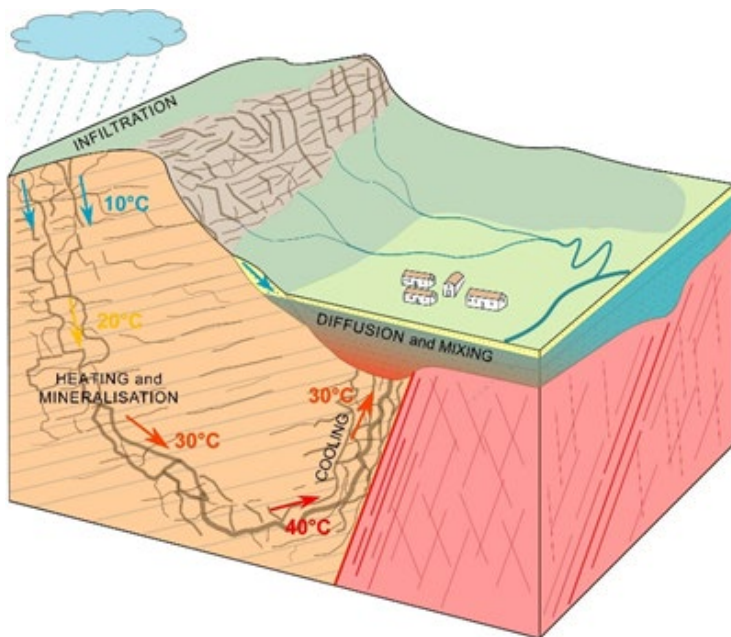
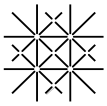


Abb. 1: Konzeptionelles 3D-Modell, welches ein Beispiel einer tiefen Grundwasserzirkulation in einem verkarsteten, geklüfteten Aquifer mit Mischungsprozessen in den quartären Ablagerungen und dem Aufstieg des thermalen Wassers entlang von Bruchstrukturen darstellt (Sonney, 2010).

2.3 Vorausgehende Untersuchungen und offene Fragen

Geologische Untersuchungen in der weiteren Umgebung des Brigerbads erfolgten in erster Linie im Rahmen von Feldarbeiten und Kartenaufnahmen (Steck, 1989; Dolivo, 1982; Burri, 1991), sowie im Rahmen der umfangreichen Planungen des Lötschbergtunnels (Geologengruppe Lötschberg-Basistunnel, 2007; BLS Alp Transit, 1994-1997) und der Autobahn A9. Für einen ersten Einblick in den generellen geologischen und den



komplexen strukturellen Aufbau des Gebietes sei auf diese Arbeiten verwiesen. Im Folgenden werden wesentliche Erkenntnisse aus vorausgehenden Untersuchungen und offene Fragen vorgestellt.

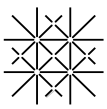
Projekt «Alpine Geothermal Power Production» (AGEPP)

Im Jahr 2006 legte das Projekt «Alpine Geothermal Power Production» (Agepp) eine erste Studie zur geothermischen Nutzung des tieferen Untergrundes im Wallis vor. Diese Studie bezeichnete das Gebiet um die Thermalquellen Brigerbad als eines der interessantesten Gebiete für die Geothermie in der Schweiz (Pg-Geothermie, 2013).

Speziell zu erwähnen sind die strukturgeologischen Arbeiten, welche die Klüftungs- und Schieferungsmuster der Gesteine besser erfassten, die geophysikalische Untersuchung des Umfelds des Thermalbads mit Hybridseismik, sowie eine Auswertung der Hydrogeologie und sämtlicher verfügbarer hydrochemischer Daten. Es erfolgten weitere geologische und strukturgeologische Erhebungen um das Kluftgeschehen als wesentliches Element der Tiefenzirkulation der Thermalwässer besser zu verstehen. Geophysikalische Erkundungen lieferten Hinweise zum Aufbau der quartären Talfüllung und zum Verlauf der Felsoberkante am nördlichen Talhang. Klare Bruchstrukturen im Kristallin des Aar-Massifs liessen sich dabei nicht ausschließen.

Als Fazit wurde festgehalten, dass der Aufstieg der Thermalwässer an präferenziellen Fließwegen stattfindet und sich verschiedene Wässer durchmischen (kalte Grundwässer des Talbodens, perkolierende Infiltrate, artesisch gespannte Tiefenwässer). Eine Reihe von Fragen blieb jedoch unbeantwortet. So bleibt trotz der Auswertung der umfangreichen Daten das Verständnis bezüglich der Hydrochemie und Radiochemie der Tiefenwässer sowie deren wichtigste Zuflusspfaden unklar. Auch blieb die Frage ungeklärt, ob im Zusammenhang mit den Hauptzirkulationswegen des Thermalwassers unterschiedliche thermale Grundwasserkomponenten existieren (sogenannte thermale und subthermale Komponenten). Das Temperaturprofil der vertikalen Bohrung 10-BR02 deutet darauf hin, dass aufgrund der Nähe zum tektonischen Kontakt zur Hauptüberschiebung deutlich höhere Temperaturen beobachtet werden, verglichen mit Temperaturen, die sich aus dem geothermischen Tiefengradienten ableiten lassen.

Es wurde auch festgehalten, dass für die geothermische Nutzung die Zerklüftung des Gesteins in der Tiefe massgebend ist und, dass diese mit grosser Überlast tendenziell stark zurückgeht (ein Aspekt dem wir in unseren Untersuchungen besonderes Augenmerk gaben). In diesem Zusammenhang konnten auch keine



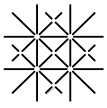
weiteren Erkenntnisse über das Fließsystem gewonnen werden, insbesondere zur Frage der Zirkulationsverhältnisse in unmittelbarer Nähe zur grossen Überschiebungs- oder Abschiebungsfläche zwischen penninischen Decken und Kristallgebirge. Eine 3D-Modellierung des Untergrundes sollte eine Verifizierung der Annahmen ermöglichen.

Projekt Tiefe Geothermie Brig-Glis AG (TGBGAG)

Gemäss der initialen Prognose der TGBGAG könnte mit einer Bohrung auf eine Tiefe von 2.5 bis 3.5 km ca. 110 °C heisses Thermalwasser mit einer Menge von ca. 50 l/s gefördert werden. Anlässlich der Ereignisse bei der Bohrung in St. Gallen (induziertes Erdbeben am 19.07.2013) wurde eine entsprechende Erkundung des Tiefenuntergrunds jedoch per Ende 2013 sistiert. In den darauffolgenden Jahren wurden neue Grundlagen erarbeitet (vgl. Werner Leu (2018)), die auf ein nutzbares Potenzial im Aar-Massif hinwiesen. Das Projekt in Brig-Glis wurde dementsprechend angepasst und auf 1 km Tiefe beschränkt, mit dem Ziel Thermalwasser mit einer Temperatur von mindestens 70 °C und einer Förderung von mindestens 25 l/s zu realisieren. Im Oktober 2018 wurde ein entsprechendes Vorprojekt erstellt und Vorabklärungen durchgeführt um eine Subventionierungsmöglichkeit der Bohrung zur Wärmenutzung in Brig durch das BFE zu prüfen. Mit dem Projekt sollte die Wärmeversorgung des Spitalneubaus in Brig-Glis gedeckt, sowie noch ein weiteres Quartier über die Abwärme mittels einem Anergienetz versorgt werden. Die Stadtgemeinde entschied im Anschluss Abklärungen zu treffen, um die vom Bund nicht subventionierten 40% der Kosten zu decken. Faktisch wurde das Projekt auf Eis gelegt und das Gesuch um Finanzhilfe nicht an das BFE eingereicht. Die Fündigkeit der Ressource bleibt somit auch nicht bestätigt und relevante neue geowissenschaftliche Daten konnten aus der Erkundungsphase nicht gewonnen werden.

Arbeiten (2010b); Sonney (2010a): Grundwasserfluss, Wärme- und Stofftransport in geothermischen Systemen eines zentralen Alpenmassifs (Lavey-les-Bains, Saint-Gervais-les-Bain und Val d'Illicz)

Auf Grundlage von geologischen 2D-Profilen simulierte Sonney (2010b) im Bereich Lavey-les-Bains, Saint-Gervais-les-Bain und Val d'Illicz das hydraulische und thermische Grundwasserregime mit detaillierten numerischen 2D-THM, welche auch komplexere geologische Strukturen berücksichtigten. Er zog die Schlussfolgerung, dass für Fallstudien alpiner Tiefenzirkulationssysteme in 2D- und 3D-Modellen die geologischen Strukturen stark vereinfacht werden müssen. Für die Entwicklung eines detaillierten 3D-Modells eines Systems wie bei Lavey-les-Bains, Saint-Gervais-les-Bains oder Val d'Illicz wären umfangreiche Forschungsarbeiten zu diesem Thema mit weitergehenden Informationen aus Tiefbohrungen notwendig.



Auch zeigte Sonney (2010b) anhand der Hydrochemie und der Isotopenzusammensetzung die Änderung der Mischungsverhältnisse sowie der Temperatur des Tiefengrundwassers im Zusammenhang mit dem Einfluss der Topografie für den Alpenraum auf (Abb. 1). Die Analysen bestätigen, dass die Zusammensetzung der Grundwasserchemie, die sich durch die Grundwasserentnahme stark verändert, sich schwer charakterisieren lässt, da keine Grundlage für das Verständnis der Fliesssysteme existiert.

3 Zielsetzungen

Ein primäres Ziel ist Wissenslücken hinsichtlich dem hydrogeologischen Prozessverständnis alpiner geothermischer Systeme auf regionaler Ebene zu schliessen. Um dies zu erreichen, sollte die von der AUG entwickelte Methodik⁴ zur Evaluation regionaler Grundwasserzirkulationssysteme (Scheidler et al., 2019) am Fallbeispiel Brig angewendet werden. Einerseits sollte ein Werkzeug für die Vollzugsbehörde erarbeitet und andererseits ein Verfahren zur Darstellung der Geologie und Grundwasserzirkulationssysteme des alpinen Aquifers entworfen werden. Die Kombination der regionalen Topografie-induzierten Grundwasserzirkulationssysteme mit dem Wärmetransport (Temperaturverteilung und Wärmepotenziale) ist dabei eine der grundlegenden Weiterentwicklungen des bisherigen Ansatzes (Fallbeispiel Davos), welches zur Begleitung der Energieplanung von Bedeutung ist.

Ein weiteres Ziel ist die Entwicklung und Anwendung der Modell-Werkzeuge zur Abschätzung des geothermischen Nutzungspotenzials des alpinen Aquifers der Region Brig. So soll aufgezeigt werden, wo auf Grundlage der regionalen Grundwasserzirkulation und der Temperaturverteilung im Untergrund geothermische Nutzungspotenziale existieren (Fündigkeit & Temperatur). Die Übertragbarkeit der erarbeiteten Grundlagen auf alpine Täler im Allgemeinen sollte geprüft werden mit dem Ziel, künftige quantitative und thermische Übernutzungen von Grundwassersystemen zu vermeiden. Hierfür werden exemplarisch Konstellationen geothermischer Nutzungen und deren gegenseitige Beeinflussung untersucht.

Tab. 3 fasst die Zielsetzungen, einschliesslich einer Beschreibung der Energieziele, direkter und kurzfristiger Wirkungen sowie indirekter und langfristiger Wirkungen als auch das Messen der Zielerreichung anhand von Erfolgsindikatoren zusammen. Im Kapitel 10.1 wird die Erreichung der einzelnen Ziele wieder aufgenommen und diskutiert.

Tab. 3: Zielsetzungen

Beschreibung Energieziele	Direkte, kurzfristige Wirkung	Indirekte, langfristige Wirkung	Messen der Zielerreichung (Erfolgsindikatoren)
Beurteilung geothermisches Potenzial Region Brig	Abschätzung verfügbare Wärmeenergie	Koordinierte Nutzung geothermischer Potenziale	Berechnung Massenbilanz (Wasser & Energie)
Vermeidung Konflikte geothermischer Nutzungen	Effizientes Bewilligungsverfahren dank fundierter Nachweise	Bewirtschaftungswerkzeuge langfristige Planungssicherheit	Messsysteme & Pumpversuche zur Beurteilung gegenseitiger Beeinflussung
Standortoptimierung Geothermiebohrungen	Robuste Auswahlkriterien Optimierung Ergiebigkeit	Nachhaltige Aquifer Bewirtschaftung	Langzeit-Pumpversuch und Grundwasser Isotopenanalysen

⁴ Technischer Bericht «GRETA Davos» Geologisches Modell und Grundwassermodellierung. BGA-Graubünden-4, 2019.

4 Projektperimeter & geologische Datengrundlagen

Für die regionale Betrachtung der Grundwasserzirkulation umfasst das Untersuchungsgebiet das oberirdische Einzugsgebiet⁵ der Rhone und damit auch einen Grossteil des Aar-Massifs (Abb. 2). Dieser grossräumige Betrachtungsansatz stellt sicher, dass der für die Fragestellung relevante Bereich im Rohnetal bei Brig, einschliesslich der hydraulischen und thermischen Randbedingungen, weit genug von den Modellgrenzen entfernt ist und dass auch die maximalen Höhen für die Topografie-induzierte Grundwasserströmung berücksichtigt werden.

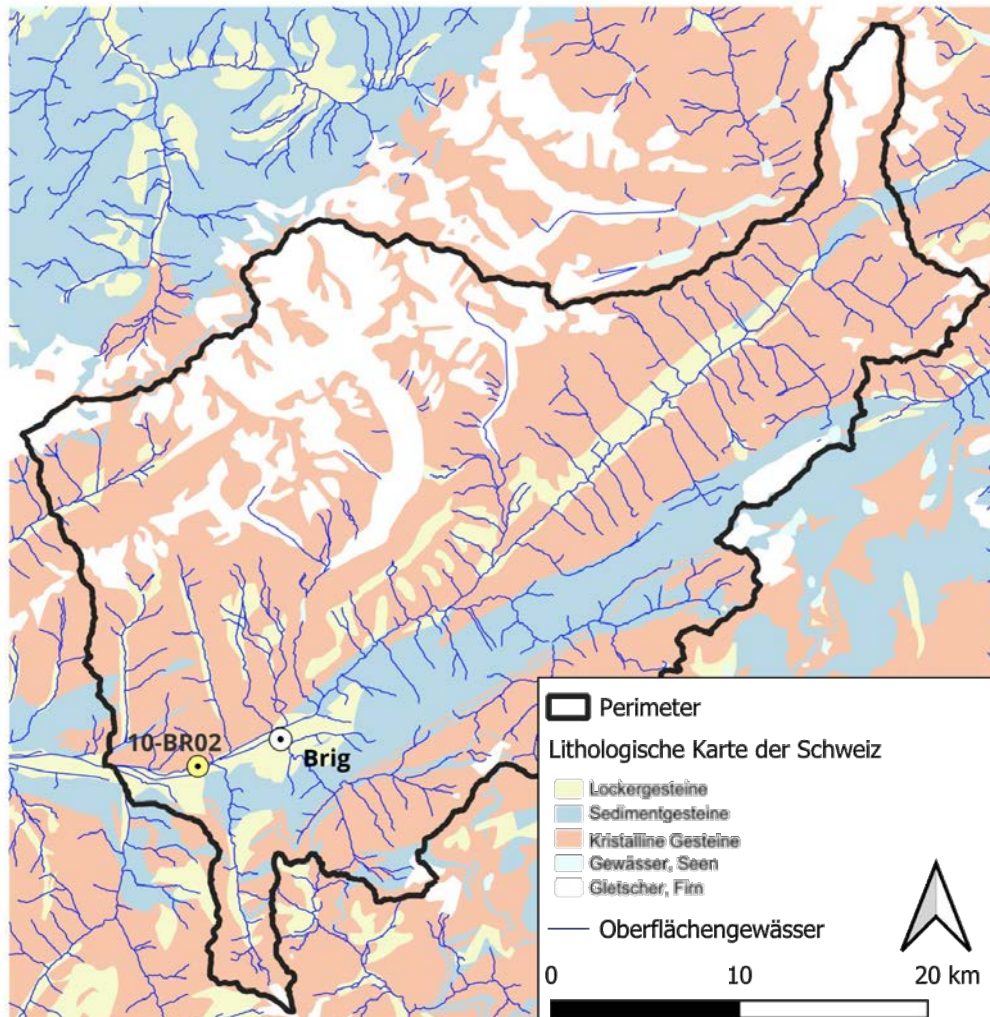


Abb. 2: Perimeter (oberirdisches Einzugsgebiet der Rhone bis unterhalb von Brig) und lithologische Karte der Schweiz (Gesteinsgruppen 1:500'000; Swisstopo), einschliesslich Oberflächengewässer.

⁵ Das oberirdische Einzugsgebiet stellt hier eine Hilfsgrösse dar um den Bereich der Grundwasserneubildung abschätzen zu können. Das für eine exaktere Analyse eigentlich notwendige unterirdische Einzugsgebiet kann mit den zur Verfügung stehenden Datengrundlagen allenfalls grob abgeschätzt werden.

Verwendete Datengrundlagen umfassen insbesondere die lithologische Karte (Gesteinsgruppen 1:500'000; Swisstopo) und Profile (Abb. 2 & Abb. 3; Swisstopo und geologischer Atlas der Schweiz). In der lithologischen Karte und den Profilen lassen sich verschiedene strukturelle Einheiten unterscheiden, insbesondere auch das Kristallin und Sedimentgesteine wie auch die Lage der Grosstrukturen «Alpine Hauptüberschiebungen» und «Rote Kuh Gampel Bruch». Unterhalb der quartären Bedeckung besteht Kontakt zum Kristallin und den Sedimentgesteinen (Helvetikum und Penninikum). Das Helvetikum besteht aus dem Kristallin des Aar-Massifs im Norden des Gebiets, südlich davon der Übergang zur Urseren-Zone mit permischen Arkosen und Konglomeraten folgend die Termen-Zone aus karbonatischen Serien und Tonschiefer. Weiter im Süden schliesst die Zone von Sion-Courmayeur an, die bereits den penninischen Sedimentdecken zugeordnet wird. Generell tauchen die Einheiten steil nach Süd-Südosten ein (Pg-Geothermie, 2013). Für Details sei auf die im Kapitel 2.3 «Vorausgehende Untersuchungen und offene Fragen» aufgeführte Literatur verwiesen.

Die Vorarbeiten zum Aufbau des geologischen 3D-Modells umfassten vor allem die Georeferenzierung der Profillinien und die Übertragung der Bruchlinien von den Kartengrundlagen in die Modellierungssoftware. Tab. A1 umfasst eine Zusammenstellung der verwendeten geologischen Profile, einschliesslich der Informationen, welche Grundlagen für die Erarbeitung des geologischen 3D-Modells Verwendung fanden.

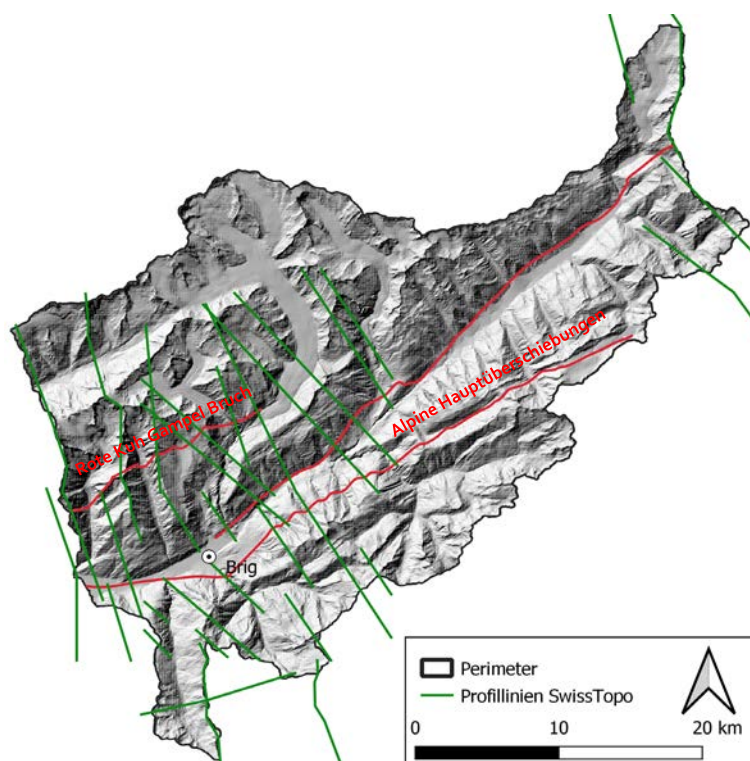


Abb. 3: Perimeter des Untersuchungsgebiets mit geologischen Profillinien der Swisstopo und geologischer Atlas der Schweiz (grün), den Alpen Hauptüberschiebungen, einschliesslich den Grosstrukturen «Alpine Hauptüberschiebungen» und «Rote Kuh Gampel Bruch» (rot) und der Oberflächentopografie in Relief-Darstellung.

Eine weitere wichtige Grundlage für die hydraulische Parametrisierung des Untergrundes waren detaillierten Daten der Bruchstrukturen, welche von der Universität Bern (Marco Herwegh, Forschungsgruppe Tektonik und Strukturgeologie) zur Verfügung gestellt wurden (Kapitel 6.2; Abb. 4). Eine Einschränkung war dabei, dass südlich der Rhone keine detaillierten Daten der Bruchstrukturen vorhanden waren und daher Annahmen bzgl. der hydraulischen Untergrundeigenschaften getroffen werden mussten (Kapitel 5).

Weitere Datengrundlagen umfassten ein Tiefenprofil der Untergrundtemperaturen in der Bohrung 10-BR02 in Brig, sowie ein Längsprofil des Temperaturverlaufs entlang des Simplontunnels (Kapitel 7.1; Abb. 4).

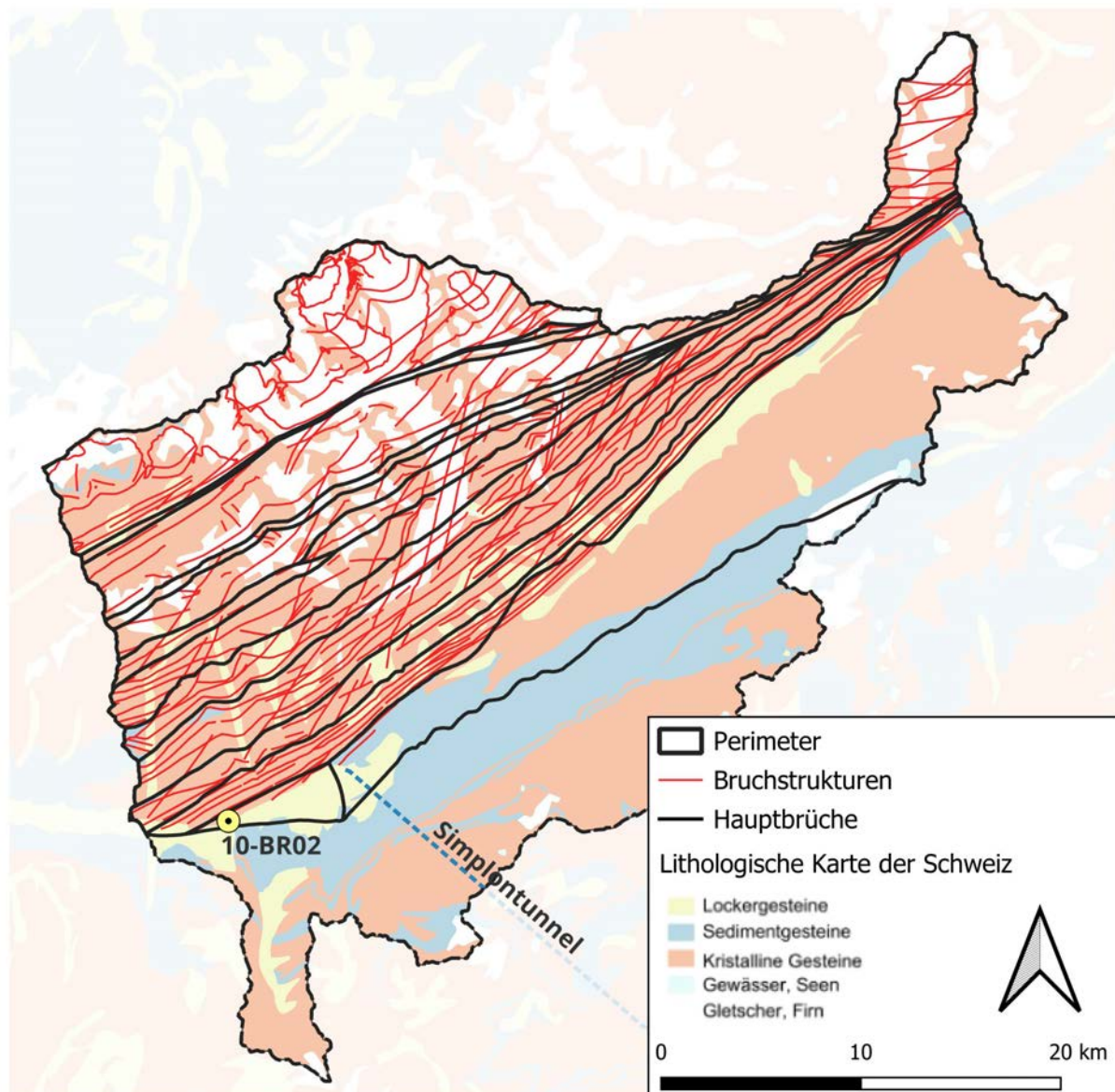


Abb. 4: Alpine Hauptüberschiebung, Hauptbrüche und detaillierte Bruchstrukturen (Daten: Universität Bern) sowie lithologische Karte der Schweiz (Gesteinsgruppen 1:500'000; Swisstopo).

5 Geologisches 3D-Modell

Basierend auf der zur Verfügung stehenden Datengrundlage wurde zur räumlichen Abbildung der geologischen Strukturen (strukturelle Grosseinheiten & Bruchsysteme) ein geologisches 3D-Modell in SKUA-GOCAD erstellt (Abb. 5). In einem ersten Schritt wurde als Perimeter das oberirdische Einzugsgebiet definiert, welches den Grossteil des Aar-Massifs umfasst (Kapitel 4).

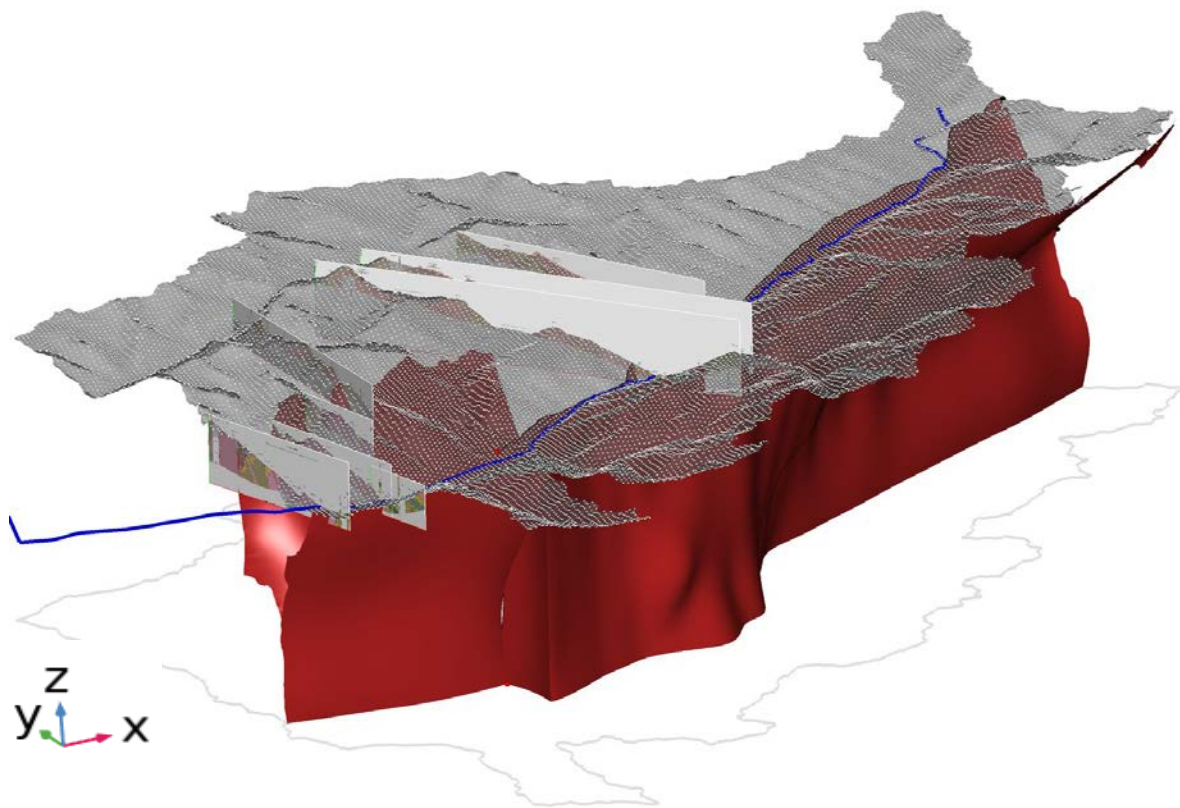
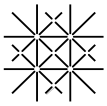


Abb. 5: 3D-Ansicht des geologischen 3D-Modells in GOCAD mit georeferenzierten geologischen 2D-Profilen für die Konstruktion der geologischen Grossstrukturen (Rot: Alpine Hauptüberschiebungen und Rote Kuh Gampel Bruch), einschliesslich der Oberflächentopografie (grau; Blick von Südwesten in das hintere Rhonetal).

Das Ziel der geologischen 3D-Modellierung ist die Interpretation und Bereitstellung der grossräumigen geometrischen Strukturen welche in das THM integriert werden konnten. Deswegen lag der Schwerpunkt für die Erstellung des geologischen 3D-Modells auf der Berücksichtigung der grossräumigen Bruchstrukturen wie die alpinen Hauptüberschiebungen, der Rote Kuh Gampel Bruch und vergleichbaren Strukturen. Es wurde keine Differenzierung der lithologischen Einheiten vorgenommen, die Parametrisierung hydrogeologischer Einheiten, welche in Kapitel 6.2 vorgestellt wird, wurde für das 3D-THM vorgenommen.



Für die Validierung des Verlaufs der geologischen Grossstrukturen in die Tiefe wurde ein qualitativer Vergleich des Verlaufs der geologischen Grossstrukturen auf Grundlage eines Schnitts des geologischen 3D-Modells auf 2'000 m ü.M. Höhe mit der interpretierten Geologie von Steck (1989) vorgenommen.

Da der Fokus nicht auf der Erstellung eines möglichst detaillierten geologischen 3D-Modells lag (ein solches existiert z.B. bei der Universität Bern für das Aar-Massif; Musso Piantelli et al. (2022)), sondern auf der Berechnung des regionalen hydraulischen und thermischen Grundwasserregimes, wurden entsprechende Vereinfachungen bereits im geologischen Aufbau berücksichtigt.

Vorausgehende Arbeiten im Untersuchungsgebiet deuten darauf hin, dass eine regionale Grundwasserzirkulation bis in Tiefen von 10 km zu erwarten sind (Diamond et al. (2018) und Egli et al. (2018)), weshalb diese vertikale Ausdehnung entsprechend für die 3D-Modellierungen, trotz grosser Unsicherheiten, berücksichtigt wurde.

So wurden die geologischen Strukturen und deren Einfallen bis in eine Tiefe von 10 km extrapoliert. Wichtig war die relevanten Grossstrukturen der einzelnen alpinen Überschiebungen von Beginn an diskret in das 3D-THM integrieren zu können, damit diese bei der Erstellung des Berechnungsnetzes bereits mitberücksichtigt werden.

6 Thermisch-hydraulisches Modell (3D-THM)

Im Folgenden wird der Aufbau des numerischen 3D-THM, einschliesslich der Überführung der Strukturen aus dem geologischen 3D-Modell, der Erstellung des Berechnungsnetzes, der Parametrisierung der hydraulischen und thermischen Randbedingungen sowie der Untergrundeigenschaften vorgestellt.

Die für die Erstellung eines numerischen 3D-THM notwendige Software muss verschiedene Anforderungen erfüllen, einschliesslich der Möglichkeit einer »Layer«-unabhängigen Integration dieser Strukturen, vor allem die Überschiebungen auf der regionalen Skala (10er km). Dieser Integrationsprozess ist auch mit fortschreitender Entwicklung der verschiedenen Softwarepakete zur Modellierung ein herausfordernder Vorgang (Ross et al. (2005)). Dies obwohl die verwendete Software COMSOL über ein separates CAD-Importmodul verfügt, welches eine Vielzahl verschiedener CAD-Dateiformate wie STEP3 oder IGES unterstützt. Das detaillierte Vorgehen der Übertragung von geologischen Strukturen in ein regionales numerisches Modell, welches die AUG in Kooperation mit den COMSOL entwickelt hat, wird in einem COMSOL Blog⁶ erläutert.

6.1 Erstellen des Berechnungsnetzes («Mesh»)

Die Auflösung und die Qualität der Tetraeder eines 3D-Berechnungsnetzes (Mesh) sind wichtige Merkmale eines numerischen Modells und abhängig von der zu berücksichtigenden Skala (in diesem Fall regional). Eine geringe Mesh-Qualität, in Relation zu den Freiheitsgraden und der Geometrie, kann zu Abweichungen bei den Resultaten oder zu Konvergenzproblemen bei der Berechnung der Jakobi-Matrix führen⁷. Der am meisten verwendete Parameter zur Überprüfung der Mesh-Qualität ist die «skewness» (Schrägheit), welche die Winkel der Elemente mit einem idealen Element vergleicht. Ein Wert von 1 entspricht dabei einem optimalen Element, während ein Wert von 0 ein degeneriertes Element repräsentiert⁸ (Abb. 6).

⁶ <https://www.comsol.com/blogs/integration-of-geological-structures-into-regional-scale-groundwater-models/>

⁷ https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/comsol_ref_mesh.15.18.html

⁸ <https://www.comsol.com/blogs/how-to-inspect-your-mesh-in-comsol-multiphysics/>

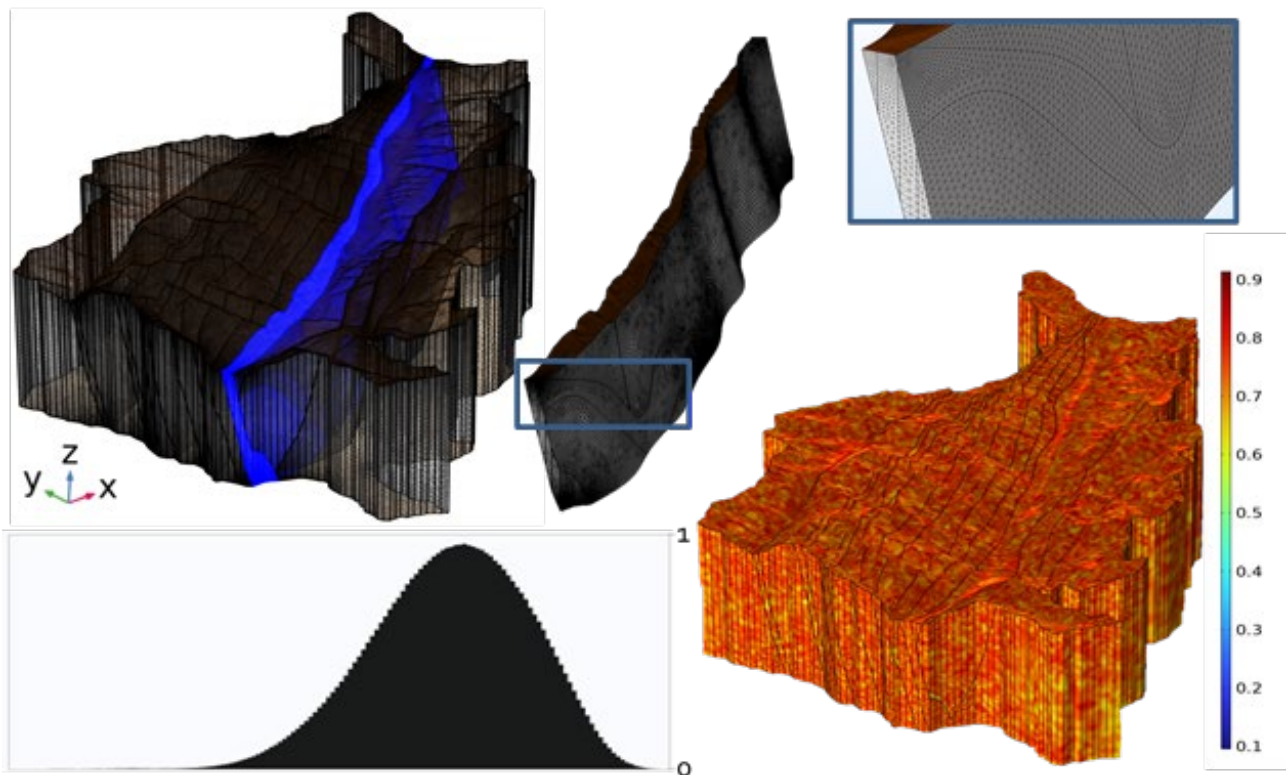


Abb. 6: Generiertes Mesh des 3D-THM in COMSOL bestehend aus ca. 7.7 Millionen Elementen (Tetraedern) mit einer durchschnittlichen Element-Qualität von 0.67 (die Skala der Abbildung unten rechts zeigt die Qualität für jeden Tetraeder) und der Gausschen Verteilungskurve (unten links).

6.2 Hydraulische und thermische Untergrundeigenschaften

Abb. 7 zeigt die durch Hauptbrüche begrenzten hydrogeologischen Einheiten, welche auf den aus dem geologischen 3D-Modell übernommenen Strukturen basieren, für welche die Parametrisierung der hydraulischen und thermischen Untergrundeigenschaften vorgenommen wurde. Die Umsetzung der geologischen Strukturen in das 3D-THM basiert auf der Lage und dem Einfallen der Hauptbrüche (**Abb. 8**). Die an der Geländeoberfläche ausgewiesenen hydrogeologischen Einheiten setzen sich 3D im Untergrund fort (**Abb. 9**).

6.2.1 Anisotropie

Ausgehend von der Annahme, dass im kristallinen Grundgebirge eine höhere Durchlässigkeit entlang von Brüchen und eine geringere Durchlässigkeit senkrecht zu diesen bestehen kann, wurde die Richtung der Anisotropie (bzw. der höchsten k -Werte) wie folgend beschrieben entsprechend der Ausrichtung der Bruchsysteme definiert. Die Höhe der horizontalen Anisotropie wird aufgrund fehlender Daten mit 0.25 (k_y/k_x)

angenommen. Die vertikalen k_z werden um eine Grössenordnung geringer als die horizontalen ($k_z = 0.1 k_x; k_y$) angenommen.

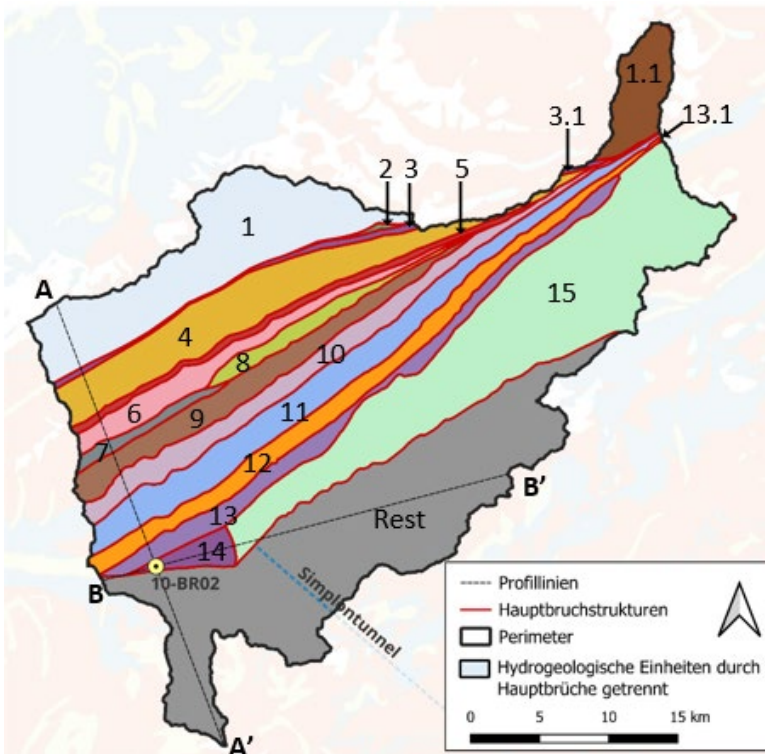


Abb. 7: Durch Hauptbrüche getrennte hydrogeologische Einheiten für welche jeweils ein gewichteter k -Wert und die Richtung der Anisotropie ermittelt wurden.

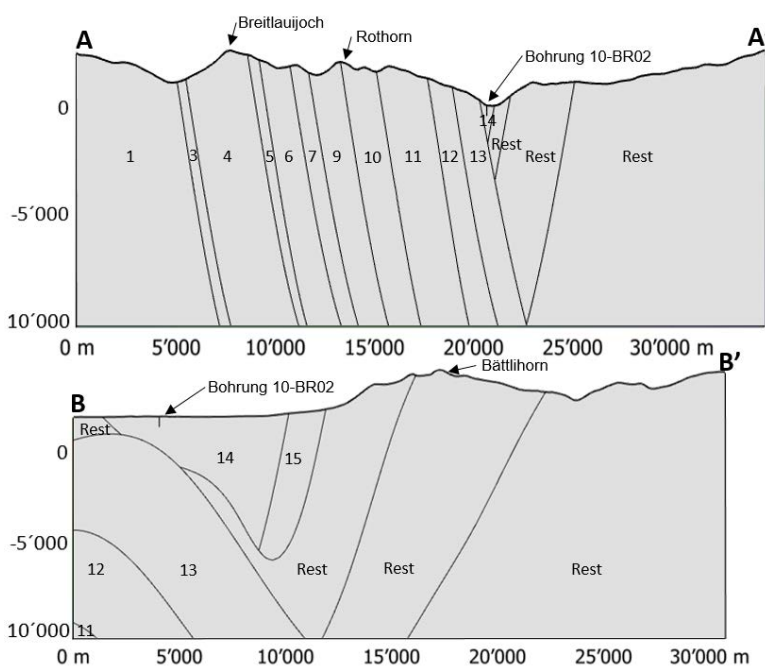


Abb. 8: Profilschnitte der im 3D-THM integrierten durch Hauptbrüche getrennten hydrogeologischen Einheiten. Profillinien sind in Abb. 7 und Abb. 43 dargestellt.

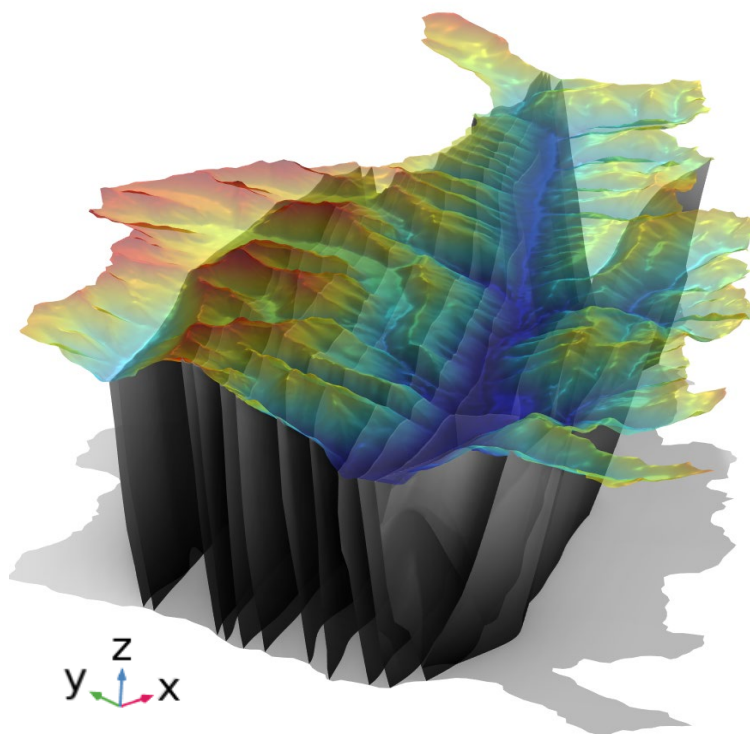
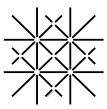
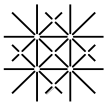


Abb. 9: 3D-THM in COMSOL: Projektperimeter mit Bruchstrukturen (Blick von Westen in das hintere Rhonetal).

Diese vereinfachten Zusammenhänge werden häufig für quartäre Schottergrundwasserleiter angenommen und lassen sich durch den Ablagerungsprozess von Fließgewässern begründen, sind aber für (tiefe) Kluftgrundwasserleiter nur bedingt gültig. Daher wurde in einem weiteren Schritt die Sensitivität einer tiefenabhängigen Integration der k -Werte untersucht (vgl. [Kapitel 6.2.2](#)).

Um die Richtung der Anisotropie bestimmen zu können, wurden alle verfügbaren Brüche nach ihrer Ausrichtung analysiert. Das Bruchsystem im Bereich des Modellperimeters wurde von der Universität Bern zur Verfügung gestellt. Mit Hilfe des Analyse-Programms «FraNEP» (Zeeb et al., 2013) konnten die strukturellen Kennwerte separat für die verschiedenen hydrogeologischen Einheiten auf Grundlage der detaillierten Daten zu den Bruchstrukturen systematisch ausgewertet werden ([Abb. 4](#) & [Abb. 7](#)). Die Richtung der Anisotropie kann in Abhängigkeit von der Ausrichtung der Bruchstrukturen und der anliegenden Gebirgsspannung beeinflusst werden. Letzteres hat je nach Stellung der Hauptspannungsrichtung Einfluss auf die Apertur von Bruchstrukturen und damit deren Permeabilität (Zhang et al., 1996). Da die Gebirgsspannung im Detail nicht bekannt ist, konnte dieser Faktor nicht berücksichtigt werden.

Für den Bereich südlich der Rhone standen keine detaillierten Daten zu Bruchstrukturen zur Verfügung. Daher war eine Auswertung auf die oben beschriebene Art nicht möglich und es wurde für diesen Bereich generalisiert der Mittelwert aller hydrogeologischen Einheiten nördlich der Rhone verwendet.



