

# Thermohydraulische 3D-Modellierung im alpinen Raum

## Erschliessung geothermischer Potenziale im Oberwallis - Pilotprojekt Brig

Stefan Scheidler, Pierre G. Christe, Eric Zechner, Michel A. Walde, Oliver S. Schilling, Jannis Epting

### Zusammenfassung

Der alpine Raum ist geprägt von oft komplexen geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen, weist jedoch zugleich ein hohes geothermisches Potenzial auf, bedingt durch tektonische Strukturen und tiefreichende hydrothermale Strömungssysteme. Die Exploration geothermischer Ressourcen, insbesondere der Tiefengeothermie, ist jedoch mit zahlreichen Herausforderungen verbunden. Dazu zählen eine oft limitierte Datenverfügbarkeit, erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der geologischen Strukturen sowie der hydraulischen und thermischen Eigenschaften des Untergrunds ebenso wie administrative, ökologische und wirtschaftliche Risiken. Eine Bewertung geothermischer Potenziale (d. h. der Temperaturen und der Grundwasserfündigkeit) und der langfristigen Nachhaltigkeit beim Betrieb geothermischer Anlagen erfordert verlässliche Tools. Diese sollen insbesondere eine optimale Nutzung der wenigen verfügbaren Untergrunddaten über den tiefen Untergrund ermöglichen und die Integration der erzeugten Informationen in die Planung von Geothermieprojekten erleichtern. Der hier vorgestellte Modellierungsansatz für die hydrothermale Zirkulation im komplexen geologischen Untergrund des Oberwallis liefert grundlegende Informationen zu Grundwasserströmung (Fündigkeit) und Wärmetransport (Temperatur). Diese Ergebnisse stellen einen wichtigen Mehrwert für die Erstellung von Potenzialkarten dar, insbesondere im Rahmen von Play-Fairway-Analysen (PFA) und bei der Erarbeitung konsolidierter Planungsgrundlagen.

### Résumé

L'environnement alpin se caractérise par des conditions géologiques et hydrogéologiques souvent complexes, mais présente en même temps un potentiel géothermique élevé, en raison de la présence de structures tectoniques actives et de systèmes d'écoulement hydrothermal profonds. L'exploration des ressources géothermiques, en particulier en géothermie profonde, pose cependant de nombreux défis: une disponibilité souvent limitée des données, des incertitudes importantes concernant les structures géologiques, ainsi que leurs propriétés hydrauliques et thermiques du sous-sol, sans oublier les enjeux administratifs, environnementaux et économiques. L'évaluation du potentiel géothermique (c'est-à-dire des températures et de l'exploitabilité des eaux souterraines) ainsi que la détermination de la viabilité à long terme d'une centrale géothermique nécessitent des outils de modélisation fiables. Ceux-ci doivent permettre une valorisation optimale des rares données disponibles du sous-sol profond, tout en facilitant leur intégration dans la planification des projets géothermiques. La modélisation du flux hydrothermal à travers le sous-sol hétérogène du Haut-Valais présentée ici constitue une approche prometteuse pour fournir des informations de base précieuses sur l'écoulement des eaux souterraines (exploitabilité) et du transport de chaleur (température). Ces résultats constituent une valeur ajoutée importante pour l'établissement de cartes de potentiel, en particulier dans le cadre des analyses du type Play Fairway (PFA) et de l'élaboration de bases de planification consolidées.

Gerade im alpinen Raum bietet die Geothermie aufgrund günstiger geologischer Strukturen und tiefreichender hydrothermaler aktiver Strömungssysteme ein erhebliches Potenzial. Die teilweise dicht besiedelten Alpentäler bieten oft geologisch und praktisch günstige Standortbedingungen für die Erschliessung dieser hydrothermalen Systeme [2]. Dennoch bleibt dieses Potenzial aufgrund fehlender Kenntnisse und Planungsgrundlagen bislang weitgehend ungenutzt. Hauptgründe hierfür sind die komplexen geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse, die eingeschränkte Datenverfügbarkeit zur Rekonstruktion dieser Untergrundverhältnisse sowie das Fehlen adäquater Rahmenbedingungen für Projektanten. Diese Hindernisse führen zu einem hohen wirtschaftlichen Risiko bei Explorationsvorhaben [3]. Hinzu kommt, dass die Nutzung geothermischer Energie, insbesondere durch Tiefbohrungen, sensible unterirdische Wasservorkommen beeinträchtigen kann. Daraus ergibt sich ein grundlegendes Spannungsfeld zwischen der Erschliessung geothermischer Potenziale und dem Schutz des Grundwassers, insbesondere im Hinblick auf die Sicherung von Trinkwasser- und Ökosystemressourcen.

In der Praxis dienen konzeptionelle Modelle häufig der Veranschaulichung geologischer Strukturen und hydrothermalen Systeme, etwa zur Erklärung der Verteilung von Quellaustritten. Sie bieten wertvolle qualitative Einblicke, ermöglichen jedoch keine belastbaren quantitativen Aussagen zu Grundwasserfündigkeit, Wärmetransport oder den Auswirkungen von Nutzungsänderungen und Klimawandel. Um die Machbarkeit sowie die Umwelteinflüsse geothermischer Nutzung besser beurteilen zu können, sind robuste, modellbasierte Bewertungsansätze erforderlich, die auch mit limitierten Daten Grundlagen verlässliche Aussagen ermöglichen.

In diesem Beitrag wird ein schrittweises Vorgehen für die regionale Bewertung hydrothermalen Grundwasserströmungssysteme vorgestellt. Dieser Ansatz kombiniert: (1)

### Ausgangslage

Der steigende Energiebedarf zusammen mit dem Erreichen des Netto-Null-Ziels bis 2050 erfordern den vermehrten Einsatz erneuerbarer und emissionsarmer Energie-

quellen [1]. Geothermische Energie rückt dabei zunehmend in den Fokus als verlässliche, grundlastfähige Ressource mit dem Ziel, die Abhängigkeit von importierter Energie und fossilen Brennstoffen zu verringern.



## Geologie und Klima

Das Untersuchungsgebiet umfasst das Oberwallis im oberen Rhonetal in den Schweizer Alpen oberhalb von Brig mit einer Fläche von 1115 km<sup>2</sup> und Höhen bis zu 4255 m ü. M.

Die hydrothermalen Systeme reichen laut Geothermometrie bis in Tiefen von 10 km [5-8], was als untere Grenze des Modellgebiets angesetzt wurde (Bild 1).

Geologisch ist das Gebiet durch quartäre Talfüllungen und darunter liegende, dichte glazial-lakustrische Sedimenten charakterisiert, die oft zu gespannten Grundwasser-Verhältnissen führen. Die geologischen Einheiten des Gebirges umfassen das kristalline Aar- und Gotthardmassiv (Helvetikum) im Norden sowie Übergangszonen zu penninischen Decken im Süden, einschliesslich alpiner Hauptüberschiebungen und des Rote-Kuh-Gampel-Bruchs.

