

Erste Erkenntnisse zur Prospektion und Charakterisierung des Aquifers der Arosener Dolomiten, Schweiz

Christian Regli · Peter Kleboth · Urs Eichenberger ·
Silvia Schmassmann[†] · Peter Nyfeler · Stephan Bolay

Eingang des Beitrages: 31.05.2013 / Eingang des überarbeiteten Beitrages: 30.10.2013
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Zusammenfassung In urbanen Orten des alpinen Raums gewinnt die Nutzung der Geothermie aus mehreren hundert Metern Tiefe zunehmend an Bedeutung. Dabei stehen vor allem offene Systeme im Vordergrund. Die vorliegende Arbeit präsentiert die ersten Erkenntnisse zur Prospektion und Charakterisierung des bisher unerforschten, nutzbaaren und ergiebigen Aquifers der Arosener Dolomiten. Neben der Anwendung von etablierten Methoden und Verfahren, wie seismischen Messungen, einer Erkundungsbohrung, bohrlochgeophysikalischen Messungen und Pumpversuchen, wird auch die Anwendung des KARSYS-Ansatzes zur geologischen und konzeptuellen hydrogeologischen

3D-Modellierung des Aquifers aufgezeigt. Zudem wird die Entwicklung eines Viewers zur 3D-Visualisierung von Bohrungen dokumentiert. Das methodische Vorgehen, bestehend aus hydrogeologischen und messtechnischen Ansätzen auf regionaler und lokaler Ebene, ermöglicht eine lithologische Faziesdifferenzierung der Arosener Dolomiten sowie eine Differenzierung der geklüfteten und verkarsteten Bereiche innerhalb des Aquifers. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für eine weitergehende, auf Fündigkeit optimierende und Risiken minimierende Explorations- und Bohrplanung sowie für eine nachhaltige Nutzungsplanung.

Die Autorin „Silvia Schmassmann“ ist verstorben.

Dr. C. Regli (✉)
GEOTEST AG,
Promenade 15, 7270 Davos Platz, Schweiz
E-Mail: christian.regli@geotest.ch

Dr. P. Kleboth
GEOTEST AG,
Grubenstrasse 12, 8054 Zürich, Schweiz
E-Mail: peter.kleboth@geotest.ch

Dr. U. Eichenberger
Schweizerisches Institut für Speläologie und
Karstforschung (SISKA),
Postfach 818, 2301 La Chaux-de-Fonds, Schweiz
E-Mail: urs.eichenberger@isska.ch

P. Nyfeler
Mühlestrasse 5, 7260 Davos Dorf, Schweiz
E-Mail: peter.nyfeler@gmail.com

S. Bolay, MSc, ETH
Geologisches Institut, ETH Zürich,
Sonneggstrasse 5, 8092 Zürich, Schweiz
E-Mail: sbolay@ethz.ch

First insights in the prospection and characterisation of the aquifer of the Arosa Dolomites, Switzerland

Abstract In urban areas of the Swiss Alps the use of geothermal energy from several hundred meters depth becomes increasingly important. For this mainly open systems have priority. This work presents the first insights in the prospection and characterisation of the so far unexplored, utilizable, and abundant Aquifer of the Arosa Dolomites. Besides the use of established methods and techniques, such as seismic measurements, an exploration drilling, borehole geophysical measurements, and pumping tests, the application of the KARSYS-approach for geological and conceptual hydrogeological 3D-modelling of the aquifer is illustrated. In addition, the development of a viewer for 3D-visualization of drillings is documented. The hydrogeological and metrological approaches allow a lithological facies differentiation of the Arosa Dolomites, and a differentiation of the fractured and karstified areas within the aquifer. The results represent the basis for advanced findings optimizing and risks minimising exploration and drilling planning, and for sustainable utilization planning.

Keywords Arosa Dolomites · Prospection strategies · KARSYS-approach · Boreholeviewer · Artesian testing

Einleitung

Die Nutzung der Niedertemperatur- oder untiefen Geothermie zu Heizzwecken mittels Erdwärmesonden und Wärmepumpen ist in der Schweiz weit verbreitet. Jährlich kommen rund $2,6 \cdot 10^6$ m Erdwärmesonden dazu (Stand 2011, Minder & Siddiqi 2012). Hingegen spielt die Stromerzeugung aus tiefen geothermischen Ressourcen in der Schweiz heute noch keine Rolle, im Gegensatz zu den traditionellen Geothermie-Ländern wie den Philippinen, Indonesien, Italien, den USA, El Salvador und Island (Kaiser et al. 2012). Das Enhanced Geothermal System (EGS)-Projekt in Basel hatte Pilotcharakter. Die aufgrund der induzierten Seismizität entstandenen Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen führten im Jahre 2010 zum Abbruch des Projekts. Die auf hydrothermale Nutzungen konzipierten und sich in Realisierung befindenden Projekte in St. Gallen und Lavey-les-Bains haben ebenfalls Pilotcharakter. Der Nutzung tiefer geothermischer Ressourcen wird ein großes Potenzial eingeräumt.