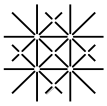
Die Auswertung der detaillierten Daten zu Bruchstrukturen für die Anisotropie und k-Werte nördlich der Rhone beinhaltet folgende Schritte:

1. Selektion der detaillierten Bruchstrukturen für jede durch Hauptbrüche getrennte hydrogeologische Einheit (Abb. 4 & Abb. 7)⁹.
2. Bestimmen der strukturellen Kennwerte separat für die verschiedenen hydrogeologischen Einheiten auf Grundlage der detaillierten Daten zu den Bruchstrukturen (Tab. 4): «Bruch-Schnittpunkte» (Intersections) pro Fläche (zur Beschreibung der normierten Vernetzung), jeweilige Anzahl der Brüche, durchschnittliche Ausrichtung, Bruch-Dichte, durchschnittliche Bruchlänge und «Bruch-Intensität».
3. Berechnung gewichteter k-Werte für jede durch Hauptbrüchen getrennte hydrogeologische Einheit anhand eines Basiswertes (siehe Annahme A) und einer berechneten Gewichtung anhand der Parameter «Bruch-Schnittpunkte» und «Bruch-Intensität» (Tab. 4).
4. Ausrichtung der hydraulischen Anisotropie (k-Werte): Drehung des Parameters «durchschnittliche Ausrichtung» (Vektor) für jede durch Hauptbrüche getrennte hydrogeologische Einheit.

Nach der Auswertung der Bruchstrukturen mithilfe des Analyse-Programms «FraNEP» (Tab. 4) wird der Basiswert der k-Werte (Sonney, 2010b) (Tab. A3), für jede der einzelnen durch Hauptbrüche getrennten hydrogeologischen Einheiten unter folgenden Annahmen berechnet:

- A: Basis-Wert: Literatur-Wert aus Sonney (2010b) (vgl. Tab. A3) für tiefen Gneis: 10^{-8} m s^{-1} .
- B: Ist die «Bruch-Intensität» ($L L^{-2}$) höher als deren Mittelwert, erhöht sich der k-Wert. Ist sie geringer reduziert sich der k-Wert entsprechend dem ersten Teil der Formel 1. Der Quotient der jeweiligen «Bruch-Intensität» mit deren Mittelwert liegt zwischen 0.3 und 3.4 wodurch auch der k-Wert um diesen Faktor reduziert, bzw. erhöht wird.
- C: Die Dichte der normierten «Bruch-Schnittpunkte» (Intersections) erhöht den k-Wert (sofern Intersections vorhanden sind, ansonsten wird der zweite Teil der Formel 1 «eins»). Der Faktor welcher mittels der Intersections berechnet wird reicht von 1 bis 6.6.

⁹ Dieser Ansatz vernachlässigt, dass einige Bruchstrukturen die alpine Hauptüberschiebung und Hauptbrüche queren, so dass diese Information über die hydraulische Konnektivität verloren geht.



Tab. 4: Ergebnis der Analyse der strukturellen Kennwerte separat für die verschiedenen hydrogeologischen Einheiten auf Grundlage der detaillierten Daten zu den Bruchstrukturen. Die Bezeichnung «Rest» steht für Bereiche südlich der Rhone für welche keine detaillierten Daten existieren, hier liegt der Mittelwert der übrigen Bereiche zugrunde.

Hydrogeologische Einheiten durch Hauptbrüche getrennt	Fläche [km ²]	Vernetzung normiert Schnittpunkte [p] /Fläche [p km ⁻²]	Anzahl Brüche [#]	Brüche Ausrichtung [°]	Bruch-Dichte [# m ⁻²]	Durchschnittliche Bruchlänge [m]	Bruch-Intensität [m m ⁻²]
Gesamt	1115	0.232	667	58.6	0.6	2206	1320
1	157	0.548	196	72.4	1.3	1278	1595
2	2	1.293	19	62.2	12.3	1470	18018
3	10	0.200	33	60.9	3.3	3288	10872
4	90	0.089	101	56.1	1.1	1826	2055
5	16	0.252	48	56.1	3.0	2391	7219
6	33	0.399	60	52.1	1.8	1820	3352
7	9	0.438	22	51.4	2.4	1859	4480
8	17	0.583	47	47.2	2.7	2233	6120
9	48	0.643	81	47.3	1.7	2417	4060
10	54	0.763	96	49.8	1.8	3109	5556
11	81	0.405	82	46.8	1.0	3715	3741
12	55	0.324	49	49.9	0.9	5139	4540
13	46	0.129	80	53.9	1.7	5756	9920
14	12	0.000	8	53.1	0.7	2582	1790
15	223	0.004	15	50.2	0.7	7806	526
Rest	262	0.000		54.3			5323

Die Gewichtung des Basiswertes erfolgt entsprechend Gleichung (1):

$$\frac{k_{f_{basis}} * FI}{\emptyset FI} * \frac{In + \emptyset In}{\emptyset In} \quad (1)$$

$k_{f_{basis}}$

= Basiswert für den k-Wert (Literaturwert) [m s⁻¹]

FI

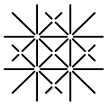
= Bruch-Intensität [L L⁻²]

In

= Bruch-Schnittpunkte / Intersections (normiert) [-]

Die so gewichteten Werte werden anschliessend entsprechend der durchschnittlichen Ausrichtung der Brüche («strike») für jede durch Hauptüberschiebungen getrennte Einheit ausgerichtet. Die dafür nötige Drehung eines Vektors p um einen festen Ursprung um den Winkel α wird (gegen den Uhrzeigersinn) durch die Multiplikation mit der Drehmatrix R_α erreicht:

$$p' = R_\alpha p \quad (2)$$



R_α wirkt auf die beiden Basisvektoren wie folgt:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -\sin \alpha \\ \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (3)$$

Für die Drehmatrix einer Drehung um α ergibt sich damit (Abb. 10):

$$R_\alpha = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (4)$$

Ein Punkt $P = (x,y)$ geht in den Punkt $P' = (x',y')$ über, dessen Ortsvektor $p' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}$ man aus $p = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ durch Anwenden der Formel (2) erhält

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (5)$$

Diese Matrixmultiplikation ergibt:

$$x' = x * \cos \alpha - y * \sin \alpha \quad (6)$$

$$y' = x * \sin \alpha + y * \cos \alpha \quad (7)$$

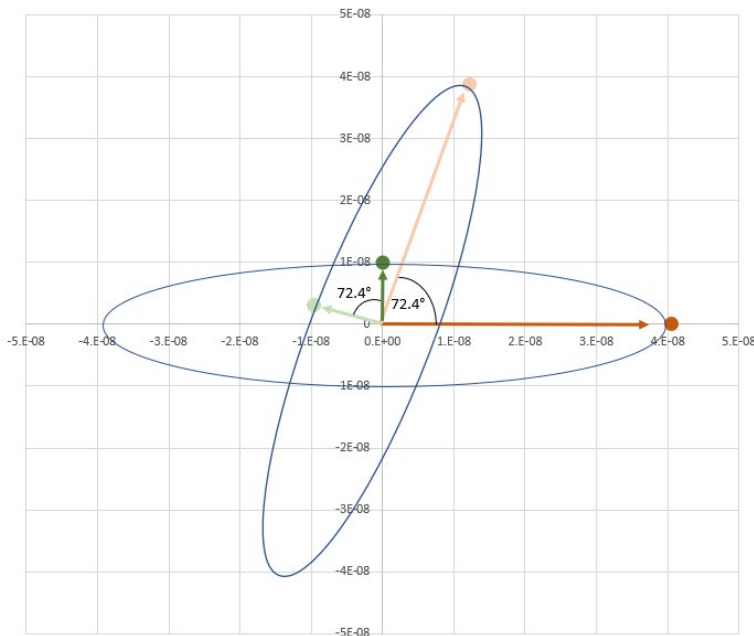
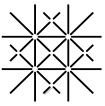


Abb. 10: Schema einer Drehung des Anisotropie-Tensors entsprechend einem Winkel α (im Beispiel 72.4°) bei einer Anisotropie von 0.25 (k^y/k^x) (El-Rayes et al., 2020; Wang and Allen, 1996).



	kxx	kyy	k'xx	k'yy
1	4.1E-08	1.0E-08	1.2E-08	3.1E-09
2	9.0E-07	2.2E-07	4.2E-07	1.0E-07
3	1.5E-07	3.8E-08	7.5E-08	1.9E-08
4	2.2E-08	5.4E-09	1.2E-08	3.0E-09
5	1.1E-07	2.8E-08	6.4E-08	1.6E-08
6	6.9E-08	1.7E-08	4.2E-08	1.1E-08
7	9.8E-08	2.4E-08	6.1E-08	1.5E-08
8	1.6E-07	4.1E-08	1.1E-07	2.8E-08
9	1.2E-07	2.9E-08	7.9E-08	2.0E-08
10	1.8E-07	4.5E-08	1.2E-07	2.9E-08
11	7.8E-08	1.9E-08	5.3E-08	1.3E-08
12	8.2E-08	2.1E-08	5.3E-08	1.3E-08
13	1.2E-07	2.9E-08	6.9E-08	1.7E-08
14	1.4E-08	3.4E-09	8.1E-09	2.0E-09
15	4.1E-09	1.0E-09	2.6E-09	6.5E-10
Rest	4.0E-08	1.0E-08	2.4E-08	5.9E-09

Tab. 5:

Gewichteter k-Wert (k_x und k_y in $m s^{-1}$) der einzelnen hydrogeologischen Einheiten, wobei der Wert k_y aufgrund der Anisotropie von 0.25 entsprechend reduziert ist. Die k-Werte k'_x und k'_y geben die entsprechend der Drehmatrix angepassten Werte an.

Hydrogeologische Einheiten

Die ermittelten gewichteten k-Werte sind keine Messgrößen (Tab. 5). Ziel war ein Transfer der Informationen (Bruch-Intensität und Ausrichtung) aus den bekannten Bruchmuster und Hauptüberschiebungen in eine k-Wert-Verteilung für die verschiedenen strukturellen Einheiten, welche als Basiswert dient. Damit kommt dem Basiswert allerdings auch die grösste Bedeutung zu. In Sonney (2010a) wird eine Bandbreite der k-Werte über sieben Größenordnungen von $1E-6$ bis $1E-12 m s^{-1}$ für tiefen Gneis (Tab. A3) angegeben mit einem für die Berechnungen verwendeten Wert von $1E-8 m s^{-1}$. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde ausgehend von diesem Wert die betrachteten k-Werte jeweils zwei Größenordnungen grösser bzw. kleiner ($1E-6$ bis $1E-10 m s^{-1}$) berücksichtigt.

6.2.2 Tiefenabhängige hydraulische Durchlässigkeit (k-Wert)

Verschiedene Studien haben gezeigt, dass der k-Wert mit der Tiefe für die meisten geologischen Einheiten abnimmt (u.a. Mojarrad et al. (2021)). Da im vorliegenden Untersuchungsperimeter v.a. das Kristallin bis in 10 km Tiefe betrachtet wurde, wurde der k-Wert für die verschiedenen hydrogeologischen Einheiten mit Formel 8 über die gesamte Mächtigkeit des THM angepasst. Die Reduktion des k-Wertes mit der Tiefe wurde mit den berechneten anisotropen Basiswerten für k_x und k_y (Tab. 5), sowie mit den Werten für den vertikalen k-Wert k_z ($k_z = 0.1 k_x$) vorgenommen.

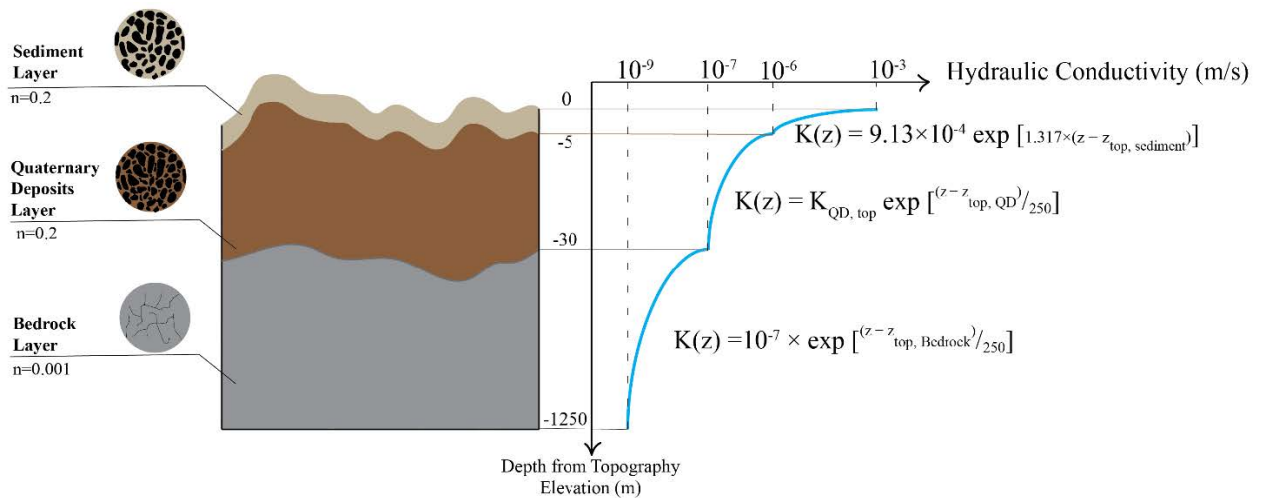


Abb. 11: Tiefenabhängige Abnahme der k-Werte (Mojarrad et al., 2021). Die Schreibweise $K(z)$ bezieht sich hier nicht auf den vertikalen k-Wert, sondern auf die Tiefe.

Entsprechend der exponentiellen Funktion

$$K_i(z) = K_{Bedrock,top} e^{\frac{(z-z_{top,i})}{\delta_i}} \quad (8)$$

- i = verschiedene Layer/Schichten (für die vorliegende Studie wird nur das Festgestein betrachtet)
- $K_{Bedrock,top}$ = k-Wert der Schicht an der oberen Begrenzung [$m s^{-1}$]
- $z_{top,i}$ = Höhe der jeweiligen Schicht (für vorliegende Studie wurden 1'000 m Schritte verwendet) [m]
- δ = skin depth [m]

Die Formel wurde insofern angepasst, dass die Abnahme der k-Werte über die gesamte Modelltiefe von 4'140 bis – 10'000 m um etwa eine Größenordnung abnimmt, indem die «skin depth» entsprechend angepasst wurde. Grund hierfür war, dass mittels der Sensitivitätsanalyse der Effekt einer derartigen exponentiellen Abnahme der k-Werte über die Tiefe simuliert werden kann, ohne dass eine zu hohe Reduktion der k-Werte zu numerischen Konvergenzproblemen führt. Bei einem Basiswert von $k = 1E-08 m s^{-1}$ ergibt sich eine exponentielle Reduktion der k-Werte entsprechend [Abb. 12](#).

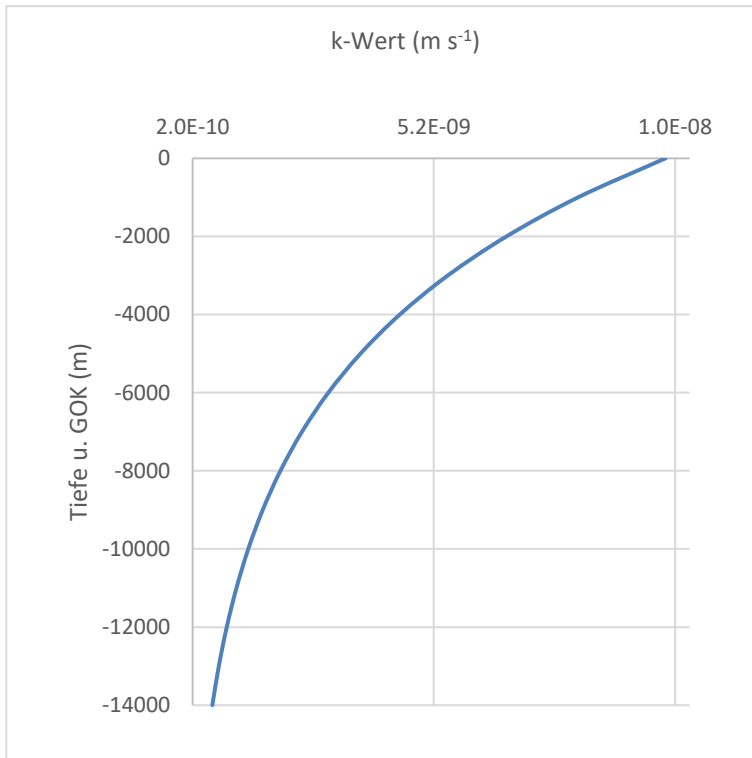


Abb. 12: Tiefenabhängiger k-Wert bei einem Basiswert von $k_x = 1E-08 \text{ m s}^{-1}$.

6.2.3 Tiefenabhängige thermische Leitfähigkeit

Ein Vergleich der Temperaturverläufe, insbesondere in der Bohrung 10-BR02, aber auch Lavey-1, machten auch eine Anpassung der thermischen Leitfähigkeit über die Tiefe notwendig. Da die Temperaturen weder in Bohrung 10-BR02 noch in Lavey-1 linear über die Tiefe verlaufen, wurde hier wie schon bei der tiefenabhängigen k-Wert Verteilung eine exponentielle Zunahme der thermischen Leitfähigkeit über die Tiefe angenommen. Diese Tiefenabhängigkeit wird u.a. in den Studien von Liao et al. (2014) und Jöeleht (2002) beschrieben, in welchen auf einen Zusammenhang der Porosität und der thermischen Leitfähigkeit hingewiesen wird. Im [Kapitel 8.1 «Kalibrierung»](#) und [Abb. 37](#) ist die tiefenabhängige thermische Leitfähigkeit illustriert.

6.3 Hydraulische und thermische Randbedingungen

Nach der Konstruktion der Geometrie für das 3D-THM auf Basis der Strukturen des geologischen 3D-Modells und der Erstellung des Finite-Elemente Netzes umfasste der nächste Schritt die Definition der hydraulischen und thermischen Randbedingungen.

6.3.1 Topografie als Grundwasserspiegel

Basierend auf dem Kontinuums-Ansatz und den Mechanismen gravitativer Grundwasserströmungssysteme im regionalen Massstab und unter der Annahme, dass in diesem der Grundwasserspiegel der Topografie entspricht (Toth, 2009) wird die Topographie, gleichmässig um 20 m abgesenkt, als «Head-Randbedingung» (Dirichlet, Abb. 13) definiert und damit als «Motor» für die regionalen Zirkulationssysteme des Grundwassers festgelegt. Durch diesen Ansatz wird auch in Gebieten, in welchen nur sehr wenige bis keine hydraulischen Messungen vorhanden sind, eine Abschätzung der Grundwasserneubildung, einschliesslich der Berechnung von Wasserbilanzen, ermöglicht. Für die Topografie wurde das DHM 200 der Swisstopo¹⁰ verwendet, dessen Auflösung für die regionale Skale und die Grösse der Meshelemente des 3D-THM ausreichend ist (Tab. 6).

6.3.2 Grundwasserentnahme

Zu der Auswertung der Modellierung gehört auch die Berechnung von Fliesslinien, welche von der Bohrung 10-BR02 (Abb. 15) rückwärts gerechnet den Fliesspfad, Herkunftsort (Ort der Grundwasserneubildung) und die Evaluation von Aufenthaltszeiten umfasst. Dazu wird über die gesamte Bohrlänge von ca. 500 m eine uniforme Entnahme angesetzt (Neumann Randbedingung). Szenarien mit unterschiedlichen Entnahmemengen ($0, 2.5, 5, 20 \text{ l s}^{-1}$) werden in Kapitel 9.3 berechnet und dargestellt.

6.3.3 Thermische Randbedingungen

Als obere thermische Randbedingung wurde der langjährige Mittelwert der Lufttemperatur des Zeitraums 1991 bis 2000 von MeteoSchweiz¹¹ definiert (Dirichlet Randbedingung); damit ist der Wärmeaustausch über die Topografie höhenabhängig berücksichtigt.

Der Wärmeeintrag in das Modell über den unteren Modellrand (basaler Wärmestrom) wird mit 0.07 W m^{-2} angenommen und ist somit etwas geringer als Sonney (2010a) mit 0.08 bis 0.09 W m^{-2} für die Region Lavey-les-Bains angibt. Der gewählte Wert basiert auf einer schweizweit vorgenommenen Zusammenstellung von

¹⁰ <https://www.swisstopo.admin.ch/de/hoehenmodell-dhm25-zoom>

¹¹ Räumliche Klimaanalysen, Mean yearly mean temperature (norm, 1991 – 2020): <https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klima-der-schweiz/raeumliche-klimaanalysen.html>

Temperaturgradienten in die Tiefe (Epting et al. (2024); Abb. A6). Der Wert für die Randbedingung des «heat-flux» (Neumann Randbedingung) wird konstant über den gesamten Modellboden integriert.

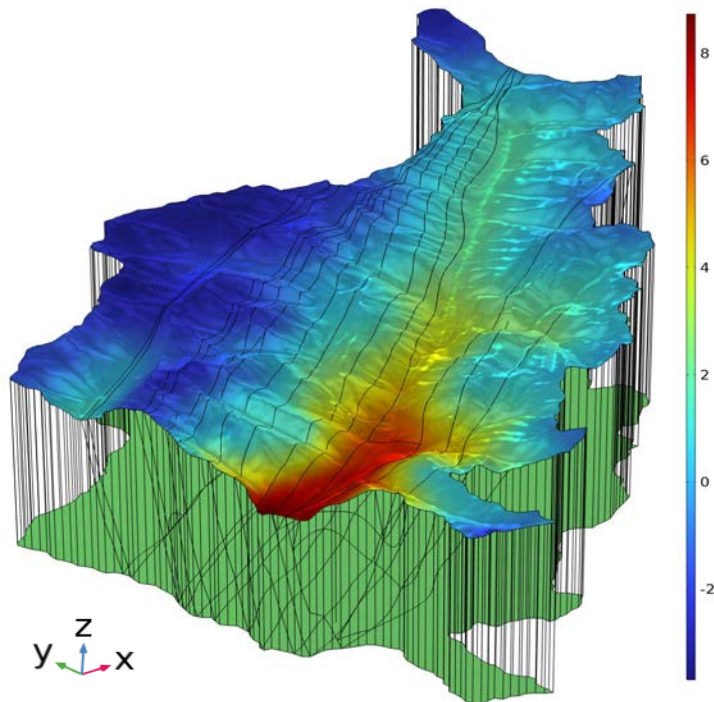


Abb. 13: Topografie als hydraulische Head-Randbedingung, Höhenangabe in m ü.M.

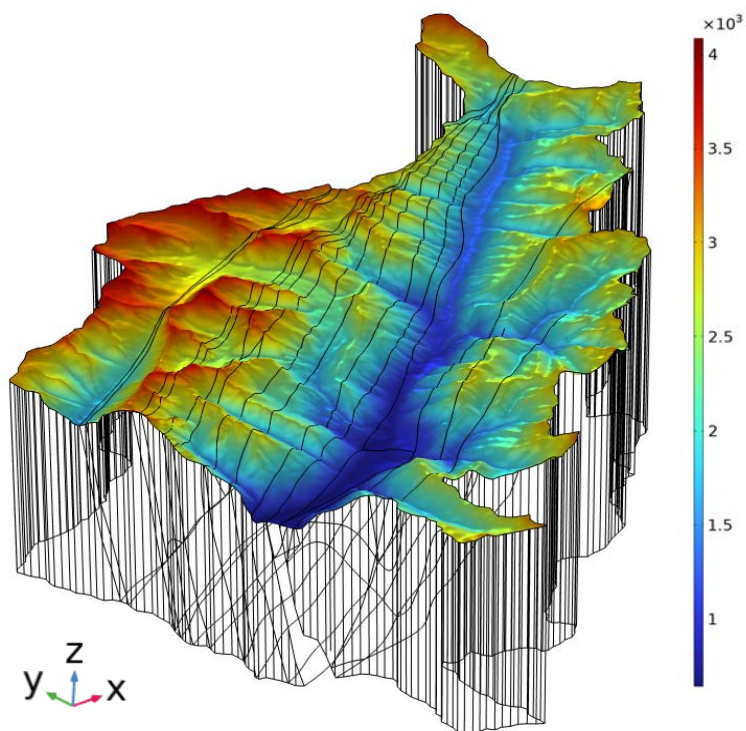
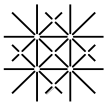


Abb. 14: Thermische Randbedingungen. Obere Randbedingung: Mittelwert der Lufttemperatur (1991 bis 2000) in °C, untere Randbedingung: basaler Wärmestrom (0.07 W m^{-2}).



7 Sensitivitätsanalyse

Eine der Stärken einer THM ist die Möglichkeit, den Einfluss einzelner Parameter auf das hydraulische Fließfeld und thermische Effekte zu prüfen und zu bewerten. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse bilden das Ausgangs-Parameterset für die Kalibrierung ([Kapitel 8.1](#)) mit welcher das «best Fit» Modell bestimmt wird. Dafür werden die gemessenen Temperaturen in der Bohrung 10-BR02 und entlang des Simplontunnels, sowie Aufenthaltszeiten ([Kapitel 7.1](#)) des Grundwassers zur manuellen Kalibrierung auf Basis der Sensitivitätsanalyse herangezogen ([Tab. 6](#)). Um den jeweiligen Einfluss der Randbedingungen und Parameter möglichst gut definieren zu können, beginnt die Sensitivitätsanalyse mit einem möglichst einfachem Modellaufbau (keine Bruchstrukturen und keine Anisotropie ([Kapitel 6.2](#)), nur hydraulische und thermische Randbedingung ([Kapitel 6.3](#))) und wird dann stufenweise komplexer.

Die Szenarien A1 berücksichtigen eine einheitliche Verteilung der k-Werte, Porosität und der Parameter thermische Wärmekapazität und thermische Leitfähigkeit für das gesamte 3D-THM (Szenarien A1, S1 bis S4).

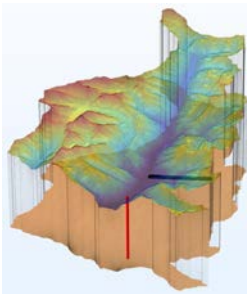
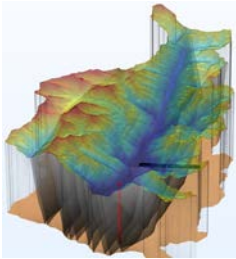
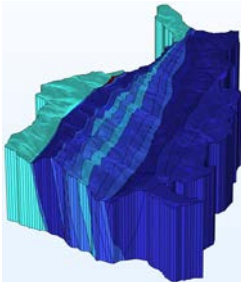
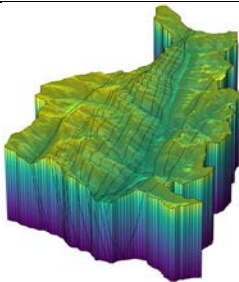
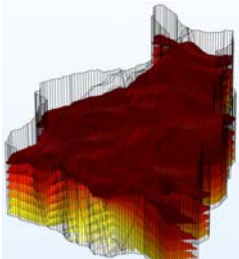
Die alpinen Hauptüberschiebungen, unter Berücksichtigung der Apertur¹² und der k-Werte werden in Szenario A2 betrachtet (Szenarien A2, S5 & 6).

Mit dem Szenario A3 (S7) wird die Anisotropie mit unterschiedlichen Ausprägungen der k-Werte betrachtet. In [Kapitel 6.3](#) wurde beschrieben wie anhand der umfangreichen Daten der Bruchstrukturen die Anisotropie, sowie die Bandbreite der k-Werte bestimmt wurden.

Wie sich die vertikale Durchlässigkeit mit der Tiefe verändert, ist ebenfalls eine unbekannte hydraulische Grösse welche in [Kapitel 6](#) diskutiert wurde. Die Sensitivität der vertikalen Durchlässigkeit wird mit Szenario A4 (S8) berechnet.

¹² Öffnungsweite eines Bruches

Tab. 6: Übersicht der hydraulischen und thermischen Parameter sowie Randbedingungen für die verschiedenen Szenarien der Sensitivitätsanalyse.

Szenario	Graphische Übersicht	Randbedingungen	Sensitivitätsanalyse
A1		<p>Hydraulik: Topographie (DHM200 -20 m) als Head (Dirichlet)</p> <p>k-Wert: k_{xy}: $1E-08$ $m\ s^{-1}$, k_z: $1E-9$ $m\ s^{-1}$</p> <p>Porosität: n: 0.05</p> <p>Heat Flux über Modellboden (Neumann): $0.07\ W\ m^{-2}$</p> <p>Wärmekapazität: $800\ J\ kg^{-1}\ K^{-1}$</p> <p>Thermische Leitfähigkeit: $2.5\ W/m^{-1}\ K^{-1}$</p>	<p>S1: k-Wert: k_{xy}: $1E-06$ bis $1E-10\ m\ s^{-1}$, k_z: $1E-07$ bis $1E-11\ m\ s^{-1}$</p> <p>S2: Porosität: n: 0.025 bis 0.1</p> <p>S3: Wärmekapazität: 400 bis $1600\ J\ kg^{-1}\ K^{-1}$</p> <p>S4: Thermische Leitfähigkeit: 1 bis $5.0\ W\ m^{-1}\ K^{-1}$</p>
A2		<p>Entsprechend A1 Zusätzlich: Alpine Hauptüberschiebungen</p> <p>Apertur: 0.1 m</p> <p>Porosität: n: 0.05</p> <p>k-Wert: $1E-05\ m\ s^{-1}$</p>	<p>S5: Apertur: 0.0 bis 0.4 m</p> <p>S6: k-Wert: $1E-03$ bis $1E-07\ m\ s^{-1}$</p>
A3		<p>Entsprechend A2 Zusätzlich: Anisotropie</p> <p>Berechnete Anisotropie für jede durch Überschiebungen getrennte hydrogeologische Einheit (siehe Berechnung Anisotropie Kapitel 6.2.1)</p> <p>Bandbreite Anisotropie (Basiswert $1E-08\ m\ s^{-1}$): K_x: $2.60E-09$ bis $4.18E-07\ m\ s^{-1}$ K_y: $6.50E-10$ bis $1.05E-07\ m\ s^{-1}$</p>	<p>S7: k-Wert: Basiswert k_x und k_y von $1E-06$ bis $1E-10\ m\ s^{-1}$</p>
A4		<p>Entsprechend A3 Zusätzlich: tiefenabhängiger k-Wert Berechnete tiefenabhängige k-Werte (siehe Kapitel 6.2.2)</p> <p>Bandbreite tiefenabhängiger k-Wert siehe Abb. 32</p>	<p>S8: Tiefenabhängiger k-Wert: Basiswert k_x und k_y von $1E-06$ bis $1E-10\ m\ s^{-1}$</p>
«Best Fit»		<p>«Best Fit» Modell entsprechend gemessener Temperaturverteilung in die Tiefe (Bohrung 10-BR2) und entlang des Simplontunnels sowie der Aufenthaltszeiten des Tiefengrundwassers</p>	<p>Darstellung der Fließlinien (ausgehend von der Topografie, sowie rückwärts berechnet von der Bohrung 10BR2); Darstellung der Grundwasserflusses (Darcy flux); Auswirkung verschiedener Entnahmeraten; Gegenseitige Beeinflussung zweier Bohrungen; Berechnung der Temperaturverteilung; Berechnung des thermischen Potentials; Berechnung der thermischen Peclet-Zahl</p>

7.1 Auswertung Sensitivitätsanalyse

Für Untersuchungen von tiefen und geothermisch nutzbaren Aquiferen liegen in den meisten Fällen nur sehr wenig belastbare Daten vor, welche zum Vergleich mit den berechneten Daten eines THM herangezogen werden können. Im vorliegenden Fall konnten drei unterschiedliche Datenquellen für die Sensitivitätsanalyse genutzt werden, welche darauffolgend auch der (manuellen) Kalibrierung des Modells (Kapitel 8) dienen:

Bohrung 10-BR02 (Abb. 15): Der in die Tiefe gemessene Temperaturverlauf in Bohrung 10-BR02 von Solexperts (2010) wurde digitalisiert (Abb. A4) und für einen Vergleich mit den berechneten Werten herangezogen. Des Weiteren wird eine kontinuierliche Grundwasserentnahme von 20 l s^{-1} berücksichtigt. Dies dient dazu, mit Hilfe von rückwärts berechneten Fließlinien sowohl den Zuströmbereich zur simulierten Grundwasserförderung als auch die Aufenthaltszeiten im Untergrund berechnen zu können. Die Temperatur entsprechend der Auswertung von Solexperts steigt in 500 m Tiefe bis auf ca. $60 \text{ }^\circ\text{C}$ an. Die Datenbank BDF Geotherm (Sonney and Vuataz (2007); mit Aktualisierung durch DUW-CREALP, 2024) hingegen enthält mehrere im Jahr 2010 gemessenen Temperaturen, welche um ca. $18 \text{ }^\circ\text{C}$ geringer sind ($41.8 \text{ }^\circ\text{C}$ in 499 m Tiefe). Diese Diskrepanz macht eine Kalibrierung anhand der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse deutlich schwieriger. Da aufgrund der von Solexperts (2010) in der Bohrung 10-BR02 gemessenen Temperaturen ein Tiefenprofil mit berechneten Temperaturen erstellt werden konnte, wurde dieses für die Sensitivitätsanalyse herangezogen.

Simplontunnel: Von der SBB AG¹³ wurde auf Anfrage der DUW der exakte Streckenverlauf des Tunnelbauwerkes inklusive z-Werten (m ü.M.) zur Verfügung gestellt. Vom Streckenverlauf liegen etwa 6 km innerhalb des Modellperimeters (Abb. 15). Temperaturdaten entlang der Tunnellinie konnten aus Badino (2006) digitalisiert werden (Abb. A3).

Aufenthaltszeiten des Grundwassers: Für das Gebiet Grimsel und für Lavey-les Bains wurden von Diamond et al. (2018), Egli et al. (2018) und Wanner et al. (2019)), respektive von Sonney (2010a) Aufenthaltszeiten des Tiefengrundwassers von $> 30 \text{ ka}$ angegeben. Analysen von Tritium bzw. ^{14}C ergaben für Lavey-les Bains Werte von $> 8 \text{ ka}$. Allerdings wurde hier eine Mischung aus Tiefengrundwasser und ca. 50 bis 60 % jüngerem Grundwasser datiert, sodass sich die Aufenthaltszeiten für den Tiefengrundwasseranteil in ähnlichem Bereich wie die übrigen, rapportierten Tiefengrundwasser-Aufenthaltszeiten befinden dürfte.

¹³ SBB AG Netzdesign, Anlagen und Technologie, Kunstbauten; Stephanie Halbeisen, GIS- und Datenbank-Spezialistin.

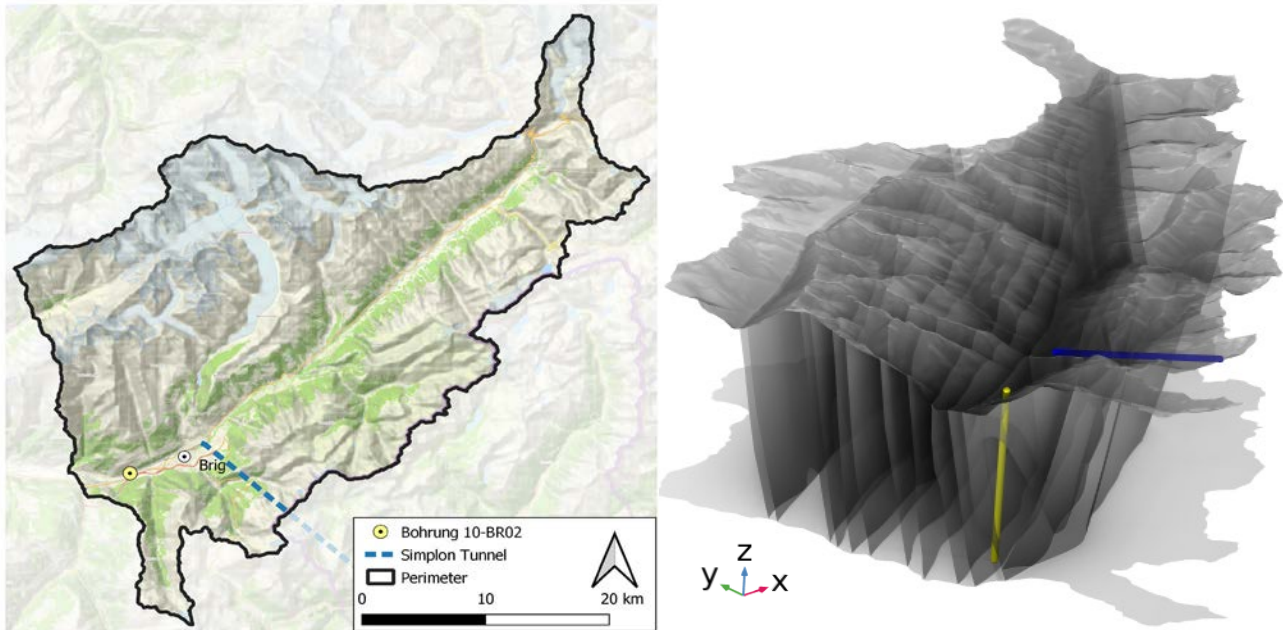


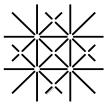
Abb. 15: Bohrung 10-BR02 (gelb) und Simplontunnel (blau) im Modellperimeter. Links: Aufsicht. Rechts: Bruchstrukturen des 3D-THM; die Bohrung wurde über die gesamte Modelltiefe verlängert um entsprechend Fließlinien berechnen zu können.

Güte-Kennwerte (RMSE, NRMSE; & NSE)

Für die Datenquellen (1) und (2) werden die berechneten Temperaturen als Ergebnis der Sensitivitätsanalyse graphisch im Vergleich zu den Messdaten der gemessenen Temperaturen dargestellt, zudem werden die absoluten Abweichungen jeweils von den zugrunde liegenden Basiswerten (es wurden jeweils zwei Szenarien mit kleineren und höheren Werten als der Basiswert berechnet) mittels Box-Plot Diagramm erfasst. Um die Relation zweier Datenreihen (gemessen, berechnet) beurteilen zu können, wird der Root Mean Square Error (RMSE), sowie der Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) und die Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) (Nash, 1970) berechnet.

RMSE:

Der RMSE ist eine Masszahl zur Beurteilung der Prognosegüte. Er gibt an, wie gut eine Funktionskurve an vorliegende Messdaten angepasst ist, beziehungsweise wie stark die berechneten Werte im Durchschnitt von den gemessenen Daten abweichen. Berechnet wird der RMSE aus der Quadratwurzel der durchschnittlichen Abweichung der berechneten von den gemessenen Werten. Je grösser RMSE ist, desto schlechter stimmen die berechneten Modellwerte mit den gemessenen Werten überein. Ein Wert von Null indiziert



eine perfekte Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Daten. Der RMSE erlaubt einen summarischen Vergleich zur Übereinstimmung der Kurvenverläufe, nicht jedoch eine quantitative Aussage über die Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (9)$$

y_1, y_2, \dots, y_n gemessene Werte [°C]

$\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n$ berechnete Werte [°C]

n ist die Anzahl der Beobachtungen [#]

NRMSE:

Der NRMSE ist eine Erweiterung von RMSE und wird durch Normalisierung von RMSE berechnet, wofür der RMSE durch den Bereich der Differenz von Minimal- und Maximalwert geteilt wird.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{y_{max} - y_{min}} \quad (10)$$

NSE:

Im Gegensatz zum RMSE kann mit der NSE eine quantitative Bewertung der berechneten Modellwerte der Temperaturen durchgeführt werden. Die NSE gibt wider, wie gut die berechneten Werte die gemessenen Werte abbilden. Der Wertebereich der NSE beträgt:

$$-\infty < NSE < 1 \quad (11)$$

Bei NSE = 1 werden die Messwerte exakt durch die berechneten Werte abgebildet. Für negative NSE werden die Messwerte besser durch ihren Mittelwert als durch die Simulationswerte abgebildet. Die NSE lässt sich wie folgt berechnen:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (t_M^t - t_R^t)^2}{\sum_{t=1}^n (t_M^t - \bar{t}_M)^2} \quad (12)$$

mit t_M [°C] der gemessenen und t_R [°C] der simulierten Temperatur.

7.2 Resultate Sensitivitätsanalyse

Zur Bewertung und zum Vergleich der jeweiligen Parameterberechnungen wurden die drei in [Kapitel 7.1](#) aufgeführten unterschiedlichen Kontrolldatensätze einbezogen: (1) Das Temperaturprofil der Bohrung 10-BR02; (2) Die Temperaturdaten des Simplontunnels vom Tunnelportal bis zum Rand des Modellperimeters (ca. 6 km); und (3) die Aufenthaltszeiten des Tiefengrundwassers. Zudem werden die Zuströmbereiche grafisch dargestellt (vgl. [Abb. 18](#), [Abb. 25](#), [Abb. 28](#), [Abb. 31](#) und [Abb. 35](#)), welche einerseits die horizontale Ausdehnung der Zuströmbereiche zeigen, aber auch die Tiefe im Untergrund welche durchströmt wird. Die Variabilität für die Bohrung 10-BR02 und den Simplontunnel wird als Temperaturabweichung in Relation zum Basiswert dargestellt.

7.2.1 Szenario A1 – S1: Hydraulische Durchlässigkeit (k-Werte)

Für das erste Szenario wurden alle strukturellen Einheiten hinsichtlich der k-Werte einheitlich und ohne die alpinen Hauptüberschiebungen, Anisotropie oder tiefenabhängige k-Werte betrachtet. Die Sensitivität der k-Werte wurde mit einem Bereich von $1\text{E-}06$ bis $1\text{E-}10 \text{ m s}^{-1}$ für k_x und k_y , sowie einem um eine Grössenordnung geringeren vertikalen k-Wert (k_z) berechnet. Als Randbedingung wird das hydraulische Potenzial entsprechend der Topografie (minus 20 m) und ein Wärmefluss über den Modellboden aufgesetzt ([Tab. A4](#)).

Auswertung Temperaturverlauf Bohrung 10-BR02 und Simplontunnel

Die beste Übereinstimmung zwischen der in diesem Szenario berechneten Temperaturverläufen und dem gemessenen Temperaturverlauf in der Bohrung 10-BR2 ist für einen k-Wert von $1\text{E-}07 \text{ m s}^{-1}$ zu beobachten, während die Temperaturverläufe für grössere und kleinere Durchlässigkeiten deutlich voneinander abweichen ([Abb. 16](#)).

Dasselbe Verhalten zeigt sich beim Vergleich zwischen dem berechneten und dem gemessenen Temperaturverlauf entlang des Simplontunnels. Hohe k-Werte ($1\text{E-}06$ und $1\text{E-}07 \text{ m s}^{-1}$) führen zu einem schnellen Anstieg sowie einem anschliessenden starken Absinken der Temperatur. Bei Reduzierung der k-Werte ($1\text{E-}08$ und $1\text{E-}09 \text{ m s}^{-1}$) liegt der berechnete hingegen deutlich näher am gemessenen Temperaturverlauf. Eine weitere Verringerung der k-Werte auf $1\text{E-}10 \text{ m s}^{-1}$ ist nicht mehr sensitiv ([Abb. 17](#)).

Die Güte-Kennwerte stellen die Abweichung vom Basiswert dar ([Tab. 7](#)). Hier zeigen sich sowohl bei den Werten für die Bohrung 10-BR02s als auch für den Simplontunnel bei tiefen k-Werten

($1E-09$ und $1E-10$ $m\ s^{-1}$) nur geringe Abweichungen (NSE Simplontunnel: 0.99 und 0.99; NSE 10-BR02: 0.81 und 0.78; (Tab. 7)).

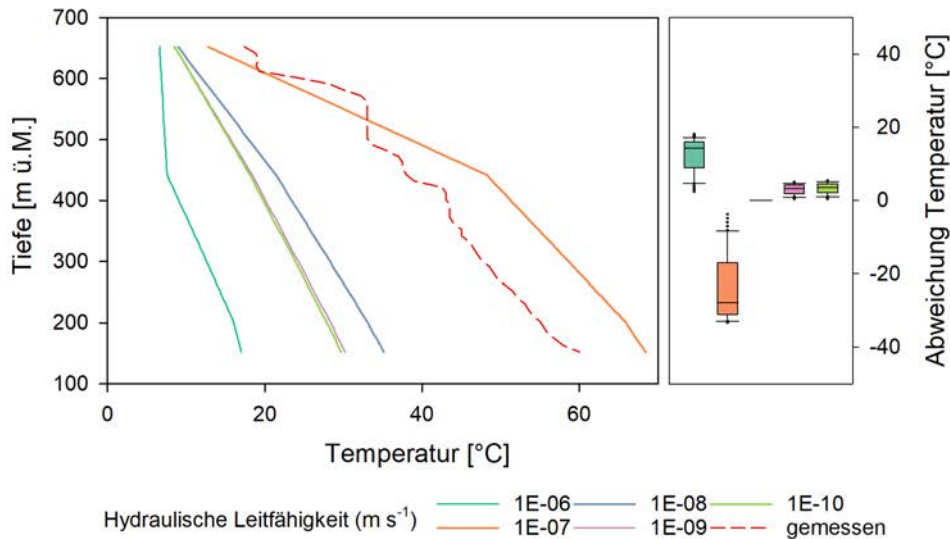


Abb. 16: Szenario A1 – S1: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur in der Bohrung 10-BR02.

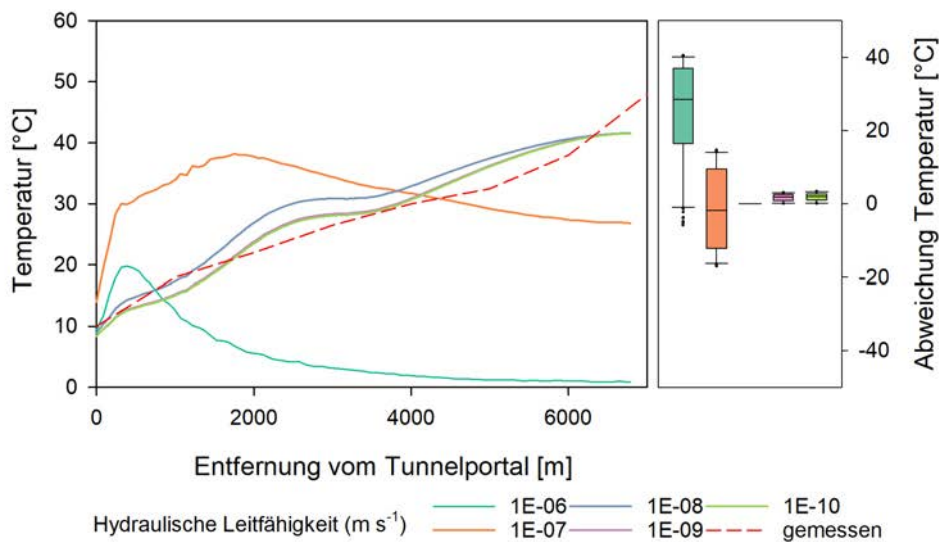


Abb. 17: Szenario A1 – S1: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur entlang des Simplontunnels.