Klimatisch ist das Untersuchungsgebiet charakterisiert durch ein inneralpines Trockental mit stark saisonal geprägter Abflussbildung: Winterliche Akkumulation von Schnee, Schneeschmelze im Frühling und sommerliche Gewitter prägen die Wasserbilanz. Der durchschnittliche Jahresniederschlag beträgt 1659 mm/Jahr (1991–2010), wovon etwa 10–15% zur Grundwasserneubildung beitragen (Modellgebiet ca. 5865–8797 l/s). Die Verdunstung liegt bei ca. 370 mm/Jahr, der Oberflächenabfluss bei rund 1000 mm/Jahr und die Transpiration bei etwa 66 mm/Jahr.

3D-geologische Modellierung; (2) gekoppelte 3D-thermohydraulische Modellierung (3D-THM); sowie (3) eine systematische Sensitivitätsanalyse zur Definition hydraulischer und thermischer Parameter. Das schrittweise Vorgehen wird anhand der hydrothermalen Systeme im komplexen geologischen Untergrund des Oberwallis (Kanton Wallis) und im Bereich der geothermischen Bohrung 10-BR02 in Brig-Glis in den südlichen Schweizer Alpen demonstriert (Bild 1).

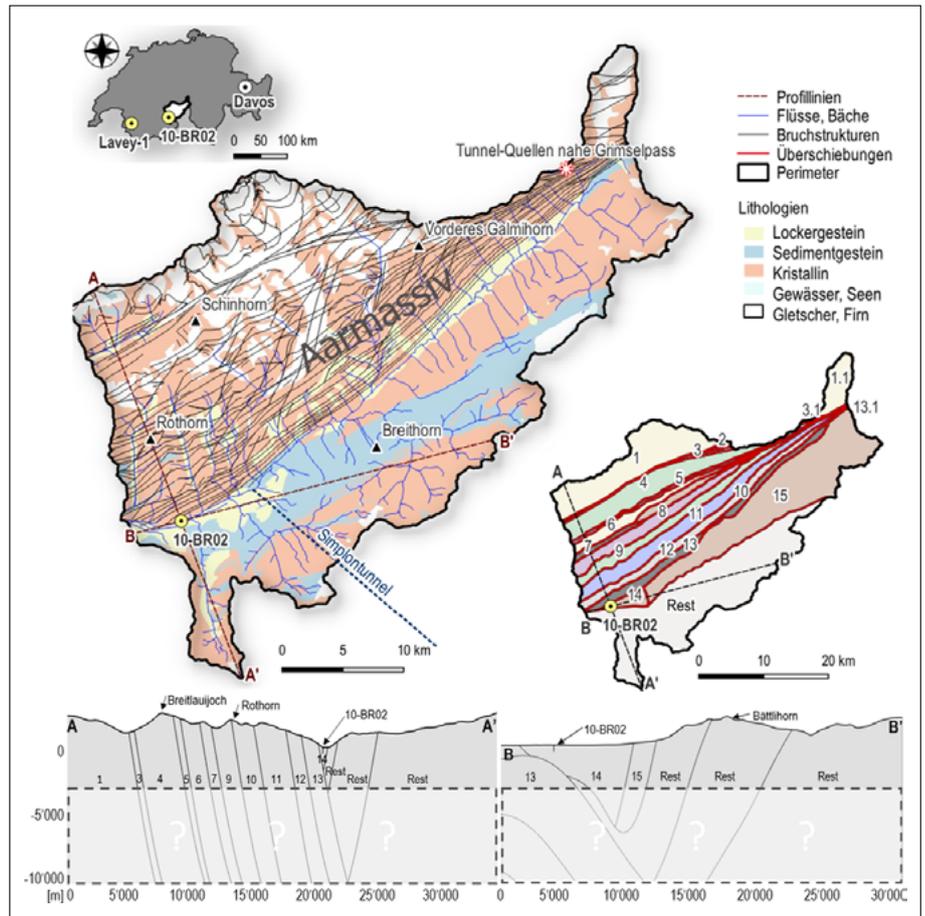
Das Gebiet von Brig-Glis im Rhonetal zählt zu den vielversprechendsten Standorten für die Entwicklung geothermischer Energie in der Schweiz. Bereits im Jahr 2010 wurde die 500 m tiefe Bohrung 10-BR02 (652 m ü. M.) für das Thermalbad Brigerbad realisiert. In jüngerer Zeit folgte eine Machbarkeitsstudie für eine weitere, 1000 m tiefe Bohrung zur Nutzung geothermischer Energie für Wärme- und Stromproduktion (Geothermieprojekt Brig-Glis; [4]). Trotz günstiger Ausgangsbedingungen zeigte die Studie, dass die Realisierbarkeit weiterer geothermischer Nutzungen in Brig-Glis im Wesentlichen von zwei kritischen Faktoren abhängt: (1) dem geothermischen Potenzial, welches aufgrund unzureichender Kenntnisse über die hydraulischen Eigenschaften und Grundwasserströmungssysteme noch nicht abschliessend bewertet werden kann; und (2) den Anforderungen des Grundwasserschutzes, da geothermische Projekte in der Schweiz strengen gesetzlichen Vorgaben zur Sicherung der Wasserressourcen unterliegen. Zudem traten administrative Schwierigkeiten auf, da die Zuständigkeiten zwischen Kantons- und Gemeindebehörden für die Bewilligung entsprechender Vorhaben unzureichend geregelt sind. Deshalb waren in einer ersten Etappe vertiefte

hydrogeologische Untersuchungen erforderlich, insbesondere zur Bewertung potenzieller hydraulischer Auswirkungen auf

die Grundwasserressourcen sowie zur Sicherstellung, dass die geothermische Nutzung langfristig nachhaltig ist und die Qualität sowie Verfügbarkeit des Grundwassers (z. B. für Trinkwassernutzung) nicht beeinträchtigt wird (Kasten 1).

## Forschungsansatz

Viele Regionen Mitteleuropas, insbesondere der alpine Raum, sind durch komplexe Reliefstrukturen und geologische Bedingungen geprägt, die multiskalige Grundwasserströmungssysteme ausbilden. Dabei werden die Grundwasserströmungssysteme hauptsächlich durch die Topografie sowie die Anisotropie und Heterogenität der hydraulischen Eigenschaften des Untergrunds kontrolliert. Das Konzept dieser hierarchisch organisierten multiskaligen Grundwasserströmungssysteme von Tóth [9] wurde durch zahlreiche Studien weiterentwickelt (z. B. [10–15]). Hydraulische Verbindungen unterschiedlicher hydrogeologischer Einheiten



**Bild 1:** Untersuchungsgebiet im Oberwallis. Links oben: Geologische Karte mit den wichtigsten lithologischen und tektonischen Elementen, dem Oberflächengewässernetz, den geologischen Profilinien, den alpinen Hauptstörungszonen sowie den regional bedeutenden Störungen und Brüchen im Oberflächeneinzugsgebiet der Rhone flussaufwärts von Brig (modifiziert aus Lithologische Karte der Schweiz – Gesteinsgruppen 1:500 000; swisstopo). Mitte rechts: Hydrogeologische Einheiten. Unten: Profilinien A-A' (links) quer und B-B' (rechts) entlang des Rhonetals. «?» bezeichnet Bereiche, in denen die Lithologien und Strukturen unbekannt sind.