Auch ist ein Trend zur Nutzung hydrothermalen Ressourcen aus dem mitteltiefen Bereich, aus mehreren hundert bis wenigen tausend Metern Tiefe, zu verzeichnen. Diese Ressourcen sind jedoch nur dort verfügbar, wo Wassermenge und Temperatur ausreichend sind. Je nach Temperatur des Wassers kann die Wärme direkt zu Heizzwecken genutzt werden, bei sehr günstigen Verhältnissen ist auch eine Stromproduktion möglich (Minder & Siddiqi 2012).

In urbanen Orten des alpinen Raums gewinnt die Nutzung der Geothermie zunehmend an Bedeutung. Zudem ist der Energiebedarf in touristisch geprägten Orten stark schwankend. Bei Spitzenauslastung im Winter steigt der Verbrauch vielerorts auf das drei- bis vierfache dessen an, was die ganzjährig ansässige Bevölkerung alleine verbraucht. Ein Beispiel ist Davos im Schweizer Kanton Graubünden, die höchstgelegene Stadt Europas.

Die geologischen Verhältnisse im alpinen Raum sind sehr komplex, und die hydrologischen Prozesse unterliegen einer starken Dynamik im Jahresverlauf. Deshalb ist die Prospektion und Charakterisierung von nutzbaren Aquifere relativ aufwändig. Hinzu kommt die Anforderung, dass Reservoir langfristig nachhaltig genutzt und benachbarte Anlagen hydraulisch und thermisch nicht beeinträchtigt werden sollen. Diese Herausforderungen verlangen eine fundierte Reservoircharakterisierung und eine Abstimmung von Explorations- und Nutzungsstrategien auf reservoirspezifische Bedingungen. Die Entwicklung praxisnaher Methoden und Werkzeuge zur Aquifercharakterisierung, unter Berücksichtigung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse, ist eine Voraussetzung zur Verminderung des Fün-

digkeitsrisikos und zur Realisierung von erfolgreichen Geothermie-Projekten.

In der vorliegenden Arbeit werden erste Erkenntnisse zur Prospektion und Charakterisierung des mitteltiefen Aquifers der Aroser Dolomiten auf der Stufe einer Voruntersuchung dargelegt. Neben 1) der Anwendung von etablierten Erkundungsmethoden und Verfahren, wie Seismik, Erkundungsbohrung, Bohrlochgeophysik und Pumpversuche, wird auch 2) die Anwendung des KARSYS-Ansatzes (Jeannin et al. 2012) aufgezeigt. Mit diesem Ansatz werden geologische und hydrogeologische Daten in einem 3D-Modell erfasst. Dadurch können die hydrogeologischen Verhältnisse auf regionaler Ebene dargestellt und Kenntnislücken aufgezeigt werden. Zudem wird 3) die Entwicklung eines Viewers zur 3D-Visualisierung von Bohrungen dokumentiert. Dessen Anwendung ermöglicht eine detailliertere Auswertung von optischen Bohrlochscans.