Tab. 7: Szenario A1 – S1: Berechnete Güte-Kennwerte (grau hinterlegt: Basiswert).

k-Wert [$m\ s^{-1}$]		1E-06	1E-07	1E-08	1E-09	1E-10
Bohrung 10-BR02	NSE	-1.97	-9.95	1	0.81	0.78
	RMSE	35.90	68.91	0	9	9.85
	NMRSE	3.44	1.24	0	0.42	0.47
Simplontunnel	NSE	-0.17	-0.83	1	0.99	0.99
	RMSE	104.7	39.93	0	7.08	7.82
	NMRSE	5.55	1.65	0	0.21	0.24

Auswertung Aufenthaltszeiten Bohrung 10-BR02

Ausgehend von der Bohrung 10-BR02 wurden Fließlinien berechnet um auf entsprechende Gebiete der Grundwasserneubildung und -aufenthaltszeiten schliessen zu können. Bei sehr hohen k-Werten von $1\text{E-}06 \text{ m s}^{-1}$ können mit dieser Methode Aufenthaltszeiten von knapp 2 ka für das bei der Bohrung ankommende Tiefengrundwasser berechnet werden, was im Vergleich mit den aus vorausgehenden Untersuchungen abgeleiteten Aufenthaltszeiten von etwa 30 ka (Kapitel 7.1) deutlich zu gering ist. Bei einer Reduktion der k-Werte steigen die Aufenthaltszeiten (bis $1\text{E-}08 \text{ m s}^{-1}$) schnell an, um danach bei weiterer Reduktion der k-Werte wieder zu sinken. Diese Reduktion der Aufenthaltszeiten geht einher mit einer deutlichen Änderung der Gebiete für die Grundwasserneubildung (Abb. 18). Während die grösste räumliche Ausdehnung der Fließlinien bei einem k-Wert von $1\text{E-}08 \text{ m s}^{-1}$ zu beobachten ist, wird der Zuströmbereich bei kleineren k-Werten ($1\text{E-}09 \text{ m s}^{-1}$ und $1\text{E-}10 \text{ m s}^{-1}$) unrealistisch klein (Abb. 18). Der Bereich der Grundwasserneubildung liegt für k-Werte von $1\text{E-}06$ bis $1\text{E-}08 \text{ m s}^{-1}$ hauptsächlich nördlich der Bohrung 10-BR02 auf Höhe des Schinorns.

k-Werte [m s^{-1}]	Aufenthaltszeit [a]
1.0E-06	1'734
1.0E-07	13'804
1.0E-08	60'875
1.0E-09	43'303
1.0E-10	6'323

Tab. 8: Szenario A1 – S1: Berechnete Aufenthaltszeiten des Tiefengrundwassers.

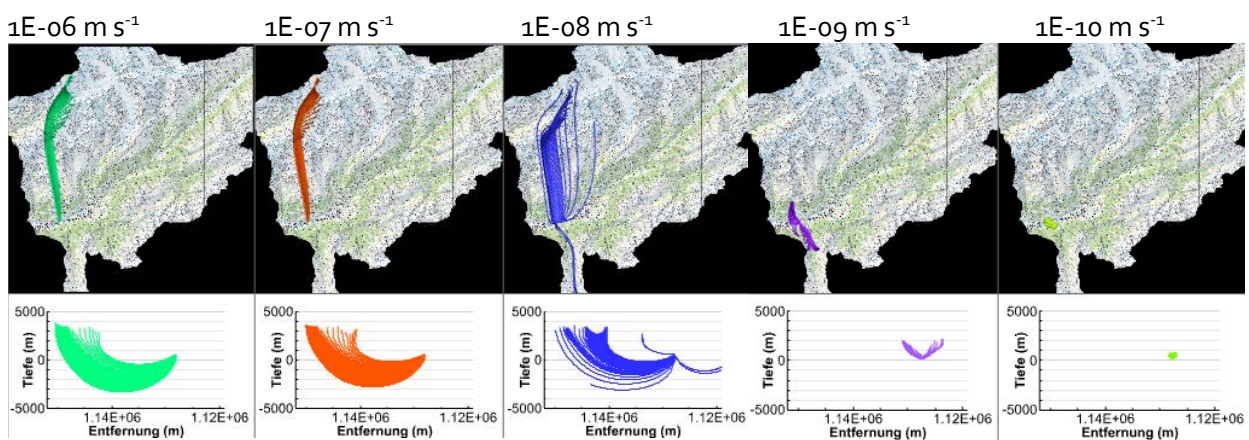


Abb. 18: Szenario A1 – S1: Horizontale (oben) und vertikale (unten) Ausdehnung der Fließlinien.

Fazit Szenario A1 – S1

Anhand der Ergebnisse für den Verlauf der Temperaturen kann ein «best Fit» für k_{xy} -Werte zwischen $1E-07$ bis $1E-08$ $m\ s^{-1}$ ermittelt werden, welcher auch durch die berechneten Aufenthaltszeiten bestätigt wird.

7.2.2 Szenario A1 – S2: Porosität

Die Porosität hat vor allem einen Einfluss auf die Aufenthaltszeiten (Tab. 9). Alle sonstigen Parameter für dieses Szenario entsprechen Szenario A1 – S1 (Tab. A4).

Auswertung Aufenthaltszeiten Bohrung 10-BR02

Während in Sonney (2010a) eine Porosität von kleiner 0.1 (für Aiguilles Rouges Gneis) angenommen wird, ist diese bei Wanner et al. (2019) anhand der «total fracture apertures in borehole» berechnet worden und es wird von einer Porosität von 0.04 ausgegangen. Egli et al. (2018) analysierte mittels «he-pycnometry» die Porosität und ermittelte für Gneis eine Bandbreite der Porosität von 0.006 bis 0.049 mit einem Mittelwert von 0.026.

Porosität [-]	Aufenthaltszeit [a]
0.01	9'159
0.025	22'897
0.05	45'793
0.075	68'690
0.1	91'586

Tab. 9: Szenario A1 – S2: Berechnete Aufenthaltszeiten des Tiefengrundwassers.

Fazit Szenario A1 – S2

Bei einer aus vorausgehenden Untersuchungen abgeleiteten Aufenthaltszeiten von ca. 30 ka würde der «best Fit» Wert der Porosität zwischen 0.025 und 0.05 liegen. In diesem Bereich liegen ebenfalls die von Egli et al. (2018) ermittelten Werte (Mittelwert 0.026) bzw. 0.04 von Wanner et al. (2019).

7.2.3 Szenario A1 – S3: Spezifische Wärmekapazität

Wie für Szenario A1 – S1 wurden für alle hydrogeologischen Einheiten die k-Werte einheitlich und ohne die alpinen Hauptüberschiebungen, Anisotropie oder Tiefenabhängigkeit der k-Werte betrachtet und auch die sonstigen Parameter sind identisch mit Szenario A1 – S1 (Tab. A4). Betrachtet wurde ausschliesslich die spezifische Wärmekapazität, welche homogen über das gesamte Modell berücksichtigt wurde.

Auswertung Temperaturverlauf Bohrung 10-BR02 und Simplontunnel

Es fällt sowohl beim Temperaturverlauf in der Bohrung 10-BR02 (Abb. 19) als auch entlang des Simplontunnels (Abb. 20) auf, dass die Verläufe der verschiedenen berechneten Temperaturen keine grossen Unterschiede aufweisen und damit der Parameter spezifische Wärmekapazität nur sehr gering sensitiv ist.

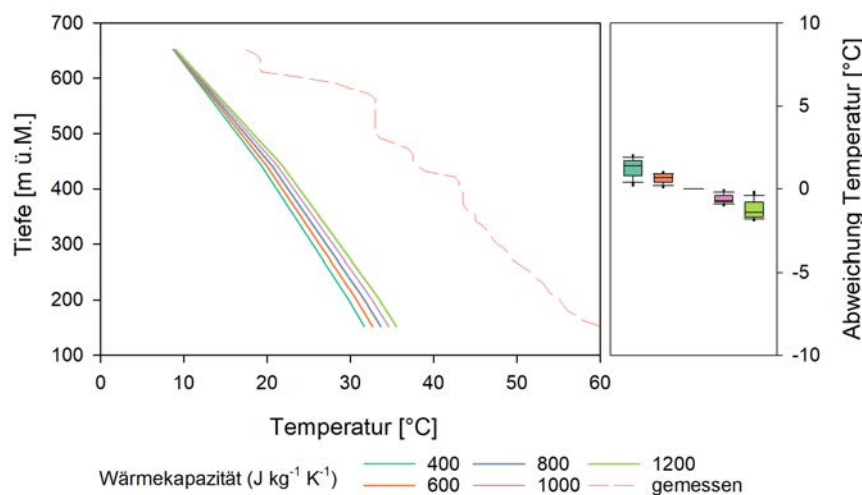


Abb. 19: Szenario A1 – S3: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur in der Bohrung 10-BR02.

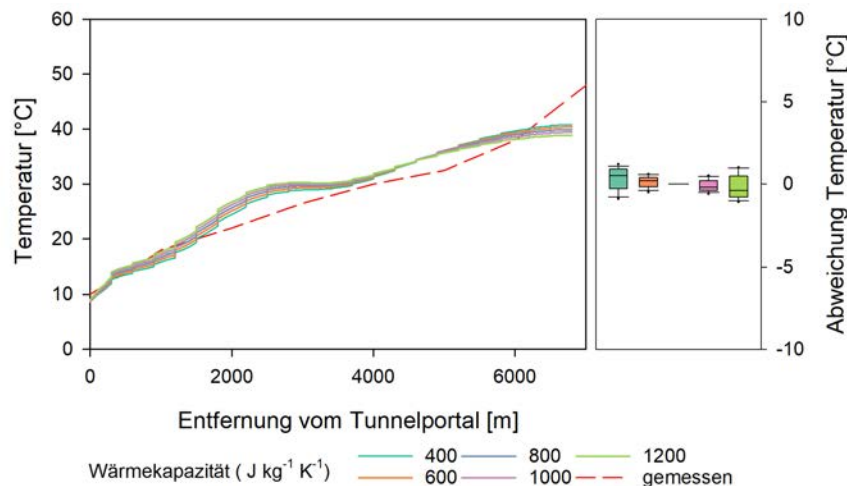


Abb. 20: Szenario A1 – S3: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur entlang des Simplontunnels.

Bestenfalls kann in der Bohrung 10-BR02 ein Aufspreizen der Temperaturverläufe, abhängig von der Tiefe mit einer maximalen Differenz von ca. 6 °C dahingehend interpretiert werden, dass bei geringen spezifischen Wärmekapazitäten der Temperaturverlauf steiler und bei höheren Werten entsprechend flacher wird. Die Kennwerte RMSE, NRMSE und NSE (Tab. 10) zeigen ebenfalls, dass sowohl für geringere als auch für höhere Werte als der Basiswert nahezu exakt in gleichen Abweichungen resultieren. Mit dem nur sehr gering sensitiven Parameter spezifische Wärmekapazität ist es daher nicht, oder nur in sehr geringem Umfang möglich, einen besseren Fit zu erhalten.

Tab. 10: Szenario A1 – S3: Berechnete Güte-Kennwerte (grau hinterlegt: Basiswert).

Spezifische Wärmekapazität [J kg ⁻¹ K ⁻¹]		400	600	800	1'000	1'200
Bohrung 10-BR02	NSE	0.97	0.99	1	0.99	0.97
	RMSE	3.66	1.82	0	1.8	3.57
	NMRSE	0.16	0.08	0	0.07	0.13
Simplontunnel	NSE	0.99	1	1	1	0.99
	RMSE	2.69	1.34	0	1.33	2.64
	NMRSE	0.08	0.04	0	0.04	0.09

Aufenthaltszeiten werden von der Wärmekapazität nicht beeinflusst und daher nicht dargestellt.

Fazit Szenario A1 – S3

Die spezifische Wärmekapazität ist vergleichsweise gering sensitiv, der Basiswert von 800 J kg⁻¹ K⁻¹ wird daher weiterhin für das «best Fit» Model verwendet.

7.2.4 Szenario A1 - S4: Thermische Leitfähigkeit

Wie für Szenario A1 – S1 wurden für alle hydrogeologischen Einheiten die k-Werte einheitlich und ohne die alpinen Hauptüberschiebungen, Anisotropie oder Tiefenabhängigkeit der k-Werte betrachtet und auch die sonstigen Parameter sind identisch mit Szenario A1 – S1 (Tab. A4). Betrachtet wurde ausschliesslich die thermische Leitfähigkeit, welche homogen über das gesamte Modell berücksichtigt wurde.

Auswertung Temperaturverlauf Bohrung 10-BR02 und Simplontunnel

Im Unterschied zur spezifischen Wärmekapazität zeigt die thermische Leitfähigkeit eine grosse Bandbreite der berechneten Temperaturverläufe. Insbesondere bei einer Verdoppelung der thermischen Leitfähigkeit von 1 auf 2 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ zeigt sich ein grosser Sprung bei den Abweichungen vom Basiswert (3 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$). Für die Temperaturverläufe entlang der Bohrung 10-BR02 (Abb. 21) wird der «best Fit», für die thermische Leitfähigkeit, zwischen 1 und 2 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ erreicht. Beim Vergleich mit den Temperaturen entlang des Simplontunnels (Abb. 22) hingegen wird bereits mit dem Basiswert eine gute Übereinstimmung berechneter und gemessener Temperaturen erreicht.

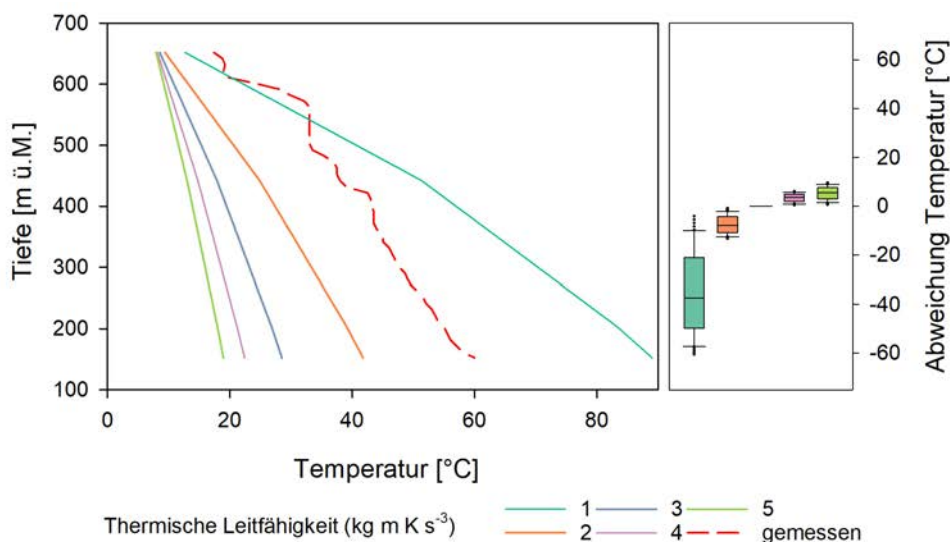


Abb. 21: Szenario A1 – S4: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur in der Bohrung 10-BR02.

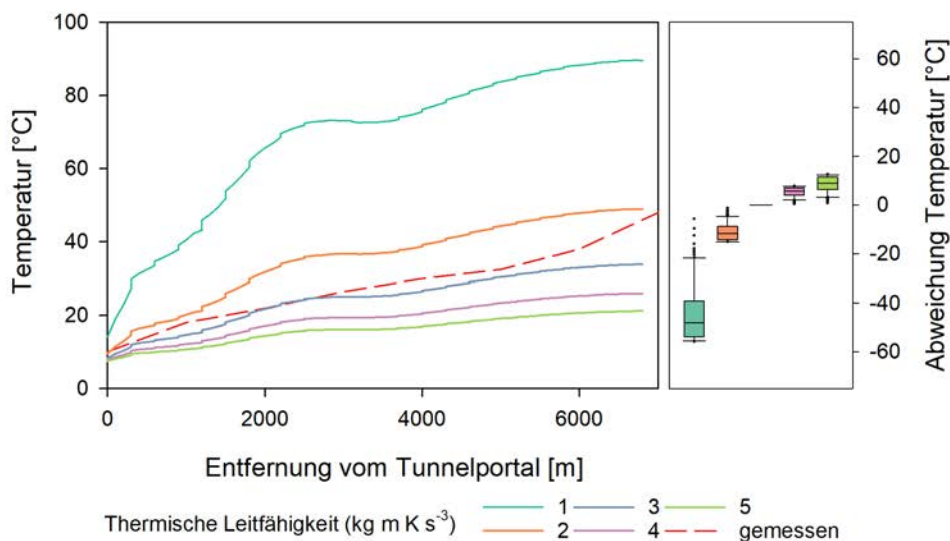


Abb. 22: Szenario A1 – S4: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur entlang des Simplontunnels.

Auch anhand der Güte-Kennwerte wird bestätigt, dass thermische Leitfähigkeiten von 1 bzw. 5 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ deutlich schlechtere Werte aufweisen als thermische Leitfähigkeiten von 2 bzw. 4 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$.

Tab. 11: Szenario A1 – S4: Berechnete Güte-Kennwerte (grau hinterlegt: Basiswert).

Thermische Leitfähigkeit [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]		1	2	3	4	5
Bohrung 10-BR02	NSE	-43.03	-1.03	1	0.58	-0.03
	RMSE	105.37	22.62	0	10.31	16.15
	NMRSE	1.38	0.7	0	0.72	1.47
Simplontunnel	NSE	-40.51	-1.65	1	0.34	-0.68
	RMSE	166.54	42.05	0	20.98	33.51
	NMRSE	2.2	1.07	0	1.16	2.45

Aufenthaltszeiten werden von der thermischen Leitfähigkeit nicht beeinflusst und werden daher nicht dargestellt.

Fazit Szenario A1 – S4

Die thermische Leitfähigkeit ist vergleichsweise sensitiv, weshalb grosse Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen für verschiedene Werte der thermischen Leitfähigkeit resultieren. Als «best Fit» eignet sich am ehesten ein Wert von 2 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$, da damit sowohl eine möglichst gute Übereinstimmung der Temperaturverläufe für die Bohrung 10-BR02 g, als auch für den Simplontunnel gefunden wird.

7.2.5 Szenario A2 – S5: Apertur

Für die Berechnungen des Einflusses der Apertur wurden alle hydrogeologischen Einheiten k-Werte einheitlich und ohne Anisotropie oder Tiefenabhängigkeit der betrachtet. Die alpinen Hauptüberschiebungen sind hingegen aktiviert und mit Porosität, hydraulischer Durchlässigkeit und Apertur parametrisiert (Tab. A4). Die Apertur wurde mit einem Basiswert von 0.2 m integriert und ein Bereich von 0.0 bis 0.4 m für die Sensitivitätsanalyse betrachtet (Tab. 6).

Auswertung Temperaturverlauf Bohrung 10-BR02 und Simplontunnel

Wie bei Szenario A1 – S3 «spezifische Wärmekapazität» ist so gut wie kein Einfluss auf den Temperaturverlauf entlang der Bohrung 10-BR02 und des Simplontunnels festzustellen. Weder die berechneten und gemessenen Temperaturverläufe (Abb. 23 & Abb. 24) noch die Güte-Kennwerte RMSE, NMRSE und NSE zeigen grössere Abweichungen (Tab. 12). Bestenfalls kann ein geringes Aufspreizen der Temperaturprofile mit der

Tiefe entlang der Bohrung (Abb. 23), bzw. entlang des Simplontunnels (Abb. 24), festgestellt werden. Die Sensitivität dieses Parameters ist allerdings zu gering um sinnvoll einen «best Fit» abzuleiten.

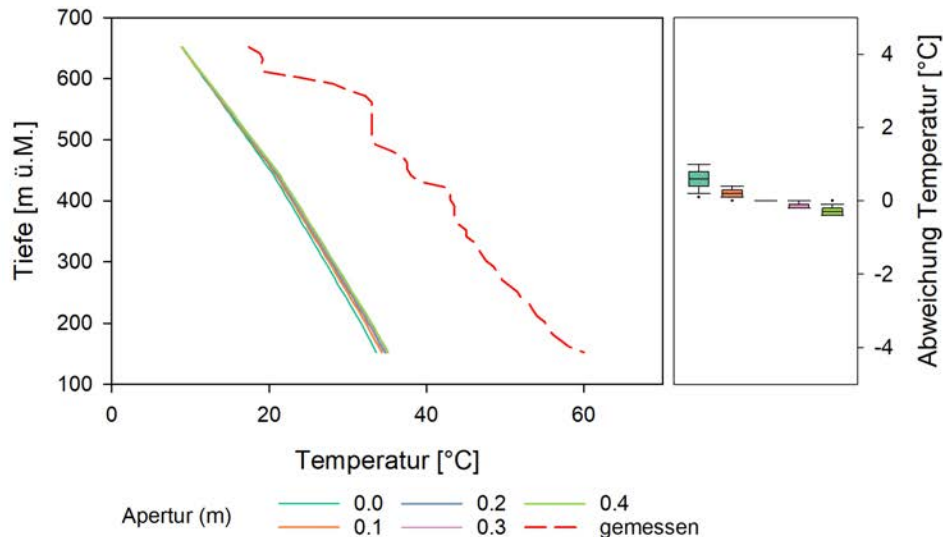


Abb. 23: Szenario A1 – S5. Vergleich berechnete - gemessene Temperatur in der Bohrung 10-BR02.

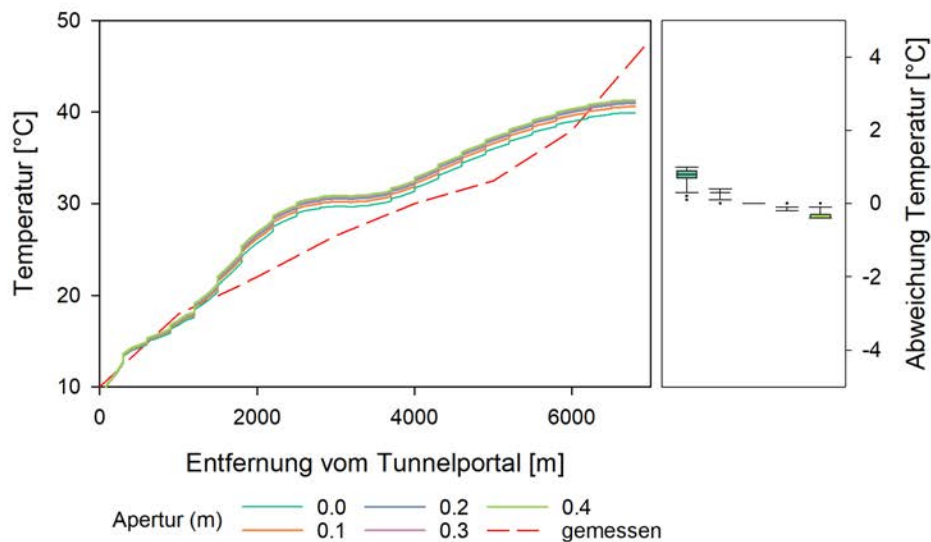


Abb. 24: Szenario A1 – S5. Vergleich berechnete - gemessene Temperatur entlang des Simplontunnels.

Tab. 12: Szenario A1 – S5: Berechnete Güte-Kennwerte (grau hinterlegt: Basiswert).

Apertur [m]		0.0	0.1	0.2	0.3	0.4
Bohrung 10-BR02	NSE	0.99	1.0	1.0	1.0	1.0
	RMSE	1.79	0.66	0.0	0.44	0.76
	NMRSE	0.07	0.03	0.0	0.02	0.03
Simplontunnel	NSE	0.99	1.0	1.0	1.0	1.0
	RMSE	2.89	1.07	0.0	0.67	1.12
	NMRSE	0.09	0.03	0.0	0.02	0.03

Auswertung Aufenthaltszeiten Bohrung 10-BR02

Schon eine relativ geringe Apertur von 0.1 m hat einen deutlichen Einfluss auf die Aufenthaltszeiten im Vergleich zur Berechnung ohne Apertur (Öffnungsweite 0.0 m). Hier halbiert sich die Aufenthaltszeit von über 60 ka auf unter 30 ka. Eine Erhöhung der Apertur auf 0.2, 0.3 und 0.4 m führt zu einer weiteren Reduktion der Aufenthaltszeiten, jedoch in immer kleineren Schritten und nicht linear (Tab. 13). Beim Vergleich mit den Zuströmbereichen (Abb. 25) zeigt sich wie bei der Aufenthaltszeit ebenfalls eine deutliche Änderung von der Berechnung ohne Apertur zu einer Apertur von 0.1 m. Bei weiterer Erhöhung der Apertur findet weder eine nennenswerte Änderung der Aufenthaltszeiten, noch der Zuströmbereiche statt. Dies deutet darauf hin, dass die Apertur bzgl. der Aufenthaltszeiten sehr sensitiv ist, jedoch für Öffnungsweiten kleiner 0.1 m. Ohne Berücksichtigung der Apertur liegt der Bereich der Grundwasserneubildung hauptsächlich nördlich der Bohrung 10-BR02 auf Höhe des Schinhorns. Dabei werden vom Grundwasser Tiefen bis ca. -3'000 m ü.M. durchströmt.

Apertur [m]	Aufenthaltszeit [a]
0	60'641
0.1	28'613
0.2	25'270
0.3	24'283
0.4	24'111

Tab. 13: Szenario A1 – S5: Berechnete Aufenthaltszeiten des Tiefengrundwassers.

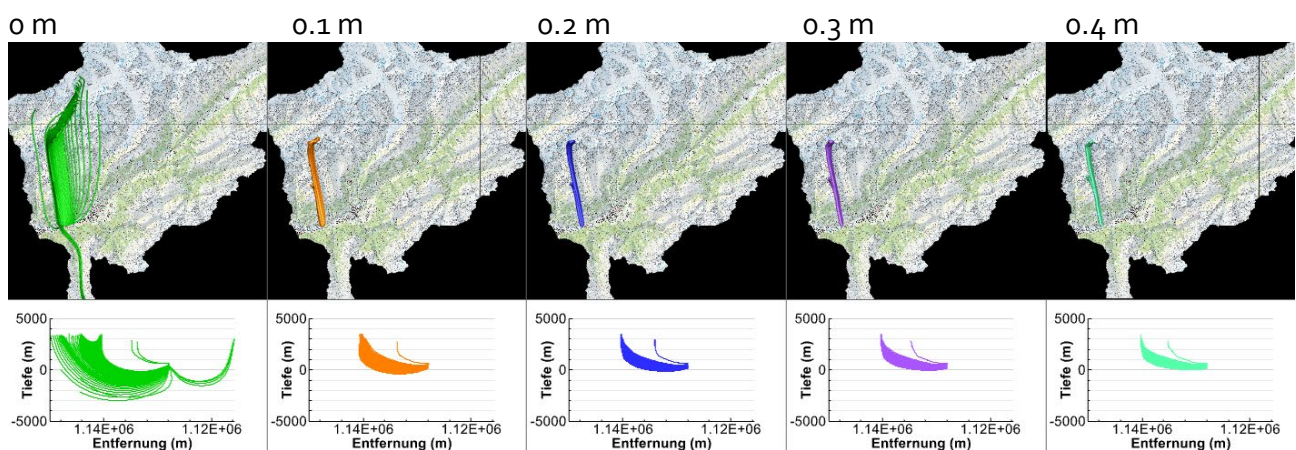
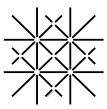


Abb. 25: Szenario A1 – S5: Horizontale (oben) und vertikale (unten) Ausdehnung der Fliesslinien.



Fazit Szenario A₁ – S₅

Die Apertur ist hinsichtlich des Verlaufs der Temperaturprofile nicht sensitiv, allerdings führt sie zu grossen Änderungen bei den simulierten Aufenthaltszeiten und Zuströmbereichen. Da eine aus vorausgehenden Untersuchungen abgeleitete Aufenthaltszeit von 30 ka mit einer Apertur von 0.1 m gut abgebildet werden kann, wird dieser Wert für das «best Fit» Modell übernommen.

7.2.6 Szenario A₂ – S₆: k-Wert der alpinen Hauptüberschiebungen

Für die Berechnungen des Einflusses der k-Werte der alpinen Hauptüberschiebungen wurden diese für alle hydrogeologischen Einheiten einheitlich und ohne Anisotropie oder Tiefenabhängigkeit der k-Werte betrachtet. Die alpinen Hauptüberschiebungen sind hingegen aktiviert und mit Porosität, hydraulischer Durchlässigkeit und Apertur parametrisiert (Tab. A₄). Der k-Wert wurde basierend auf einem Basiswert von $1E-05$ m s⁻¹ integriert und ein Bereich von $1E-03$ bis $1E-07$ für die Sensitivitätsanalyse betrachtet.

Auswertung Temperaturverlauf Bohrung 10-BR02 und Simplontunnel

Wie bei Szenario A₁ – S₃ «spezifische Wärmekapazität» bzw. A₁ – S₅ «Apertur» ist so gut wie kein Einfluss auf den Temperaturverlauf in der Bohrung (Abb. 27) und im Simplontunnel (Abb. 28) festzustellen. Weder die berechneten und gemessenen Temperaturverläufe noch die Kennwerte NSE, RMSE und NRMSE (Tab. 14) zeigen grössere Abweichungen. Bestenfalls kann ein geringes Aufspreizen der Temperaturprofile mit der Tiefe entlang der Bohrung, bzw. des Simplontunnels festgestellt werden. Die Sensitivität dieses Parameters ist allerdings zu gering um sinnvoll einen «best Fit» abzuleiten. Bestenfalls kann damit der Temperaturgradient in die Tiefe leicht beeinflusst werden.

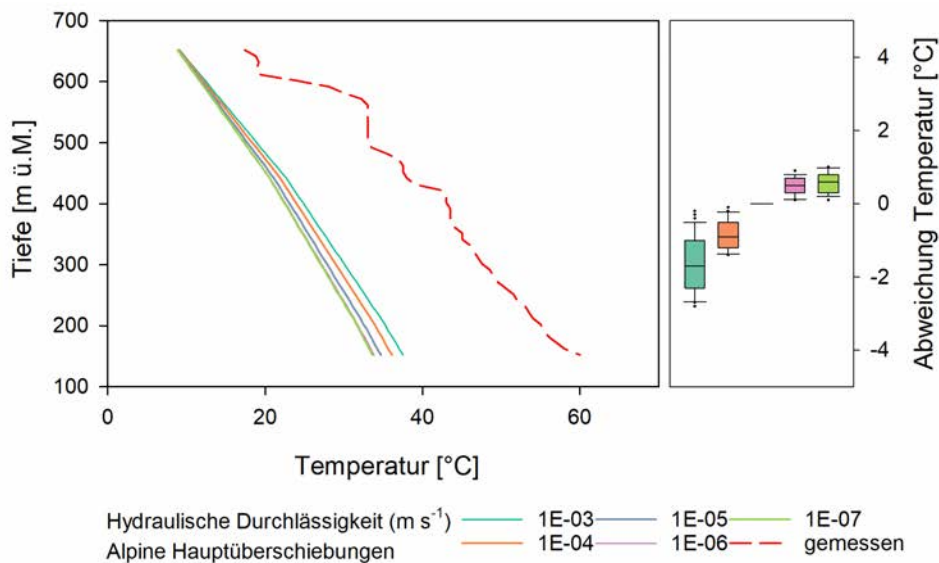


Abb. 26: Szenario A2 – S6: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur in der Bohrung 10-BR02.

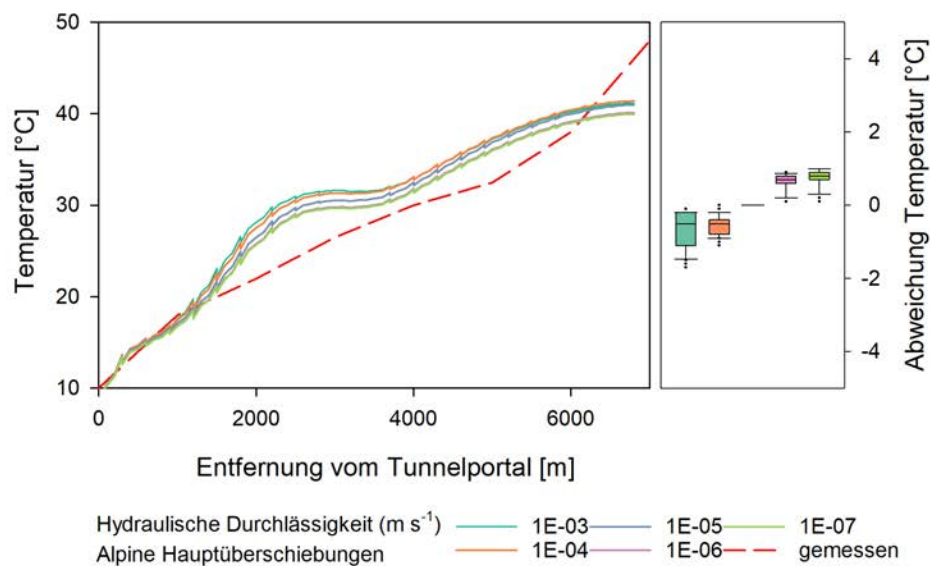


Abb. 27: Szenario A2 – S6: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur entlang des Simplontunnels.

Tab. 14: Szenario A2 – S6: Berechnete Güte-Kennwerte (grau hinterlegt: Basiswert).

Hydr. Durchlässigkeit [$m s^{-1}$]		1E-03	1E-04	1E-05	1E-06	1E-07
Bohrung 10-BR02	NSE	0.94	0.99	1.0	0.99	0.99
	RMSE	4.91	2.5	0.0	1.49	1.76
	NMRSE	0.17	0.09	0.0	0.06	0.07
Simplontunnel	NSE	0.99	1.0	1.0	0.99	0.99
	RMSE	2.94	2.24	0.0	2.44	2.84
	NMRSE	0.09	0.07	0.0	0.08	0.09

Auswertung Aufenthaltszeiten Bohrung 10-BR02

Ähnlich wie bei den Berechnungen mit unterschiedlichen Aperturen zeigt auch der k-Wert im Bereich der alpinen Hauptüberschiebungen einen deutlichen Einfluss auf die simulierte Aufenthaltszeiten. Allerdings reduzieren sich die Aufenthaltszeiten, welche bei hohen k-Werten ($1\text{E}-03\text{ m s}^{-1}$) mit knapp 50 ka sehr hoch sind, um ca. 50% bei Reduzierung der k-Werte auf $1\text{E}-05\text{ m s}^{-1}$, um bei weiterer Reduktion der k-Werte auf $1\text{E}-07\text{ m s}^{-1}$ wieder deutlich auf nahezu 60 ka anzusteigen (Tab. 15). Dieser Effekt kann nur mit unterschiedlichen Zuströmbereichen für unterschiedliche k-Werte erklärt werden (Abb. 28). Für Szenario A2 – S5 «Apertur» war bereits ersichtlich, dass Aperturen grösser als 0.1 m nicht mehr sensitiv sind. Da die Durchlässigkeit einer Bruchzone sowohl aus der Apertur als auch der k-Werte bestimmt wird, führen hohe k-Werte zum gleichen Effekt wie hohe Aperturen. Das Ergebnis der Zuströmbereiche und der Aufenthaltszeiten zeigt, dass erst k-Werte der Hauptüberschiebungen von kleiner $1\text{E}-05\text{ m s}^{-1}$ zu aus vorausgehenden Untersuchungen abgeleiteten Aufenthaltszeiten sowie auch Zuströmbereichen führen. Bei kleiner werdenden k-Werten (ab $1\text{E}-05\text{ m s}^{-1}$) wird sowohl der Zuströmbereich breiter und es werden tiefere Bereiche (bis max. -2'500 m ü.M.) vom Grundwasser durchströmt.

k-Werte Bruchstrukturen [m s^{-1}]	Aufenthaltszeit [a]
1.0E-03	48'922
1.0E-04	27'602
1.0E-05	25'270
1.0E-06	44'510
1.0E-07	58'183

Tab. 15: Berechnete Aufenthaltszeiten des Tiefengrundwassers.

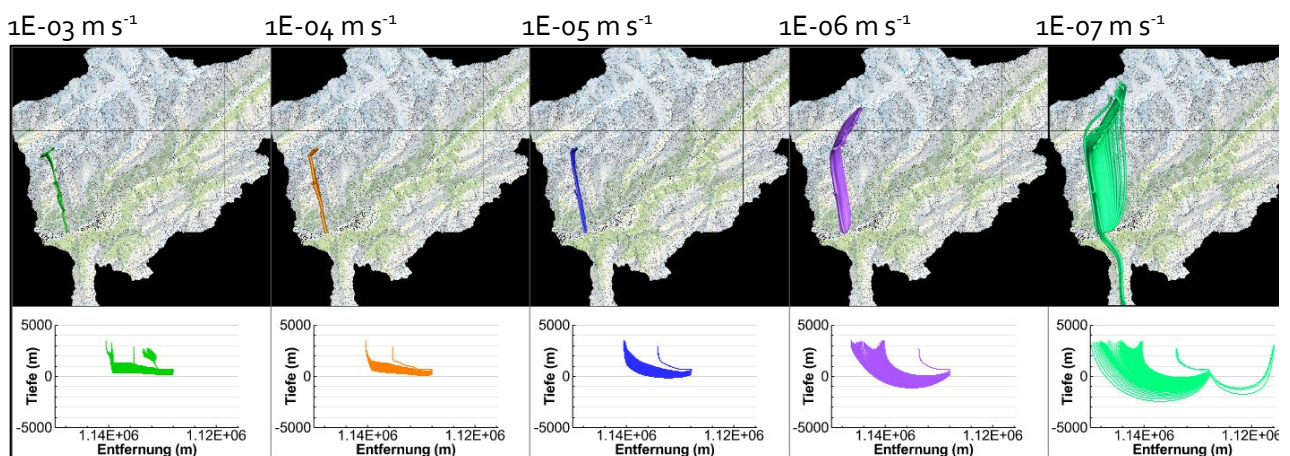
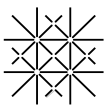


Abb. 28: Szenario A2 – S6: Horizontale (oben) und vertikale (unten) Ausdehnung der Fließlinien.



Fazit Szenario A2 – S6

Die k-Werte der alpinen Hauptüberschiebungen sind hinsichtlich des Verlaufs der Temperaturprofile nicht sensitiv, allerdings führen sie zu grossen Änderungen bei der Aufenthaltszeit und den Zuströmbereichen. Da eine aus vorausgehenden Untersuchungen abgeleiteten Aufenthaltszeiten von 30 ka gut mit k-Werten zwischen von $1E-05$ und $1E-06$ $m\ s^{-1}$ ermittelt werden kann, wird ein Wert von $5E-05$ $m\ s^{-1}$ für das «best Fit» Modell übernommen.

Auswertung Temperaturverlauf Bohrung 10-BR02 und Simplontunnel

Wie bei Szenario A1 – S1 führen Änderungen der k-Werte zu deutlichen Änderungen beim Verlauf der Temperaturen. Bei Betrachtung der Ergebnisse für die Bohrung 10-BR02 (Abb. 29) zeigt sich eine sehr hohe Sensitivität für hohe k-Werte. Bei geringeren k-Werten sinkt die Sensitivität deutlich, so resultiert nahezu kein Unterschied zwischen den k-Werten $1E-09$ und $1E-10$ $m\ s^{-1}$. Geringe k-Werte ($1E-06$ und $1E-07$ $m\ s^{-1}$) resultieren für den Simplontunnels (Abb. 30) ebenfalls in einer sehr schlechten Übereinstimmung der berechneten mit gemessenen Temperaturen und auch in den höchsten Abweichungen vom Basiswert (NMRSE von 17.85 bzw. 4.38 für k-Werte von $1E-06$ respektive $1E-07$ $m\ s^{-1}$, Tab. 17).

Tab. 16: k-Werte der gewichteten (Formel 1) und gedrehten (Formel 6 und 7) Basiswerte, unter Berücksichtigung der Anisotropie für jede durch eine alpine Hauptüberschiebung getrennte hydrogeologische Einheit (Formeln siehe Kapitel 6.2).

	Basis k_x					Basis k_y				
	1.0E-06	1.0E-07	1.0E-08	1.0E-09	1.0E-10	1.0E-06	1.0E-07	1.0E-08	1.0E-09	1.0E-10
1	1.2E-06	1.2E-07	1.2E-08	1.2E-09	1.2E-10	3.1E-07	3.1E-08	3.1E-09	3.1E-10	3.1E-11
2	4.2E-05	4.2E-06	4.2E-07	4.2E-08	4.2E-09	1.0E-05	1.0E-06	1.0E-07	1.0E-08	1.0E-09
3	7.5E-06	7.5E-07	7.5E-08	7.5E-09	7.5E-10	1.9E-06	1.9E-07	1.9E-08	1.9E-09	1.9E-10
4	1.2E-06	1.2E-07	1.2E-08	1.2E-09	1.2E-10	3.0E-07	3.0E-08	3.0E-09	3.0E-10	3.0E-11
5	6.4E-06	6.4E-07	6.4E-08	6.4E-09	6.4E-10	1.6E-06	1.6E-07	1.6E-08	1.6E-09	1.6E-10
6	4.2E-06	4.2E-07	4.2E-08	4.2E-09	4.2E-10	1.1E-06	1.1E-07	1.1E-08	1.1E-09	1.1E-10
7	6.1E-06	6.1E-07	6.1E-08	6.1E-09	6.1E-10	1.5E-06	1.5E-07	1.5E-08	1.5E-09	1.5E-10
8	1.1E-05	1.1E-06	1.1E-07	1.1E-08	1.1E-09	2.8E-06	2.8E-07	2.8E-08	2.8E-09	2.8E-10
9	7.9E-06	7.9E-07	7.9E-08	7.9E-09	7.9E-10	2.0E-06	2.0E-07	2.0E-08	2.0E-09	2.0E-10
10	1.2E-05	1.2E-06	1.2E-07	1.2E-08	1.2E-09	2.9E-06	2.9E-07	2.9E-08	2.9E-09	2.9E-10
11	5.3E-06	5.3E-07	5.3E-08	5.3E-09	5.3E-10	1.3E-06	1.3E-07	1.3E-08	1.3E-09	1.3E-10
12	5.3E-06	5.3E-07	5.3E-08	5.3E-09	5.3E-10	1.3E-06	1.3E-07	1.3E-08	1.3E-09	1.3E-10
13	6.9E-06	6.9E-07	6.9E-08	6.9E-09	6.9E-10	1.7E-06	1.7E-07	1.7E-08	1.7E-09	1.7E-10
14	8.1E-07	8.1E-08	8.1E-09	8.1E-10	8.1E-11	2.0E-07	2.0E-08	2.0E-09	2.0E-10	2.0E-11
15	2.6E-07	2.6E-08	2.6E-09	2.6E-10	2.6E-11	6.5E-08	6.5E-09	6.5E-10	6.5E-11	6.5E-12
Rest	2.4E-06	2.4E-07	2.4E-08	2.4E-09	2.4E-10	5.9E-07	5.9E-08	5.9E-09	5.9E-10	5.9E-11

7.2.7 Szenario A3 – S7: Anisotropie

In Kapitel 6.2 «Anisotropie» wurde das Vorgehen zur Ermittlung der Anisotropie basierend auf einer Berücksichtigung eines detailliert kartierten Bruchsystems erläutert. Dieses resultiert in einem für jede hydrogeologische Einheit separat definiertem Verhältnis der horizontalen k -Werte (k_x/k_y , siehe Tab. 16), während die vertikalen k -Werte k_z basierend auf k_x um eine Grössenordnung kleiner definiert wurden. Der Basiswert wurde mit $1E-08 \text{ m s}^{-1}$ definiert und im Rahmen der Sensitivitätsanalyse mit jeweils zwei Grössenordnungen höher und tiefer betrachtet.

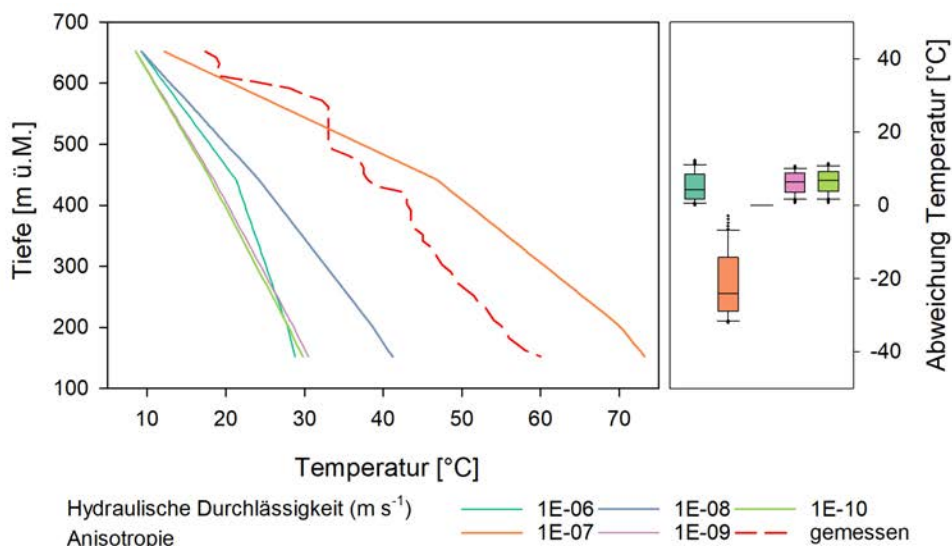


Abb. 29: Szenario A2 –S7: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur in der Bohrung 10-BR02.