## Geologischer und hydrologischer Modellierungsansatz, Sensitivitätsanalyse

In dieser Studie wurde ein geologisches 3D-Modell (Software Aspen SKUA) erstellt, das die grossräumigen geologischen Strukturen des Untersuchungsgebiets berücksichtigt, insbesondere die alpinen Hauptüberschiebungen und den Rote-Kuh-Gampel-Bruch (Bild 1). Aufgrund der limitierten Datengrundlage, insbesondere in grösseren Tiefen, mussten geologische Strukturen vereinfacht und extrapoliert werden. Ziel war es, eine möglichst realistische geologische Grundlage für das 3D-THM zu schaffen.

Mit dem 3D-THM (COMSOL Multiphysics®) konnten die dichteabhängigen Grundwasserströmungs- und Wärmetransportprozesse abgebildet werden. Hydraulische und thermische Eigenschaften, einschliesslich der Anisotropie, wurden für abgegrenzte hydrogeologische Einheiten auf Basis der Bruchorientierung, -intensität und -dicke definiert [25]. Die obere hydraulische Randbedingung orientierte sich am digitalen Höhenmodell (DHM; Swisstopo), welches den regionalen Grundwasserspiegel approximiert. Thermische Randbedingungen wurden durch einen höhenabhängigen Temperaturverlauf, basierend auf MeteoSwiss-Daten (*RnormY9120*; 1991–2020), abgebildet. Die basale Wärmestromdichte wurde als konstante Randbedingung mit  $0,07 \text{ W/m}^2$  über den gesamten Modellboden definiert, basierend auf durchschnittlichen Temperaturgradienten in der Schweiz [26]. Für die Geothermiebohrung 10-BR02 in Brig wurde eine konstante Entnahmerate von  $20 \text{ l/s}$  über die  $500 \text{ m}$  lange Bohrung berücksichtigt.

In einer Sensitivitätsanalyse (Bild 2) wurden strukturelle und parametrische Modellannahmen systematisch variiert und mit Resultaten aus Tracerversuchen (Temperaturprofile, Grundwas-

serströmungswege, Verweilzeiten) verglichen. Das daraus abgeleitete Basismodell bildete die Grundlage für die nachfolgende Modellkalibrierung, in der thermohydraulische Parameter feinabgestimmt wurden.

Abschliessend wurde ein Best-Fit-Modell mithilfe unabhängiger Daten validiert. Für Kalibrierung und Validierung wurden folgende Datensätze herangezogen: (1) Vertikale Temperaturprofile aus den Geothermiebohrungen 10-BR02 (Brig,  $500 \text{ m}$  Tiefe) und Lavey-1 (Lavey-les-Bains,  $2900 \text{ m}$  Tiefe); (2) Horizontales Temperaturprofil entlang des Simplontunnels (bis  $1400 \text{ m}$  Tiefe); (3) Grundwasserverweilzeiten aus Tracerdaten (Grimseltunnel  $> 30\,000 \text{ a}$ ; Lavey-les-Bains  $> 8000 \text{ a}$ , Mischwasser); (4) Geothermometrische Schätzung der Reservoirtemperatur für den geothermischen Brunnen 10-BR02 ( $100\text{--}110^\circ \text{C}$  in  $\sim 2000 \text{ m}$  Tiefe); (5) Grundwasserneubildungsraten im Einzugsgebiet ( $\sim 7000\text{--}8000 \text{ l/s}$ ); und (6) Schätzung der mittleren Grundwasseranreicherungshöhe basierend auf stabilen Isotopenanteilen im Wasser ( $\delta^{18}\text{O}$ :  $-15,9\text{‰}$ ;  $\sim 3400 \text{ m}$  ü.M.).

Das Best-Fit-Modell wurde verwendet um Temperaturverteilungen und Grundwasserflüsse als ein qualitatives Mass für die Fündigkeit (Darcy-Fluss) und Wärmestromdichten in charakteristischen Tiefenlagen ( $150, -350, -1350 \text{ m}$  ü.M.) zu berechnen. Aufgrund der limitierten Datengrundlage und der grossen Unsicherheiten wurden die Wärmestromdichten in normierter Form dargestellt. Zur Bestimmung des dominanten Wärmetransportprozesses (advektiv vs. konduktiv) wurde zusätzlich die thermische Peclet-Zahl [27] berechnet.

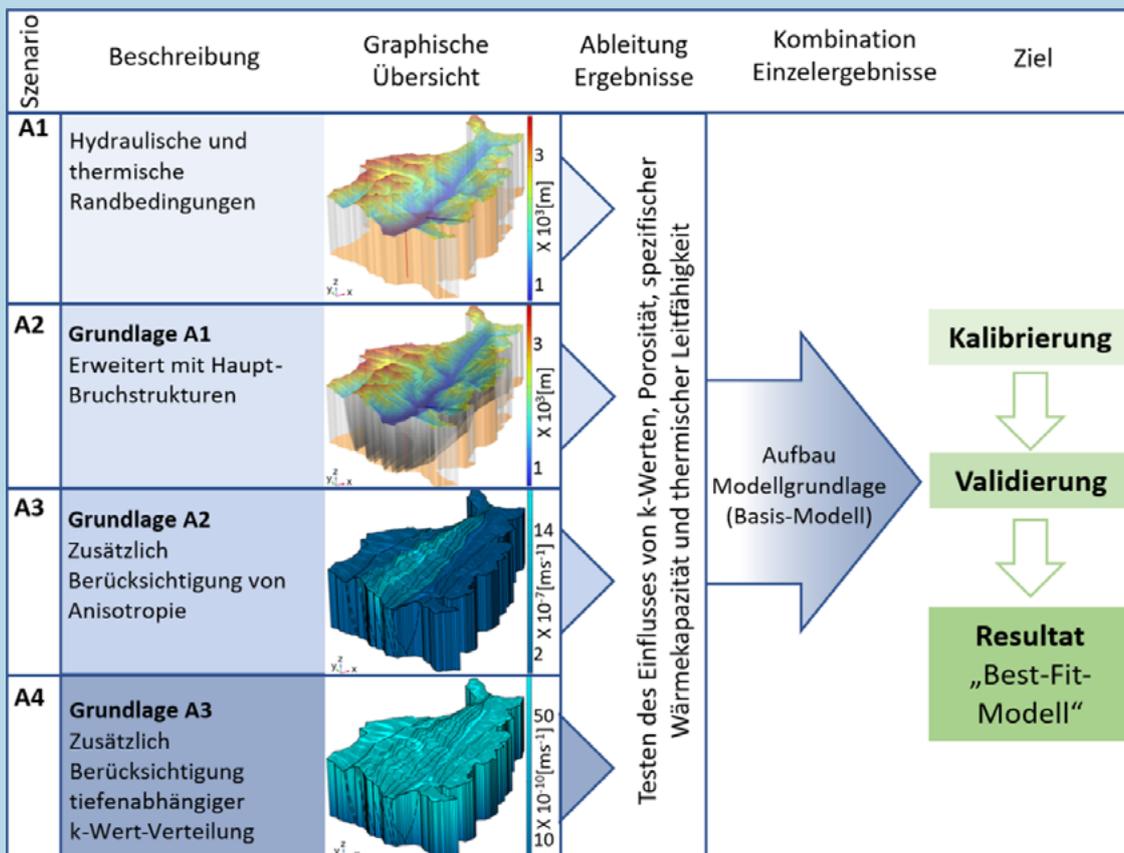


Bild 2: Evaluierte Szenarien und Randbedingungen für die Sensitivitätsanalyse. Die Bilder zeigen schematisch die zunehmende Differenzierung und Modellkomplexität, wobei die Farbschemata die obere hydraulische Randbedingung (A1), die obere und untere thermische Randbedingung sowie die alpinen Hauptüberschiebungen (A2), die Struktur von A2 plus die Anisotropie (A3) und die Struktur von A2 plus die tiefenabhängigen k-Werte (A4) zeigen.