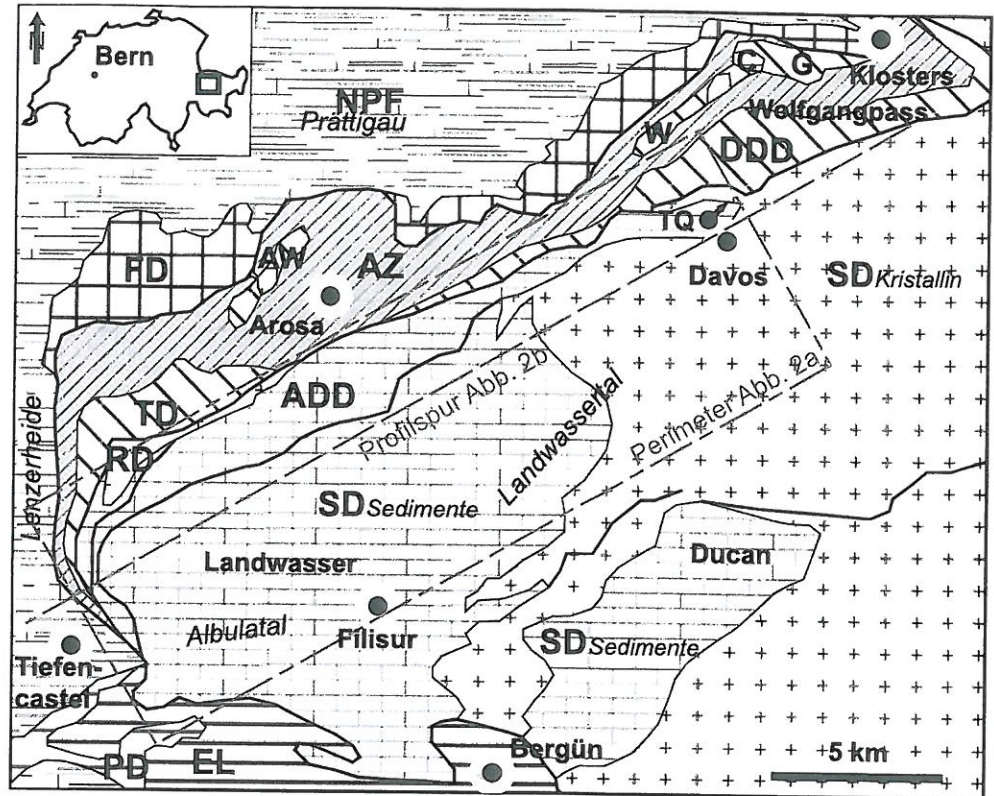
Geologisch-hydrogeologische Übersicht

Geologische Verhältnisse

Die Überschiebung des Ostalpins auf das Penninikum ist zwischen Klosters und der Lenzerheide aufgeschlossen (Abb. 1). Die Aroser Dolomiten sind Teil des oberostalpinen Deckenstapels. Sie erstrecken sich über einen Gebirgszug von rund 28 km Länge und maximal 3,3 km Breite zwischen Davos im NE und dem Albulatal im SW (Brauchli & Glaser 1924; Cadisch 1922; Cadisch & Leupold 1929; Eugster & Leupold 1930; Frei & Ott 1926). Die tektonische Begrenzung nach unten erfolgt durch Kristallindecken des Davoser Dorfberges und des Aroser Rothorns, beides unterostalpine Einheiten, sowie der Aroser Zone, einer ophiolithführenden oberpenninischen Einheit. Die tektonische Begrenzung nach oben erfolgt durch die oberostalpine Silvretta-Decke, bestehend aus Kristallingesteinen im NE und Sedimentgesteinen im SW. In Eichenberger (1986) sind zahlreiche Profilschnitte enthalten. Die maximale Mächtigkeit der nach SE einfallenden Aroser Dolomiten wird von Flisch und Streckeisen (1986) auf ca. 500 m geschätzt. Die Ausdehnung dieser Gesteine unter der Silvretta-Decke ist nicht bekannt.

Flisch & Streckeisen (1986) beschreiben die Aroser Dolomiten als Hauptdolomit des Nors, der teilweise brekziös ausgebildet ist. Darüber folgen regional geringmächtige Kalke, Dolomite und Tonschiefer des Rätis und Lias. An der Basis finden sich gelegentlich Raibler-Rauhacken des Karns. Die Gesteine erfuhren eine alpine, anchimeta-morphe Überprägung (Thöni 1999; Mählmann & Giger 2012) und weisen eine starke Klüftung auf. Mit Annäherung an die Überschiebung der Silvretta-Decke sind die Gesteine stark kataklastisch deformiert.