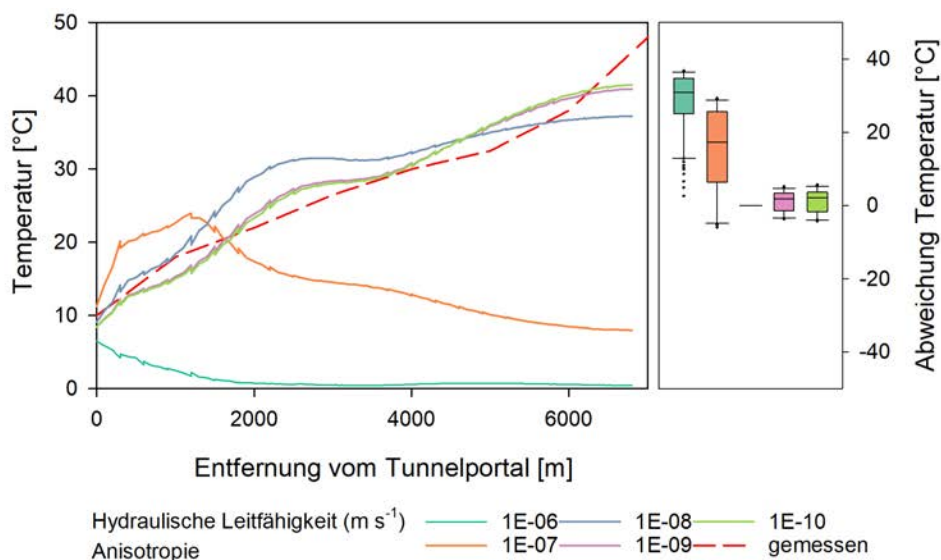


Abb. 30: Szenario A2 –S7: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur entlang des Simplotunnels.

Tab. 17: Szenario A2 –S7: Berechnete Güte-Kennwerte (grau hinterlegt: Basiswert).

Anisotropie Basiswert [m s^{-1}]		1E-06	1E-07	1E-08	1E-09	1E-10
Bohrung 10-BR02	NSE	0.54	-5.06	1.0	0.48	0.41
	RMSE	17.16	62.56	0.0	18.40	19.60
	NMRSE	0.88	1.02	0.0	0.84	0.92
Simplontunnel	NSE	-14.53	-5.63	1.0	0.84	0.80
	RMSE	107.47	70.24	0.0	10.98	12.20
	NMRSE	17.85	4.38	0.0	0.34	0.37

Auswertung Aufenthaltszeiten Bohrung 10-BR02

Ähnlich wie bei den unterschiedlichen Aperturen zeigt auch der k-Wert der alpinen Hauptüberschiebungen einen deutlichen Einfluss auf die berechneten Aufenthaltszeiten (Tab. 18). Die Aufenthaltszeiten steigen mit geringeren k-Werten an, sinken dann aber wieder für den Basiswert $1\text{E-}09 \text{ m s}^{-1}$. Dieser Effekt kann nur mit unterschiedlichen Zuströmbereichen bei unterschiedlichen k-Werten erklärt werden (Abb. 31). Höhere k-Werte haben, bei Berücksichtigung der Anisotropie, nicht nur einen Einfluss auf den Zuströmbereich, sondern auch auf die Tiefe der Fliesslinien. Insbesondere bei Basiswerten von $1\text{E-}06$ und $1\text{E-}07 \text{ m s}^{-1}$ werden vom Grundwasser Tiefen bis ca. -7'000 m ü.M. durchströmt.

Anisotropie Basiswerte [m s^{-1}]	Aufenthaltszeit [a]
1.0E-06	2'807
1.0E-07	20'302
1.0E-08	76'782
1.0E-09	58'865
1.0E-10	148'226

Tab. 18: Szenario A2 – S7: Berechnete Aufenthaltszeiten des Tiefengrundwassers.

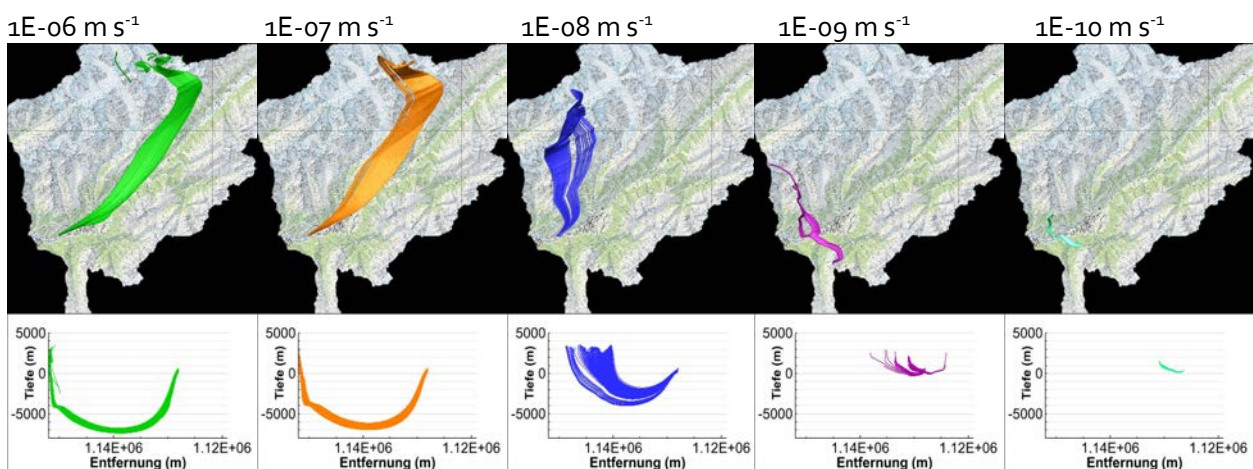


Abb. 31: Szenario A2 – S7: Horizontale (oben) und vertikale (unten) Ausdehnung der Fliesslinien.

Fazit Szenario A2 – S7

Die Berücksichtigung der Anisotropie der K-Werte zeigt einen deutlichen Einfluss auf den Temperaturverlauf sowie die Aufenthaltszeiten und Zuströmbereiche. Im Vergleich mit dem Temperaturverlauf in der Bohrung 10-BR02 und bei Betrachtung der Aufenthaltszeiten wären K-Werte zwischen $1\text{E-}07$ und $1\text{E-}08 \text{ m s}^{-1}$ passend, während im Vergleich mit dem Temperaturverlauf im Simplontunnel passende K-Werte bei $1\text{E-}08 \text{ m s}^{-1}$ liegen. Für das «best Fit» Modell wurde deshalb ein K-Werte von $5\text{E-}08 \text{ m s}^{-1}$ gewählt.

7.2.8 Szenario A3 – S8: tiefenabhängige k-Werte

In Kapitel 6.2 «Anisotropie» wurde das Vorgehen zur Ermittlung der Anisotropie basierend auf einer Berücksichtigung eines detailliert kartierten Bruchsystems erläutert. Dieses resultiert in einem, für jede hydrogeologische Einheit separat definiertem, Verhältnis der horizontalen k-Werte (k_x/k_y , siehe Tab. 16), während die vertikalen k-Werte k_z basierend auf k_x um eine Größenordnung kleiner definiert wurden. Für die tiefenabhängigen k-Werte wird eine exponentielle Abnahme eines Startwertes berechnet (Kapitel 6.2.2 «Tiefenabhängige k-Werte») und im Rahmen der Sensitivitätsanalyse mit jeweils zwei Größenordnungen höher und tiefer betrachtet (Abb. 32).

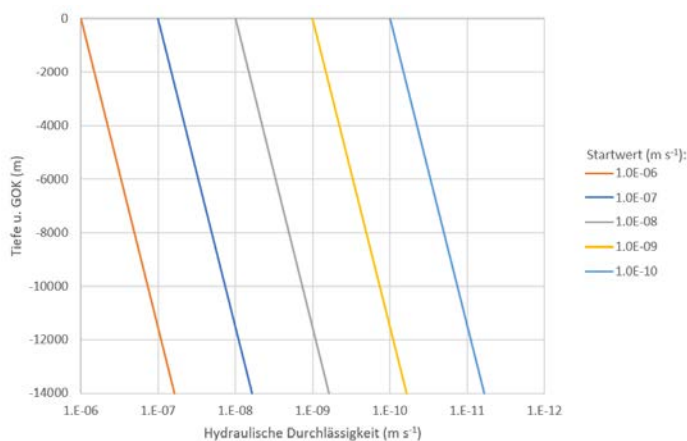


Abb. 32:

Tiefenabhängige k-Werte ausgehend von den jeweiligen Startwerten für die Szenarien der Sensitivitätsanalyse.

Auswertung Temperaturverlauf Bohrung 10-BR02 und Simplontunnel

Wie bei Szenario A2 – S1 führen Änderungen der k-Werte zu deutlichen Änderungen beim Verlauf der Temperaturen. Bei der Bohrung 10-BR02 kann mit einem k-Wert von $1\text{E-}10 \text{ m s}^{-1}$ der «beste Fit» von berechneten und gemessenen Temperaturen erzielt werden (Abb. 33). Beim Simplontunnel zeigen, mit Ausnahme des

geringsten k-Wertes ($1\text{E}-10 \text{ m s}^{-1}$), alle Temperaturverläufe (Abb. 34) ab etwa 2'000 m horizontaler Entfernung vom Tunnelportal ein Plateau.

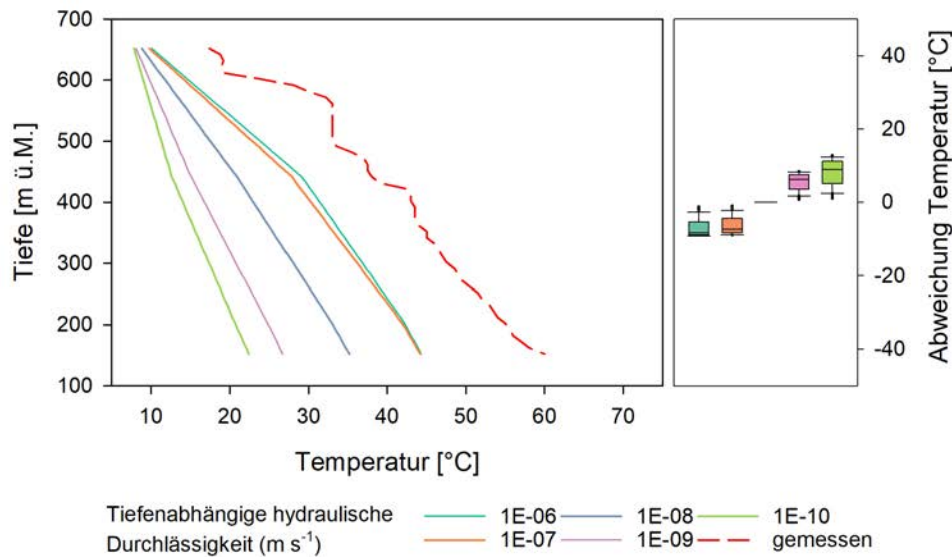


Abb. 33: Szenario A2 – S8: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur in der Bohrung 10-BR02.

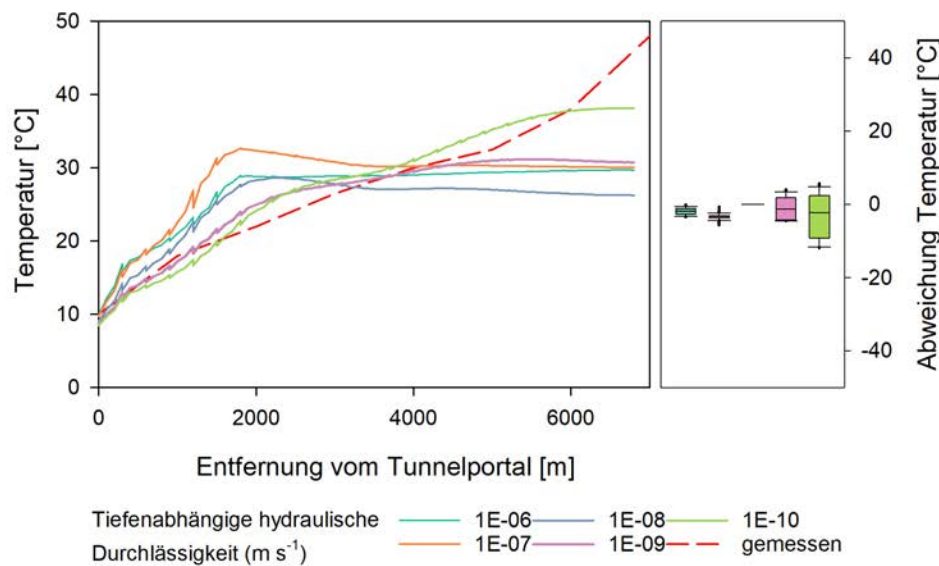
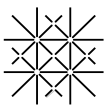


Abb. 34: Szenario A2 – S8: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur entlang des Simplontunnels.

Die Güte-Kennwerte verdeutlichen, dass eine Erhöhung der K-Werte von $1\text{E}-07$ auf $1\text{E}-06 \text{ m s}^{-1}$ nur noch gering sensitiv ist (NMRSE und RMSE verändern sich beispielsweise bei der Bohrung 10-BR02 nur noch von 0.53 auf 0.59 respektive von 18.37 auf 20.21; Tab. 19).



Tab. 19: Szenario A2 – S8: Berechnete Güte-Kennwerte (grau hinterlegt: Basiswert).

Tiefenabhängige k-(Basis-)Werte [$m\ s^{-1}$]		1E-06	1E-07	1E-08	1E-09	1E-10
Bohrung 10-BR02	NSE	0.08	0.24	1.0	0.41	-0.28
	RMSE	20.21	18.37	0.0	16.23	23.87
	NMRSE	0.59	0.53	0.0	0.87	1.64
Simplontunnel	NSE	0.78	0.42	1.0	0.51	-1.18
	RMSE	7.68	12.45	0.0	11.51	24.18
	NMRSE	0.39	0.54	0.0	0.51	0.82

Auswertung Aufenthaltszeiten Bohrung 10-BR02

Die Aufenthaltszeiten bei hohen tiefenabhängigen k-Werten steigen von ca. 20 ka ($1E-06\ m\ s^{-1}$) stark auf ca. 50 ka ($1E-07\ m\ s^{-1}$) an, um anschliessend bei weiterer Reduktion der k-Werte (auf $1E-08\ m\ s^{-1}$) wieder zu sinken (Tab. 20). Noch kleinere Durchlässigkeiten ($1E-09\ m\ s^{-1}$ und $1E-10\ m\ s^{-1}$) führten zu numerischen Problemen bei der Berechnung bzw. zu (unrealistischen) mehreren Grössenordnungen höheren Aufenthaltszeiten. Dies zeigt sich ebenfalls bei den Zuströmbereichen (Abb. 35), welche für die Basiswerte $1E-06$ bis $1E-08\ m\ s^{-1}$ sehr sensitiv sind. Die Ausdehnung der Zuströmbereiche werden bei kleineren Basiswerten wie oben beschrieben unrealistisch und Resultate werden daher für die kleinsten k-Werte nicht dargestellt. Die Zuströmbereiche und die Bereiche der Grundwasserneubildung ändern stark zwischen den beiden Situationen ($1E-06$ und $1E-07\ m\ s^{-1}$). Zudem erhöht sich die vom Grundwasser durchströmte Tiefe von -2'000 m ü.M. für einen (Basis-)k-Wert von $1E-06\ m\ s^{-1}$ auf ca. -5'000 m ü.M. für einen (Basis-)k-Wert von $1E-07\ m\ s^{-1}$.

Tiefenabhängige k-Werte Basiswerte [$m\ s^{-1}$]	Aufenthaltszeit [a]
1.0E-06	19'738
1.0E-07	50'619
1.0E-08	17'225
1.0E-09	n.b.
1.0E-10	n.b.

Tab. 20: Szenario A2 – S8: Berechnete Aufenthaltszeiten des Tiefengrundwassers.

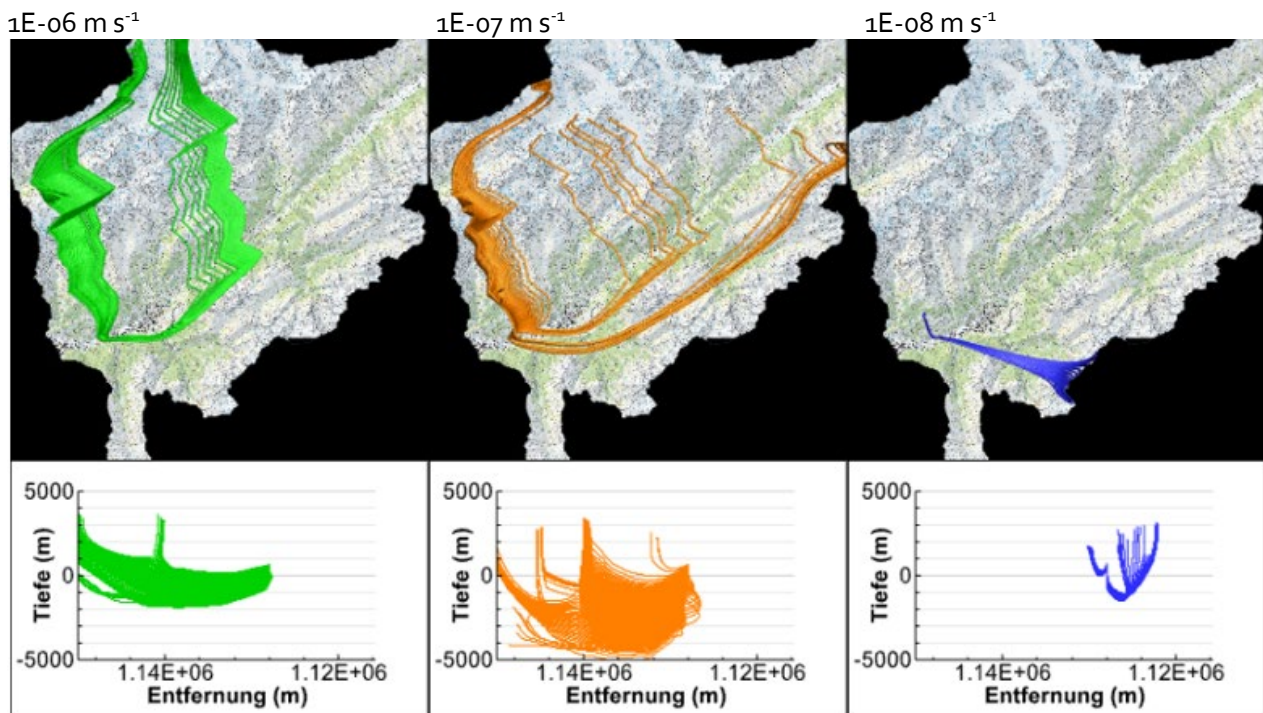
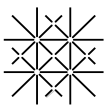


Abb. 35: Szenario A2 – S8: Horizontale (oben) und vertikale (unten) Ausdehnung der Fließlinien.

Fazit Szenario A2 – 8

Während die Auswertung der Aufenthaltszeiten passende tiefenabhängige k -Werte zwischen $1\text{E-}06$ und $1\text{E-}07 \text{ m s}^{-1}$ plausibel erscheinen lassen, müssten entsprechend der Auswertungen der Temperaturverläufe im Simplontunnel passende k -Werte deutlich geringer gewählt werden. Aufgrund der Lage des Simplontunnels im südöstlichen Modellperimeter ([Abb. 15](#)) lässt dies aber auch darauf schliessen, dass dieser Bereich nicht als Durchschnitt der anderen Zonen betrachtet werden kann, sondern separat parametrisiert werden müsste.



8 «Best Fit» Modell

Anhand der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse konnten die passendsten hydraulischen und thermischen Parameter, auf Grundlage des Temperaturverlaufs in der Bohrung in Brigerbad 10-BR02 und entlang des Simplontunnels sowie Angaben zu den Aufenthaltszeiten, für das «best Fit» Modell abgeleitet werden. In der Sensitivitätsanalyse konnte bereits die Bedeutung der einzelnen Parameter und teilweise auch verschiedener Parameterkombinationen auf die Temperaturverteilung und die Aufenthaltszeiten beurteilt werden und diente als Ausgang für die Modellkalibrierung.

Mit Hilfe der Modellkalibrierung (Kapitel 8.1) konnte dann die beste Parameterkombination ermittelt und anschliessend mit dem resultierenden «best Fit» Modell die Ergebnisse ausgewertet und Szenarien berechnet werden (Kapitel 9). Für die Kalibrierung des «best Fit» Modells wurde zusätzlich der Temperaturverlauf in der Bohrung Lavey-1 in Lavey-Les-Bains berücksichtigt. Die Bohrung in Lavey-Les-Bains liegt zwar nicht mehr im Modellperimeter und auch die geologischen Verhältnisse sind nicht direkt vergleichbar (wenn auch ähnlich) aber es ist die einzige Information in dieser Region, welche bis in ca. 2'500 m Tiefe reicht.

8.1 Kalibrierung

Eine Vielzahl an unterschiedlichen Parameterkombinationen wurde hinsichtlich der oben genannten Kriterien berechnet und ausgewertet (Kapitel 7). Dabei hat sich gezeigt, dass vor allem der Modellbereich für welchen keine Daten zu Bruchstrukturen (Kapitel 6.2) vorhanden waren, gesondert betrachtet werden musste. Insbesondere wurde die k -Wert Verteilung angepasst, wobei das aus der Analyse der Bruchstrukturen abgeleitete Verhältnis der horizontalen Anisotropie k_y/k_x für jede durch Hauptbrüche begrenzte hydrogeologische Einheit beibehalten wurde (Kapitel 6.2). Die k -Wert Verteilung in vertikaler Richtung k_z ist ebenfalls vom k_x -Wert abhängig und muss in diesem Kontext betrachtet werden (Tab. 21 und Abb. 36). Wie bereits im Fazit zu Szenario A2-8 beschrieben (Kapitel 7.2.8), mussten die durch Hauptbrüche begrenzten hydrogeologischen Einheiten östlich der Rhone (Einheit 14, 15 und «Rest»; Abb. 7) aufgrund fehlender Datengrundlage separat kalibriert werden um eine Übereinstimmung gemessener und berechneter Temperaturen entlang des Simplontunnels zu erreichen. Die hydraulischen Eigenschaften der Hauptüberschiebungen (Apertur, k -Wert) mussten nur leicht angepasst werden, da die Auswirkungen dieser Strukturen auf das regionale Fließfeld eher gering sind. Hinsichtlich der Aufenthaltszeiten wurde die Porosität basierend auf Literaturwerten (Kapitel 7.2.2) mit 0.035 definiert. Eine Kalibrierung der Aufenthaltszeiten mittels der Porosi-

tät macht nur bedingt Sinn, da über diesen Parameter die aus vorausgehenden Untersuchungen abgeleiteten Aufenthaltszeiten (eine Verdoppelung der Porosität resultiert in einer Verdoppelung der Aufenthaltszeiten) definiert werden kann. Der Fokus zur Kalibrierung der Aufenthaltszeiten wurde daher auf die Parameter k -Werte und Apertur der Hauptüberschiebungen gelegt.

	Einheit	k_x [m^{-5}]	k_y [m^{-5}]	k_z [m^{-5}]
Hydrogeologische Einheiten	1	2.00E-07	5.00E-08	1.00E-08
	2	2.64E-07	6.60E-08	1.32E-08
	3	1.22E-06	3.04E-07	6.08E-08
	4	1.96E-07	4.90E-08	9.79E-09
	5	1.04E-06	2.59E-07	5.18E-08
	6	6.91E-07	1.73E-07	3.46E-08
	7	9.96E-07	2.49E-07	4.98E-08
	8	1.80E-06	4.51E-07	9.01E-08
	9	1.28E-06	3.20E-07	6.40E-08
	10	1.90E-06	4.74E-07	9.49E-08
	11	8.68E-07	2.17E-07	4.34E-08
	12	8.66E-07	2.16E-07	4.33E-08
	13	1.12E-06	2.81E-07	5.62E-08
	14	4.00E-08 (k)	1.00E-08 (k)	2.00E-09 (k)
	15	3.00E-07 (k)	7.50E-08 (k)	1.50E-08 (k)
Rest	3.00E-08 (k)	7.50E-09 (k)	1.50E-09 (k)	

Tab. 21: Basiswerte für die k -Werte. Die tiefenabhängige Anpassung erfolgt entsprechend [Abb. 36](#). Die mit (k) gekennzeichneten Werte sind separat kalibriert worden, da für diese Bereiche die k -Werte aufgrund mangelnder Daten der Bruchstrukturen nicht wie in [Kapitel 6.2](#) beschrieben definiert werden konnten.

Die Basiswerte für die k -Werte für k_x , k_y und k_z sind für jede durch eine Hauptbruch begrenzte hydrogeologische Einheit ([Abb. 7](#)) in [Tab. 21](#) aufgeführt, die Veränderung über die Tiefe in [Abb. 36](#). Im Anhang A findet sich eine Visualisierung der hydraulischen Durchlässigkeiten für alle drei Raumrichtungen ([Abb. A5](#)).

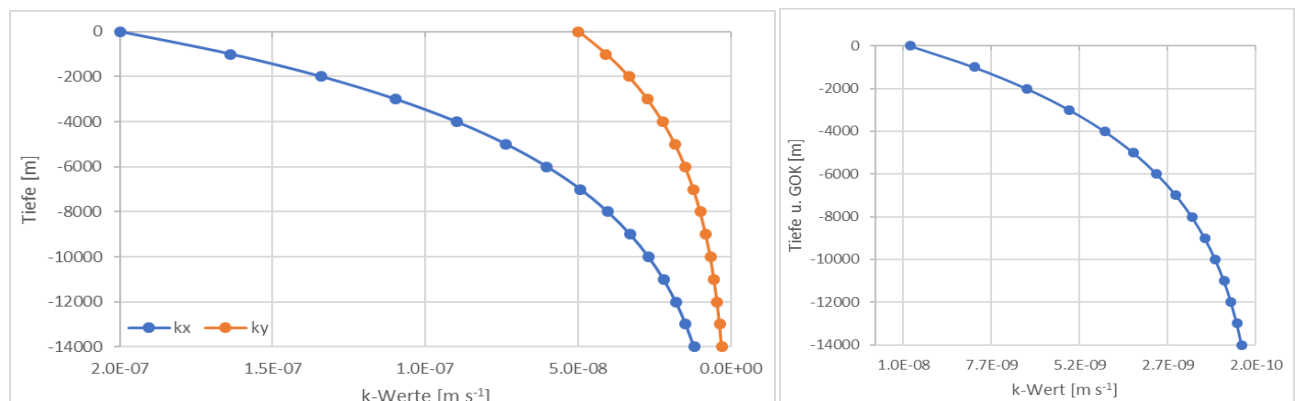


Abb. 36: Tiefenabhängige k -Werte, links für k_x und k_y , rechts für k_z . Der jeweils erste Wert (Null auf der Ordinate) entspricht dem Basiswert (siehe [Tab. 21](#)).

Nachdem eine lineare Verteilung der thermischen Leitfähigkeit nicht in einer guten Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Temperaturverläufe in den Bohrungen 10-BR02 und Lavey-1 resultierte, wurde eine exponentielle Zunahme der thermischen Leitfähigkeit von $1.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ in den oberen Modellbereichen bis $11 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ in 10 km Tiefe berücksichtigt (Abb. 37, Kapitel 6.2.3).

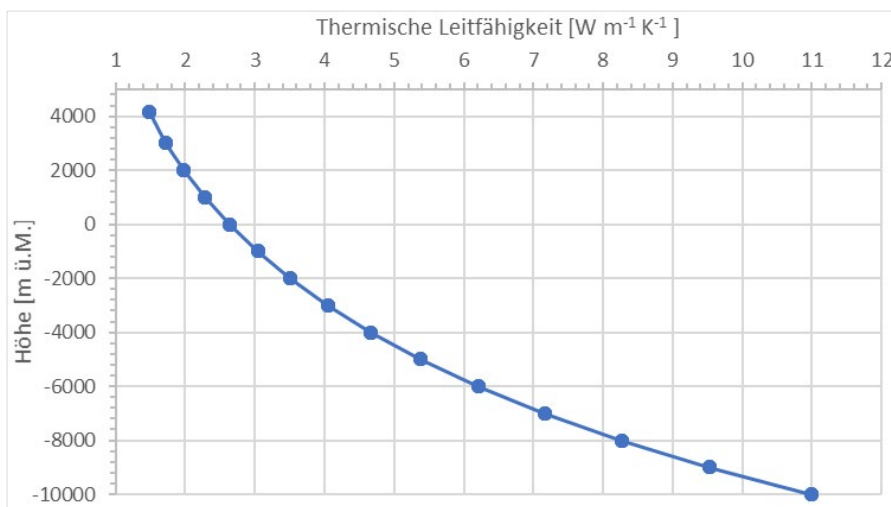


Abb. 37: Tiefenabhängige thermische Leitfähigkeit.

In Tab. 22 sind alle für das «best Fit» Modell verwendeten Randbedingungen und Parameter zusammengefasst.

Tab. 22: Hydraulische und thermische Randbedingungen und Parameter für das «best Fit» Modell.

Hydrogeologische Einheiten (Matrix ohne Bruchstrukturen)	Wert	Einheit
Topo als Head Randbedingung	Topographie minus 20 m	m ü.M.
Hydraulische Durchlässigkeit k_x, k_y, k_z	Anisotrop und tiefenabhängig (vgl. Tab. 21, Abb. 36)	m s^{-1}
Porosität	0.035	-
Heat flux Modellboden	0.07	W m^{-2}
Wärmekapazität	800	$\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Thermische Leitfähigkeit	Tiefenabhängig (vgl. Abb. 37)	$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Alpine Hauptüberschiebungen		
Hydraulische Durchlässigkeit	1.00E-05	m s^{-1}
Apertur	0.05	m
Porosität	0.035	-
Betriebliche Randbedingungen		
Entnahme Bohrung 10-BR2	0, 2.5, 5, 20	l s^{-1}

8.2 Resultate der Kalibrierung

Bei der Betrachtung der Resultate der Kalibrierung zeigt sich, dass die simulierten Temperaturen in Bohrung 10-BR02 im Vergleich zu den gemessenen Daten von Solexperts ([Abb. 38](#)) sehr gut übereinstimmen. Kurzfristige Schwankungen, wie sie die Daten von Solexperts zeigen, können mit dem Modell nicht nachgebildet werden, da der Fokus auf den grossräumigen Grundwasserzirkulationen lag und quartäre Grundwasserzutritte sowie lokale Kluffstrukturen nicht berücksichtigt werden konnten. Grundsätzlich könnte das quartäre Grundwasser in das Modell integriert werden, um Mischungsprozesse von quartärem und Felsgrundwasser zu simulieren (vgl. Herangehensweise in Davos, Scheidler et al. (2019)). Dabei bildet das von Christe et al. (2024) für den Kanton Wallis entwickelte regionale Grundwasserströmungsmodell für den oberen Rhone-talaquifer eine gute Ausgangslage. Um lokale Kluffstrukturen zu berücksichtigen, bräuchte es aber eine Kenntnis zu Lage, Wasserführung und hydraulischer Durchlässigkeit dieser Strukturen - Information, die nicht einfach vorhanden ist.

Für die Tiefbohrung Lavey-1 werden im oberen Bereich (bis in eine Tiefe von ca. -800 m ü.M.) die Temperaturen um bis zu ca. 10 °C zu gering berechnet, da die berechneten Temperaturen jedoch mit der Bohrung 10-BR02 gut übereinstimmen wurde von einer weiteren Anpassung bzw. Kalibrierung für den oberen Bereich entsprechend der Bohrung Lavey-1 abgesehen, auch da sich die Bohrung ausserhalb des Projektperimeters befindet. Ab einer Tiefen von ca. -800 m.ü.M. ist die Übereinstimmung der gemessenen und der berechneten Temperaturkurve gut (vgl. [Abb. 38](#)).

Der Temperaturverlauf entlang des Simplontunnels, bzw. des Teilstückes welches sich im Projektperimeter befindet (ca. 6 km) zeigt v.a. für die ersten 3 km eine sehr gute Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Temperaturen, während für die anschliessenden 3 km die berechneten Temperaturen um bis zu 5 °C niedriger simuliert werden im Vergleich zu den gemessenen Temperaturen. Dabei ist, wie auch bei dem gemessenen Temperaturverlauf der Bohrung 10-BR02, zu beachten, dass ausser den Hauptüberschiebungen keine diskreten Brüche für den südlichen Modellbereich berücksichtigt wurden, sondern die Informationen des Bruchsystems, soweit vorhanden, der Gesamtmatrix der einzelnen Modell-Teilbereiche aufgeprägt worden sind ([Kapitel 6.2](#)).

Für das «best Fit» Modell betragen berechnete Aufenthaltszeiten des Grundwassers von der Grundwasserneubildung bis zur Bohrung 10-BR02 ca. 30 ka (detailliertere Angaben in [Kapitel 9.2](#)).

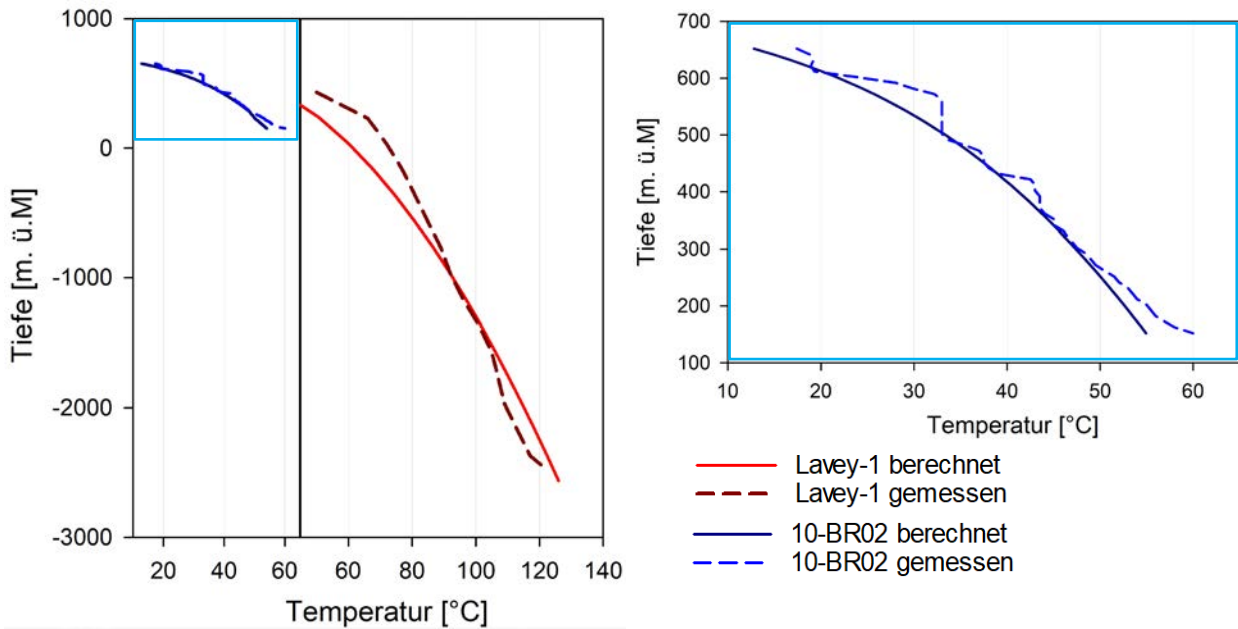


Abb. 38: Vergleich berechnete - gemessene Temperatur in der Bohrung 10-BR02 (blauer Kasten: Zoom siehe rechts) und projiziert auf Lavey-1 für das "best Fit" Modell.

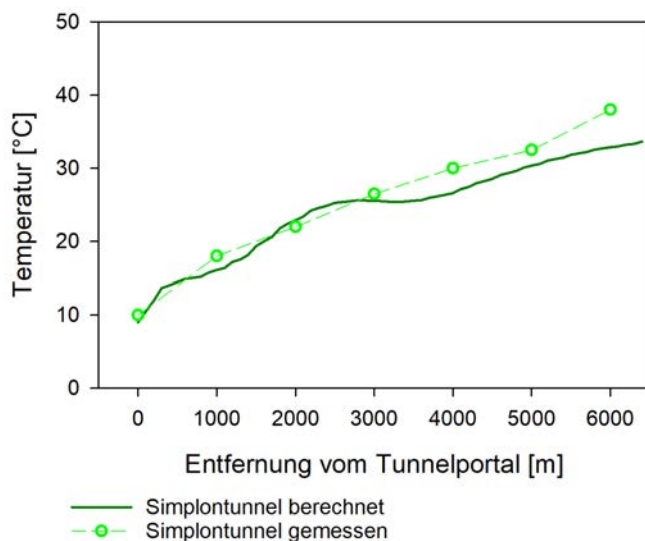


Abb. 39: Vergleich berechnete - gemessene Temperaturen entlang des Simplontunnels für das «best Fit» Modell.

8.3 Validierung der Grundwasserneubildung und Aufenthaltszeiten

Die wichtigste hydraulische Randbedingung für die Grundwasserzirkulation im betrachteten Untersuchungsgebiet ist die obere Randbedingung über welche die Grundwasserneubildung definiert wird. Über die

obere Randbedingung (Topographie als «head») kann das 3D-THM prinzipiell so viel Grundwasserneubildung simulieren wie numerisch verlangt wird. Ein Vergleich einer meteorologisch definierten Grundwasserneubildung mit der Wassermenge, welche über die Grundwasserneubildung an der Geländeoberfläche numerisch berechnet wird, stellt daher ein unabhängiges Gütekriterium dar.

Bei einer Gesamtfläche des Modellperimeters von 1'115 km² resultiert für die Simulation mit dem 3D-THM eine totale Grundwasserneubildung von ca. 8'300 l s⁻¹. Sonney (2010a) gibt für die Gebiete Lavey-les-Bains und Saint-Gervais-les-Bains die Grundwasserneubildung überschlagsmässig mit 10% des Gebietsniederschlags an, welcher mit einer Niederschlagsmenge von 2'000 mm a⁻¹ definiert wird. Das wären auf den Modellperimeter bezogen ca. 7'000 l s⁻¹. Im betrachteten Modellperimeter liegt der durchschnittliche Jahresniederschlag, basierend auf der mittleren Niederschlagshöhe 1991 bis 2010 (Rasterdatensatz R_{norm} von MeteoSchweiz) bei 1'659 mm a⁻¹ (Abb. 40). Berücksichtigt man die Grundwasserneubildung mit 10 bzw. 15% resultieren 5'865 bzw. 8'797 l s⁻¹. Die mit dem Modell simulierte Grundwasserneubildung passt somit sehr gut zur Annahme von Sonney (2010a) und fällt in den Bereich der berechneten Werten auf Grundlage meteorologischer Daten und einer realistischen Schätzung eines Grundwasserneubildungsanteils von 10-15% des Gesamtniederschlags.

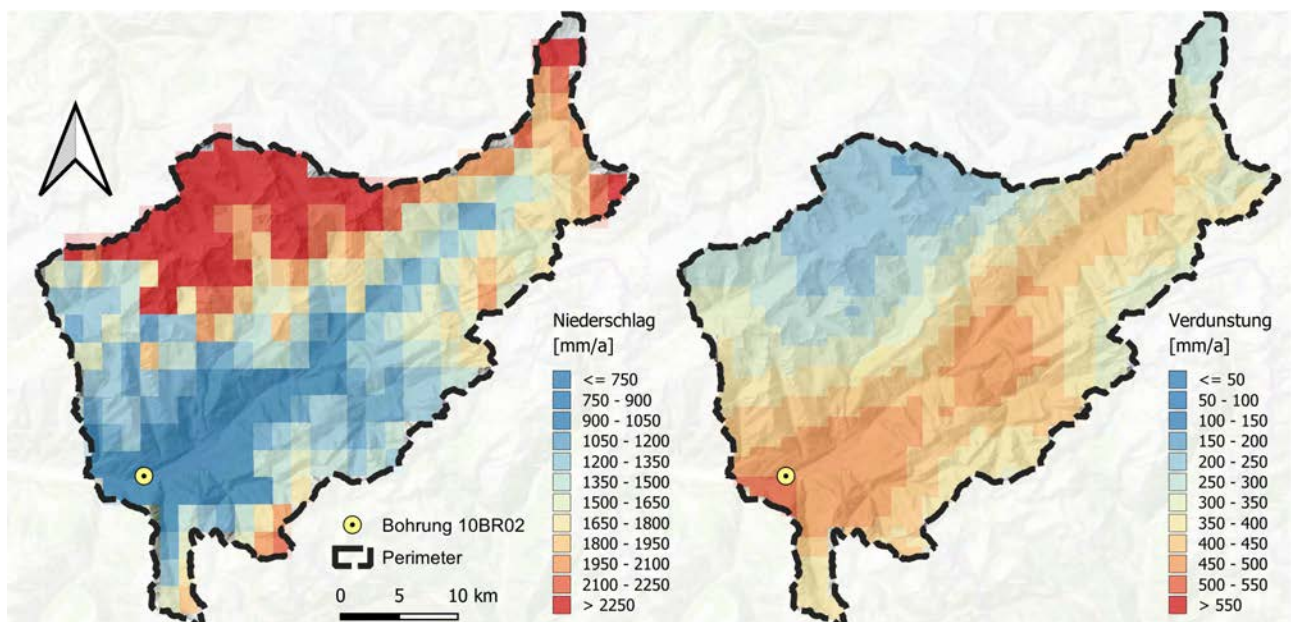


Abb. 40: Niederschlag und Verdunstung im Bereich des Modellperimeters (Rasterdatensatz R_{norm} von MeteoSchweiz mit einer Auflösung von 1,5 km respektive Hydrologischer Atlas der Schweiz mit einer Auflösung von 1 km).

Auch die Wasserbilanz kann für eine Schätzung der Grundwasserneubildung herangezogen werden, unter Berücksichtigung des Niederschlags, der Evaporation und des oberflächlichen Abflusses (ohne Speicheränderung wie Eis oder Schnee). In die Berechnung geht die Evaporation mit 370 mm a^{-1} ein (basierend auf den mittleren jährlichen Verdunstungshöhen 1973 bis 1992, Hydrologischer Atlas der Schweiz). Werte für Transpiration und Oberflächenabfluss sind direkt nicht verfügbar. Allerdings existieren Werte aus der Literatur bzw. Wasserbilanzen, welche hier als Anhaltspunkte verwendet werden können. Die Transpiration im alpinen Raum wird von Mastrotheodoros et al. (2020) mit 3 bis 4 % vom Jahresniederschlag angegeben (ca. 66 mm a^{-1}), während für den Oberflächenabfluss grob Werte um $1'000 \text{ mm a}^{-1}$ angenommen werden können (Schädler (2014)). Mit der Abschätzung der Wasserbilanz des Einzugsgebiets resultiert eine Grundwasserneubildung von $7'871 \text{ l s}^{-1}$, welche sehr gut mit der mit dem 3D-THM simulierten Grundwasserneubildung übereinstimmt.

Mit der mittleren Höhe für das Gebiet der Grundwasserneubildung (für das von der Bohrung 10-BR02 geförderten Wassers) von ca. $3'300 \text{ m ü.M.}$ und einer aus vorausgehenden Untersuchungen abgeleiteten Aufenthaltszeit des Grundwassers vom Ort der Grundwasserneubildung bis zur Bohrung von ca. 30 ka stellt sich, v.a. auch aufgrund von Mischungsprozessen, die Frage in wie weit die simulierten Verweilzeiten im Untergrund realistisch sind. Für die mittlere Höhe von Lavey-les-Bains and Saint-Gervais-les-Bains geht Sonney (2010a) von einer mittleren Höhe der Grundwasserneubildung von ca. $1'700$ bis $2'100 \text{ m ü.M.}$ aus. Im Rahmen des vom BFE unterstützten Geotex Rhone Projekts¹⁴ wurde im März 2023 eine Wasserprobe von Brigerbad auf stabile Wasserisotope, sowie ^3H und ^{14}C untersucht. Die Auswertung ist noch nicht abgeschlossen, aber basierend auf den stabilen Wasserisotopen (d^{18}O : -14.69 ‰ bzw. d^2H : -108.7 ‰) würde die mittlere Höhe auf über $2'000 \text{ m ü.M.}$ liegen. Die Aufenthaltszeiten werden auf mehrere $1'000$ Jahre, möglicherweise mehr als 10 ka geschätzt. Die Angaben werden unter Vorbehalt genannt, da die Probe einen relativ hohen Anteil einer lokalen, kalten Grundwasserkomponente enthält und stark von mikrobiellen Aktivitäten beeinflusst ist¹⁵. Die Vergleichsgrößen (mittlere Höhe der Grundwasserneubildung und Aufenthaltszeiten) zeigen, dass die mit dem 3D-THM berechneten Aufenthaltszeiten vergleichsweise gross sind. Es ist aber zu berücksichtigen, dass die aus Wasserisotopen abgeleiteten Aufenthaltszeiten und mittleren Höhen der Grundwasserneubildung durch oberflächennähere Grundwasserkomponenten «kontaminiert» sind.

¹⁴ BFE-Projekt SI/502523 «Geotex Rhône – Geothermische Exploration im inneralpinen Raum mittels Play Fairway Analyse (PFA) - Beispiel Rhonetal»

¹⁵ Mitteilung per Email von Christoph Wanner; 26.08.2024

9 Ergebnisse

Mit Hilfe des kalibrierten 3D-THM ist es möglich den hydraulischen und thermischen Ist-Zustand einschliesslich Grundwasserzirkulation, Temperaturverteilung, thermische Potenziale und Peclet Zahl (Verhältnis von advektivem zu konduktivem thermischem Transport; Epting et al. (2017)), aber auch Szenarien wie gegenseitige Beeinflussung zweier Geothermie-Bohrungen zu evaluieren.

9.1 Grundwasserzirkulation

Entsprechend Tóth (2009) fungiert im regionalen Massstab die Topographie als Motor für die grossräumige Grundwasserzirkulation. Neben der Topographie wird die Grundwasserzirkulation durch die Abfolge verschiedener hydrogeologischer Einheiten mit unterschiedlichen hydraulischen und thermischen Eigenschaften zusätzlich beeinflusst.

9.1.1 3D Grundwasserzirkulation

Um die Grundwasserzirkulation visualisieren zu können wurden ausgehend von Bohrung 10-BR02 Fließlinien (particle tracking) bis zur oberen Begrenzung (Bereich der Grundwasserneubildung) berechnet und dargestellt (Abb. 49).