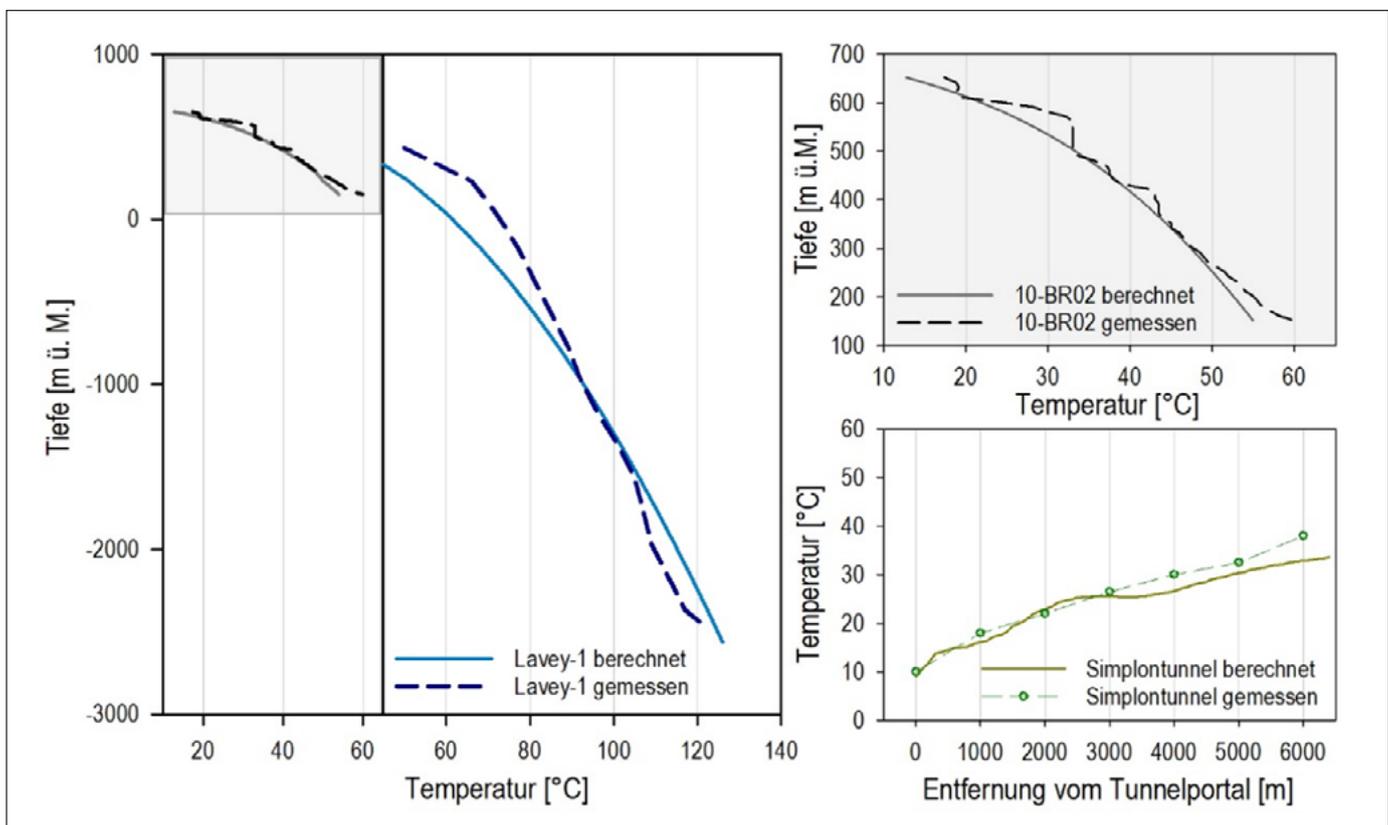


Bild 3: Links: Vergleich berechneter und gemessener Temperaturen in der Geothermiebohrung 10-BR02 (Kasten: Zoom rechts oben) und Lavey-1 (da ausserhalb vom Untersuchungsperimeter, projiziert auf den Standort 10-BR02) sowie entlang des Simplontunnels für das Best-Fit-Modell (rechts unten).

hängen massgeblich von deren Geometrie, räumlicher Anordnung und inneren Struktur ab [16]. Grössere tektonische Strukturen wie Verwerfungen und Überschiebungen können dabei entweder als hydraulische Barrieren oder als bevorzugte Fließwege fungieren [17–22]. Ein Verständnis dieser multiskaligen Grundwasserströmungssysteme sowie der zugrundeliegenden hydrogeologischen Prozesse ist entscheidend, um für die geothermische Nutzung günstige hydrothermale Bedingungen zu identifizieren.

Um quantitative Analysen hydrothermaler Systeme zu ermöglichen, sind physikalisch basierte, numerische thermohydraulische Modelle (THM) erforderlich. Deren Erstellung erfordert jedoch umfangreiche Datensätze, weshalb sie bislang meist nur vereinfacht als 2D-Profile umgesetzt wurden. Studien wie jene von Sonney [23] zeigen zwar, dass 2D-THM komplexe geologische Strukturen abbilden können, betonen jedoch die Notwendigkeit von 3D-Modellen für eine realistische Darstellung tiefer hydrothermaler Zirkulation im alpinen Raum.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde eine bestehende Methodik [24] weiterentwickelt, welche die Auswahl geeigneter Modellkomplexität und die Feinabstimmung thermohydraulischer Parameter ermöglicht (Kasten 2).

## Resultate

### Sensitivitätsanalyse, Modellkalibrierung und -validierung

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde anhand verschiedener Szenarien untersucht, wie stark einzelne Parameter die Modellgüte beeinflussen (Kasten 2). Die Ergebnisse zeigten, dass insbesondere die hydraulische Leitfähigkeit einen signifikanten Einfluss auf die Modellresultate hat. Die Wärmeleitfähigkeit erwies sich ebenfalls als sehr sensitiv. Im Gegensatz dazu hatten die Wärmekapazität sowie die hydraulische Leitfähigkeit der alpinen Hauptüberschiebungen nur geringe Auswirkungen auf die Modellgüte.

Im Rahmen der Modellkalibrierung konnte das Best-Fit-Modell entwickelt werden. Die Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Temperaturen entlang des geothermischen Brunnens 10-BR02 und des Simplontunnels ist insgesamt gut (Bild 3). In der (auf den Standort 10-BR02 projizierten) Bohrung Lavey-1 konnten die Temperaturen im oberen Bereich (bis ca. -800 m ü. M.) weniger gut reproduziert werden, während im tieferen Bereich eine gute Übereinstimmung erzielt wurde. Da sich Lavey-1 ausserhalb der Modellgrenze befindet, wurde auf eine zusätzliche Anpassung verzichtet.

Die Modellvalidierung bestätigt die Plausibilität des Best-Fit-Modells. Die auf einer Modellfläche von 1115 km<sup>2</sup> simulierte Grundwasserneubildung beträgt etwa 8300 l/s und liegt damit nahe an der durch Wasserbilanzmethoden ermittelten Grundwasserneubildung von rund 7871 l/s. Auch die mittlere Höhe des Grundwasseranreicherungsgebiets (ca. 3300 m ü. M.) sowie die simulierten Grundwasserverweilzeiten von etwa 30 000 Jahren stehen im Einklang mit unabhängigen tracerbasierten Schätzungen.

### Hydraulischer und thermischer Ist-Zustand

Mit dem kalibrierten Best-Fit-Modell konnte der hydraulische und thermische Ist-Zustand analysiert werden.

Die simulierten Fließspfade (Bild 4) zeigen, dass das Grundwasser aus Höhenlagen über 3000 m ü. M., insbesondere aus dem Norden des Aarmassivs, bis in Tiefen von rund -5000 m ü. M. absinken und in den Talregionen konvergieren. So übersteigt der piezometrische Druck in Talregionen wie dem Lonza- und Rhonetal bei Brig die Geländeoberfläche, was zu artesischen Verhältnissen führt; und auch bestätigt ist in der Geothermiebohrung 10-BR02 [28].

Die tiefenabhängige Temperaturverteilung (Bild 5) bestätigt deutlich erhöhte Tem-

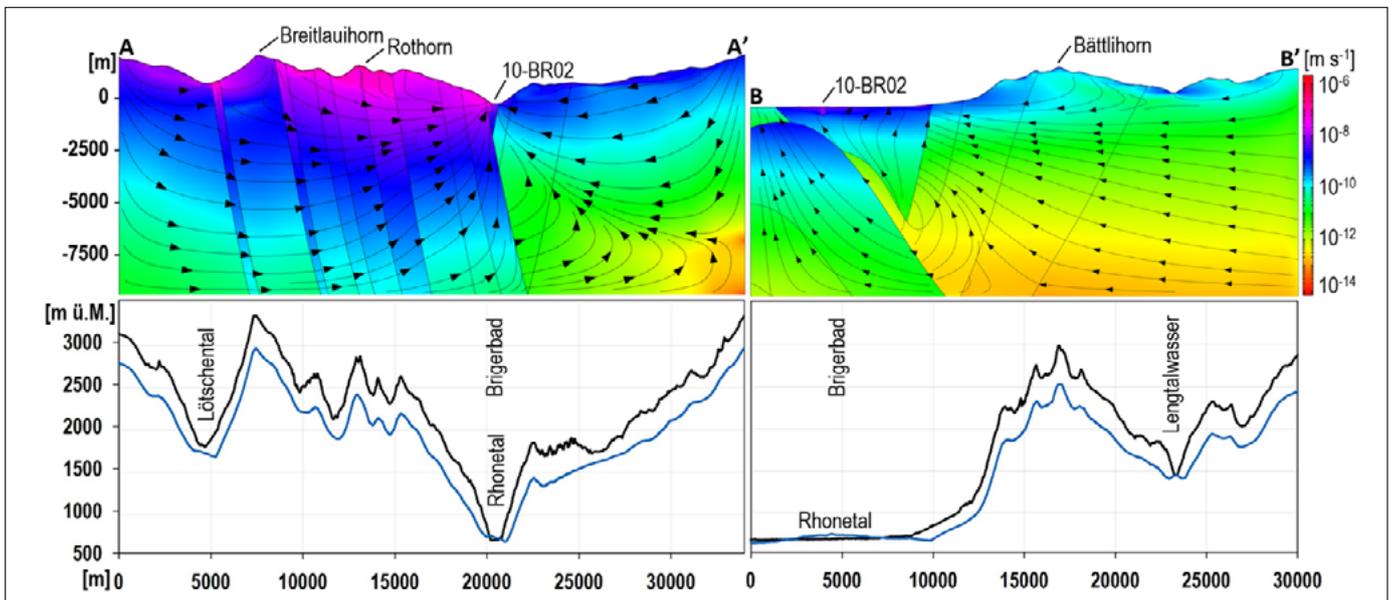


Bild 4: Darcy-Geschwindigkeitsverteilung und Fließspfade (blau) entlang der Profilinien A-A' und B-B' (Lage Profilinien in Bild 1), darunter jeweils hydraulische Höhe und Topografie entlang derselben Profilinien, wobei die gestrichelte schwarze Linie die Topografie und die grüne Linie die hydraulische Höhe des (tiefen) Grundwassers darstellt (man beachte die unterschiedliche Auflösung der y-Achsen, oben relativ zum Ansatzpunkt der Geothermiebohrung 10-BR02 und unten in absoluter Höhe in m ü.M.); in Talbereichen sind teilweise artesische Grundwasserverhältnisse zu beobachten.

peraturen unterhalb des Rhonetals im Vergleich zu den umliegenden Gebieten. Im Raum Brigerbad erreichen die simulierten Temperaturen bereits in 150 m ü.M. über 50°C, in -350 m ü.M. über 70°C und in -1350 m ü.M. bis zu 100°C. Diese Resultate stimmen gut mit geothermometrischen

Schätzungen von bis zu 110°C in dieser Tiefe überein [29].

Die Verteilung des simulierten Grundwasserflusses (Darcy-Fluss) zeigt (Bild 5), dass der Grundwasserfluss mit der Tiefe abnimmt und im Norden generell höher ist. Der Einfluss von Bruchzonen ist sowohl in

den Fließspaden als auch für den Grundwasserfluss deutlich. Die vertikale Grundwasserströmung (Bild 5) zeigt aufsteigende Strömung unterhalb des Rhonetals, die Wärme aus der Tiefe bringt, und absteigende Strömung im Norden, die durch kühlere Oberflächenbedingungen beeinflusst ist.