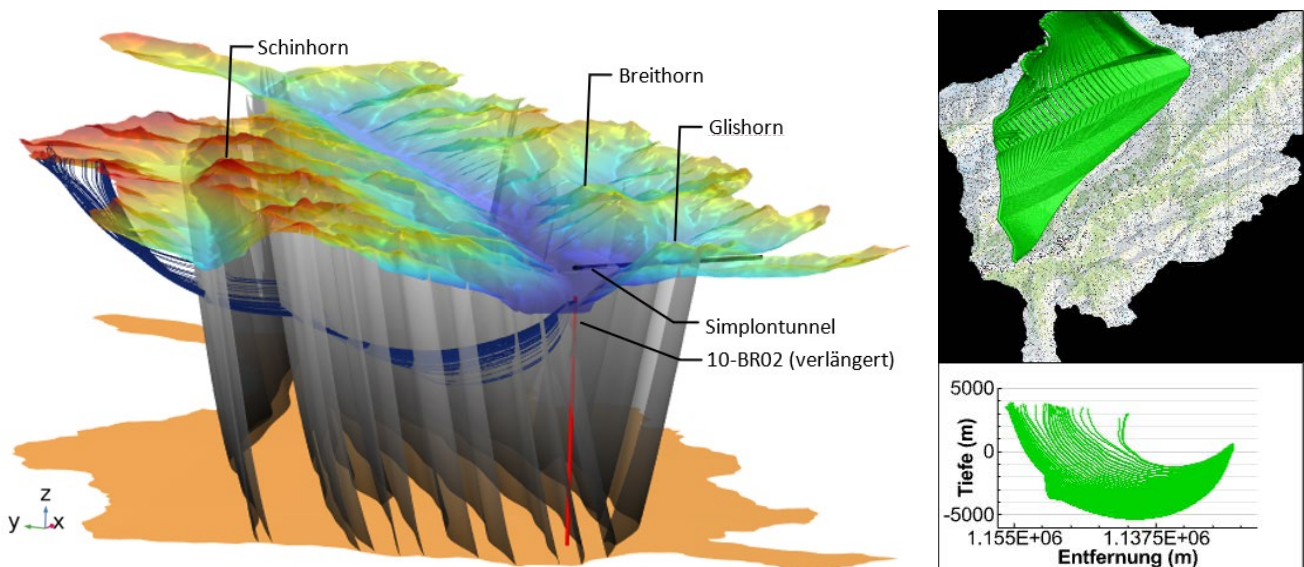


Abb. 41: Von der Bohrung 10-BR02 ausgehend simulierte Fließlinien. Links: Blick von Westen in das obere Rhonetal. Fließlinien von der Bohrung bis zum Bereich der Grundwasserneubildung (Topographie: Farbübergang blau bis rot, untere Modellbegrenzung: orange, Bruchsysteme: grau). Rechts oben: Aufsicht projizierter Fließlinien (grün). Rechts unten: Projektion Fließlinien auf Tiefenprofil (grün).

Die Abbildung zeigt, wie die Fließlinien aus Bereichen der Grundwasserneubildung, die v.a. gegen Norden im Bereich des Aar-Massifs stattfindet, von über 3'000 m ü.M. auf bis zu -5'000 m ü.M. absinken um schliesslich bei der Bohrung 10-BR02 zu enden. Die berechneten Aufenthaltszeiten liegen bei ca. 30 ka, während die Temperatur in -5'000 m ü.M. bei ca. 165 °C liegt (Kapitel 9.5).

In Abb. 42 wurden die Fließlinien ausgehend von der Topographie über den gesamten Modellperimeter berechnet. Die Fließlinien welche tiefe Bereiche durchströmen beginnen in hoch gelegenen Regionen und akkumulieren in tieferen Talbereichen. Teilweise ist auch ein Zufluss Richtung Bohrung 10-BR02 von der linken Rhone-Seite zu erkennen.

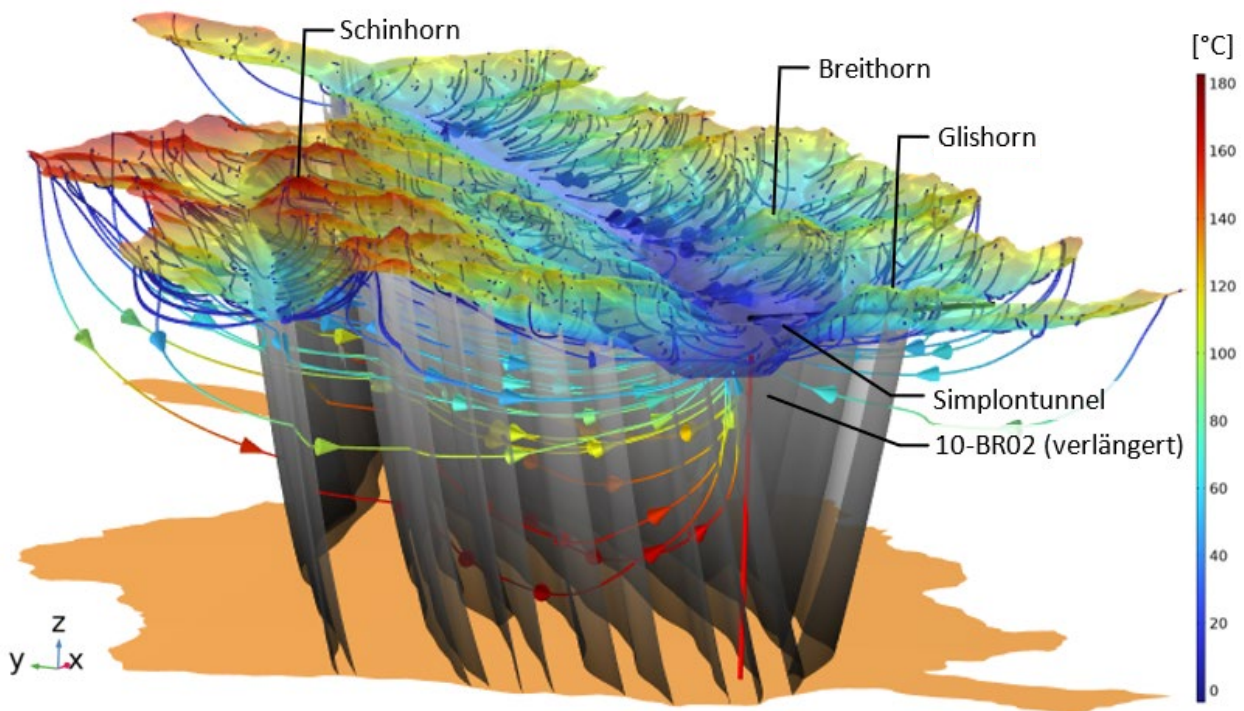


Abb. 42: Grundwasserzirkulation bei gleichmässiger Verteilung der Partikel über die Topographie (Topographie: Farbübergang blau bis rot, untere Modellbegrenzung: orange, Bruchsysteme: grau, 10-BR02: rot, Simplontunnel; dunkelblau). Blick von Westen in das obere Rhonetal. Die Fließlinien sind entsprechend ihrer tiefenabhängigen Temperatur eingefärbt.

9.1.2 2D Profilschnitte Hydraulik und Grundwasserzirkulation

Profilschnitte durch das 3D-THM und die Bohrung 10-BR02 verdeutlichen den Einfluss der Topographie auf den (Tiefen-)Grundwasserspiegel (Abb. 43). Während das Felsgrundwasser i.A. parallel zur Topographie verläuft, erreicht insbesondere in Talregionen der Grundwasserspiegel die Geländeoberfläche, bzw. liegt über dieser (artesische Grundwasserverhältnisse) wie beispielsweise im Toce- oder Lonza- und Rhonetal bei Brig. Artesische Grundwasserverhältnisse werden auch durch die gemessene Hydraulik in der Bohrung 10-BR02 in Brigerbäd bestätigt.

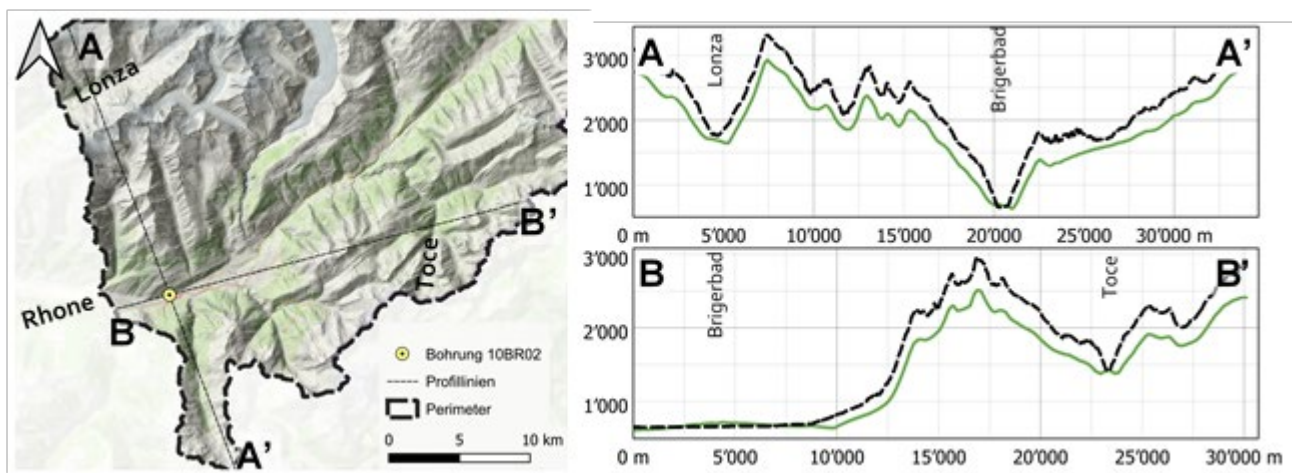


Abb. 43: Vergleich von simulierten Grundwasserhöhen mit der Topographie. Die schwarze Linie zeigt den Verlauf der Topographie, während die grüne Linie das Druckpotenzial des (Tiefen-)Grundwassers darstellt. In Talbereichen können teilweise artesische Grundwasserverhältnisse beobachtet werden.

Betrachtet man die simulierte Darcy-Geschwindigkeitsverteilung mit der Darstellung der Fließlinien (Abb. 44), so kann zum einem beobachtet werden, dass die Darcy-Geschwindigkeiten mit der Tiefe abnehmen und generell gegen Norden höher sind. Zum anderen ist auch der Einfluss der Bruchstrukturen, sowohl in der Darcy-Geschwindigkeitsverteilung als auch im Verlauf der Fließlinien, gut zu erkennen. Weiterhin lassen sich Bereiche wie im Südosten des Modellperimeters erkennen, in denen die Fließlinien auch in Richtung der Bohrung 10-BR02 verlaufen. Die Grundwasserfließgeschwindigkeit und der Grundwasserdurchfluss sind hier jedoch so gering, dass das Grundwasser aus diesen Bereichen nur einen geringfügigen Anteil an der simulierten Grundwasserförderung in der Bohrung 10-BR02 ausmachen. Im Talbereich bei Brigerbäd kann ein grossräumiges Aufströmen des (Tiefen-)Grundwassers beobachtet werden, wobei auch hier die geringeren hydraulischen Durchlässigkeiten östlich der Rhone mit zunehmender Tiefe der Grund dafür sind,

dass (Tiefen-)Grundwasser aus diesen Bereichen einen verhältnismässig geringeren Anteil an der simulierten Grundwasserförderung in der Bohrung 10-BR02 ausmachen.

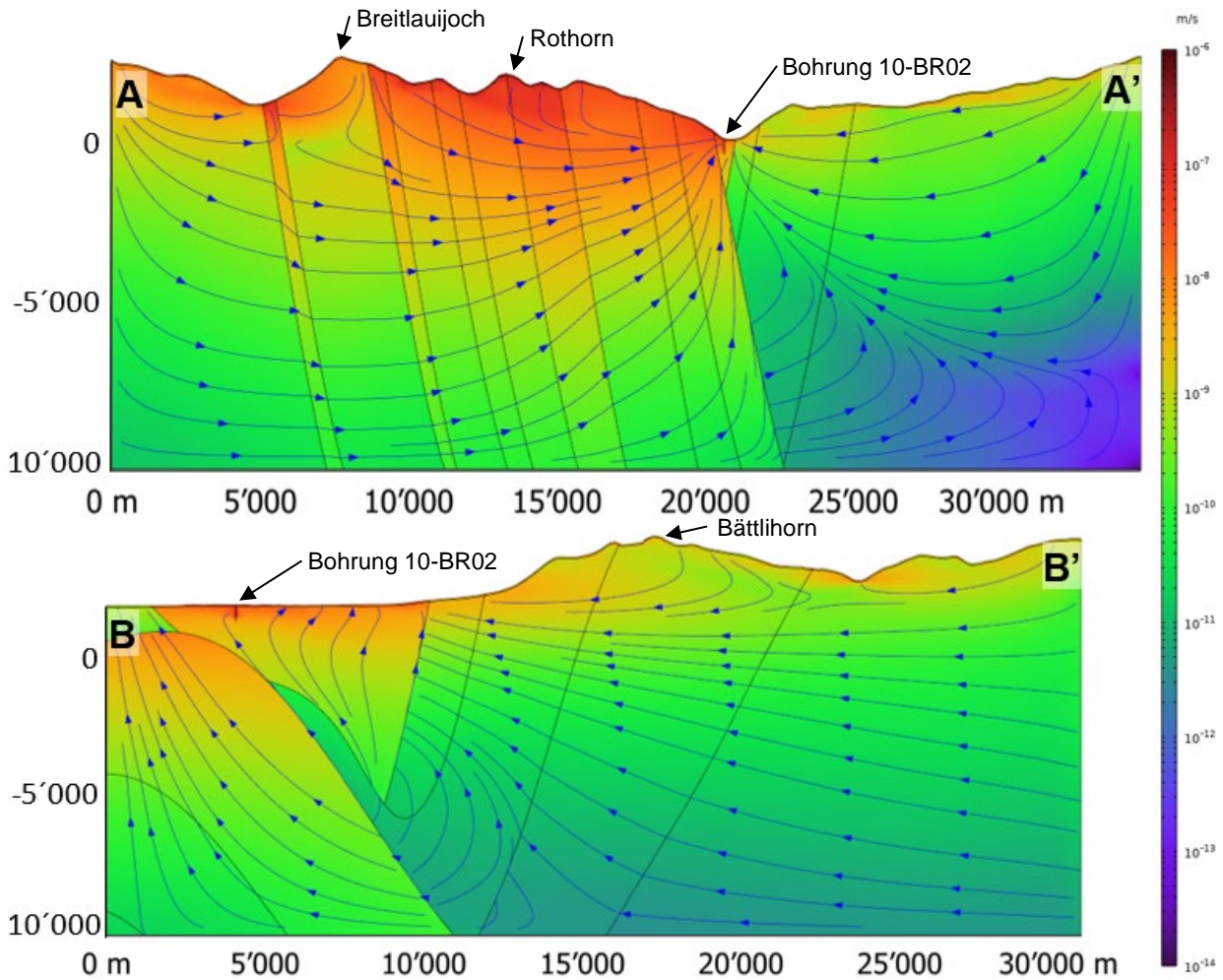


Abb. 44: Fliesslinien (blau) entlang der Profilschnitte A-A' und B-B' (Lage siehe Abb. 43). Farbige dargestellt: Darcy-Geschwindigkeitsverteilung.

In Abb. 45 und Abb. 46 wird der vertikale Grundwasserfluss (Up- und Downwelling) normiert quantifiziert. Den Darstellungen kann entnommen werden, dass im Rhonetal vor allem ein Grundwasserfluss von unten nach oben (Upwelling, einschliesslich Temperaturprägung aus tieferen Bereichen) und gegen Norden vor allem ein Grundwasserfluss von oben nach unten (Downwelling, einschliesslich Temperaturprägung aus oberflächennäheren Bereichen) stattfindet.

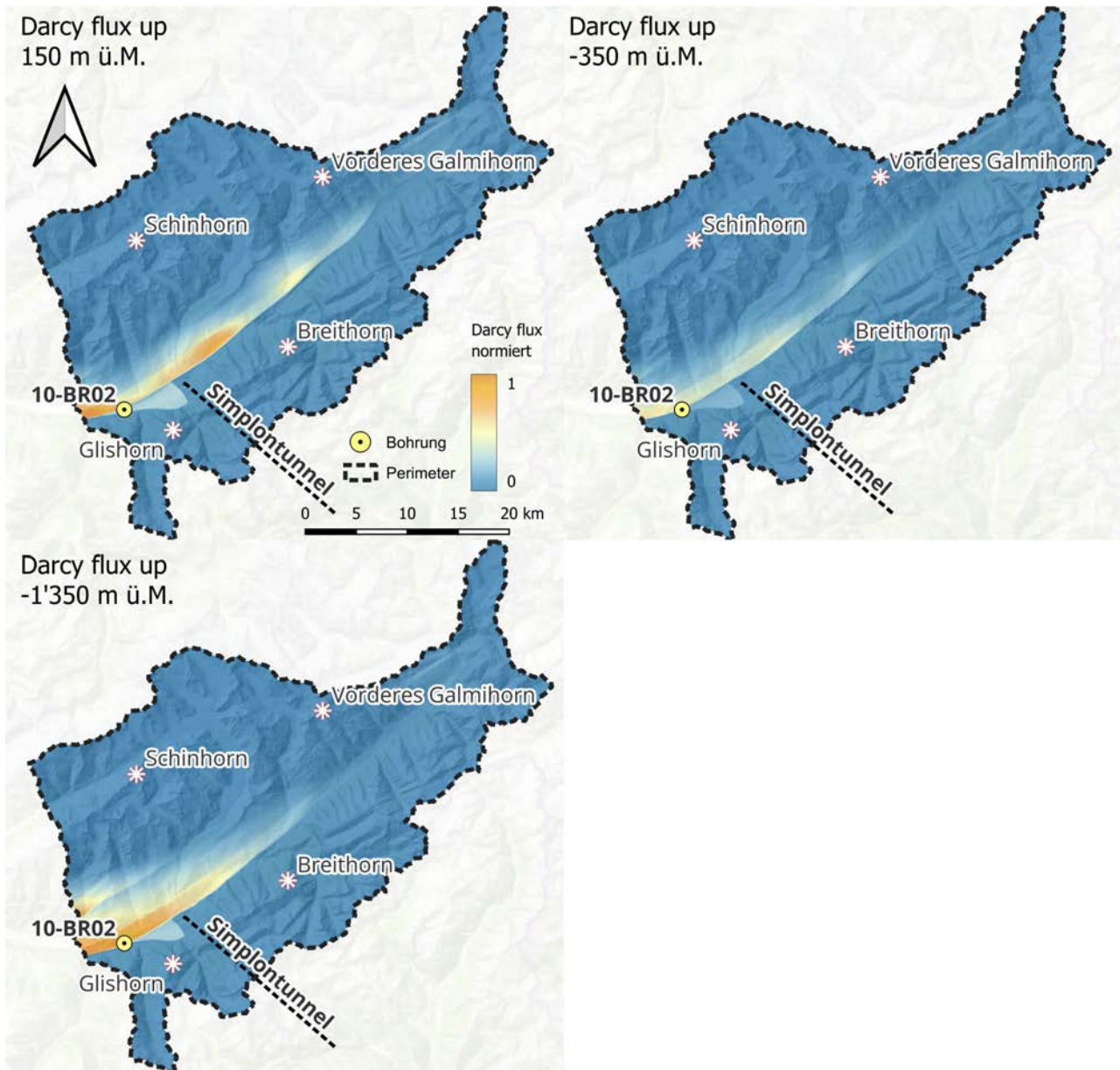
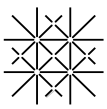


Abb. 45: Normalisierter vertikaler Grundwasserdurchfluss (Darcy flux) von unten nach oben.

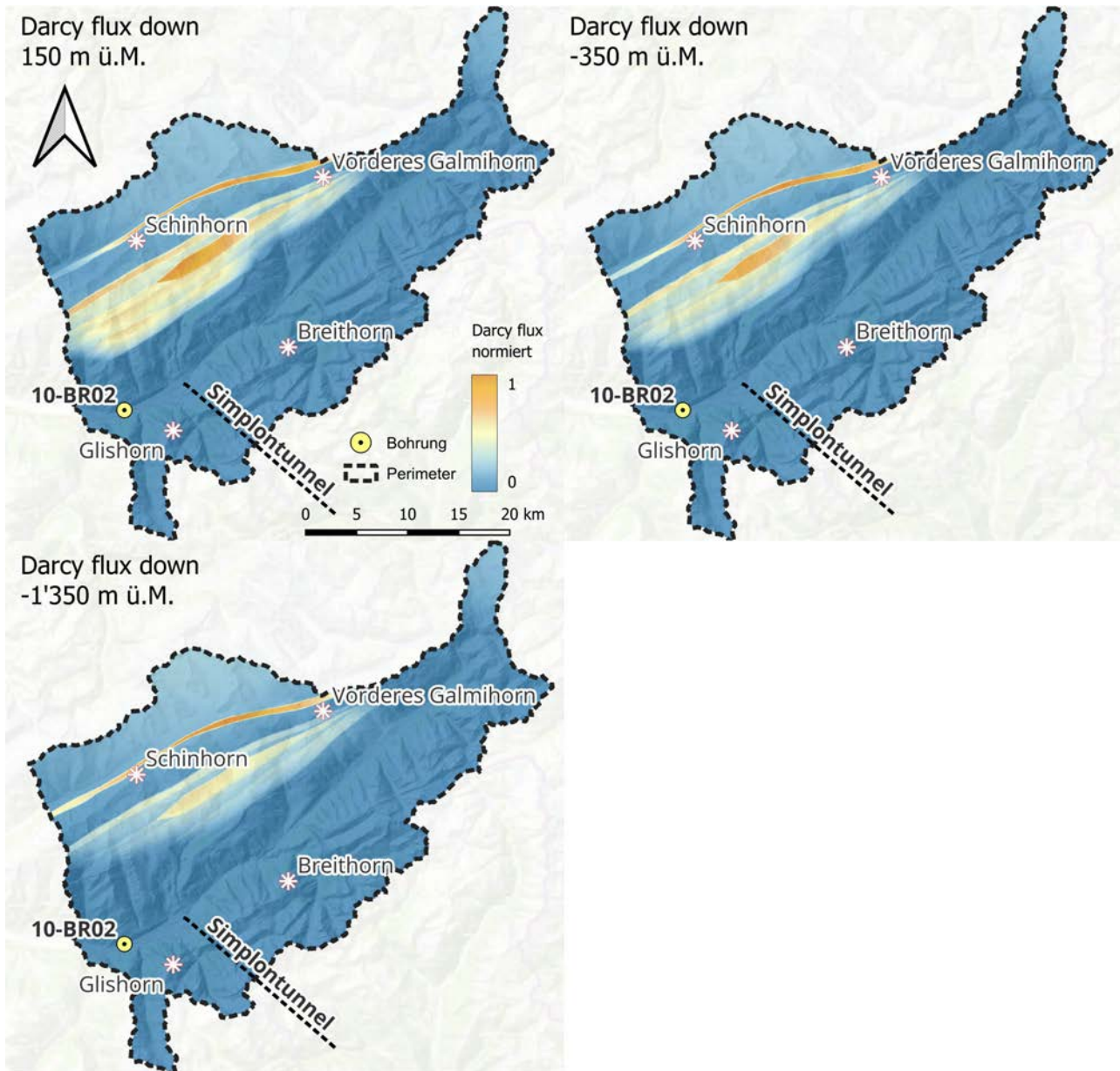
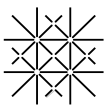


Abb. 46: Normalisierter vertikaler Grundwasserdurchfluss (Darcy flux) von oben nach unten.

9.2 Grundwasserneubildung

In der gewählten Modellimplementierung kann die Grundwasserneubildung grundsätzlich über die gesamte Oberfläche des Modellperimeters stattfinden. Aufgrund der Tatsache, dass als einzige Randbedingung für die Hydraulik die Topographie (DHM200 – 20 m) als «head»-Randbedingung definiert wurde (vergleiche [Kapitel 6.3.1 & 8.2](#)), sind sowohl quartäre Einflüsse (z.B. erhöhte Flusswasser-Infiltration) wie auch seitliche Grundwasserzuflüsse nicht berücksichtigt.

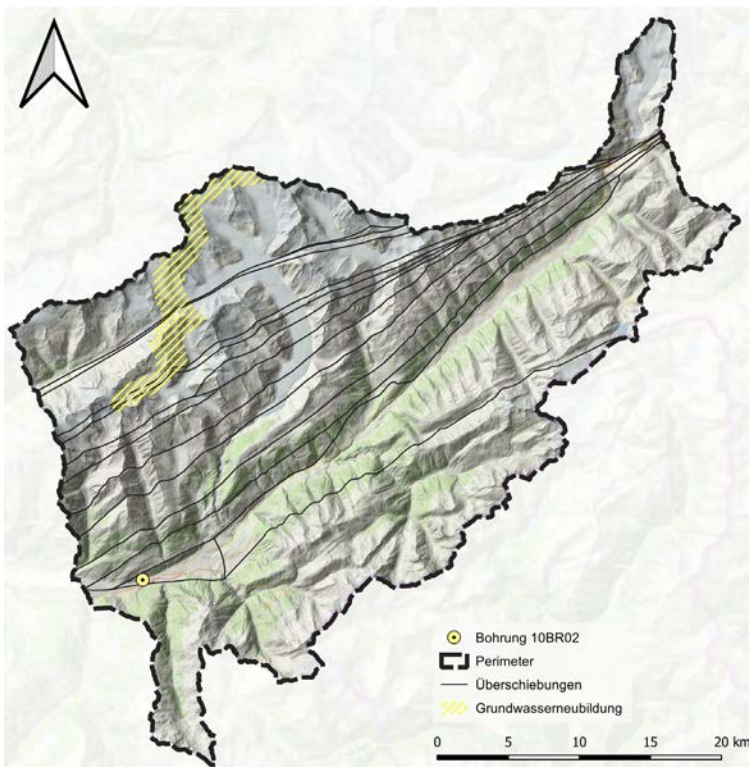
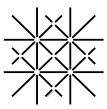


Abb. 47: Berechneter Bereich im welchem die wesentliche Grundwasserneubildung stattfindet.

Um die Frage beantworten zu können, woher das geförderte Grundwasser der Bohrung 10-BR02 stammt wurde die «reverse particle-tracking» Methode angewandt. Ausgehend von den rückwärts von der Bohrung 10-BR02 berechneten Fliesslinien wurden die Bereiche des Modells kartiert, von welchen die Fliesslinien starten, und als Bereiche der wesentlichen Grundwasserneubildung für das Tiefengrundwasser bei Brigbad betrachtet ([Abb. 47](#)). Die Abgrenzung des Modellperimeter basiert auf dem oberirdischen Einzugsgebiet, welches jedoch nicht unbedingt dem unterirdischen Einzugsgebiet entspricht ([Kapitel 4](#)). Es ist gut möglich, dass bei entsprechend einfallenden geologischen Strukturen im Bereich des Modellrandes auch



ausserhalb des oberirdischen Einzugsgebiet Grundwasser dem Modellperimeter zu- oder wegfließen kann. Die mittlere Höhe des Bereichs im welchem die wesentliche Grundwasserneubildung stattfindet, beträgt ca. 3'300 m ü.M., die Fläche umfasst ca. 39 km² (Abb. 47).

9.3 Grundwasserabsenkung

Um die Auswirkung einer Grundwasserentnahme im Bereich der Bohrung 10-BR02 abschätzen zu können wurden verschiedene Entnahmemengen simuliert und die hydraulische horizontale und vertikale Reaktion im Untergrund (Absenktrichter) ausgewertet. Basis für die Werte der Entnahmemengen waren die Angaben des Pumpversuchs in unterschiedlichen Tiefen von Solexperts (Tab. 23). Hier wurde in mehreren Intervallen mit unterschiedlichen Entnahmemengen gefördert und dabei Temperatur und Absenkung gemessen. Aufgrund der homogenen Matrix des Modells (auch wenn die k-Werte und die thermische Leitfähigkeit mit der Tiefe ändern, wurden weder das Quartär noch unterschiedlichen Lithologien berücksichtigt) ist es für die Modellrechnungen nicht entscheidend, in welcher Tiefe das Grundwasser entnommen wird. Um ein «Tro-ckenfallen» numerisch zu verhindern, wurde die Tiefenangaben des Intervalls 5 der Tab. 23 übernommen. Insgesamt wurden 4 Zustände berechnet:

- ohne Entnahme
- Entnahme von 2.5 l s⁻¹
- Entnahme von 5.0 l s⁻¹
- Entnahme von 20 l s⁻¹

Tab. 23: Gemessene Pumpraten, Absenkbeträge und Temperaturen (aus Solexperts (2010)).

Intervall	von.. ..bis [m u.OKT]	Länge [m]	Pumprate bei max. Absenkung [l/s]	Δh im Inter- vall [m]	Δh in der Inox- Verrohrung [m]	Temperatur im Inter- vall [°C]	Temperatur Brunnenkopf / Absetzbecken [°C]
i1	382.0 - 499.3	117.3	0.05	85.6	85.2	54.2	35.2 / 34.6
i2	281.0 - 318.1	37.1	1.82	80.4	87.0	47.4	41.8 / 42.9
i3	200.0 - 237.1	37.1	4.48	58.4	87.7	40.3	37.8 / 38.0
i4	162.9 - 200.0	37.1	3.50	31.1	49.6	37.4	34.7 / 35.1
i5	162.9 - 499.3	336.4	5.00	16.0	52.0	40.15	37.3 / 37.4

Anschliessend wurden die horizontale Ausdehnung sowie auch die Tiefe des Absenktrichters mit der Variante ohne Grundwasserentnahme verglichen. Hierfür wurden entlang der Profillinie vier Messpunkte betrachtet, an welchen jeweils die Absenkung für die unterschiedlichen Entnahmemengen abgegriffen wurde. Messpunkt M1 liegt knapp neben der Bohrung 10-BR02, um numerische Randeefekte entlang des Brunnens

zu vermeiden. In 100 m Entfernung von der Bohrung befindet sich M₂, während M₃ und M₄ in 500 m respektive 2 km Entfernung zur Bohrung gesetzt wurden. In Tab. 24 sind die Differenzen zur Variante ohne Grundwasserentnahme dargestellt. Zudem sind in

Abb. 48 bis Abb. 51 die Isohypsen des hydraulischen Drucks und Schnitte entlang der beiden Profillinien dargestellt. Bei allen Szenarien wurde der «hydraulic head» in einer Tiefe von auf 600 m ü.M. exportiert (ca. 50 m unter der Topographie am Standort der Bohrung 10-BR02).

Eine weitere Auswertung der unterschiedlichen Entnahmemengen wurde für die Temperaturverteilung entlang der Bohrung 10-BR02 durchgeführt. Hierfür wurde die Bohrung virtuell auf 2'000 m ü.M. verlängert, um abschätzen zu können, ob auch tiefere Bereiche Temperaturänderungen aufgrund ändernder Entnahmemengen unterliegen (Tab. 25).

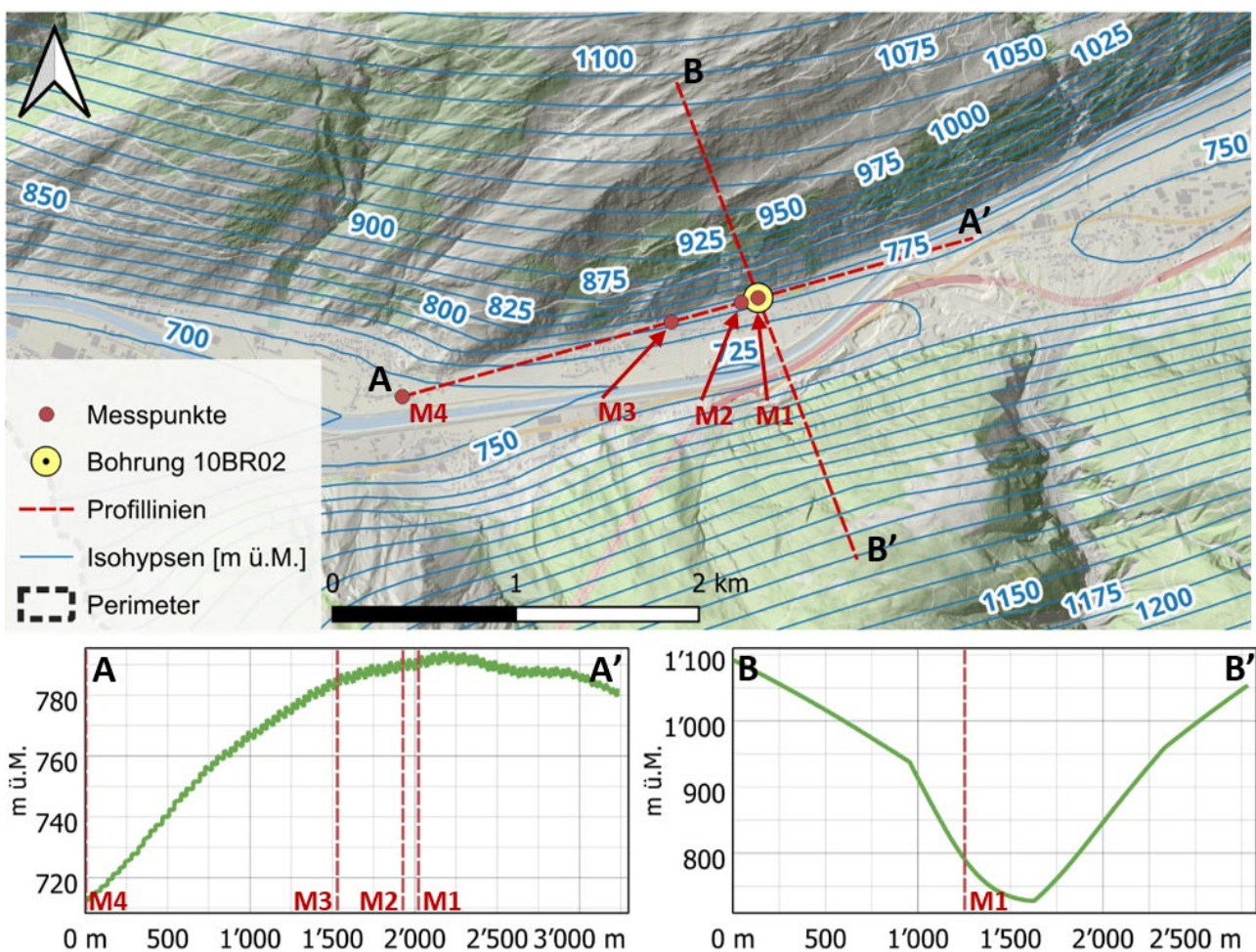


Abb. 48: Oben: Darstellung der Isohypsen ohne Grundwasserentnahme in Bohrung 10-BR02. Unten: Profile mit hydraulischer Druckverteilung auf 600 m ü.M.

Im Bereich Brigerbad werden im gesamten Talbereich artesische Grundwasserverhältnisse berechnet¹⁶. Bei der Interpretation der Profile und der Isohypsen ist jedoch zu beachten, dass die virtuelle Fläche, von welcher die hydraulische Druckverteilung abgegriffen wurde, ca. 50 m tiefer liegt als der Talboden bei der Bohrung 10-BR02. In Abb. 48 wird die Situation ohne Grundwasserentnahme dargestellt. Dies ist die Referenz-Situation für die folgenden Darstellungen, welche mit Entnahmemengen von 2,5, 5 und 20 l s⁻¹ berechnet wurden.

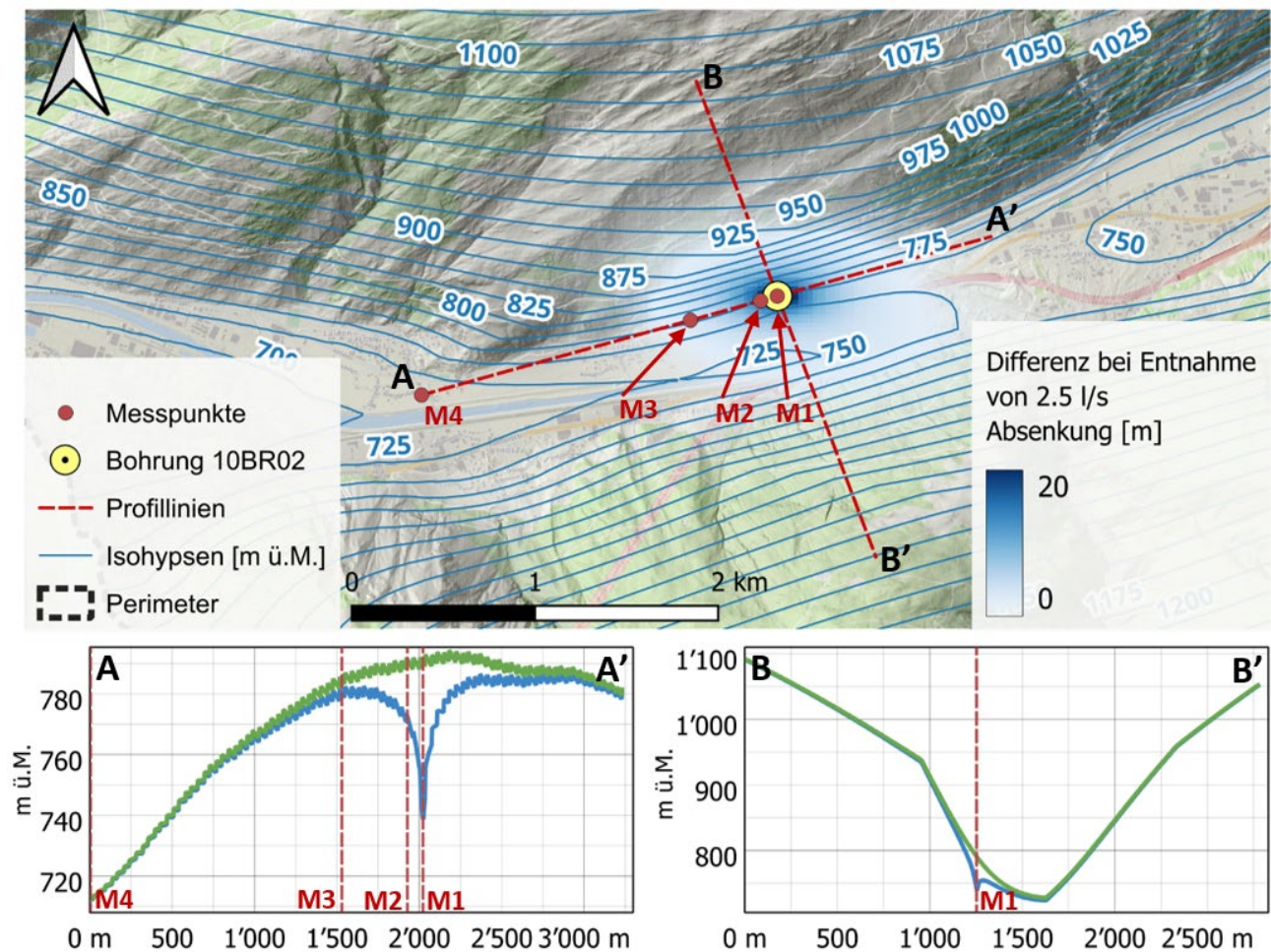


Abb. 49: Oben: Darstellung der Isohypsen bei einer Grundwasserentnahme von 2.5 l s⁻¹. Unten: Profile mit hydraulischer Druckverteilung auf 600 m ü.M. ohne (grün) und mit Absenktrichter (blau).

¹⁶ Auch bei der Bohrung der ETHZ-SED auf dem Lonzaareal in Visp im Jahr 2017 musste wegen artesischer Grundwasserverhältnisse in einer Tiefe von ca. 100 m aufgrund stark ansteigenden hydraulischer Drücke auf dem Bohrkopf die Bohrung abgebrochen werden. In Brigerbad liegt der Übergang Quartär/Fels zwar etwas weniger tief, jedoch ist der Fels sehr verwittert und dekomprimiert.

Bei einer geringen Grundwasserentnahme von 2.5 l s^{-1} entsteht bereits ein deutlicher Absenktrichter mit einer maximalen Absenkung von ca. 36 m. Die Entnahme ist noch in 2 km Entfernung wahrzunehmen, wenn auch nur noch mit einer Grundwasserabsenkung von 0.31 m. Während des Packer-Pumpversuchs von Sol-experts wurde in Intervall I₂ und I₄ mit Entnahmeraten von 1.8 respektive 3.5 l s^{-1} gefördert welche in einer Grundwasserabsenkung von 87 bzw. 50 m resultierte (vgl. Tab. 24).

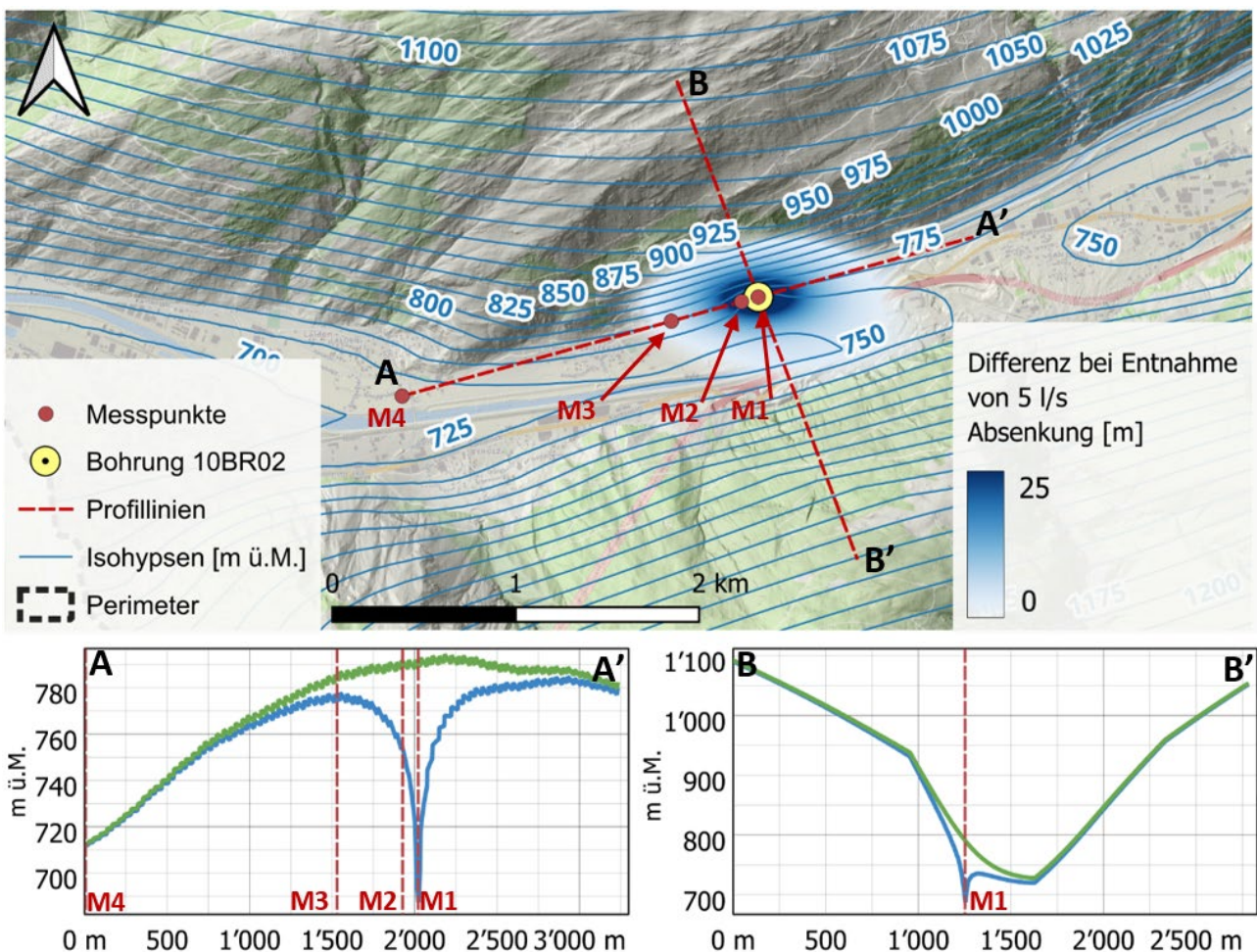


Abb. 50: Oben: Darstellung der Isohypsen bei einer Grundwasserentnahme von 5.0 l s^{-1} . Unten: Profile mit hydraulischer Druckverteilung auf 600 m ü.M. ohne (grün) und mit Absenktrichters (blau).

Bei einer Grundwasserentnahme von 5 l s^{-1} erhöht sich die Grundwasserabsenkung bereits auf knapp 73 m während in 2 km Entfernung die Druckhöhe um ca. 0.6 m reduziert wird (Tab. 24). Beim Vergleich mit den gemessenen Absenkungen während des Pumpversuchs, bei welchem in den Intervallen I₃ und I₅ mit 4.5 respektive 5.0 l s^{-1} gefördert wurde, werden unterschiedliche Absenkungen von 88 und 52 m erreicht. Solche Unterschiede sind mit unterschiedlichen Wasserzutritten bzw. Klüften im Bereich der Bohrung zu erklären,

können aber so vom Modell nicht nachgebildet werden. Gleichzeitig wird die Grössenordnung der Absenkung aber sehr gut ermittelt.

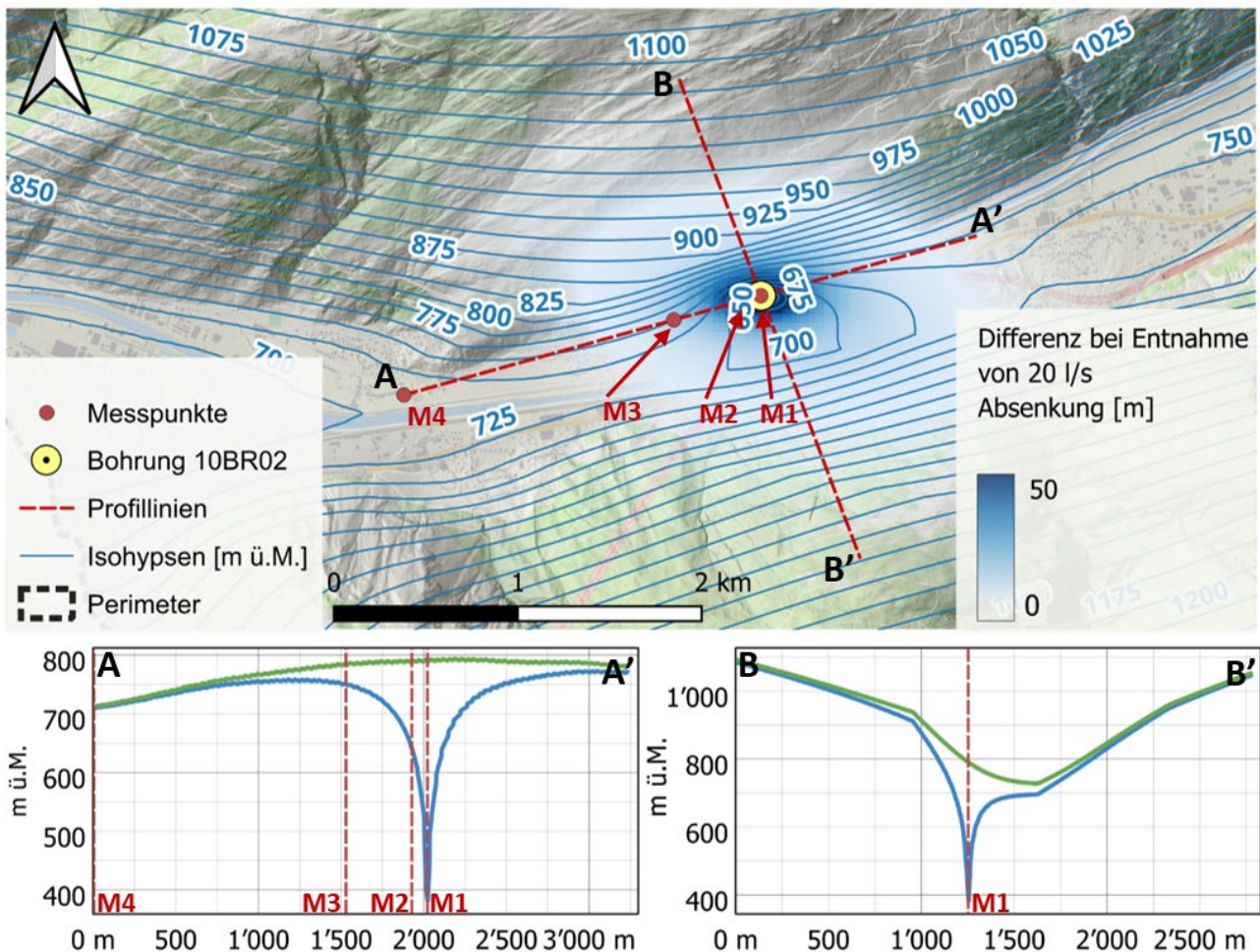
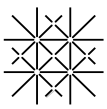


Abb. 51: Oben: Darstellung der Isohypsen bei einer Grundwasserentnahme von 20.0 l s^{-1} . Unten: Profile mit hydraulischer Druckverteilung auf 600 m ü.M. ohne (grün) und mit Absenktrichters (blau).

Bei einer deutlichen Erhöhung der Grundwasserentnahme auf 20 l s^{-1} erhöht sich die Grundwasserabsenkung auf ca. 290 m . Auch in einer Entfernung von 2 km ist noch eine Absenkung von ca. 36 m wahrzunehmen. Da 5 l s^{-1} die höchste Entnahmeleistung während des Pumpversuchs war, kann hier kein direkter Vergleich mit diesem durchgeführt werden. Aufgrund der guten Übereinstimmung mit Entnahmeraten von 2.5 und 5 l s^{-1} der berechneten und der gemessenen (Tab. 23) Werte, ist dieser Wert für höhere Entnahmeraten (hier 20 l s^{-1}) jedoch plausibel.

Die unterschiedlichen Grundwasserentnahmeraten haben zudem einen Einfluss auf die Grundwassertemperatur in Abhängigkeit der Tiefe. Bei einem Vergleich der Grundwasserentnahmen 2.5 , 5.0 und 20 l s^{-1} mit



der Modellvariante ohne Grundwasserentnahme zeigt sich eine Erhöhung der Grundwassertemperatur mit steigender Entnahmerate. Dies liegt darin begründet, dass bei höheren Grundwasserentnahmen verstärkt Grundwasser aus tieferen Bereichen gefördert wird. In Tab. 25 sind die Unterschiede farblich markiert, wobei der grösste Unterschied bei einer Entnahme von 20 l s^{-1} in einer Tiefe von 400 m (250 m ü.M.) erreicht wird.

Tab. 24: Absenkung (Differenz im Vergleich zur Situation ohne Entnahmen) aufgrund unterschiedlicher Grundwasserentnahmen im Zusammenhang mit zunehmender Entfernung zur Bohrung 10-BR02.

Messpunkte auf 600 m ü.M.	Entnahme [l s^{-1}]			
	0	2.5	5	20
	Hydraulic head [m ü.M.]	Differenzen [m]		
M1	786.3	36.4	72.8	291.4
M2	782.7	17.6	35.2	140.6
M3	769.1	4.0	8.1	31.2
M4	709.7	0.3	0.6	2.5

Messpunkte auf 200 m ü.M.	Entnahme [l s^{-1}]			
	0	2.5	5	20
	Hydraulic head [m ü.M.]	Differenzen [m]		
M1	1049.2	35.0	69.8	279.1
M2	1048.0	17.2	34.5	395.0
M3	1039.1	7.1	14.1	56.5
M4	992.8	1.5	3.0	12.1

Tab. 25: Auswertung der Temperaturen, einschliesslich Temperatur-Differenz im Vergleich zur Situation ohne Entnahmen, entlang der Bohrung 10-BR02 bei unterschiedlichen Entnahmemengen.

Tiefe am Standort 10-BR02 [m]	Entnahme [l s^{-1}]			
	0	2.5	5	20
	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	Differenzen in [$^{\circ}\text{C}$]		
200	38.4	0.3	0.5	1.0
400	50.7	0.4	0.8	2.6
600	59.9	0.3	0.6	2.0
800	67.6	0.2	0.4	1.3
1000	74.5	0.1	0.2	0.8
1200	80.7	0.1	0.2	0.5
1400	86.4	0.1	0.1	0.4
1600	91.8	0.0	0.1	0.3
1800	96.7	0.0	0.1	0.2
2000	101.4	0.0	0.0	0.2

9.4 Gegenseitige Beeinflussung zweier geothermischer Nutzungen

Die Frage, inwieweit eine oder mehrere zusätzliche geothermische Nutzungen bestehende Nutzungen beeinflussen, wird mit zunehmendem Nutzungsdruck immer wichtiger. Eine gute Möglichkeit, dies zu quantifizieren, ist die Integration einer neuen geothermischen Nutzung im Modell. Dies wurde exemplarisch mit einer (virtuellen) Bohrung mit 500 m Länge in einem Kilometer Entfernung westlich zu Bohrung 10-BR02 evaluiert. Bei einer Entnahme von jeweils 5 l s^{-1} in der Bohrung 10-BR02 und der virtuellen Bohrung wird im Folgenden analysiert ob sich die Grundwasserentnahmen gegenseitig beeinflussen (Abb. 52).

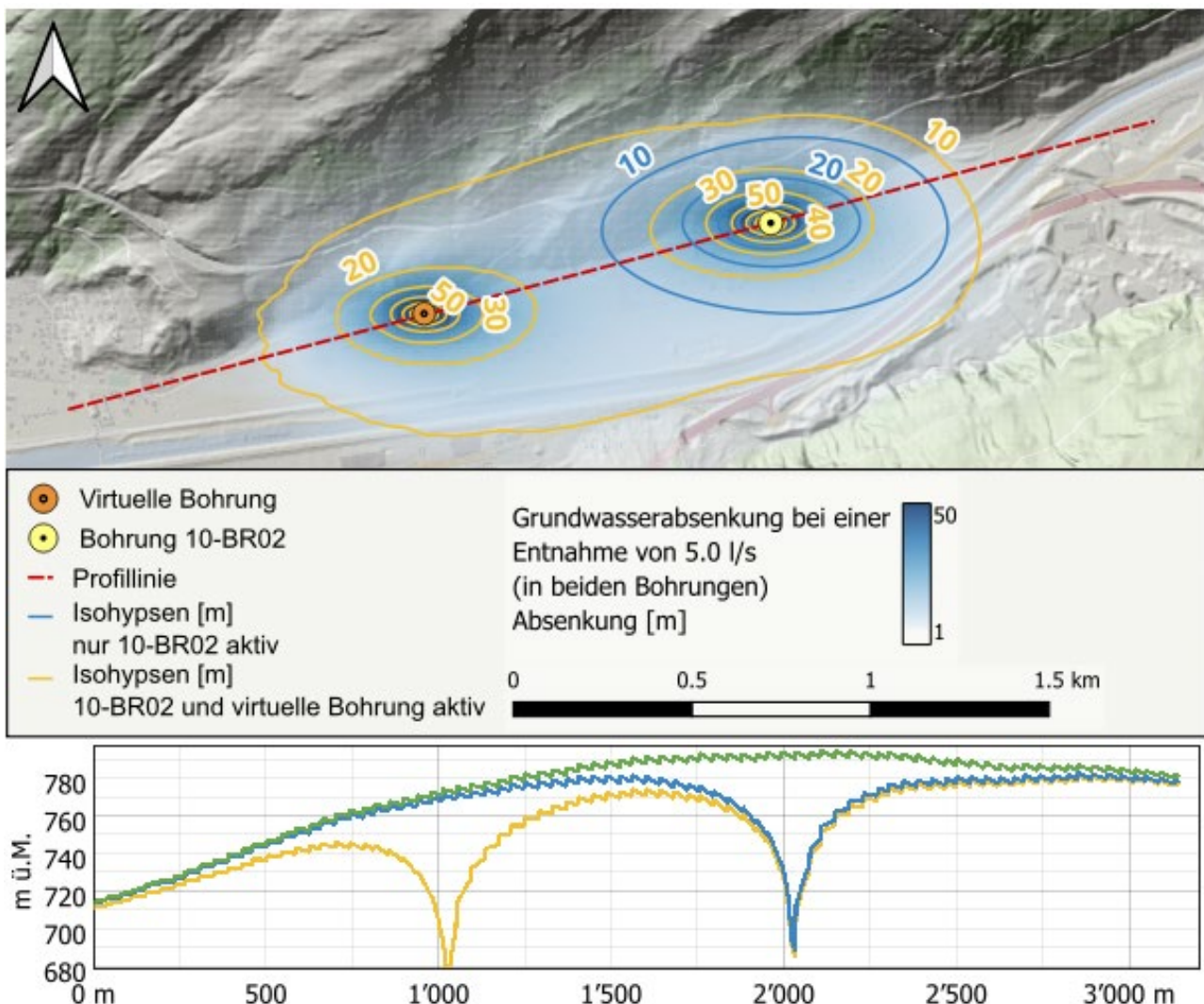


Abb. 52: Oben: Absenktrichter (Isohypsen der Absenkung in m) und gegenseitige Beeinflussung durch die zusätzliche Grundwasserentnahme in der virtuellen Bohrung. Unten: Profile mit hydraulischer Druckverteilung auf 600 m ü.M., die blau eingezeichneten Isohypsen zeigen die Situation, wenn nur aus der Bohrung 10-BR02 gefördert wird.

Die maximale Tiefe der Absenkung am Standort 10-BR02 wird mit zusätzlich ca. 3 m nur geringfügig tiefer (von 687 auf 684 m ü.M.). Beim Vergleich der Isohypsen ist gut zu sehen, dass sich bei Entnahme an beiden Standorten die Absenktrichter überlagern und die Entnahmebreite des Absenktrichters mit einem Durchmesser von insgesamt ca. 2'500 m deutlich grösser wird.

9.4.1 Vergleich unterschiedliche Entnahmetiefen

Um den Einfluss unterschiedlicher Bohrtiefen bzw. Tiefe der Grundwasserentnahme einer virtuellen Bohrung auf die bestehende Bohrung 10-BR02 aufzuzeigen, wurden zwei zusätzliche Modellberechnungen mit unterschiedlichen Filtertiefen in der virtuellen Bohrung durchgeführt. Die obere Filterstrecke erstreckt sich von 600 bis 400 m ü.M., während die untere Filterstrecke 700 m tiefer von -100 bis -300 m ü.M. integriert wurde (Abb. 53). Die Entnahmeraten betragen sowohl in der Bohrung 10-BR02 als auch in der virtuellen Bohrung, wie schon in der vorherigen Berechnung (Kapitel 9.4), jeweils 5 l s^{-1} . Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass bei einer tiefen Entnahme aus der virtuellen Bohrung kein Einfluss auf die Grundwasserentnahme der Bohrung 10-BR02 mehr zu beobachten ist, während bei der Entnahme im oberen Bereich der in Kapitel 9.4 beschriebene Absenktrichter erfasst wird (Abb. 54).

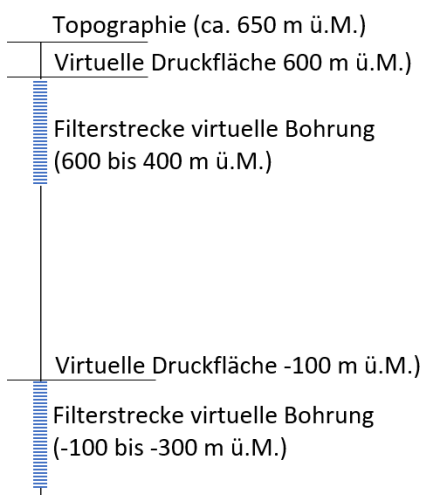


Abb. 53: Schema der integrierten virtuellen Bohrung mit den jeweiligen Filterstrecken und den virtuellen Druckflächen.

Wird in beiden Bohrungen jeweils im oberen Bereich Grundwasser entnommen hat dies dennoch (geringe) Auswirkungen auf den tieferen Bereich (virtuelle Druckfläche auf -100 m ü.M.). Auch wenn kein Absenktrichter zu beobachten ist, resultiert eine (geringe) grossräumige Absenkung des Druckniveaus (schwarze Linie im Vergleich zur grünen Linie der unteren Abbildung (Abb. 54)). Damit wird deutlich, dass der Einfluss

einer zusätzlichen Bohrung nicht nur von der horizontalen Lage, sondern ebenso von der jeweiligen Entnahmetiefe und auch von der Entnahmemenge abhängig ist.

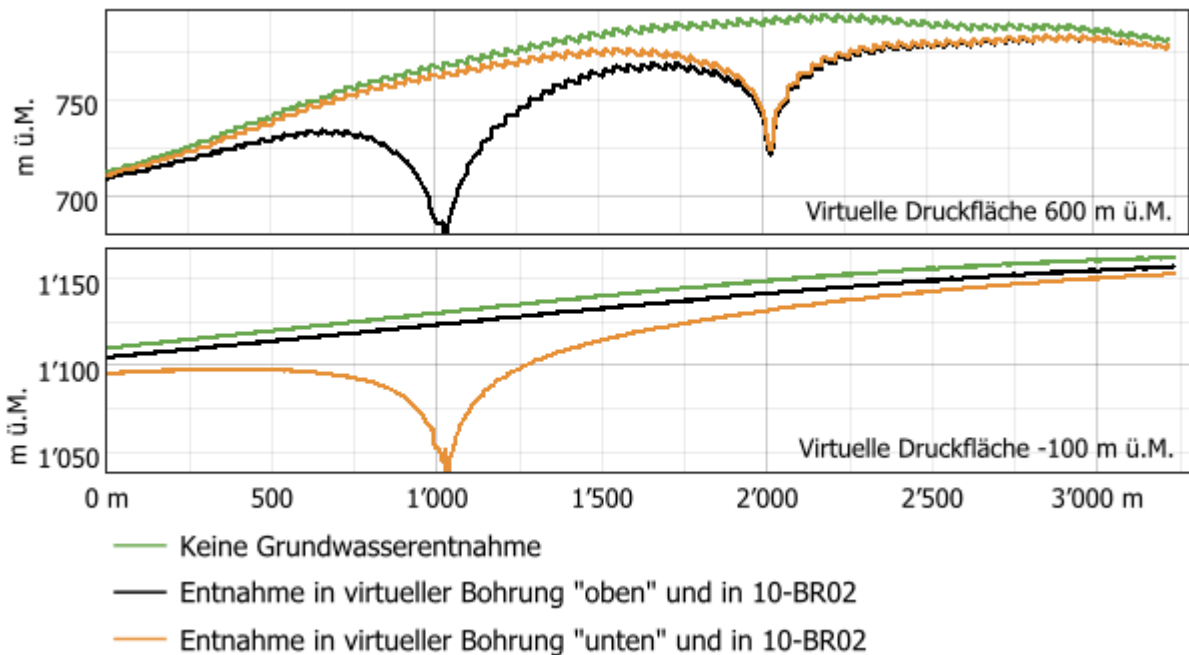


Abb. 54: Vergleich von unterschiedlichen Entnahmetiefen (Filterstrecken) der virtuellen Bohrung mit der Bohrung 10-BR02 bezogen auf zwei verschiedene Tiefen (virtuelle Druckflächen).

9.5 Temperaturverteilung

In [Abb. 55](#) sind die simulierten Isoflächen für Temperaturen von 50 bis 300 °C in unterschiedlichen Tiefen dargestellt. Deutlich ist der Einfluss der Topographie zu erkennen, insbesondere für die 100 °C-Isofläche.

In [Abb. 56](#) wird die Temperaturverteilung in unterschiedlichen Tiefen (150, -350, -1'350 m ü.M.) dargestellt, auch hier sind gut die erhöhten Temperaturen im Talbereich zu erkennen. Aufgrund der Temperaturverteilung allein kann jedoch noch kein thermisches Potenzial abgeleitet werden, da hierfür auch die Ergiebigkeit des Aquifers (Fündigkeit) mit einbezogen werden muss. Dieses wird in [Kapitel 9.6](#) näher betrachtet.

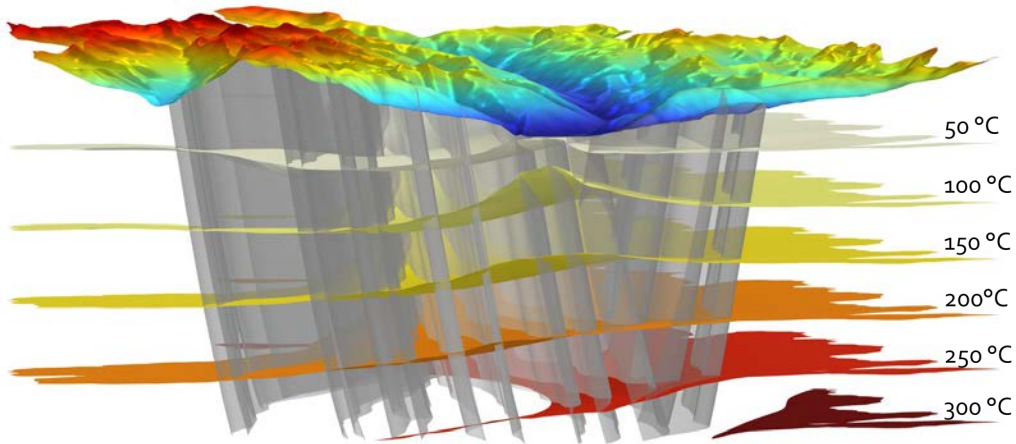
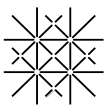


Abb. 55: Flächen gleicher Temperatur. Blick von Westen in das obere Rhonetal.

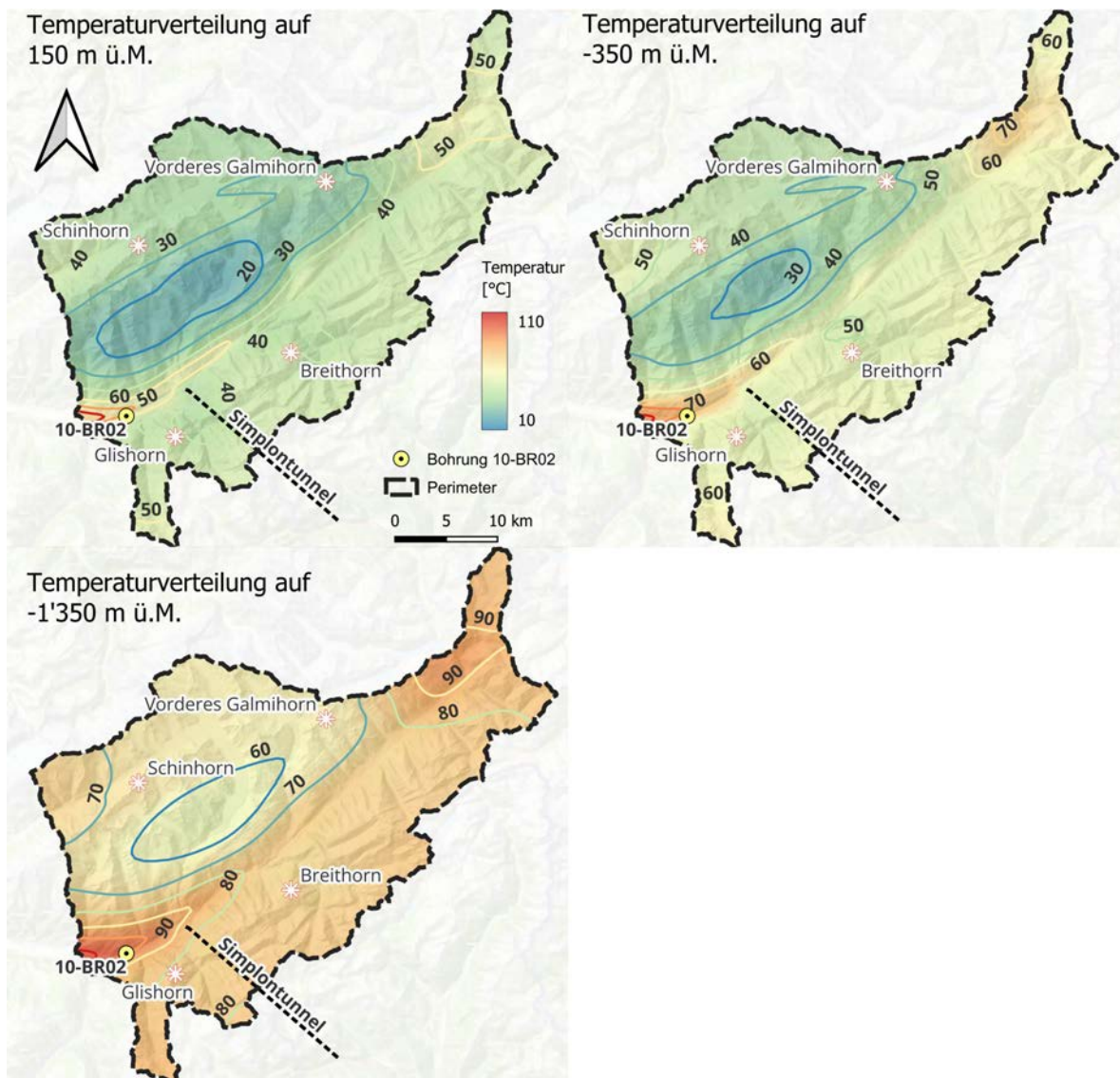


Abb. 56: Temperaturverteilung auf 150, -350 und -1'350 m ü.M.

9.6 Thermisches Potenzial

Eine detaillierte Quantifizierung des thermischen Potenzials im Bereich des Modellperimeters ist aufgrund der Unsicherheiten, die ein numerisches Modell mit limitierter Datengrundlage immer mit sich bringt und hier insbesondere im [Kapitel 7](#) aufgezeigt wurde, schwierig. Im Rahmen dieser Modellstudie ist eine Ableitung absoluter Energiemengen nicht sinnvoll. Deshalb wird der vertikale Wärmefluss («heat flux») normiert dargestellt ([Abb. 57](#)). Dies ermöglicht eine erste qualitative Einschätzung, in welchen Bereichen und Tiefen ein grösseres oder geringeres thermisches Potenzial zu erwarten ist, welches dann in einer Explorationsphase bestätigt werden kann.

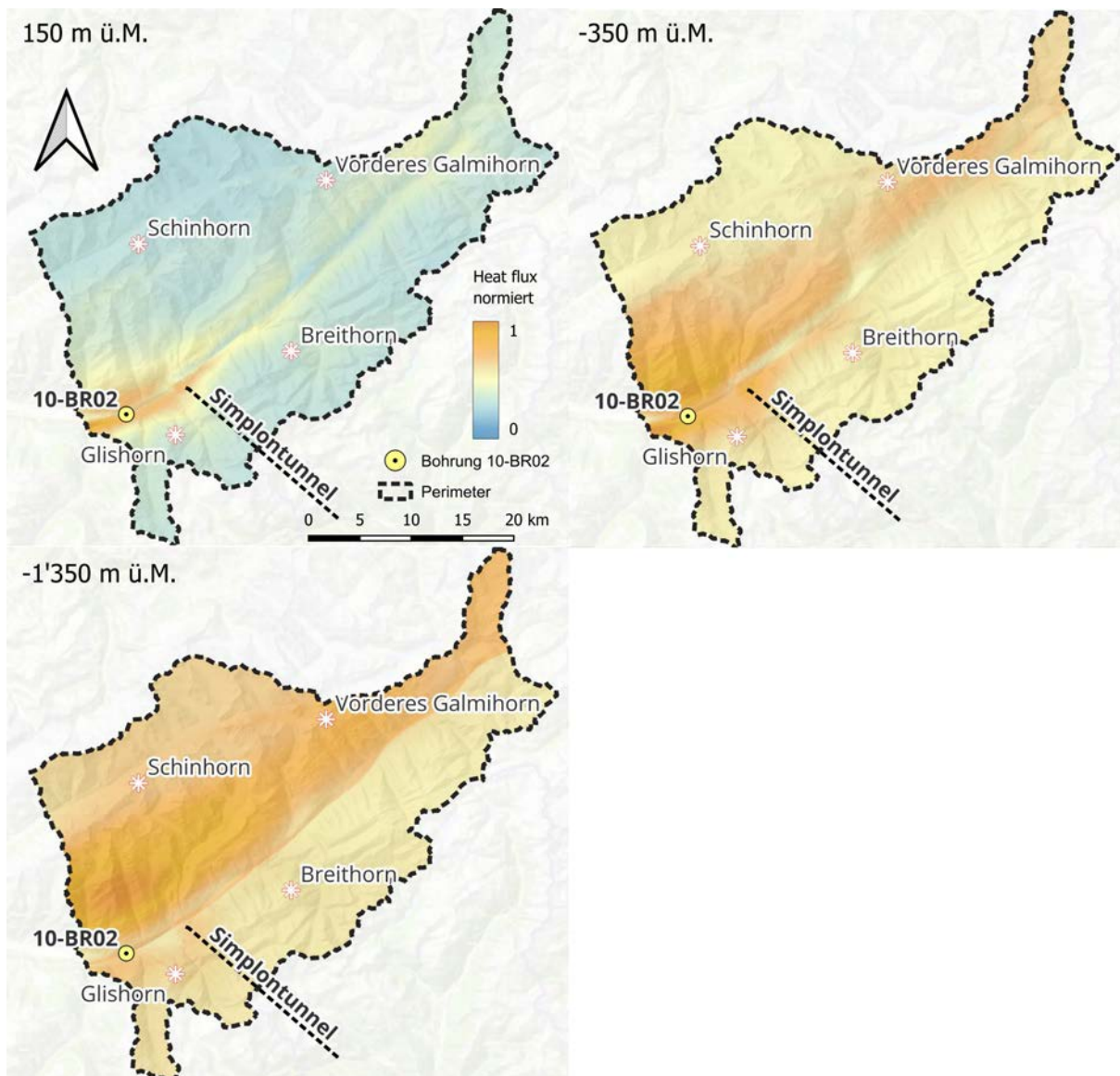


Abb. 57: Normierter vertikaler Wärmefluss in unterschiedlichen Tiefen (150, -350, -1'350 m ü.M.).

Es sollen dennoch im Folgenden die Bandbreiten der berechneten Wärmeflüsse zusammenfassend aufgeführt werden. Der vertikale Wärmefluss beträgt auf Höhe der Bilanzfläche 150 m ü.M. im Maximum 0.17 W m^{-2} (Minimum 0.04 W m^{-2}) und ist vor allem im Talbereich bei Brigerbad erhöht, wie die Daten des kantonalen Grundwassermessnetzes¹⁷ bestätigen. In tieferen Bereichen (-350 und -1'350 m ü.M.) erhöht sich der minimale Wärmefluss grossräumig auf 0.05 W m^{-2} bei einem reduzierten maximalen Wärmestrom von 0.1 W m^{-2} . Dieser erfolgt dafür allerdings über fast den gesamten Modellperimeter. Die Grössenordnung der berechneten Wärmeflüsse stimmt gut mit der neu erarbeiteten Wärmestromkarte von Epting et al. (2024) überein (Abb. A6).

Zudem wird die thermische Peclet-Zahl als dimensionslose Kennzahl für das Verhältnis von advektiven und konduktiven Wärmetransport dargestellt (Abb. 58). Je höher der Wert, desto mehr überwiegt der advektive Wärmetransport. Somit kann mit der thermischen Peclet-Zahl der advektive Wärmetransport im Zusammenhang mit der regionalen Grundwasserströmung evaluiert und Regionen ausgewiesen werden, in welchen ein grösseres thermisches Potenzial (Temperaturen & Fündigkeit) besteht. Auf Höhe der Bilanzfläche von 150 m ü.M. finden sich demnach die höchsten thermischen Potenziale fast ausschliesslich entlang des Rhonetals. Zu beachten ist, dass der Verlauf der Hauptüberschiebungen (auch im Talbereich ist eine scharfe Abgrenzung entlang der Hauptüberschiebung sichtbar) für die Parametrisierung der durch sie getrennten hydrogeologischen Einheiten für die Berechnungen wichtig sind. Das Rhonetal an sich wird ausschliesslich durch den Einfluss der Topographie berücksichtigt. Auf Höhe der Bilanzfläche auf -350 m ü.M., also etwa 1'000 m tiefer als die Topographie im Bereich der Bohrung 10-BR02, verlagert sich der Bereich mit den höchsten thermischen Peclet-Zahlen weiter nach Süd-Westen, was sich weitere 1'000 m tiefer (auf der Bilanzfläche -1'350 m ü.M.) fortsetzt. Gut zu sehen sind auch teilweise scharfe Abgrenzungen zwischen Bereichen hoher und niedriger thermischer Peclet-Zahlen. Dies ist auf den Einfluss der Hauptüberschiebungen bzw. grösseren Unterschieden bei der Parametrisierung benachbarter hydrogeologischer Einheiten zurückzuführen.

¹⁷ <https://strates-vs.crealp.ch/viewer/>

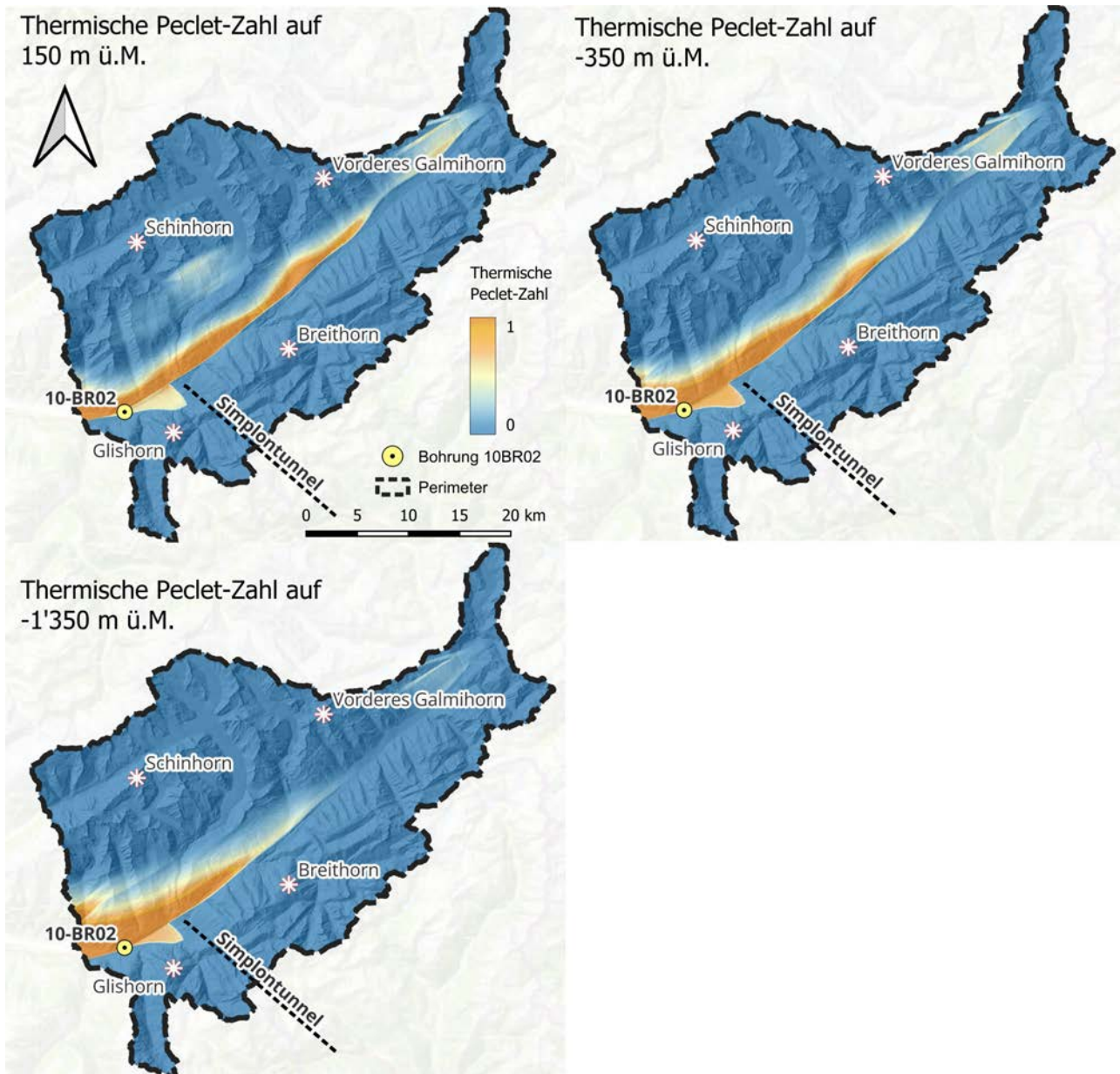
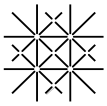


Abb. 58: Thermische Peclet-Zahl in unterschiedlichen Tiefen (150, -350, -1'350 m ü.M.).

10 Diskussion

Die im Rahmen dieser Studie entwickelten Modelle sind ein wichtiger Schritt zum besseren Verständnis der regionalen Tiefengrundwassersysteme im Alpenraum. Die Modellierungsarbeiten erlauben eine erste Charakterisierung des hydraulischen und thermischen Grundwasserregimes unter Berücksichtigung der regionalen Grundwasserzirkulation. Anhand des Fallbeispiels Brig, für welches seit mehreren Jahren über geothermische Tiefbohrungen diskutiert wird, zeigt die Studie auf, wie die über die Zeit generierten Daten und Informationen in qualitativ hochstehende Entscheidungsgrundlagen integriert werden können. Exemplarisch wird gezeigt, dass die systematische Integration verschiedener primärer Datenquellen zu sekundären Informationen führt, die einen erheblichen Mehrwert für die Entwicklung von raum- und energieplanerischen Produkten darstellen. Vorteile ergeben sich auch für die generelle Abschätzung des geothermischen Potenzials und die anschliessende Machbarkeitsprüfung von Projekten.

Die vorliegende Studie liefert eine fundierte wissenschaftlich-technische Grundlage, die somit die Planung von geothermischen Bohrprojekten unterstützen und zur systematischen Identifizierung der damit verbundenen Chancen und Risiken beitragen kann. Mit dem 3D-THM können Szenarien getestet werden, die zur Optimierung des Ressourceneinsatzes und zur Identifizierung möglicher Projektauswirkungen genutzt werden können. Geeignete flankierende Massnahmen können transparent und frühzeitig diskutiert werden, was eine wichtige Voraussetzung für eine effiziente Durchführung von Baubewilligungsverfahren und eine informierte Abwägung möglicher Interessenskonflikte ist.

Im Hinblick auf das vom Walliser Staatsrat am 17. März 2021 beschlossene Gesetzgebungsverfahren zur Erarbeitung eines kantonalen Georessourcengesetzes¹⁸ trägt die Studie dazu bei, eine weitere wichtige Rahmenbedingung zu erfüllen. Dabei handelt es sich um Mindestanforderungen im Zusammenhang mit den Vorbereitungsarbeiten für die Erkundung des kantonalen Untergrundes und die spätere Bewirtschaftung der entsprechenden Georessourcen. Mit den hier vorgestellten Ergebnissen wird die mögliche Integration des geothermischen Potenzials des Tiefengrundwassers in die energiewirtschaftliche Planung greifbar. Zudem kann so Planung einer zukünftigen Erkundungsbohrung besser gefördert werden.

¹⁸ Die aktuelle Arbeitsversion sieht vor, dass die Planungsgrundsätze in den funktionalen Räumen und im Untergrund sowie die Georessourcen auf Kantonsgebiet im kantonalen Richtplan verankert werden sollte. Zu diesem Zweck sollten die Gemeinden in ihren Zonennutzungsplänen (ZNP) die zur Orientierung notwendigen Oberflächensektoren ausweisen, die für die Entwicklung von Projekten zur Erkundung und Nutzung von Georessourcen im kantonalen Untergrund geeignet sind. Ein Koordinationsblatt «Untergrund» wurde bereits vom Kanton Wallis im Hinblick auf eine bevorstehende Teiländerung des kantonalen Richtplans ausgearbeitet. Diese wird Anfang 2025 bei den betroffenen Gemeinden und Organisationen in die Vernehmlassung gehen.

10.1 Zielerreichung

Tab. 26 fasst die Erreichung der Ziele zusammen, die einzelnen Aspekte der Tabelle werden im Folgenden auf der Grundlage der Modellierungsergebnisse erläutert und diskutiert. Die Ergebnisse erlaubt es den Behörden wichtige Schlüsse für die Entwicklung geeigneter Rahmenbedingungen für die Förderung von Geothermieprojekten zu ziehen. Insbesondere können die Ergebnisse des Pilotprojekts dazu beitragen, die Sichtbarkeit der Geothermie im Wallis am konkreten Beispiel von Brig erhöhen. Förderlich könnte es sein, die neu gewonnenen Daten und Informationen über den Untergrund (insbesondere über die thermisch-hydraulische Kopplung alpiner Grundwasserströmungssysteme) einer breiten Interessengruppe zugänglich und verständlich zu machen. Dabei sollten idealerweise auch raumplanerische, regulatorische und ökonomische Ebenen berücksichtigt und eingebaut werden.

Tab. 26: Zielerreichung

Beschreibung Energieziele	Direkte, kurzfristige Wirkung	Indirekte, langfristige Wirkung	Messen der Zielerreichung (Erfolgsindikatoren)
Beurteilung geothermisches Potenzial Region Brig ✓	Abschätzung verfügbare Wärmeenergie ✓	Koordinierte Nutzung geothermischer Potenziale	Berechnung Massenbilanz (Wasser & Energie) ✓
Vermeidung Konflikte geothermischer Nutzungen ✓	Effizientes Bewilligungsverfahren dank fundierter Nachweise	Bewirtschaftungswerkzeuge langfristige Planungssicherheit	Messsysteme & Pumpversuche zur Beurteilung gegenseitiger Beeinflussung ✗
Standortoptimierung Geothermiebohrungen ✓	Robuste Auswahlkriterien Optimierung Ergiebigkeit	Nachhaltige Aquifer Bewirtschaftung	Langzeit-Pumpversuch und Grundwasser Isotopenanalysen ✗

10.1.1 Beschreibung Energieziele

Beurteilung geothermisches Potenzial Region Brig

Auf Grundlage der 3D-THM konnten für ein «best Fit» Modell und für verschiedene Tiefenbereiche (150, -350 und -1'350 m ü.M.) die Temperaturverteilung, der Darcy-Flux als Mass für die Grundwasserströmung, einschliesslich aufwärts- und abwärtsgerichteter Grundwasserströmung (Up- and Downwelling), der Wärmefluss (v.a. auch normiert) aus der Tiefe sowie die thermische Peclet-Zahl berechnet werden.

Als Folge der regionalen Grundwasserzirkulation ist für die verschiedenen Tiefenbereiche zu beobachten, dass die Temperaturen im Talbereich deutlich höher sind als in den benachbarten höheren Lagen, wobei der Unterschied mit der betrachteten Tiefe zunimmt. Bereits in einem Tiefenbereich von 150 m ü. M. liegen die Temperaturen im Gebiet Brigerbad bei über 50 °C, in einer Tiefe von -350 m ü. M. bei über 70 °C und in einer Tiefe von -1'350 m ü. M. sogar bei ca. 100 °C. Es konnte ein vertikaler Wärmefluss auf Höhe der Bilanzfläche

150 m ü.M. von im Maximum 0.17 W m^{-2} (Minimum 0.04 W m^{-2}) abgeleitet werden, welcher vor allem im Talbereich bei Brigerbad erhöht ist. In tieferen Bereichen (-350 und -1'350 m ü.M.) erhöht sich der minimale Wärmefluss grossräumig auf 0.05 W m^{-2} bei einem reduzierten maximalen Wärmestrom von 0.1 W m^{-2} . Dieser erfolgt dafür allerdings über fast den gesamten Modellperimeter.

In Anbetracht der geringen Datengrundlage und der damit verbundenen grossen Unsicherheiten wurde neben einer Angabe der Bandbreite absoluter Werte des Wärmeflusses (W m^{-2}) auch eine Normierung des Wärmeflusses vorgenommen und dieser für die verschiedenen Tiefenbereiche dargestellt. Darüber hinaus wurde die thermische Peclet-Zahl bestimmt, die angibt, ob advective oder konduktive Wärmetransportprozesse dominieren. Die Peclet-Zahl ermöglicht auch das Potenzial der Realisierung von «offenen» (hohe Peclet-Zahl) oder «geschlossenen» (niedrige Peclet-Zahl) geothermischen Systemen zu bewerten. Die Kenntnis der Grundwasserströmung (Up- and Downwelling), der normalisierten Wärmeströme und der Peclet-Zahl ermöglichen es, Gebiete auszuweisen, in denen ein grösseres oder kleineres Potenzial des Grundwasserdargebots (Fündigkeit) und des thermischen Wärmeflusses besteht.

Fazit

Die Studie liefert Erkenntnisse zur Charakterisierung des hydraulischen und thermischen Grundwasserregimes im Raum Brig, welche in guter Übereinstimmung mit bestehenden Feldmessungen stehen und ein besseres Verständnis der dynamischen Tiefengrundwasserzirkulation auf Einzugsgebietsebene ermöglichen.

Die aus dem Modell generierten sekundären Produkte können direkt für die Erstellung von Planungsgrundlagen (z.B. Potenzialkarten, Eignungskarten) verwendet werden.

Vermeidung Konflikte geothermischer Nutzungen & Standortoptimierung Geothermiebohrungen

Auf Grundlage der 3D-THM konnten einerseits die hydraulischen und thermischen Auswirkungen der Grundwasserentnahme im Bereich der Bohrung 10-BR02 als auch eine zusätzliche Grundwasserentnahme evaluiert werden. Für verschiedene Entnahmemengen wurde die horizontale und vertikale hydraulische Reaktion (Absenktrichter) simuliert und ausgewertet. Auch die thermische Beeinflussung konnte quantifiziert werden.

Damit ist das 3D-THM ein funktionales und flexibles Werkzeug, um die gegenseitige Beeinflussung verschiedener bestehender und neuer Bohrungen zu quantifizieren und Konflikte zwischen geothermischen Nutzungen vor dem Hintergrund des steigenden Nutzungsdrucks zu vermeiden.

Auch kann der Standort neuer geothermischer Bohrungen auf Basis der Kenntnis des geothermischen Potenzials und der Simulationen mit dem 3D-THM optimiert werden.

Fazit

Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Festlegung von Projektauflagen einerseits und von Bewirtschaftungsplänen andererseits, die aufgrund ihres restriktiven Charakters auf detaillierte, transparente und präzise Informationen angewiesen sind.

Da die Verfügbarkeit möglichst verlässlicher Informationen und Daten nicht nur für die Vollzugsbehörde, sondern auch für den Antragsteller im Genehmigungsverfahren von entscheidender Bedeutung ist, kann der Aufwand für die notwendigen zusätzlichen Untersuchungen bei vermutetem Konfliktpotenzial am ausgewählten Projektstandort gezielt begrenzt werden.

10.1.2 Direkte, kurzfristige Wirkung

Abschätzung verfügbare Wärmeenergie & Robuste Auswahlkriterien / Optimierung Ergiebigkeit

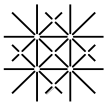
Auf Grundlage der 3D-THM kann eine erste Abschätzung (Grössenordnung) der verfügbaren Wärmeenergie vorgenommen werden. Mit der Kenntnis des geothermischen Potenzials können Gebiete mit grösserem oder geringerem Potenzial bzgl. Grundwasserdargebot (Fündigkeit) und thermischem Wärmefluss ermittelt werden.

Fazit

Die aus dem Modell generierten Produkte können dem Kanton Wallis für die spätere Erarbeitung von Potenzialkarten gemäss Stossrichtung des in Erarbeitung stehenden Entwurfs eines kantonalen Georessourcengesetzes direkt zur Verfügung gestellt werden.

Effizientes Bewilligungsverfahren dank fundierter Nachweise

Der Alpenkanton Wallis verfügt über grosse Grundwasservorkommen und die Gebirgslandschaft zeugt von einer komplexen geologischen und tektonischen Entwicklung. Die Prüfung der Projektlage, sei es für Zulassungsdossiers, Plangenehmigungsverfahren oder den Bau, erfordert daher die Berücksichtigung detaillierter geologischer und hydrogeologischer Informationen sowie die Erhebung von Daten vor Ort durch ergänzende Untersuchungen. Die Durchführung von Bohrungen stellt eine besondere Art von unterirdischem Eingriff dar, bei welchem mit verschiedenen Risiken zu rechnen ist. Wenn die Unsicherheiten aufgrund der stark



heterogenen Verhältnisse bereits im untiefen Untergrund hoch sind, ist damit zu rechnen, dass diese in der Tiefe zunehmen.

Fazit

In Kantonen wie dem Wallis, in welchen das Verfügungsrecht über das Grundwasser bei den Gemeinden liegt, die Nutzung der übrigen unterirdischen Ressourcen allerdings nicht oder nur ungenügend geregelt ist, muss mit einer zusätzlichen Komplexität und regulatorischen Hürde bei der Organisation von Geothermieprojekten gerechnet werden. Eine kantonale Entwicklung von spezifischen Kartenprodukten für Tiefengeothermieprojekte im Raum Brig, welche mit dem kantonalen Richtplan oder die Energierichtplanung der betroffenen Gemeinden koordiniert wäre, steht zudem noch aus. Die im Rahmen der vorliegenden Studie erarbeiteten Informationen und Geodaten können zu diesem Zweck entsprechend weiter aufbereitet werden.