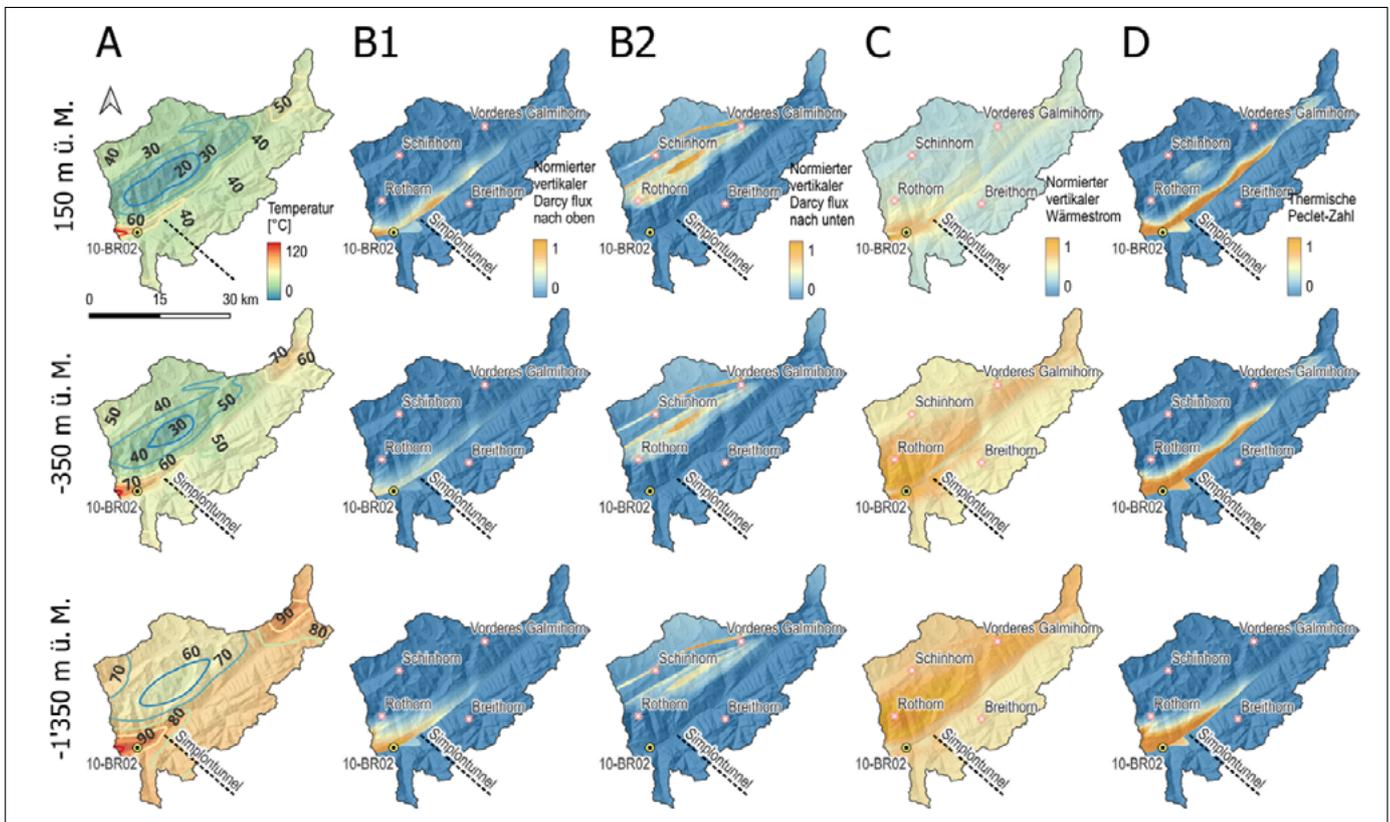


Bild 5: Jeweils für die Höhenlagen 150, -350 und -1350 m ü.M. (Basiskarte: swissALTI3D monodirektionale Hangschatten): Temperaturverteilung (A); Vertikaler Grundwasserfluss (Darcy-Fluss) von unten nach oben (B1) und von oben nach unten (B2); Normalisierter vertikaler Wärmestrom (C); thermische Peclet-Zahl (D).

## Geothermisches Potenzial

Eine detaillierte Quantifizierung thermischer Potenziale anhand absoluter Energiegrößen ist aufgrund der Unsicherheiten, begründet in der limitierten Datengrundlage, nur eingeschränkt möglich. Aus diesem Grund wurde der vertikale Wärmestrom normiert (*Bild 5*). Dies ermöglicht eine erste qualitative Einschätzung von Bereichen und Tiefen, in denen ein hohes oder niedriges thermisches Potenzial zu erwarten ist.

Dennoch lassen sich die Bandbreiten der berechneten Wärmeströme wie folgt zusammenfassen. Der minimale und maximale vertikale Wärmestrom auf 150 m ü.M. liegt zwischen  $0,04$  und  $0,17 \text{ W m}^{-2}$  und ist unterhalb des Tals in der Nähe der geothermischen Bohrung 10-BR02 besonders hoch. In tieferen Lagen von  $-350$  und  $-1350 \text{ m ü.M.}$  nehmen die minimalen und maximalen vertikalen Wärmeströme grossflächig zu und liegen zwischen  $0,05$  und  $0,1 \text{ W m}^{-2}$ . Die Grössenordnung der berechneten Wärmeströme stimmt somit gut mit der Wärmestromkarte von [26] überein.

Ausserdem wurde die thermische Peclet-Zahl als dimensionsloses Mass für das Verhältnis von advektivem und konduktivem Wärmetransport berechnet (*Bild 5*). Mit zunehmender Peclet-Zahl gewinnt der advektive Wärmetransport an Bedeutung. Die thermische Peclet-Zahl kann daher verwendet werden, um den advektiven Wärmetransport im Zusammenhang mit der regionalen Grundwasserströmung zu bewerten und Regionen zu identifizieren, in denen ein höheres thermisches Potenzial (Temperaturen und Grundwasserfündigkeit) vorhanden ist. Die grössten thermischen Potenziale finden sich demnach fast ausschliesslich unterhalb des Rhonetals in Tiefen von  $150 \text{ m ü.M.}$  Entlang der Hauptstörungszonen steigt die Peclet-Zahl an. In einer Tiefe von  $-350 \text{ m ü.M.}$ , ca.  $1000 \text{ m}$  unter der Erdoberfläche und in der Nähe der geothermischen Bohrung 10-BR02, verschiebt sich das Gebiet mit den höchsten thermischen Peclet-Zahlen gegen 1 (advektiv dominierter Wärmetransport) weiter nach Südwesten. Der Trend verstärkt sich mit zunehmender Tiefe (*Bild 5*).

## Zusammenfassung & Diskussion

Die Erschliessung geothermischer Ressourcen kann die Versorgungssicherheit mit erneuerbaren Energien in der Schweiz wesentlich erhöhen. Trotz günstiger geologischer Voraussetzungen ist die Projektentwicklung komplex. Zentral ist die strukturierte Aufbereitung heterogener Daten, doch häufig gehen Informationen zwischen öffentlichen und

privaten Akteuren verloren. Regulatorische Mechanismen zur Harmonisierung sind daher dringend erforderlich. Das Pilotprojekt in Brig zeigt, wie thermohydraulische Modellierungen zum besseren Verständnis hydrothermalen Systeme beitragen und technische, administrative sowie wirtschaftliche Grundlagen stärken können.

Der entwickelte Modellierungsansatz zur hydrothermalen Zirkulation im komplexen geologischen Untergrund des Oberwallis reduziert Unsicherheiten in datenarmen alpinen Regionen durch die Nutzung physikalischer Prinzipien und datenbasierter Algorithmen. So kann der Informationsgehalt begrenzter Datensätze maximiert werden. Dies ermöglicht eine verbesserte Abschätzung des geothermischen Potenzials, unterstützt die Integration in die Play Fairway Analysis (PFA) und bietet Management-Tools für eine langfristige Planung. Durch die Reduktion explorativer Risiken kann der Ansatz wesentlich zur Optimierung der Exploration und Kosteneinsparung in der Projektentwicklung beitragen.

## Abschätzung des geothermischen Potenzials in der Region Brig

Mit den Resultaten des 3D-THM können zur Beurteilung des geothermischen Potenzials die Temperaturverteilung, die Grundwasserfündigkeit, die normierten Wärmeströme und die thermische Peclet-Zahl in verschiedenen Tiefen abgeschätzt werden. So zeigen die Berechnungen des Modells, dass die Temperaturen in Betrachtung der absoluten Höhe, im Talbereich deutlich erhöht sind im Vergleich zu den umliegenden Gebieten. Die berechnete thermische Peclet-Zahl ermöglicht eine Einschätzung der dominanten Wärmetransportprozesse und liefert Hinweise auf die standortabhängige Eignung offener oder geschlossener geothermischer Systeme. Die ersten Ergebnisse liefern wertvolle Informationen, die sowohl in die kantonale und kommunale Richtplanung (z. B. Potenzial- und Eignungskarten) als auch in die Vorbereitung konkreter Erschliessungsarbeiten in Brig einfließen können.

## Management-Tools für langfristige Planungssicherheit

3D-geologische Modelle und 3D-THM sind zentrale Werkzeuge für die Ermittlung einer nachhaltigen und sicheren Nutzung von Untergrundressourcen. Sie unterstützen vielfältige Anwendungen wie Wasserwirtschaft, Geothermie oder Umweltplanung und helfen, komplexe geologische und hydrogeologi-

sche Verhältnisse zu verstehen und abzuschätzen. Besonders in der geothermischen Nutzung sind solche Modelle wertvoll, da sie raumzeitliche Veränderungen im Aquifersystem sowie unterschiedliche Nutzungskonzepte simulieren können.

Das hier entwickelte 3D-THM bietet eine integrierte Grundlage für die Optimierung geothermischer Bohrstandorte und zur Bewertung potenzieller Nutzungskonflikte. Als flexibles Planungs- und Management-Tool unterstützt es langfristige Strategien zur Ressourcennutzung und trägt zur besseren Koordination und Entscheidungsfindung bei.

Das 3D-THM kann deshalb auch für allgemeine Potenzialanalysen, wie auch gezielt für konkrete Planungsaufgaben und Szenarienimulationen wie neue Bohrungen oder erhöhte Förderung zum Einsatz kommen. Darüber hinaus kann es als Monitoring-Werkzeug während des Betriebs einer geothermischen Anlage genutzt werden. Es ist flexibel erweiterbar: Zusätzliche Daten oder neue Erhebungen steigern seine Aussagekraft und Prognosefähigkeit. Die Integration weiterer Informationen wie hydrochemischer oder isotoopenbasierter Daten kann verbleibende Unsicherheiten gezielt reduzieren und die Modellqualität weiter verbessern.

Aus Sicht des Projektträgers unterstützt das Modell die Optimierung des Nutzungskonzepts und schafft Transparenz hinsichtlich der Auswirkungen sowie der Wirksamkeit von Schutz- und Begleitmassnahmen. Für die Vollzugsbehörde bilden gezielte Simulationsszenarien eine Grundlage zur Plausibilisierung der erwarteten Eingriffe und für Erfolgskontrollen. Gerade bei komplexen Geothermieprojekten fördert dies die koordinierte Zusammenarbeit aller Beteiligten. Durch geeignete Auflagen kann zudem die Modellqualität laufend verbessert werden, etwa durch die systematische Integration neuer Daten in ein «lebendiges» Modell.

## Integration in die Play Fairway Analysis (PFA)

Der Begriff «Play» beschreibt eine geologisch günstige Situation in einer Region, in der die Wahrscheinlichkeit für das Auffinden geothermischer Ressourcen besonders hoch ist. Die «Play Fairway Analysis (PFA)» ist ein zentrales Instrument der nationalen Explorationsstrategie. Sie dient dazu, subventionierte Projekte gezielt zu unterstützen und nachvollziehbare, datengestützte Empfehlungen zu ermöglichen. Im Rahmen des BFE-Projekts «GeoTex Rhône» (Geothermische Exploration im inneralpinen

Raum mittels Play Fairway Analysis (PFA) – Beispiel Rhonetal [30]) wird derzeit auf Basis repräsentativer Daten aus dem Rhonetal eine Zusammenstellung der relevanten geologischen Faktoren, ihrer räumlichen Verteilung sowie der damit verbundenen Unsicherheiten und Risiken erarbeitet.

Die Ergebnisse des 3D-THM können direkt zur Charakterisierung der «Plays» im Raum Brig beitragen. Es liefert Informationen zu Grundwasserströmung, potenzieller Fündigkeit und Wärmetransport, die in die Erstellung sogenannter «favorability maps» im Rahmen von GeoTex einfließen können. Diese Karten unterstützen die Identifikation geeigneter Standorte und die regionale Abschätzung des geothermischen Potenzials.

## Schlussfolgerungen

Die Pilotstudie Brig demonstriert am Beispiel eines lang diskutierten Standorts für geothermische Tiefenbohrungen, wie ein prozessbasierter, schrittweise aufgebauter Modellierungsansatz zur fundierten Entscheidungsfindung bei der Nutzung geothermischer Ressourcen beitragen kann. Das entwickelte Modell fungiert als vielseitiges Werkzeug zur Analyse und Prognose regionaler Tiefengrundwasserzirkulationen und ermöglicht eine fundierte Erstbewertung

der hydraulischen und thermischen Verhältnisse in komplexen alpinen Systemen.

Durch die Simulation von Grundwasserströmung, normierten Wärmeströmen und der Beurteilung der verschiedenen Wärmetransportprozesse, können Gebiete mit unterschiedlichem geothermischem Potenzial identifiziert werden. Diese Erkenntnisse unterstützen nicht nur die Standortwahl für geothermische Nutzung, sondern auch raumplanerische Entscheidungen. Das 3D-THM erweist sich dabei als vielseitiges Werkzeug zur Bewertung langfristiger Umsetzbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit unter Berücksichtigung potenzieller Auswirkungen auf das regionale Grundwassersystem. Es ermöglicht die gezielte Optimierung neuer Bohrstandorte und dient als Grundlage für eine konfliktarme Ressourcennutzung bei wachsender Nachfrage.

Aufbauend auf den konventionellen PFA-Ansätzen verbessert die Kombination mit dem 3D-THM die Koordination von Feldarbeiten (Seismik, Erhebung hydrochemischer Daten, Isotopendaten und gelöste Stoffe im Grundwasser von bestehenden Bohrungen und Quellen), die Bewertung thermohydraulischer Parameter und die Reduktion von Unsicherheiten. Dies trägt zur Erweiterung des Wissens über lokal nutzbare Geothermie-Ressourcen bei und kann kantonale

sowie kommunale Raum- und Energieplanungsgrundlagen gezielt unterstützen.