10.1.3 Indirekte, langfristige Wirkung

Koordinierte Nutzung geothermischer Potenziale

Im Wallis sind bzgl. der Verfügung des Tiefengrundwassers als wichtiges geothermisches Potenzial die entsprechenden Zuständigkeiten und Kompetenzen nicht ausreichend geklärt und es gilt häufig das Prinzip «*First come, first served*». Dies kann zu Übernutzung des Untergrundes oder Konflikten führen.

Fazit

Die Relevanz einer erfolgreich koordinierten Planung von Geothermieprojekten kann durch Werkzeuge wie in dieser Studie vorgestellt untermauert werden.

Für eine nachhaltige Bewertung von Gebieten mit hohem geothermischem Potenzial wie im Raum Brig muss die dynamische Entwicklung der genutzten Ressourcen verfolgt werden können, was mit erheblichem Aufwand verbunden ist (u.a. Erkundung, Tests, Monitoring), der den Rahmen dieser Studie sprengen würde.

Bewirtschaftungswerkzeuge für eine langfristige Planungssicherheit

Die geothermische Nutzung von Grundwasservorkommen ist an verschiedene räumliche und zeitliche Variablen gebunden, die einerseits auf Veränderungen im natürlichen Aquifersystem und andererseits auf das Nutzungskonzept selbst zurückzuführen sind. Moderne Werkzeuge, die heute für die vorsorgliche Analyse, Planung und Bewirtschaftung einer geothermischen Ressource zur Verfügung stehen, können deshalb wesentlich zur langfristigen Planungs- und Betriebssicherheit beitragen. In den letzten Jahren ist das Interesse an 3D-Modellen für entsprechenden Darstellungs- und Visualisierungsanwendungen im Untergrund und zur Bestimmung des nötigen Koordinationsbedarfs in der Praxis stark gewachsen. Eine Gesamtbetrachtung der Schutz- und Nutzungs-Interessen auf regionaler und sogar überregionaler Ebene kann zudem massgeblich zur Entflechtung von Interessenkonflikten beitragen.

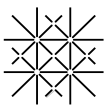
Die Ergebnisse des 3D-THM und die daraus gewonnenen regional aufgelösten Informationen stellen in diesem Zusammenhang einen Mehrwert dar. Die zusätzlichen Erkenntnisse und die flexible Modellierungstechnik können z.B. genutzt werden, um bestehende Prognosen aus früheren Studien zu verifizieren oder direkt die Entwicklung lokaler Modelle für die Planung einer Bohrung zur Erschliessung geothermischer Potenziale im Untergrund zu unterstützen.

Fazit

Mit dieser Studie wurde eine aussagekräftige Grundlage geschaffen, die nun den kantonalen Behörden und der Gemeinde Brig zur Verfügung steht.

Das Modell liefert wertvolle Informationen über den Aufbau des Untergrundes sowie des hydraulischen und thermischen Grundwasserregimes, welcher die geothermische Ressource in der Region Brig charakterisiert.

Diese Informationen stehen für die Erarbeitung von Planungsinstrumenten wie Potenzial- oder Eignungskarten zur Verfügung. Die gewonnenen Erkenntnisse können anschliessend gezielt in raumplanerische Instrumente (Zonenpläne) einfließen und die notwendige Abstimmung mit der energiewirtschaftlichen Planung erleichtern. Damit können die Chancen für Projekte besser abgeklärt werden, was ein wichtiger Anreiz für Investitionen ist, da die Rahmenbedingungen für die Bau- und Nutzungsphase frühzeitig zur Verfügung stehen. In diesem Zusammenhang werden die Möglichkeiten für eine effiziente und nachhaltige Bewirtschaftung der Ressource Geothermie optimiert und Mindestanforderungen transparent gemacht.



Der nachhaltige Ressourcenschutz ist eine komplexe Aufgabe und wird durch iterative Lernprozesse und die systematische Auswertung von neuen Erkenntnissen sichergestellt. Um eine nachhaltige Nutzung der unterirdischen Ressourcen zu gewährleisten, stellt die notwendige Kombination verschiedener Instrumente und Daten eine Herausforderung dar um Schnittstellen, Interoperabilität und eine angemessene Verteilung der oft begrenzten verfügbaren Ressourcen zu minimieren. Diese Herausforderungen stehen im Mittelpunkt der laufenden Arbeiten zur Standardisierung von Modellen und Daten und zum Informationsaustausch. Damit ein Modell auch für den Vollzug direkt angewendet werden kann, müssen die Prozesse im Untergrund die aus Bau- und Nutzungsaktivitäten zurückzuführen sind, ebenfalls abgebildet werden können. Im Bereich Geothermie sind typische Fragestellungen die Festlegung von Vorbehaltsgebieten für nachgewiesene hydrothermale Ressourcen, die Bewertung von Standort- und Nutzungskonflikten sowie die Festlegung von Kriterien für Bohrungen, die in die kommunale Bauleitplanung oder andere Planungsinstrumente einfließen können.

Fazit

Das hier vorgestellte Werkzeug kann durch den Vollzug als Grundlage für eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung direkt angewendet werden und erlaubt es die Prozesse im Untergrund die aus Bau- und Nutzungsaktivitäten zurückzuführen sind abzubilden.

10.1.4 Messen der Zielerreichung (Erfolgsindikatoren)

Berechnung Massenbilanz (Wasser & Energie)

Auf Grundlage der 3D-THM konnten für ein «best Fit» Modell und für verschiedene Tiefenbereiche (150, -350 und -1'350 m ü.M.) die Temperaturverteilung, der Darcy-Flux als Mass für die Grundwasserströmung, einschliesslich aufwärts- und abwärtsgerichtet Grundwasserströmung (Up- and Downwelling), der Wärmefluss (v.a. auch normiert) aus der Tiefe sowie die thermische Peclet-Zahl berechnet werden.

Fazit

Die anlässlich dieser Studie realisierten Berechnungen ermöglichen eine erste qualitative Einschätzung in welchen Bereichen und Tiefenlagen ein grösseres oder kleineres thermisches Potenzial einschliesslich Fündigkeit erwartet werden kann.

Die Herstellung konsolidierter Potenzialkarten mit der sog. Geothermal Play-Fairway Analyse (PFA) ist im Projektes GEOTEX auf Stufe Rhonetal vorgesehen (Schmid et al., in prep.). Die Ergebnisse dieser Studie

werden für das Gebiet von Brig berücksichtigt und die erweiterte Nutzung der 3D-THM für Potenzialstudien kann Teil späterer Projektphasen werden.

Messsysteme, Pumpversuche zur Beurteilung gegenseitiger Beeinflussung & Langzeit-Pumpversuch und Grundwasser Isotopenanalysen

Grundwasserdaten im Rhonetal werden heute durch verschiedene Messnetze erhoben. Die langfristige Grundwasserbeobachtung wird vom Kanton seit den 1970er Jahren aktiv betrieben und im Laufe der Jahre wurden verschiedene Kartenprodukte entwickelt. Das kantonale Grundwassermessnetz wurde für die allgemeine Überwachung des oberflächennahen Rhone-Grundwasserleiters und für die Bedürfnisse einzelner grosser Bauprojekte aufgebaut und optimiert.

Es existieren allerdings keine Grundwassermessungen, die auf die tieferen Bereiche des Grundwasserleiters oder auf die Zirkulation des Tiefengrundwassers im umgebenden Kluftgestein ausgerichtet sind. Leider konnten im Rahmen des Projektes keine Messsysteme implementiert oder weitergehende Untersuchungen durchgeführt werden. Dies könnte jedoch im Rahmen einer direkten Erkundung der geothermischen Ressource erfolgen. Dabei würden zusätzliche Messdaten und Feldversuche eine weitere Validierung des 3D-THM ermöglichen.

Fazit

Auf der Grundlage des 3D-THM kann die Lokalisierung und Auswahl von Messsystemen und Pumpversuchen optimiert sowie gegenseitige Beeinflussung geothermischer Bohrungen evaluiert und bewertet werden.

Zusätzliche Daten können dann in das 3D-THM integriert werden, um die Prognosefähigkeit des Modells zu verbessern und seine mögliche Verwendung bei der Überwachung des Erfolgs einer Geothermieanlage während des Betriebs zu ermöglichen.

10.2 Neue Werkzeuge zur Erschliessung geothermischer Potenziale

Die verschiedenen Etappen der Erschliessung, Nutzung und Bewirtschaftung geothermischer Ressourcen profitieren von einer integralen Betrachtung geologischer, hydrogeologischer und hydrologischer Prozesse auf lokaler und regionaler Ebene. Bei der Planung von Geothermieprojekten benötigen Entscheidungsträger nicht nur angemessene Informationen über vorhandene geothermische Potenziale, sondern auch über

die technische, umweltverträgliche und wirtschaftliche Machbarkeit einer angestrebten geothermischen Nutzung.

Thermisch-hydraulische Modelle in 3D (3D-THM) stellen in diesem Zusammenhang ein modernes Werkzeug dar, welches sowohl zur Optimierung eines Erschliessungskonzeptes als auch zur Prognose der zu erwartenden Projektauswirkungen unter vordefinierten Nutzungsszenarien eingesetzt werden kann. Mit den aus dieser Studie gewonnenen Informationen lassen sich beispielsweise schon heute Bereiche im Untergrund identifizieren, die aufgrund der grossräumigen Grundwasserzirkulation und Temperaturverteilung für eine geothermische Exploration vielversprechend sind. Es wird auch gezeigt, dass eine Modellierung, auch im Vergleich zu teureren und risikoreicheren¹⁹ Erkundungsbohrungen bereits eine erste Abschätzung des geothermischen Potenzials ermöglicht, was zu einer wesentlichen Risikoreduzierung des Projektportfolios führen kann (sog. «Derisking» geplanter Explorationskampagnen).

In diesem Zusammenhang können mögliche Daten- und Informationslücken transparent und frühzeitig mit den Projektbeteiligten adressiert werden. Die effiziente Verwaltung der verschiedenen Datensätze, die entweder für die Modellierung der Strömungs- und Wärmetransportprozesse im Untergrund oder für die Analyse der Auswirkungen einer Förderung benötigt werden, stellt eine grosse Herausforderung dar. Eine strukturierte und koordinierte Erfassung, Harmonisierung, Interpretation und Modellierung von Untergrunddaten auf kantonaler Ebene ist somit unerlässlich, um die Machbarkeit von Geothermieprojekten zu beurteilen und deren konkrete Umsetzung zu fördern.

Ganz grundsätzlich hängt die Prognosefähigkeit von Modellen von der Qualität der Eingangsdaten ab. Es ist somit unerlässlich die Datenerhebung und -verfügbarkeit für jedes Geothermieprojekt so früh wie möglich abzuklären und zu regeln. Die Modellergebnisse müssen so klar und verständlich wie möglich für den Nutzer dargestellt werden, der häufig kein Experte auf dem Gebiet ist. Um das notwendige Vertrauen zwischen den Beteiligten aufzubauen, muss deshalb klar kommuniziert werden, was das Modell kann und was nicht bzw. welche Modellverbesserungen noch anzustreben sind, um die Erfolgchancen bei einer zukünftigen Projektumsetzung zu maximieren.

¹⁹ Bohrkosten steigen mit der Tiefe exponentiell an, Risiken bzgl. Fündigkeit und Bohrproblemen nehmen zu.

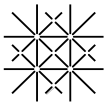
10.2.1 Anwendung des 3D-THM

Im Rahmen dieser Studie konnte eine konsolidierte und modellbasierte Planungsgrundlagen für Geothermieprojekte im Bereich Brig mit Bezug auf die Nutzungstiefe geschaffen werden. Bei zukünftigen Erkundungskampagnen sollten Standorte, für die in den Modellsimulationen ein hoher Wasserfluss (Fündigkeit) in «Upwelling»-Zonen (aufwärtsgerichteter Grundwasserströmung) und in Verbindung mit vergleichsweise hohen Temperaturen prognostiziert wird, für weitere Erkundungen priorisiert werden.

Die in [Kapitel 7](#) beschriebene Sensitivitätsanalyse hatte dabei zum Ziel, den grössten Unsicherheiten, die hauptsächlich auf fehlende Daten zurückzuführen sind, zu begegnen. In diesem Zusammenhang konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den Temperaturkurven im Untergrund der Bohrungen Brigerbad (10-BR02) und Lavey-les-Bains (Lavey-1) sowie entlang des Simplontunnels erreicht werden. Die berechneten Verweilzeiten stimmen ebenfalls mit Erfahrungswerten aus anderen Untersuchungen überein, die berechnete Grundwasserneubildung und die simulierte Absenkung in der Bohrung 10-BR02 sind realistisch. Informationen wie z.B. geochemische Daten wurden noch nicht für eine weitergehende Validierung des Modells verwendet, würden es aber erlauben, verbleibende Unsicherheiten zu adressieren.

Die Aussagekraft des Modells für das thermische Potenzial ist stark abhängig von der Abfolge der durch Hauptüberschiebungen getrennten geologischen Einheiten (siehe [Abb. 7](#)). Für bestimmte lokale Bereiche ist die Aussagekraft des Modells daher eingeschränkt (z.B. Teilgebiet bei Brig oder Visp mit scharfer Trennung der geologischen Einheiten quer durch das Tal). Trotz der wenigen Daten existiert nun aber ein Werkzeug für eine erste Abschätzung des geothermischen Potenzials und zur Simulation von Szenarien (wie gegenseitige Beeinflussung, Auswirkung neuer geothermischer Bohrungen, erhöhte Entnahmen). Mit den im Rahmen eines Erschliessungsprogramms neu gewonnenen Daten könnte eine laufende Aktualisierung des 3D-THM adressiert und die Prognosefähigkeit erhöht werden. Projektparameter, die von zeitlichen Variablen abhängen (z.B. Charakteristik der geothermischen Ressource, Nutzungsintensität) sowie betriebliche Optimierungen (z.B. Reservebohrungen, aktive Regeneration des geothermischen Reservoirs) würden hinsichtlich der Energie- und Umweltbilanz entsprechend verbessert.

Um eine nachhaltige Bewirtschaftung der Ressource zu gewährleisten, muss spätestens während der Betriebsphase ein langfristiges Überwachungsprogramm konzipiert werden. Da dies einen direkten Einfluss auf die Projektkosten hat, sollte dieser Schritt mit hoher Priorität und hohen Standards durchgeführt werden. Auch hier bietet das Modell eine relevante Grundlage: Es wurde zwar in erster Linie entwickelt, um



regionale und lokale unterirdische Zuflüsse zu verstehen und Planungs- und Betriebsstrategien zu optimieren, spielt aber eine entscheidende Rolle bei der Erstellung der erforderlichen Nachweise, die einem Planfeststellungsdossier beiliegen müssen.

10.2.2 Übertragbarkeit & Upscaling

Die Datengrundlagen für die hydraulische und thermische Parametrisierung der Untergrundeigenschaften und der Randbedingungen von 3D-THM sind inzwischen soweit vorhanden bzw. in der Entwicklung, dass ein «Upscaling» bzw. Übertragung von 3D-THM auf das gesamte Rhonetal oder allgemein auf Schweizer Alpentäler grundsätzlich möglich wäre. Die im Rahmen dieser Studie identifizierte Standorte könnten zusammen mit anderen vielversprechenden «Plays²⁰», die ebenfalls eine hohe Reproduzierbarkeit aufweisen, von einer vertieften Untersuchung profitieren. Für das Rhonetal sollte einerseits die gezielte Auswertung der vorhandenen kantonalen Daten und andererseits die Ergebnisse des vom BFE und swisstopo unterstützten Geotex-Projektes (Schmid et al., in prep.) genutzt werden. Im Vordergrund steht die Abschätzung des geothermischen Gesamtpotenzials des Rhonetals mittels einer «Play Fairway Analysis» (PFA²¹) unter Verwendung von Potenzialkarten. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass die Datenbasis für den Aufbau und vor allem eine Validierung entsprechender 3D-THM noch ungenügend ist für eine aussagekräftige PFA-Analyse. Es muss daher oft auf ergänzende Daten zurückgegriffen werden, die entweder aus allfällig im Projektgebiet existierenden, privaten Bohrungen stammen können, oder im Rahmen zusätzlicher Erkundungskampagnen gewonnen werden müssen. Im Vergleich zu einer einfachen PFA-Analyse liefert ein wie nun für das obere Rhonetal existierendes 3D-THM jedoch direkt wichtige Neuerkenntnisse zur Optimierung notwendiger zusätzlicher Untersuchungen und potenzieller Risiken (v.a. auch Fündigkeitsrisiko) auf verschiedenen Skalen. Die Anwendung der Methodik und die Entwicklung von 3D-THM auf das gesamte Rhonetal könnte einen wichtigen Beitrag dazu leisten, die räumliche Ausdehnung und die Eigenschaften inneralpiner geothermischer Reservoirs besser einzugrenzen. Da bereits ein 3D-THM für das obere Rhonetal besteht und die Methodik entwickelt ist, ist der zukünftige Aufwand für eine Übertragung oder ein «Upscaling» überschaubar.

²⁰ Ein geothermisches Play, oder play type (engl. (Karten-) Spiel) ist eine geologische Anordnung (setting) bestehend aus der Wärmequelle, dem Wärme-Migrationsweg, den Wärme- oder Fluid-Speicherbedingungen und den technisch/ökonomischen Möglichkeiten der Nutzung. Im Deutschen wird play type oft mit Fündigkeitstyp übersetzt. <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/p/play-geothermisches-play-type>

²¹ Play Fairway Analysen (PFA) sollen die Erfolgsquoten bei Explorationsbohrungen verbessern und so die Kosten von Geothermieprojekten senken und die Erschliessung neuer Gebiete erleichtern.

Dazu müsste in einem ersten Schritt eine entsprechende Datengrundlage erstellt werden, insbesondere geologische und hydrogeologische Informationen (u.a. strukturelle Einheiten, Überschiebungen, Bruchstrukturen, Daten aus Tiefbohrungen). Inwieweit die Geometrie des gesamten Rhonetals (Faktor 10 des für diese Studie verwendeten Perimeters) numerisch umgesetzt werden kann, müsste vorgängig geklärt werden. Als Resultat könnten in Ergänzung zu den Grundwasserkarten des Rhonetals und der Karstsysteme der Nordalpen und des Chablais auch eine orientierende Karte der Tiefengrundwasserzirkulation im Kanton Wallis erstellt werden. Die Bereitstellung solcher Produkte wäre zur systematischen Integration der Geothermie in die Energieplanung der Gemeinden willkommen und würde sicherlich auch die notwendige Koordination mit den kantonalen Behörden fördern. Die gewonnenen Informationen über den Aufbau und die Eigenschaften des kantonalen Untergrundes würden auch anderen Interessen (z.B. Grundwasserschutz, geologische Gefahren, Landwirtschaft) zur Verfügung stehen.

10.3 Raumplanerische Perspektive

Gemäss der «Good-Practice»-Sammlung des Bundesamtes für Raumentwicklung (Are, 2023) hat die Raumplanung die Aufgabe, die unterschiedlichen Ansprüche an die Nutzung und den Schutz des Raumes sowohl an der Oberfläche als auch im Untergrund zu koordinieren. Das Raumplanungsgesetz (RPG) und die kantonalen Bau- und Planungsgesetze bieten bereits heute einen weitgehend geeigneten Rahmen, um Interessenkonflikte im Vorfeld von Grossprojekten zu vermeiden oder projektbezogen zu lösen. Eine zukünftige Intensivierung der Nutzung des Untergrundes wird die Raumplanung auf kommunaler, kantonaler und Bundesebene jedoch weiterhin herausfordern. Die optimierte zukünftige Nutzung des Potenzials der Tiefengrundwasservorkommen ist somit nicht nur eine wichtige Frage in der Region Brig, sondern eine Herausforderung für die ganze Schweiz.

Geothermieprojekte stehen vor besonders hohen technischen und organisatorischen Herausforderungen. Die Planung neuer Projekte im Verbund mit bestehenden Anlagen muss auf Nutzungskonzepten beruhen, die auf eine frühzeitige Erkennung und Entschärfung von Konflikten sowie auf eine effiziente und rationelle Raumplanung ausgerichtet sind. Es ist daher hilfreich, Ausbau-, Mess- und Nutzungsdaten (Entnahme- und Rückgabemengen und -temperaturen) bestehender Anlagen zu diesem Zweck zentral zu erfassen, sodass sie bei der Planung künftiger Anlagen berücksichtigt werden können. Geologische Basismodelle werden so zu wichtigen Bausteinen bei der Entwicklung von Bewirtschaftungsinstrumenten für schützenswerte unterirdische Ressourcen, die den Entscheidungsprozess der Behörden bei geplanten Eingriffen oder Nutzungen

unterstützen. Durch die Integration aller verfügbarer Daten in regional ausgelegten Modellen und einer guten raumplanerischen Organisation können nachvollziehbare und nachhaltige Entscheidungen getroffen werden, die eine konsequente Abwägung zwischen Wirtschaftlichkeit, Risikomanagement und Dokumentationspflichten bei Projektierung und Betrieb ermöglichen.

Behörden und Projektträger verfügen jedoch oft nur über begrenzte und sehr lokale Kenntnisse der von nachgewiesenen hydrothermalen Ressourcen. Detaillierte Untersuchungen relevanter hydrothermalen Systeme sind daher selten vorhanden oder zugänglich. Dies erschwert Behörden und Projektträgern den Aufbau von Know-how über die notwendigen Schritte zur optimalen Nutzung der geothermischen Ressourcen, und die Lücken für eine effiziente Raumplanung im Untergrund können kaum geschlossen werden. Daher ist es für die Nutzung geothermaler Ressourcen besonders wichtig, dass relevante Daten zum Untergrund und zu geothermaler Nutzungen zuverlässig gesammelt, ausgewertet und die Resultate breit zugänglich gemacht werden.

Der Einsatz ressourcenorientierter Modelle, die sich auf die zeitliche und räumliche Auflösung der meist komplexen Prozesse im Untergrund konzentrieren und auf eine möglichst breite Grundlage an Daten zum Untergrund und dessen Nutzung zurückgreifen können, bilden eine fundierte Grundlage für Bewirtschaftungsaufgaben und Erfolgskontrollen. So stellen die im Rahmen dieser Studie abgeleiteten Modellergebnisse nützliche sekundäre Geodatensätze dar, die einerseits für die Nachführung wichtiger raumplanerischer Instrumente wie Gewässerschutzkarte, Zonenplan oder Sachplan Energie, andererseits aber auch direkt für die Projektplanung verwendet werden können.

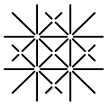
10.4 Multifunktionales Grundwasser

Als multifunktionale Ressource muss Grundwasser entsprechend den Schutz- und Nutzungsanforderungen bewirtschaftet werden. Dies erfordert zunehmend eine integrierte Grundwasserbewirtschaftung unter Aufsicht der Vollzugsbehörde. Dies fördert eine regional gestaltete Gesamtbetrachtung des Grundwasserflusssystems unter Berücksichtigung natürlicher und anthropogener Faktoren im Rahmen der Behörde. In diesem Zusammenhang muss besonderes Augenmerk auf bestehende Nutzungen und Konfliktpotenziale gelegt werden. Somit bietet der Ansatz eine effektive und pragmatische Möglichkeit, die Anforderungen des Grundwasserschutzes mit den Anforderungen der Grundwassernutzung in konstruktiver Weise in Einklang zu bringen und sie an kurz- und langfristigen Leistungszielen auszurichten.

Grundwasserressourcen haben oft einen regionalen oder sogar überregionalen Charakter und können je nach Struktur des Untergrundes auch in Schichten gegliedert sein. Hydrogeologische Untersuchungen sind daher ein sehr wichtiger Bestandteil geothermischer Projekte, um sicherzustellen, dass ein geplanter Eingriff bereits genutzte Ressourcen nicht dauerhaft oder sogar irreversibel schädigt. Für einen Antragsteller kann es jedoch eine wiederkehrende Herausforderung sein, im Rahmen von lokal konzipierten Projekten im Untergrund ausreichende Nachweise für den langfristigen Schutz der nutzbaren oder genutzten Grundwasserressourcen zu erbringen. Hier besteht jedoch ein erhebliches Risiko, dass die Vollzugsbehörde die Anforderungen und Bedingungen zu hoch ansetzt. Es ist ineffizient, wenn die in diesem Zusammenhang erforderlichen anspruchsvollen Abklärungen von den einzelnen Projektinhabern von Fall zu Fall durchgeführt werden müssen. Auch die Festlegung der entsprechenden Verantwortlichkeiten und Zuständigkeiten kann kompliziert sein, was sich negativ auf den Verlauf des Genehmigungsverfahrens auswirken kann.

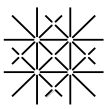
Der nachhaltige Ressourcenschutz ist eine komplexe Aufgabe und wird durch iterative Lernprozesse und die systematische Auswertung von neuen Erkenntnissen sichergestellt. Um eine nachhaltige Nutzung der unterirdischen Ressourcen zu gewährleisten, stellt die notwendige Kombination verschiedener Instrumente und Daten eine Herausforderung dar um Schnittstellen, Interoperabilität und eine angemessene Verteilung der oft begrenzten verfügbaren Ressourcen zu minimieren. Eine Garantie für die Zugänglichkeit von repräsentativen hydrogeologischen Grundlagen, von entsprechend strukturierten Geodatenätze, sowie von regional ausgelegten Grundwassermodellen würde somit die Planungssicherheit unterstützen und das gemeinsame Verständnis zwischen den Projektanten, der Vollzugsbehörde und die weiteren Parteien fördern. Um die besonderen Schutzanforderungen im Vorhinein zu veranschaulichen und im Rahmen der Projektumsetzung zu berücksichtigen kann die Einführung einer möglichst praxistauglichen Differenzierung für nutzbaren Grundwasservorkommen sinnvoll werden.

- Grundwasservorkommen in Verbindung mit Grundwasser, das für die aktuelle Wasserversorgung bestimmt ist;
- Grundwasservorkommen in Verbindung mit Grundwasser, das für die zukünftige Wasserversorgung reserviert ist;
- Nachgewiesene oder wahrscheinliche Grundwasservorkommen in Verbindung mit Grundwasser, das sich nicht für die Wasserversorgung eignet;
- Vermutete Grundwasservorkommen, mit im Rahmen einer Prospektion zu präzisierender Ausdehnung und Nutzungszweck;



- Grundwasservorkommen, die aus technischer, sozioökonomischer und sicherheitstechnischer Sicht keine Nutzung zulassen.

Durch die Sensibilisierung für das Thema «Nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung» können die Herausforderungen und Chancen besser verstanden werden. Zudem können Kanton und Gemeinden die Möglichkeiten für entsprechende Anpassungen des kantonalen Rechts besser prüfen, beurteilen und wichtige Synergien anerkennen.



11 Ausblick

Disclaimer

Die von EnergieSchweiz unterstützten Projekte werden wirkungsorientiert entwickelt und umgesetzt und auf die übergeordneten Ziele der Energie- und Klimapolitik des Bundes abgestimmt. In diesem Sinne können viele der im Rahmen dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse dazu dienen, die Aufgaben, die in der Zuständigkeit des Kantons Wallis und der Stadtgemeinde Brig liegen, besser wahrzunehmen. Unter Berücksichtigung der neuen Erkenntnisse über die Funktion des hydrothermalen Systems von Brig und der modellbasierten Bewirtschaftungsmöglichkeiten der tiefen Grundwasserressourcen werden daher im Folgenden Empfehlungen für die hoheitlichen Aufgaben der Walliser Behörden im Bereich der Geothermie formuliert.

Der Inhalt dieses Kapitels wurde in enger Abstimmung mit dem BFE verfasst. Es stellt eine Art Bedarfsanalyse dar, die auch auf den Erfahrungen der anderen Studien aufbaut, die in den letzten 20 Jahren vom Bund mit 1,3 Mio. CHF für Geothermieprojekte im Wallis (ohne Lavey-les-Bains) subventioniert wurden. Aus diesen Studien wurden eine Reihe von Daten und vielversprechenden Informationen für Geothermieprojekte sowie Ansätze und Leitlinien für entsprechende regulatorische Anpassungen generiert. Dieses Kapitel spiegelt daher in erster Linie die Meinung der Projektbegleitung wider.

Da die notwendigen Abklärungen zur möglichen Umsetzung solcher Massnahmen ausserhalb des Projektrahmens liegen und in einer eng koordinierten Zusammenarbeit zwischen den betroffenen Fachstellen zu adressieren wäre, übernimmt die AUG der Universität Basel keine Gewähr für die inhaltliche Richtigkeit, Genauigkeit, Aktualität, Zuverlässigkeit und Vollständigkeit der hier wiedergegebenen Informationen.

Die folgenden Überlegungen und Orientierungshilfen sind im Hinblick auf eine mögliche Fortsetzung eines Geothermieprojektes mit entsprechendem Bohrprogramm in der Region Brig formuliert. Die hier angestellten Überlegungen könnten jedoch auch für die Entwicklung ähnlicher Projekte im alpinen Kontext verallgemeinert werden. In jedem Fall wäre es angesichts der Erfahrungen, die im Rahmen der vorliegenden Studie zusammengetragen werden konnten, vorrangig empfehlenswert, geeignete kantonale Rahmenbedingungen zu entwickeln, um die Überwachung, Begleitung und Genehmigung von Geothermieprojekten im Wallis zu erleichtern.

11.1 Situation der Geothermie im Wallis

Abb. A1 zeigt die hohe Dichte aufgeschlossener und bekannter Thermalwasservorkommen im Kanton Wallis, welche das höchste geothermische Potenzial in der Schweiz aufweisen. Auf lokaler Ebene stellen derartige Ressourcen eine bedeutende Entwicklungsmöglichkeit für erneuerbare Heizsysteme dar, deren Einbeziehung in die Energiepläne der lokalen Behörden von Vorteil wäre. Die Nutzbarkeit von subthermalen bis thermalen Grundwasser bietet auch für den Gebäude-, Verkehrs- und Industriesektor interessante Perspektiven bei der Entwicklung neuer technischer Lösungen zur Erreichung der vorgeschriebenen Dekarbonisierungsziele. In Kombination mit Wärmenetzen könnte die Energieversorgung von Gemeinden idealerweise unterstützt werden. Gleichzeitig wäre dies ein wichtiger Beitrag zur Erreichung der in der kantonalen Energiestrategie (Dewk, 2019) formulierten langfristigen Vision einer 100% erneuerbaren und einheimischen Versorgung bis 2060.

Die Ausrichtung der Klima- und Energiepolitik auf das Netto-Null Ziel (Bfe, 2020) erfordert koordinierte Massnahmen auf den drei Staatsebenen Bund, Kantone und Gemeinden. Für Massnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen im Gebäudebereich sind gemäss Bundesverfassung vor allem die Kantone zuständig. Die Heterogenität und Komplexität der kantonalen Vorschriften und Bewilligungsverfahren behindern leider noch oft Unternehmen und Investoren darin, den nötigen Umbau des Energiesystems voranzutreiben. Hier sind nicht nur Technologien und Produkte, welche die Anforderungen an eine klimafreundliche, effiziente, sichere und bezahlbare Energieversorgung gefragt, sondern auch adäquate regulatorische, technische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen. Die direkte und indirekte Nutzung der Wärme aus dem Untergrund stösst dabei auf grosses Interesse, da sie sich als nachhaltige Wärmequelle, allenfalls in Kombination mit Wärmepumpen, eignet. Hier wird unter anderem mit einem starken Ausbau der Wärmenetze und Effizienzsteigerungen in industriellen Prozessen gerechnet. Der Wärmebereich macht heute in der Schweiz rund 50 Prozent des Energieverbrauchs aus und verursacht mehr als 35 Prozent der Treibhausgasemissionen. Eine optimierte thermische Nutzung des Untergrunds kann deshalb ein wesentlicher Beitrag für die Dekarbonisierung der Energiesysteme und die Reduktion des Energiebedarfs leisten, insbesondere während den Wintermonaten.

Bei der Förderung der Erdwärme beinträchtigen das Fündigkeitsrisiko einerseits und fehlende regulatorische Rahmenbedingungen andererseits immer noch die Attraktivität von Investitionen in entsprechende geothermische Fernwärmenetze. Die Förderstrategie des Bundes kann in diesem Zusammenhang Projekte zur direkten Nutzung der Geothermie zur Wärmeerzeugung mit Beiträgen an die Explorations- und Erschliessungsphase unterstützen. Damit sollen die anfänglichen Verzögerungen und Mehrkosten, die mit

dem Nachweis einer wirtschaftlich nutzbaren Ressource verbunden sein können, soweit minimiert werden. Eine entsprechende Investitionssicherheit für die eigentliche Nutzung der Ressource soll dann besser gewährleistet werden (Abb. 59). Dies setzt allerdings voraus, dass die zuständigen Behörden eine Bereitschaft für die notwendige Zusammenarbeit mit den Projektverantwortlichen entwickeln, um allfällige Projektoptimierungen in technischer und administrativer Hinsicht frühzeitig anzugehen. Die Rahmenbedingungen für die Erarbeitung eines entsprechenden kantonalen Geothermieprogramms im Wallis bleiben derzeit in dieser Hinsicht ungünstig. Dadurch werden zum Teil auch Chancen für wirtschaftlich ausgereifte Projekte verpasst. Es wäre somit vorteilhaft, wenn den einheimisch nutzbaren geothermischen Potenzialen, die sich viele Walliser Gemeinden teilen, in ihrer Bedeutung zur Konkretisierung der kantonalen Energie-Ziele anerkannt wären, um in den entsprechenden Energierichtplänen abgebildet zu werden.

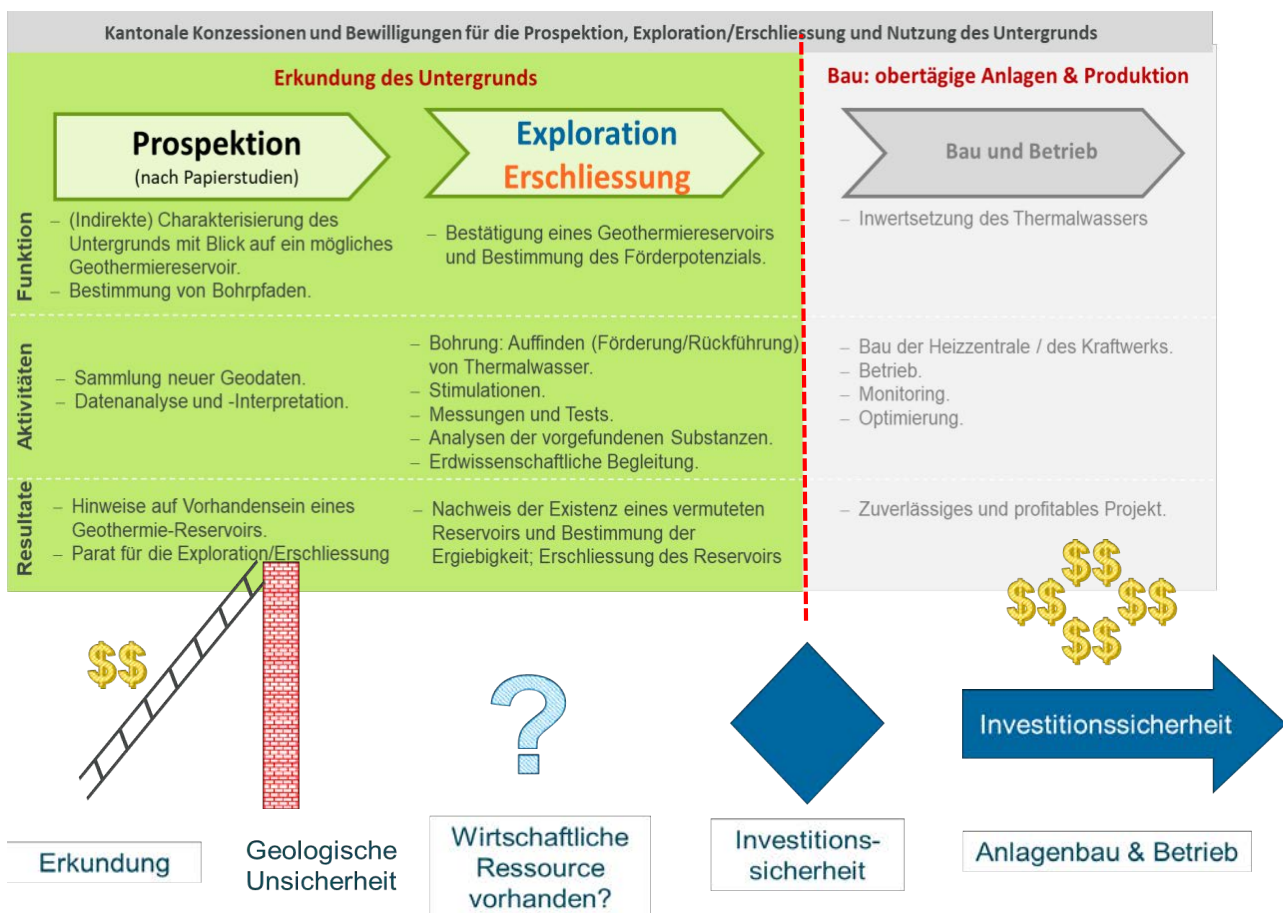


Abb. 59: Schematischer Ablauf der Etappen eines Geothermieprojektes von der Erkundung bis zum wirtschaftlichen Betrieb. Über das Bundesgesetz über die Reduktion der CO₂-Emissionen (CO₂-Gesetz) können Projekte zur direkten Nutzung der Geothermie für die Wärmebereitstellung finanziell unterstützt werden (Quelle: BFE).

11.1.1 Gegenwärtige Vollzugspraxis

Der Kanton Wallis erteilt jedes Jahr über 300 Bohrbewilligungen, gemäss Statistik der DUW zwei Drittel davon für Geothermieprojekte und vorwiegend für die Nutzungen der untiefen Geothermie (Erdwärmesonden EWS und Grundwasser-Wärmepumpen GWP). Mit der zunehmenden Nutzungsdichte steigen die raumplanerischen Herausforderungen erheblich und eine Vermehrung von Nachbarschaftskonflikten kann nicht ausgeschlossen werden. Im alpinen Raum sind zudem Bohroperationen immer mit einem gewissen Restrisiko verbunden, die auf die heterogene alpine Geologie zurückzuführen ist²². Hier sind neben der energetischen Nutzung die Fragen der öffentlichen Sicherheit im Zusammenhang mit dem Gewässerschutz und geologischen Risiken daher von zentraler Bedeutung.

Um diese Risiken zu reduzieren, publiziert der Kanton sogenannte Zulässigkeitskarten. Diese interaktiven Instrumente dienen dazu, die Beurteilung der Eingriffe in den Untergrund für Bürger, Fachleute und Behörden zu vereinfachen. Sie sollen zu einer rationellen und nachhaltigen Nutzung des Untergrundes beitragen, die den besonderen Schutzanforderungen gerecht wird. So können auch allfällige Interessenabwägungen auf objektiver Basis vorgenommen werden. Obwohl sich die Praxis für die Realisierung von EWS und GWP etabliert hat, fehlt derzeit eine Grundlage von entsprechend aufbereiteten Geodaten für die Erkundung des Tiefengrundwassers, bzw. für geothermische Bohrungen, die aufgrund ihrer Tiefe oder Nutzungsintensität einen übergeordneten öffentlichen Nutzen²³ darstellen.

Aus diesem Grund haben die DUW, die für die Bohrbewilligungen im Kanton Wallis zuständige Behörde, und die DEWK, die für Energiefragen und dem Energiesektor zuständige Behörde, beschlossen, parallel zu den laufenden Arbeiten an die «Georessourcengesetz», welche das stark veraltete kantonale Bergbau-Regelwerk²⁴ ersetzen soll, konsolidierte Datengrundlagen für geothermische Projekte im Wallis zu erarbeiten. Im Wallis liegt das Verfügungsrecht über das Grundwasser bei den Gemeinden. Die Verfügung des Tiefengrundwassers als wichtiges geothermisches Potenzial ist als solches heute nicht geregelt, was rechtlich behandelt werden muss. Diese Situation erschwert die Organisation der Aufgaben der Raumplanung, der Ressourcennutzung und des Grundwasserschutzes. Die Tatsache, dass viele Grundwasservorkommen über die Gemeindegrenzen hinaus gehen, führt zu erheblichen Schwierigkeiten bei der Bewirtschaftung und der Festlegung von Konzessionen. Die entsprechenden Zuständigkeiten und Kompetenzen sind daher oft nicht

²² S. dazu <https://www.vs.ch/de/web/sen/grundwasser-und-bauwesen>

²³ Die Grenzen einer zunehmenden öffentlichen Nutzung sind so gesetzt, dass eine gleichzeitige Nutzung nicht mehr ohne weiteres möglich ist und/oder deren Nutzung sich gegenseitig beeinträchtigen kann.

²⁴ Gesetz über die Bergwerke und Steinbrüche vom 21. November 1856: https://lex.vs.ch/app/de/texts_of_law/931.1

ausreichend geklärt und es gilt noch häufig das Prinzip «*First come, first served*». Dies kann zu Übernutzung des Untergrundes oder Konflikten führen. Unbefriedigend ist derzeit, dass rein organisatorische Faktoren einen angemessenen Daten-, Informations- und Wissensaustausch behindern, der für die Entwicklung geeigneter Planungsgrundlagen unerlässlich ist. Konfliktsituationen im Untergrund, insbesondere im Grundwasser, sind in der Regel schwer erkennbar und werden erst nach Jahren sichtbar. Ein erhöhtes Gefährdungspotential als Folge unzureichender Planungsaufgaben kann zudem zu Mehrkosten führen. Bei auftretenden Konflikten oder einer defizitären Kommunikation muss zudem mit einem Vertrauensverlust der Bevölkerung gerechnet werden.

11.1.2 Lehre aus dem Projekt Tiefe Geothermie Brig-Glis AG (TGBG AG)

Das Projekt der Tiefe Geothermie Brig-Glis AG (TGBG AG), welches die Quartiere der Gemeinde mit heissem Wasser aus bis zu 1 km Tiefe beheizen will, stellt zwar ein Beispiel eines vielversprechenden «Leuchtturmprojekt» dar für eine neue Generation von Geothermie-Anlagen im Rhonetal, gleichzeitig aber auch eine aufgrund von fehlenden Rahmenbedingungen verpasste Chance. Nach erfolgreichen Machbarkeitsstudien und trotz des geringen Risikos für die öffentliche Sicherheit ist das Projekt weiterhin hängig. Ein Grund dafür sind sicherlich die oben erwähnten administrativen und politischen Unsicherheiten, die auf einen Mangel an Anreizen hindeuten und eine ungünstige Ausgangslage für die Durchführung eines Genehmigungsverfahrens darstellen. Es ist sicherlich auch so, dass die Weiterverfolgung eines solchen Projektes im Raum Brig von der Abklärung der wirtschaftlichen Tragfähigkeit und der regulatorischen Bereitschaft hätte profitieren können. Die kantonale Wasserstrategie (Kanton Wallis Staatsrat (2013)) hat die Notwendigkeit einer Anpassung der Gesetzgebung bereits früh erkannt, damit notwendige Rahmenbedingungen für sichere Investitionen geschaffen werden (Ausarbeitung einer spezifischen Gesetzesbestimmung oder Koordination einer Gesetzesänderung in den Bereichen Wasser, Umwelt und Energie). Für die Förderung der Geothermie muss aber prioritär der identifizierte Geltungsbereich des kantonalen Georessourcengesetzes umgesetzt werden. Dies würde nicht nur die Gemeinden bei der koordinierten Planung der notwendigen Untersuchungen und Infrastrukturen unterstützen, sondern auch die Rechtssicherheit für Investoren und die generelle Koordination mit den kantonalen und kommunalen Behörden erleichtern. Die Festlegung von Gebieten im kantonalen Richtplan, in denen Grundwasserwärme aufgrund besonderer Schutzanforderungen nicht oder nur eingeschränkt genutzt werden soll, wäre ein erster hilfreicher Schritt. Der nächste Schritt sollte darin bestehen, den Untergrund weiter einzubeziehen und das identifizierte und nutzbare geothermische Potenzial systematisch in die Flächennutzungsplanung der Gemeinde einzubeziehen. Die Ausscheidung von Grundwasserwärmenutzungszonen, in welcher spezifische Vorschriften bei der Erkundung des Untergrunds

gelten würde, wäre z.B. eine gute Voraussetzung für eine koordinierte Planung. Die Akzeptanz und Finanzierung strategisch relevanter Projekte, die im gemeinsamen Interesse der Gemeinden und des Kantons liegen, könnte idealerweise unterstützt werden. Unter solchen Bedingungen hätte das Projekt der TBGB AG bessere Chancen gehabt, realisiert zu werden.

11.1.3 Nutzbare Potenziale nutzen

Abb. A1 zeigt die hohe Dichte aufgeschlossener und bekannter Thermalwasservorkommen im Kanton Wallis, welche das höchste geothermische Potenzial in der Schweiz aufweisen. Das grosse Potenzial ist nicht nur ein theoretisches, sondern auch ein bereits nachgewiesenes Potenzial. Die von der CREALP Anfang 2024 aktualisierte Datenbank BDF-Geotherm (Sonney & Vuataz, 2007) liefert sehr wertvolle direkte Informationen aus Bohrungen und geochemischen Analysen. Diese Datengrundlage bietet einen erfolgversprechenden Rahmen für eine thermohydraulische Charakterisierung der hydrothermalen Systeme im Wallis, die eine geologisch-hydrogeologische Klassifizierung nach Typen ermöglicht. Die Tatsache, dass in den letzten Jahren bei EWS-Bohrungen an mehreren Stellen artesisch gespanntes subthermales Grundwasser nachgewiesen werden konnte, deutet zudem darauf hin, dass die wirtschaftliche Nutzung von Grundwasserwärme aus gut zugänglichen, tieferen Aquiferzonen auch in Gebieten möglich ist, die bisher als eher nicht ergiebig galten.