Ein verantwortungsvoller Umgang mit der Ressource Grundwasser ist auch bei der Erschliessung geothermischer Potenziale möglich, vorausgesetzt, es kommen integrierte Planungs- und Entscheidungsinstrumente zum Einsatz. Der vorgestellte Modellierungsansatz fördert eine praxisnahe, schutzkonforme Planung, indem er Unsicherheiten in der Exploration reduziert. Dadurch kann er wesentlich zur Optimierung der Ressourcennutzung und zur Effizienzsteigerung in der Projektentwicklung beitragen.

## Danksagungen

Das Forschungsprojekt «Wärmetransport im Tiefengrundwasser – Erschliessung des geothermischen Potenzials im Kanton Wallis – Pilotprojekt Brig» wurde vom Kanton Wallis (Dienststelle für Energie und Wasserkraft und Dienststelle für Umwelt) sowie dem Bundesamt für Energie (BFE) durch das Programm energieschweiz finanziert und unterstützt. Detaillierte Bruchstrukturdaten wurden von der Universität Bern (Forschungsgruppe Prof. Dr. Marco Herwegh) anlässlich des Projekts GeoTex zur Verfügung gestellt.

## Quellen:

1. IEA, Net Zero by 2050, IEA, Editor. 2021: Paris
2. Merkofer, R., D.M. Brehme, and D.R.J. Shor. Evaluation of the geothermal energy potential of Switzerland—a techno-economic approach. 2024.
3. Lund, J.W. and T.L. Boyd, Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 2016. 60: p. 66–93.
4. Leu, W., et al., Geothermieprojekt Brig-Glis – Vorprojekt Energienutzung mit einer mitteltiefen Geothermiebohrung (hydrothermal) – Schlussbericht, S.F.O.o.E. SFOE, Editor. 2018: Bern, Switzerland.
5. Egli, D., et al., Structural characteristics, bulk porosity and evolution of an exhumed long-lived hydrothermal system. *Tectonophysics*, 2018. 747: p. 239–258.
6. Sonney, R. and F.-D. Vuataz, Properties of geothermal fluids in Switzerland: A new interactive database. *Geothermics*, 2008. 37(5): p. 496–509.
7. Diamond, L.W., C. Wanner, and H.N. Waber, Penetration depth of meteoric water in orogenic geothermal systems. *Geology*, 2018. 46(12): p. 1063–1066.
8. Alt-Epping, P., L.W. Diamond, and C. Wanner, Permeability and groundwater flow dynamics in deep-reaching orogenic faults estimated from regional-scale hydraulic simulations. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2022. 23(12): p. e2022GC010512.
9. Tóth, J., Two-dimensional isotropic flow model showing the distribution of local, intermediate, and regional groundwater flow systems. *Journal of Geophysical Research*, 1963. 68: p. 4795–4812.
10. Worman, A., et al., Fractal topography and subsurface water flows from fluvial bedforms to the continental shield. *Geophysical Research Letters*, 2007. 34(7).
11. Butscher, C. and P. Huggenberger, Implications for karst hydrology from 3D geological modeling using the aquifer base gradient approach. *Journal of Hydrology*, 2007. 342(1–2): p. 184–198.
12. Zijl, W., Scale aspects of groundwater flow and transport systems. *Hydrogeology Journal*, 1999. 7(1): p. 139–150.

13. Tóth, J., Gravitational systems of groundwater flow, theory, evaluation, utilization. 2009: Cambridge.
14. Marklund, L. and A. Worman, The use of spectral analysis-based exact solutions to characterize topography-controlled groundwater flow. *Hydrogeology Journal*, 2011. 19(8): p. 1531–1543.
15. Schilling, O.S., et al., Revisiting Mt Fuji's groundwater origins with helium, vanadium and environmental DNA tracers. *Nature Water*, 2023. 1(1): p. 60–73.
16. Raiber, M., et al., Environmental isotopes meet 3D geological modelling: Conceptualising recharge and structurally-controlled aquifer connectivity in the basalt plains of south-western Victoria, Australia. *Journal of Hydrology*, 2015. 527: p. 262–280.
17. Caine, J.S., J.P. Evans, and C.B. Forster, Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 1996. 24(11): p. 1025–1028.
18. Corbel, S., et al., Identification and geothermal influence of faults in the Perth metropolitan area, Australia. 2012.
19. Schilling, O., et al., Hydrothermal models of the Perth metropolitan area, Western Australia: implications for geothermal energy. *Hydrogeology Journal*, 2013. 21(3): p. 605–621.
20. Moya, C.E., M. Raiber, and M.E. Cox, Three-dimensional geological modelling of the Galilee and central Eromanga basins, Australia: New insights into aquifer/aquardar geometry and potential influence of faults on inter-connectivity. *J. Hydrology*, 2014(Regional Studies 2): p. 119–139.
21. Moya, C.E., et al., Hydrochemical evolution and groundwater flow processes in the Galilee and Eromanga basins, Great Artesian Basin, Australia: A multivariate statistical approach. *Science of the Total Environment*, 2015. 508: p. 411–426.
22. Moya, C.E., et al., Using environmental isotopes and dissolved methane concentrations to constrain hydrochemical processes and inter-aquifer mixing in the Galilee and Eromanga Basins, Great Artesian Basin, Australia. *Journal of Hydrology*, 2016. 539: p. 304–318.
23. Sonney, R., Groundwater flow, heat and mass transport in geothermal systems of a Central Alpine Massif. The cases of

- Lavey-les-Bain, Saint-Gervais-les-Bains and Val d'Illice, in Faculty of Sciences. 2010: University of Neuchâtel.
24. Scheidler, S., et al., Geothermal use of an Alpine aquifer-Davos pilot study. *Grundwasser*, 2019. 24(4): p. 277–286.
25. Zeeb, C., et al., Fracture network evaluation program (FraNEP): A software for analyzing 2D fracture trace-line maps. *Computers & Geosciences*, 2013. 60: p. 11–22.
26. Epting, J., M. Walde, and O. Schilling, Abschlussbericht – Herleitung «natürlicher» Grundwassertemperaturen & Definition Tiefengrundwasser – Hydrogeologische Grundlagen, I.A.d.B.f.U. (BAFU), Editor. 2024.
27. Epting, J., et al., 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.
28. Solexperts, Geothermieprojekt Brigerbad, geohydraulische Versuche in der Bohrung 10-BR2, B. A-1985, Editor. 2010.
29. Sonney, R. and F.D. Vuataz, BDFGeotherm: the database of geothermal fluids in Switzerland. *Proc. European Geothermal Congress*, 2007.
30. <https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=51527>

## Autoren:

**Stefan Scheidler, Eric Zechner, Michel A. Walde, Jannis Epting**, Angewandte und Umweltgeologie, Hydrogeologie, Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel, 4056 Basel, Schweiz  
**Pierre G. Christe**, Schweizerisches Bundesamt für Energie – BFE, CH-3003 Bern, Schweiz  
**Oliver S. Schilling**, Hydrogeologie, Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel, 4056 Basel, Schweiz / Abteilung Wasserressourcen und Trinkwasser, Eawag: Das Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs, 8600 Dübendorf, Schweiz