Das im Rahmen dieser Studie entwickelten 3D-THM vervollständigt die bisherigen geothermischen Untersuchungen im Raum Brig. Die Qualität der generierten Grundlagen kann als Benchmark einer erfolgreich abgeschlossenen Prospektionsphase angesehen werden, der gute Voraussetzung für die Zustellung eines Gesuches für eine Erkundungsbohrung in Brig stellt. Die Verifizierung und die numerischen Beispiele zeigen die Rechenfähigkeiten des Modells und deuten auf wichtige physikalische Eigenschaften des Tiefengrundwasserströmungssystems, die nun anlässlich einer Testbohrung zu bestätigen wären. Das entwickelte Modell sollte bei Geothermie-Ingenieuren auch Interesse wecken, indem eine iterative Überprüfung der thermischen Interaktion zwischen benachbarten Heiz- und Kühlanlagen in verschiedenen Tiefenbereiche ermöglicht wird, die einen erheblichen Einfluss auf die Energieeffizienz der beteiligten Systeme haben kann. Das 3D-THM bietet somit die rechnerischen Mittel, um eine gegebene oder realisierte Bohrlochkonfigurationen auf der Grundlage der Tiefe und der Grundwasserströmungsrichtung virtuell zu testen, was zusätzliche Garantien für die optimale Nutzung des unterirdischen Thermalwassers gewährleistet. Es könnte zudem zur Analyse der Auswirkungen eines übermässigen Ausbaus von geothermischen Nutzungen eingesetzt werden, um eine ungünstige Ausbeutung von der geothermischen Ressource zu verhindern. Auf diese Weise können auch die Schutzanforderungen besser wahrgenommen und berücksichtigt werden.

Eine frühzeitige Investition in ein solches Modell lohnt sich daher, da es sicherlich als Instrument zur Erfolgskontrolle der geothermischen Nutzung in die Produktionsphase integriert werden könnte.

11.2 Konsolidierte Dokumentation des kantonalen Untergrunds

Im Rahmen dieser Studie wurde ein Modellwerkzeug entwickelt, welches die regionalen Kenntnisse über den Untergrund erweitert und ebenfalls für die lokale Bedürfnisse der Planung einer Erkundungsbohrung vorteilhaft eingesetzt werden kann. Wenn die Erkundung der Schlüssel zum Umgang mit dem Fündigkeitsrisiko hin zu einer wirtschaftlich nutzbaren geothermischen Ressource ist, muss eine erfolgreiche Prospektionsphase (i.e. bei der Machbarkeitsstudie) die bestmögliche Planung der Bohroperation und die Vermeidung von Bohrfehlern sichergestellt werden. Dabei muss ein Prospektionsprogramm die relevantesten Unsicherheiten adressieren, welche auf Basis des aktuellen Datenbestandes in einem Vorprojekt eingehend analysiert werden müssen. Mit dem 3D-THM konnte z.B. gezeigt werden, dass Modelle sich als Planungswerkzeuge bestens eignen, indem Geodatensätzen beliebig generiert werden können. So konnte bereits das geothermische Potenzial im Raum Brig orientierend dargestellt werden. Damit steht der Gemeinde Brig eine Informationsgrundlage für die Aufnahme in den Zonennutzungsplan bzw. dem Kanton für den kantonalen Richtplan zum Thema «Geothermie» zur Verfügung.

11.2.1 Relevanz der geologischen Daten

Damit aber ein Modell auch für die Detailplanung einer Erkundung und den Vollzug direkt angewendet werden kann, müssen die verbleibende Unsicherheiten u.a. auch die Prozesse im Untergrund die aus Bau- und Nutzungsaktivitäten zurückzuführen sind, mit der bestmöglichen Auflösung abgebildet werden können. Somit muss die Zurverfügungstellung der nötigen minimalen Datensätze sowohl mit öffentlichen als auch privaten Akteuren abgeklärt werden können²⁵. Das Bundesrecht hat in der Energiegesetzgebung einzig eine Zustellungspflicht von Geodaten im Zusammenhang mit Investitionsbeiträgen für die Prospektion und die Erschliessung eines Geothermiereservoirs eingeführt²⁶. Es enthält aber keine gesetzliche Grundlage, um die Eigentümer einer Anlage zur thermischen Nutzung des Untergrunds zu verpflichten, ihre geologischen Daten den Behörden zur freien Nutzung zur Verfügung zu stellen. Die Kantone können aber in ihrer eigenen

²⁵ Mit der seit 2018 laufenden Entwicklung des hydrogeologischen Informationssystem STRATES-VS wurde im Wallis die Stossrichtung zur vermehrten Nutzung und Aufwertung der Daten mit Bezug auf dem Untergrund angestrebt.

²⁶ https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/766/de#annex_2_5/lv_l1

Gesetzgebung entsprechende Verpflichtungen aufführen, was auch vom Bund ausdrücklich empfohlen wird, da es ohne entsprechende geologische Daten kaum möglich ist, eine umfassende Schutz- und Nutzungsplanung für die unterirdischen Gewässer oder anderen Ressourcen zu erstellen.

Ganz grundsätzlich können Geothermieprojekte einen wesentlichen Impuls zur Erarbeitung von notwendigen Planungsgrundlagen leisten, sowie der Verankerung entsprechender Anforderungen in der Raumplanung dienen. Wie die Bereitstellung der notwendigen Geodaten und Planungsgrundlagen für eine zukünftige unterirdische Raumplanung geregelt werden soll, muss noch im Entwurf des kantonalen Georessourcengesetzes festgelegt werden, welcher derzeit diskutiert wird. Dabei sind konsolidierte Angaben, respektive interpretierten Daten zu den entsprechenden geothermischen Potenzialen, zum geologischen Aufbau in der Tiefe, zu den möglichen Risiken (z.B. Bruchsysteme, sensible geologische Horizonte, Arteser) sowie zu regionalen und überregionalen Grundwasserfließsystemen mit zu berücksichtigen. Aus den zur Verfügung stehenden kantonalen Datengrundlagen wären zudem möglichst belastbare Kennwerte und Parametergrößen abzuleiten, die bei der Auslegung indirekter (Geophysik) oder direkter (Erkundungsbohrungen) Untersuchungen, sowie zur allgemeinen Auseinandersetzung mit Projektunsicherheiten, unerlässlich sind. Auf diese Weise kann auch die Aussagekraft, der im Rahmen von projektbezogenen Vorhaben durchgeführten Modellierungsarbeiten positiv unterstützt und die Zuverlässigkeit von Prognosen technisch und wirtschaftlich gezielt beeinflusst werden.

11.2.2 Herausforderung Untergrund

Trotz mehrerer Einzelstudien zum geothermischen Potenzial, die im Laufe der Jahre durchgeführt wurden, steht eine Entwicklung eines entsprechenden kantonalen Förderprogramms durch die zuständigen kantonalen und kommunalen Behörden noch aus. So bestehen derzeit Wissenslücken, was die Bearbeitung von Gesuchen für tiefere Bohrungen (> 1 km) oder die Förderung von geplanten Geothermieprojekten im öffentlichen Interesse erheblich erschwert. Dies liegt einerseits an der fehlenden Datenintegration in Form von Informationen und konsolidiertem Wissen über den Untergrund und andererseits am mangelnden politischen Willen die teilweise identifizierten vielversprechenden geothermischen Ressourcen zu erschliessen.

Da bundesrechtlich gesehen Private nicht zur Bereitstellung von geologischen Daten im Zusammenhang mit unterirdischen Bauten und Anlagen verpflichtet sind, wären entsprechenden Vereinbarung zwischen kantonalen Behörden und Privaten für geothermische Erschliessungsprogramme förderlich. Die Studie Brig zeigt jedoch, dass eine Berücksichtigung tiefer geothermischer Potenziale konsequent in die Energieplanung der Gemeinden einbezogen werden sollte. Da das Grundwasser im Kanton Wallis in die Zuständigkeit

der Gemeinden fällt, kann aber der Kanton nur bedingt Entwicklungsprogramme in diesem Kontext umsetzen. Um diese Hindernisse zu überwinden, konzentrieren sich DUW und DEWK auf die Sensibilisierung der betroffenen Akteure. Ziel des Kantons sollte es aber sein, die Planung im Untergrund so zu fördern, dass ein standardisiertes Verfahren zur Charakterisierung von Georessourcen umgesetzt und geothermische Projekte einheitlich und kohärent entwickelt werden können. Auch wenn die Arbeiten an einer entsprechenden kantonalen Gesetzgebung für den Untergrund im Wallis noch nicht abgeschlossen sind, stellt die vorliegende Studie einen weiteren Schritt zur Verbesserung der Durchführung von Planungsaufgaben und der Anforderungen an Geodatensätze, die für Geothermieprojekte unerlässlich sind, dar.

Dies ist eine wichtige Voraussetzung, um durch Synergien und Austausch wichtige Lerneffekte auszulösen, die Effizienz der unterirdischen Investitionen zu sichern und die Überwindung der Lernkurve zu ermöglichen. Dies erleichtert es, Erfolge zu wiederholen und Fehler aus früheren Projekten zu vermeiden. Um die Planungssicherheit generell zu erhöhen, ist eine entscheidungsbefugte Trägerschaft mit einem Team von erfahrenen Explorationsfachleuten ein wesentlicher Aspekt. Die Behörden spielen hier eine wichtige, wenn auch nicht steuernde Rolle, indem sie einen zielgerichteten Genehmigungsprozess ermöglichen. Darüber hinaus bleibt die Behörde für die ganzheitliche Betrachtung der verschiedenen Nutzungsansprüche des Untergrundes am Standort verantwortlich, die der Projektträger zu berücksichtigen hat.

Es bleibt zu hoffen, dass das Fallbeispiel Brig auch den konkreten Bedarf für eine entsprechende Regelung explizit aufzeigen kann. Das Gesetzgebungsverfahren zum Georessourcengesetz, das mit der Staatsratsentscheidung vom 17. März 2021 beschlossen wurde, kann dabei vom bedarfsorientierten Ansatz dieser Studie profitieren. So wurde das Interesse der vorliegenden Studie und des Geotex-Projekts (Schmid et al., in prep.) im Kontext des eingeleiteten legislativen Prozesses von den Bundes- und Kantonsbehörden klar anerkannt, mit dem Ziel, die erforderlichen Zusammenhänge zwischen den technischen und den rechtlich-administrativen Aspekten im Zusammenhang mit Projekten zur Erkundung des Untergrunds besser zu veranschaulichen.

11.3 Entwicklung von Leitlinien & Vorschriften

Die Anforderungen an die nachhaltige Bewirtschaftung von Grundwasserressourcen werden durch die Gewässerschutzgesetzgebung formuliert. Die rationale und optimale Energienutzung und die zu erreichende Ziele sind hingegen in der Energiegesetzgebung verankert. Die Kantone sind in diesem Kontext gefragt, die nötigen Rahmenbedingungen zu schaffen, die ein zielführendes Abwägen zwischen den Schutz- und Nut-

zungsinteressen ermöglicht. Dabei braucht es nicht nur eine klare Definition im rechtlichen Sinne der Zuständigkeiten und Verfügungsrechte im Untergrund, sondern auch der nötigen Minimalanforderungen für den Vollzug und Erfolgskontrollen.

11.3.1 Ausgangslage

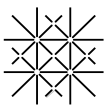
Die Planung und Bewilligung von Nutzungen des Untergrunds im Wallis liegt in der Hoheit des Kantons, wobei das Verfügungsrecht über das Grundwasser den Gemeinden obliegt. Dies erfordert ein hohes Mass an Koordination, damit eine geordnete und nachhaltige Planung und Nutzung des Untergrunds erreicht wird. Neben der Entwicklung von raumplanerischen Instrumenten, müssen auch harmonisierte Verfahren und eine korrekte Projektaufführung in der Praxis adressiert werden. Die verschiedenen Bedürfnisse im Zusammenhang mit privaten oder öffentlichen Infrastrukturprojekten müssen hier berücksichtigt werden. Diesbezüglich hat die zuständige Behörde die wichtige Aufgabe, die minimalen Anforderungen für Projekte unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften des kantonalen Untergrunds interdisziplinär zu präzisieren.

Der kantonale Richtplan stellt in diesem Zusammenhang ein wichtiges Instrument dar, um die kantonalen Georessourcen und die damit auf die verbundenen Koordinationsanforderungen im Untergrund aufmerksam zu machen. Um Projekte zu fördern, muss zusätzlich für die Planung und Begleitung der verschiedenen Etappen von Geothermieprojekten (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) ein zielführendes Vorgehen angestrebt werden, damit der Ablauf der entsprechenden Bewilligungsverfahren vereinfacht wird. Dabei muss insbesondere zwischen der initialen Erkundungsphase, welche Bohrarbeiten einschliesst, und die Betriebsphase mit definitivem Anlagebau unterschieden werden.

11.3.2 Grobskizze Musterverfahren «Geothermiebohrungen»

Um die Projektträger bei der Vorbereitung einer Explorationskampagne zu unterstützen, wäre es vorteilhaft, wenn ein Musterverfahren für die Bewertung und Genehmigung von Geothermieprojekten vorliegen würde. Minimalanforderungen sollten so abgeglichen werden, dass damit auch die Kompatibilität mit den Bundesanforderungen für einen Subventionsantrag gegeben ist. Folgende technisch-administrative Aspekte sollten insbesondere im Rahmen eines solchen Musterverfahrens aufbauend abgedeckt werden:

- **Phase I - Antrag auf geothermische Exploration:** Generelle Informationen zum Projekt und die zu erreichenden Ziele; Konzeptmodell (qualitativ und/oder numerisch); Angaben zum vorläufigen Bohrprogramm; Ergebnis aus den gewässerschutz- und umweltschutzrechtlichen Abklärungen; Kommentar zu



spezifischen geologischen Risiken (z.B. Arteser, Instabilitäten, Erdbeben); Berücksichtigung allfällige Vorschriften gemäss Gemeindebaureglement.

- **Phase II - Kantonale Genehmigung der Erkundung:** Frühabklärung der für das konzentrierte Verfahren zuständigen Dienststelle (entweder DUW, DEWK, oder kantonales Bausekretariat²⁷). Minimale Kriterien zur Überprüfung der entscheidenden Unterlagen: Bohrprogramm; Prognose thermohydraulische Modellierung; Notfallmassnahmenplan; Überwachungskonzept (Umwelt, Gewässer, private Schutzgüter); Abfallbewirtschaftungsplan; Bohrstellenorganisation mit Information an die Lokalbevölkerung.
- **Phase III – Kommunikation durch die Projektleitung der Erkundungsergebnisse:** Falls die Ressource bestätigt wird, Antrag auf eine Konzession bzw. Nutzungsbewilligung: vorgesehener Nutzungsplan, aktualisiertes Modell, Bohrlochausrüstung, Notfallreaktionsplan, langfristige Monitorings-Strategie. Falls die Ressource nicht fündig gemacht wird, Überprüfung bzw. Ende des Projektes. Bei beiden Ausgangslagen, Zustellung der neu gewonnenen geologischen und hydrogeologischen Daten zwecks Aufnahme auf das kantonale Informationssystem STRATES-VS.
- **Phase IV – Kantonale Betriebsbewilligung:** Validierung des vorgesehenen Nutzungskonzeptes, Definition der im Betrieb zu berücksichtigenden Alarm- und Warnungs-Schwellenwerte, Modelleinsatz zur Erfolgskontrolle, Kommunikationspflicht (i.e. Erfolgskontrolle, Jahresbericht), Verfüllungsplan des Bohrlochs bei Aufgabe der Nutzungsanlage, Einhaltung allfälliger weiteren kommunalen Anforderungen.

Anhang: Referenzen

AG, B. A. T.: Lötschberg – Basislinie, Teilabschnitt Süd, Probebohrungen zur Ermittlung der geologischen Verhältnisse, Bohrberichte oder geologische Kurzberichte Bohrungen Mund (1994), Baltschiedertal (1995), Lidu (1995), Maachi (1996), St. German (1997), Stegentola (1997), Portal Steg (1995), Rarnerchumma (1996), 1994-1997.

AG, G. L.-B. p. A. K. H.: BLS Alp Transit Lötschberg Schlussdokumentation: Los Nr. 46.43.010, Los Nr. 46.41.010 und Los Nr. 46.32.010, 2007.

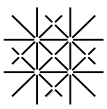
AGEPP: Géothermie du cristallin profond de la vallée du Rhône, étude préliminaire, à l'attention de l'Office fédéral de l'énergie, 2006.

ARE: Raumplanung im Untergrund. Good Practice Sammlung, 2023.

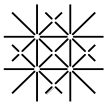
Badino, G.: Underground Drainage Systems and Geothermal Flux, Acta Carsologica, 32(2), <https://doi.org/10.3986/ac.v34i2.261>, 2006.

BFE: Energieperspektiven 2050+. Kurzbericht, 2020.

²⁷ Die Erfahrungen im Wallis zeigen, dass Explorationsprojekte in den letzten Jahren nicht immer einheitlich bewilligt wurden, was für den Gesuchsteller eine gewisse administrative Herausforderung darstellen kann. Es wäre daher sehr empfehlenswert, trotz fehlender kantonaler Gesetzgebung über den Untergrund, ein standardisiertes Verfahren für Geothermiebohrungen im Wallis festzulegen.



- Burri, M.: Geologischer Atlas der Schweiz, 1:25'000, Geologische Karte Nr.93: Blatt Brig, Geologische Kommission der Schweiz, 1991.
- Christe, P., Zurfluh, F., Vermeulen, P., and Blaha, P.: Natürliche und anthropogene Einflussfaktoren auf die Hydrogeologie im oberen Rhone-Aquifer (HydRhA Modell), 2024.
- DEWK: Energieland Wallis: Gemeinsam zu 100% erneuerbarer und einheimischer Versorgung. Vision 2060 und Ziele 2035., 64, 2019.
- Diamond, L. W., Wanner, C., and Waber, H. N.: Penetration depth of meteoric water in orogenic geothermal systems, *Geology*, 46, 1063-1066, 10.1130/G45394.1, 2018.
- Dolivo, E.: Nouvelles observations structurales au SW du massif de l'Aar entre Visp et Gampel, *Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz* 157, 1982.
- Egli, D., Baumann, R., Küng, S., Berger, A., Baron, L., and Herwegh, M.: Structural characteristics, bulk porosity and evolution of an exhumed long-lived hydrothermal system, *Tectonophysics*, 747, 239-258, 10.1016/j.tecto.2018.10.008, 2018.
- El-Rayes, A., Omran, A., Geriesh, M., and Hochschild, V.: Estimation of hydraulic conductivity in fractured crystalline aquifers using remote sensing and field data analyses: An example from Wadi Nasab area, South Sinai, Egypt, *J Earth Syst Sci*, 129, ARTN 203 10.1007/s12040-020-01470-5, 2020.
- Epting, J., Walde, M., and Schilling, O.: Abschlussbericht - Herleitung «natürlicher» Grundwassertemperaturen & Definition Tiefengrundwasser – Hydrogeologische Grundlagen, 2024.
- Epting, J., García-Gil, A., Huggenberger, P., Vázquez-Suñe, E., and Mueller, M. H.: Development of Concepts for the Management of Thermal Resources in Urban Areas – Assessment of Transferability from the Basel (Switzerland) and Zaragoza (Spain) Case Studies, *Journal of Hydrology*, 2017.
- Jõelet, A. K., Kalle, Shogenova, Alla; Sliupa, Saulius; Kukkonen, Ilmo; Rastenienè, V.; Zabele, A: Thermal conductivity of Cambrian siliciclastic rocks from the Baltic basin, *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences: Geology*, 51, 5-15, 10.3176/geol.2002.1.01, 2002.
- Kanton Wallis Staatsrat: Wasserstrategie des Kantons Wallis. Herausforderungen, Ziele, Stossrichtungen und Massnahmen, 64, 2013.
- Liao, W. Z., Lin, A. T., Liu, C. S., Oung, J. N., and Wang, Y. S.: Heat flow in the rifted continental margin of the South China Sea near Taiwan and its tectonic implications, *J Asian Earth Sci*, 92, 233-244, 10.1016/j.jseae.2014.01.003, 2014.
- Mastrotheodoros, T., Pappas, C., Molnar, P., Burlando, P., Manoli, G., Parajka, J., Rigon, R., Szeles, B., Bottazzi, M., Hadjidoukas, P., and Fatichi, S.: More green and less blue water in the Alps during warmer summers, *Nat Clim Change*, 10, 155-+, 10.1038/s41558-019-0676-5, 2020.
- Mojarrad, B. B., Wörman, A., Riml, J., and Xu, S.: The influence of hyporheic fluxes on regional groundwater discharge zones, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2021, 1-28, 10.5194/hess-2021-148, 2021.
- Musso Piantelli, F., Mair, D., Berger, A., Schlunegger, F., Wiederkehr, M., Kurmann, E., Baumberger, R., Möri, A., and Herwegh, M.: 4D reconstruction of the Doldenhorn nappe-basement system in the Aar massif: Insights into late-stage continent-continent collision in the Swiss Alps, *Tectonophysics*, 843, 229586, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229586>, 2022.
- Nash, J. E. S., J. V.: River flow forecasting through conceptual models, *Journal of Hydrology*, 10, 282-290, 1970.
- PG-Geothermie: Geothermie Brig-Glis; Geothermiebohrungen Brigerbad Phase 2: Schlussbericht Phase 2, zuhanden Geothermie Brigerbad A. Bundesamt für Energie BfE, S.B.-G., Elektrizitätswerk EnBAG Brig-Glis, FMV Sion, nicht publizierter Bericht (ed), 2013.
- Ross, M., Aitssi, L., Martel, R., and Parent, M.: From geological to groundwater flow models: An example of inter-operability for semi-regular grids, *Three-Dimensional Geologic Mapping for Groundwater Applications, Workshop Extended Abstracts*, Salt Lake City, Utah,



- Schädler, B.: Wasserressourcen in der Schweiz - ein Ausblick, *aqua viva*, 4-7, 2014.
- Scheidler, S., Anders, B., Regli, C., Bolay, S., and Huggenberger, P.: Geothermal use of an Alpine aquifer-Davos pilot study, *Grundwasser*, 24, 277-286, 10.1007/s00767-019-00433-y, 2019.
- Schmid, T., van den Heuvel, D., Wanner, C., Herwegh, M., and Diamond, L.: GeoTex Rhône. Geothermische Exploration im inneralpinen Raum mittels Play Fairway Analyse (PFA) – Beispiel Rhonetal, in prep.
- Solexperts: Geothermieprojekt Brigerbad, Geohydraulische Versuche in der Bohrung 10-BR2, 2010.
- Sonney, R.: Groundwater flow, heat and mass transport in geothermal systems of a Central Alpine Massif. The cases of Lavey-les-Bains, Saint-Gervais-les-Bains and Val d'Illicz, Faculty of Sciences, University of Neuchatel, 2010a.
- Sonney, R.: Groundwater flow, heat and mass transport in geothermal systems of a Central Alpine Massif. The cases of Lavey-les-Bains, Saint-Gervais-les-Bains and Val d'Illicz.. *Geochemistry*., Université de Neuchâtel, NNT : tel-00923368, 2010b.
- Sonney, R. and Vuataz, F. D.: BDFGeotherm: the database of geothermal fluids in Switzerland, Proc. European Geothermal Congress, 2007.
- Steck, A.: Structures of Alpine Deformations in the Zermatt Region, *Schweizerische Mineralogische Und Petrographische Mitteilungen*, Band 69, Heft 2, 1989, 205+, 1989.
- Steck, A. and Université de Lausanne. Institut de géologie et de paléontologie. Coupe tectonique horizontale des Alpes centrales, Université de Lausanne, Institut de géologie et paléontologie, 1989.
- Toth, J.: Gravity flow of groundwater: a geologic agent, *Gravitational Systems of Groundwater Flow: Theory, Evaluation, Utilization*, 91-127, Doi 10.1017/Cb09780511576546.005, 2009.
- Tóth, J.: *Gravitational Systems of Groundwater Flow, Theory, Evaluation, Utilization*, Cambridge 2009.
- Wang, Z. H. and Allen, M. B.: Modeling full-tensor anisotropy in groundwater flow via an iterative scheme for mixed finite elements, *Transport Porous Med*, 25, 147-165, Doi 10.1007/Bf00135853, 1996.
- Wanner, C., Diamond, L. W., and Alt-Epping, P.: Quantification of 3-D Thermal Anomalies From Surface Observations of an Orogenic Geothermal System (Grimsel Pass, Swiss Alps), *J Geophys Res-Sol Ea*, 124, 10839-10854, 10.1029/2019jb018335, 2019.
- Werner Leu, A. M., Oliver Meyer, Stefan Pfammater: Geothermieprojekt Brig-Glis - Vorprojekt Energienutzung mit einer Mitteltiefen Geothermiebohrung (hydrothermal), 2018.
- Zeeb, C., Gomez-Rivas, E., Bons, P. D., Virgo, S., and Blum, P.: Fracture network evaluation program (FraNEP): A software for analyzing 2D fracture trace-line maps, *Comput Geosci-Uk*, 60, 11-22, 10.1016/j.cageo.2013.04.027, 2013.
- Zhang, X., Sanderson, D. J., Harkness, R. M., and Last, N. C.: Evaluation of the 2-D permeability tensor for fractured rock masses, *Int J Rock Mech Min*, 33, 17-37, Doi 10.1016/0148-9062(95)00042-9, 1996.

Anhang: Abbildungen und Tabellen

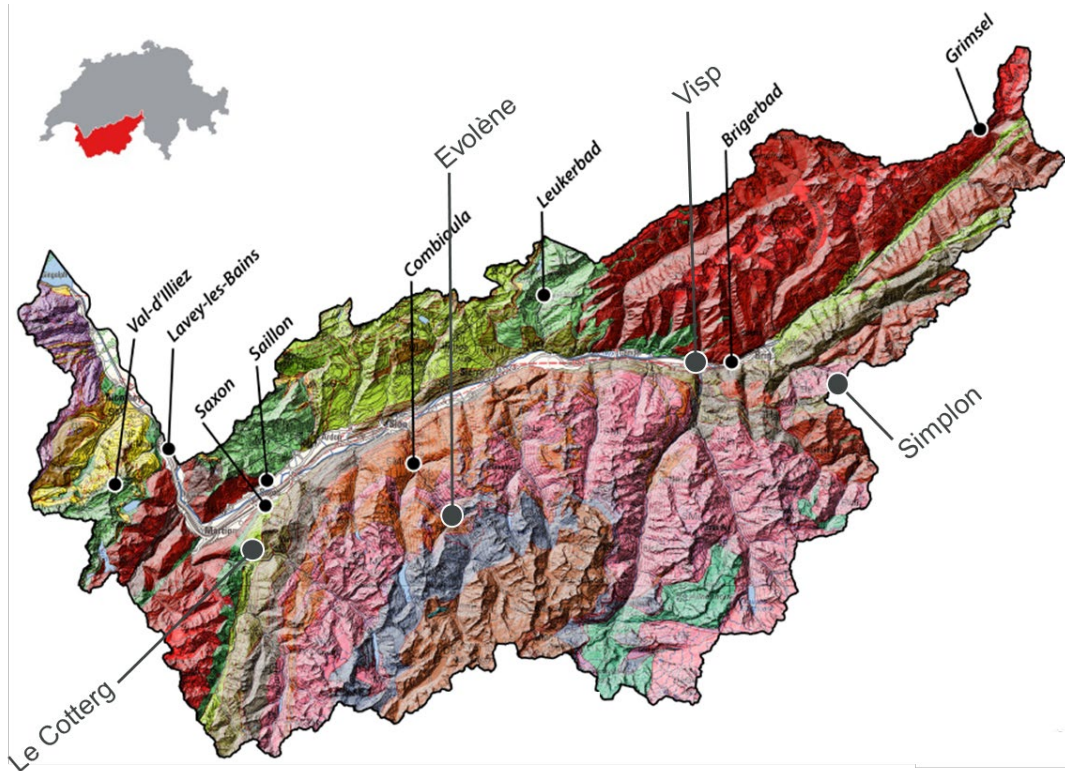


Abb. A1: Aufgeschlossene und bekannte Vorkommen von Thermalwasser im Kanton Wallis (Quellaustritt an der Oberfläche, Arteser während Bohrarbeiten, Tunnelwasser; Legende: geologische Karte der Schweiz 1:500000; Bundesamt für Landestopografie swisstopo).

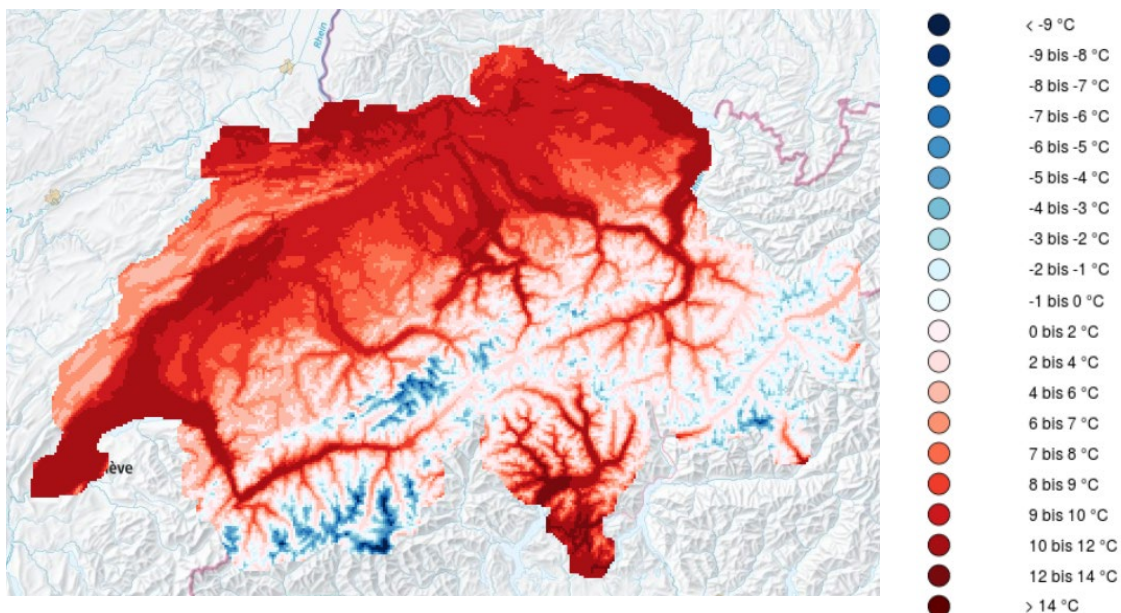


Abb. A2: Klimanormwerte Temperatur 1991-2000 (MeteoSchweiz).

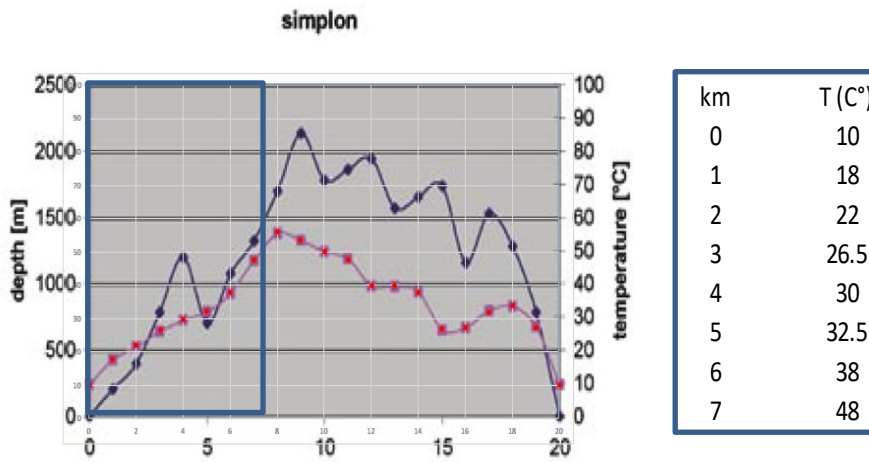


Abb. A3: Links: Temperaturverlauf im Simplontunnel digitalisiert aus Badino (2005). Die ersten 7 km ab Tunnelportal liegen im Projektperimeter (Abb. 15). Rechts: Für diese Studie verwendete Temperaturen.

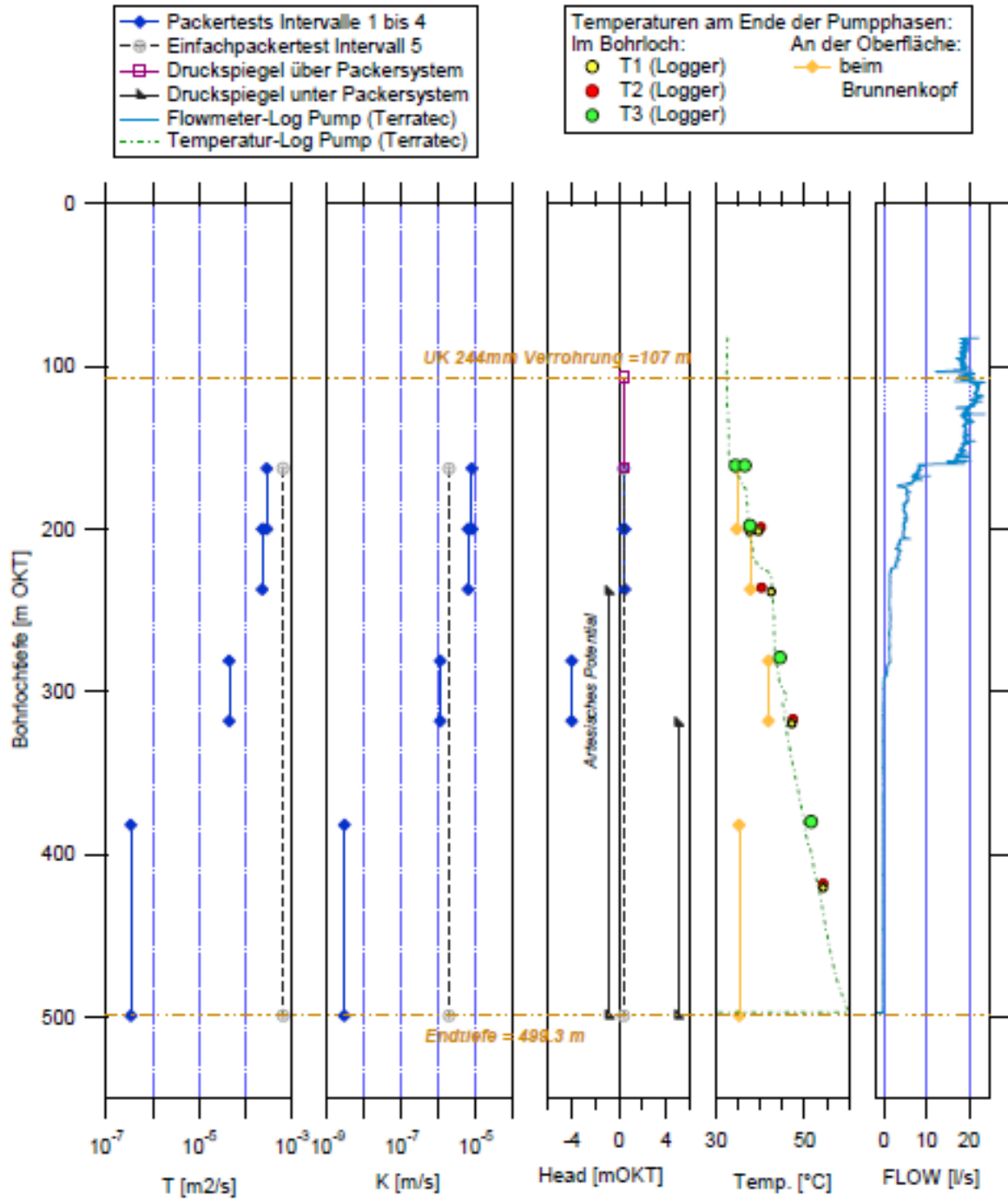
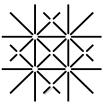


Abb. A4: Vertikale Verteilung der ermittelten geohydraulischen Parameter Transmissivität (T), k-Wert (k), statisches Druckpotential (hs), sowie Temperaturdaten und Flowmeterlog (Solexperts 2010).

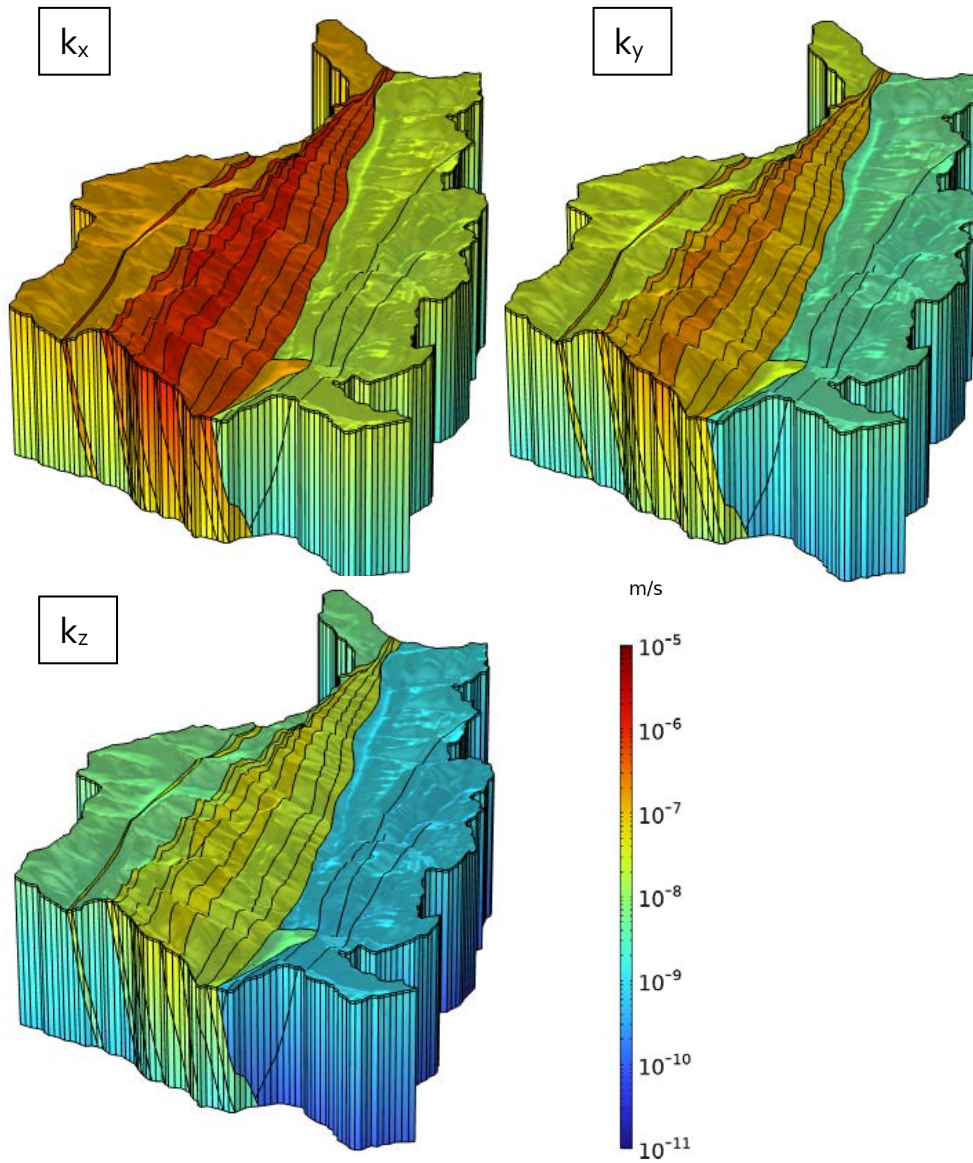
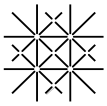


Abb. A5: Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit (k-Werte).

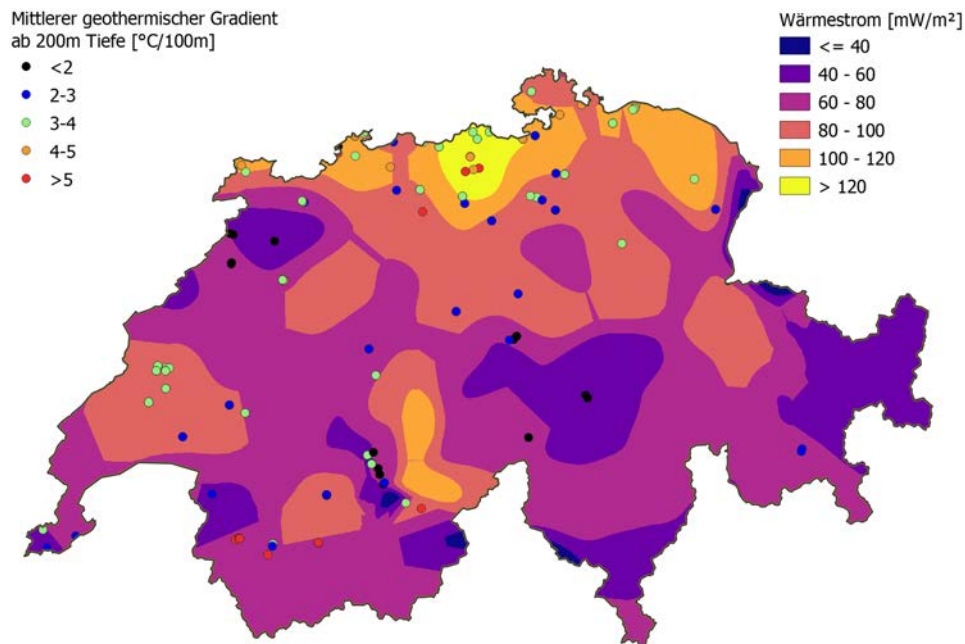
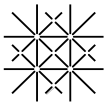


Abb. A6: Wärmestrom (Epting et al. (2024)) verändert nach Geothermische Karte der Schweiz 1:500000; swisstopo, SGPK).

Tab. A2: Zusammenstellung der verwendeten geologischen Profile.

Profil W->O	Name GA25	Ausgabejahr	Maßstab	Autor(en)	Sedimentgesteine kristallines Grundgebirge Verlauf Störungszonen	Bemerkung
GA25_153_Plate_II_Section_14	Raron (LK 1288)	2018 1:25000	M. Sartori, M. Marthaler & Y. Gouffon	X X X		
GA25_153_Plate_II_Section_16a	Raron (LK 1288)	2017 1:25000	M. Sartori, M. Marthaler & Y. Gouffon	X X X		Differenzierung Quartär
GA25_153_Plate_III_Section_16b	Raron (LK 1288)	2017 1:25000	M. Sartori, M. Marthaler & Y. Gouffon	X X X		Differenzierung Quartär
GA25_131_Plate_II_Section_7	Aletschgletscher (LK 1269)	2011 1:25000	A. Steck	X X		Schichteinfallen
GA25_131_Plate_I_Section_3	Aletschgletscher (LK 1269)	2011 1:25000	A. Steck	X X		Schichteinfallen, Deckengrenze
GA25_131_Plate_I_Section_4	Aletschgletscher (LK 1269)	2011 1:25000	A. Steck	X X		Schichteinfallen, Deckengrenze
GA25_131_Plate_I_Section_5	Aletschgletscher (LK 1269)	2011 1:25000	A. Steck	X		Schichteinfallen
GA25_131_Plate_I_Section_6	Aletschgletscher (LK 1269)	2011 1:25000	A. Steck	X		Schichteinfallen



Tab. A3: Vergleich geologischer und hydrothermischer Parameter (aus Sonney 2010).

Boundary conditions	Obs./Eval. values	Imposed values
Water recharge (mountain condition)	1 to 20% of precip.	10% of precip.
Imposed hydraulic head (m)		Elevation of rivers
Surface temperature (°C)	0-10	0-10
Hydraulic conductivity (m/s)		
Gneiss decompressed zone	$> 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Deep gneiss	10^{-6} to 10^{-12}	10^{-8}
Fractured zone of gneiss (fault)	10^{-2} to 10^{-5}	10^{-3}
Glaciolacustrine deposits	10^{-5} to 10^{-8}	10^{-6}
Epinassey fan delta	10^{-4} to 10^{-6}	10^{-5}
Recent alluvial deposits	10^{-2} to 10^{-5}	10^{-3}
Conductivity anisotropy factor		
Deep gneiss	$K(\text{hor.})/K(\text{vert.}) = 2$ and 75°	
Fractured zone of gneiss (fault)	$K(\text{hor.})/K(\text{vert.}) = 10$ and 110°	
Glaciolacustrine deposits	$K(\text{hor.})/K(\text{vert.}) = 10$ and 0°	
Rock thermal conductivity (W/m/K)		
Aiguilles Rouges gneiss	2.65	2.5
Quaternary deposits	2	2
Heat flux (mW/m^{-2})	80-90	87
Porosity (%)		
Aiguilles Rouges gneiss	< 10	< 10
Quaternary deposits	1 to 20	5 to 15
Pumping discharge (L/min)		Annual average discharge
P600		800
P201		350
Temperature in wells (°C)		Sim. initial conditions
P600 (before exploitation)	68	68.4
P201 (before P600 exploitation)	62	56.4
AP (before P201 exploitation)	44	40
Calc. temperature at depth (°C)	110-110	110-130
Geothermal gradient (°C/km)	15-20	16
Mean resid. time of deep wat.(years)	> 8000 (^{14}C)	> 30000

Tab. A4: Modell Parametrisierung für Szenarien A1 & A2 S1 bis S8, hervorgehoben ist jeweils der für die Sensitivitätsanalyse genutzte Parameter und dessen Bandbreite.

Hydrogeologischen Einheiten (Matrix ohne Bruchstrukturen)	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	Einheit
Topo als Head	Topo -20 m	Topo -20 m	Topo -20 m	Topo -20 m	Topo -20 m	Topo -20 m	Topo -20 m	Topo -20 m	m ü.M.
k-Wert kx	1E-06 - 1E-10	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	Anisotropie und tiefenabhängig	m s ⁻¹
k-Wert ky	1E-06 - 1E-10	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	Anisotropie vgl. Tab. 16	vgl. Tab. 16 und Abb. 32	m s ⁻¹
k-Wert kz	0.1 k _x	00.1 k _x	0.1 k _x	0.1 k _x	0.1 k _x	0.1 k _x	0.1 k _x	Abb. 32	m s ⁻¹
Porosität strukturelle Einheit	0.05	0.01 - 0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	-
Heat flux von Modellboden	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	W m ⁻²
Wärmekapazität	800	800	400 - 1200	800	800	800	800	800	J kg ⁻¹ K ⁻¹
Thermische Leitfähigkeit	2.5	2.5	2.5	1 - 5	2.5	2.5	2.5	2.5	W m ⁻¹ K ⁻¹
Alpine Hauptüberschiebungen									
k-Wert	-	-	-	-	1.0E-05	1E-03 - 1E-07	1.0E-05	1.0E-05	m s ⁻¹
Apertur	-	-	-	-	0 - 0.4	0.20	0.20	0.20	m
Porosität	-	-	-	-	0.05	0.05	0.05	0.05	-
Betriebliche Randbedingungen									
Entnahme Bohrung 10-BR2	20	20	20	20	20	20	20	20	l s ⁻¹