Abb. 1 Tektonische Karten-skizze des ostalpin/penninischen Grenzbereichs im Raum Landwasser-/Albulatal, modifiziert nach Mählmann und Giger (2012): *NPF* Nordpenninische Flysch-Decken, *FD* Falknis-Decke, *AZ* Arosler Zone mit internen Schuppen (*AW* Arosa Weisshorn, *W* Weisshorn, *C* Casanna, *G* Gotschna), *PD* Platta-Decke, *TD* Tschirpen-Decke, *EL* Ela-Decke, *RD* Rothorn-Decke, *DDD* Davoser Dorfberg-Decke, *ADD* Arosler Dolomiten-Decke, *SD* Silvretta-Decke, *TQ* Tobelmühlequelle



Jüngere Talgeschichte

Die Davoser Landschaft ist stark glazial geprägt. Die Entwässerung im Landwassertal erfolgte ursprünglich sowohl in Richtung N ins Prättigau als auch in Richtung SW ins Albulatal. Durch den Totalbergsturz im Gebiet des heutigen Wolfgangpasses erfolgte eine Flussumkehr und somit eine vollständige Entwässerung dieses Hochtales in Richtung SW. Der Bergsturz konnte von Maisch (1981) zeitlich zwischen das Gschnitz- und Clavadel-Stadium (ca. 14'500–14'000 BP) eingeordnet werden. Aufgrund von verschiedenen Gletschervorstößen aus Seitentälern des unteren Landwassertales, mit Bildung von Eis- und Moränenbarrieren, entstand der rund $50 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ fassende spätglaziale Großdavosersee, dessen Ausbruch durch die Megarippen bei Filisur belegt ist (Fitze 2009).

Die Mächtigkeit der Lockergesteine beträgt in Davos lokal über 100 m und ist durch zwei Kernbohrungen (Büchi & Müller 1986) sowie zahlreiche Erdwärmesondenbohrungen neueren Datums belegt. Moränen, limnische Ablagerungen und Deltasedimente sowie fluviatile Ablagerungen des Landwassers und Bachschutt der Seitengewässer dokumentieren die Sedimentationsprozesse und den sehr heterogenen Aufbau dieser Talfüllung (Dedual & Böhm 1993).

Hydrogeologische Verhältnisse

Das Wasser in den Arosler Dolomiten ist im Raum Davos gespannt bis artesisch. Büchi & Müller (1986) beschreiben die Arosler Dolomiten als inhomogenen, anisotropen Karst-/Kluftaquifer unterschiedlicher Mächtigkeit, und aufgrund der in einer rund 30 m in den Arosler Dolomit abgeteufte Bohrung festgestellten Wasserführung als geeignet für geothermische Nutzungen. Als bedeutenden Überlauf im NE dieses Systems wurde von ihnen, aufgrund der geologischen Verhältnisse, die Tobelmühlequelle oberhalb Davos identifiziert.

Wie stark die Arosler Dolomiten verkarstet sind, ist nicht bekannt. Als Hinweise auf eine Verkarstung sind die Existenz und das Schüttungsregime bedeutender Quellen, die Anwitterung und Erweiterung von Klüften im höher gelegenen Aufschlussgebiet sowie die sichtbare Verkarstung der Plattenkalke im SW der Arosler Dolomiten zu werten. Das Gewässernetz an der Oberfläche deutet darauf hin, dass die Klüfte und der Karst nicht die gesamten Niederschläge des rund 48 km^2 großen oberirdischen Einzugsgebietes aufnehmen können. Aufgrund der glazialen Talgeschichte mit Übertiefung und Wiederauffüllung des Landwassertales ist denkbar, dass die Verkarstung weit unter den heutigen Bergwasser- bzw. Druckspiegel reicht.

Die hydraulischen Verhältnisse innerhalb der Arosler Dolomiten werden durch Klüftung, Verkarstung sowie durch

Wechsel in der sedimentären Fazies bestimmt. Eine hydraulische Verbindung mit den darunter liegenden tektonischen Einheiten kann nicht ausgeschlossen werden, scheint aber eher unwahrscheinlich zu sein, da karbonatische Elemente jeweils durch hydraulisch gering durchlässige kristalline Gesteine oder mergelige Schiefer getrennt werden. Aufgrund des Kontaktes der Aroser Dolomiten mit den quartären Lockergesteinen im Raum Davos können letztere bis zu einem gewissen Grad als Vorfluter bezeichnet werden.

Konzept und Methoden

Das Konzept der Voruntersuchung zur Prospektion und Charakterisierung des Aquifers der Aroser Dolomiten bestand einerseits darin, die großräumigen hydrogeologischen Verhältnisse im Aquifer zu erfassen, um Fragen zu regionalen Aspekten, die das Grundwasser betreffen, wie Grundwasserneubildung, -fließregime und -abfluss sowie Grundwasserangebot und -erschließung, angehen zu können. Andererseits sollten in einer Erkundungsbohrung am Standort eines potenziellen Abnehmers in Davos die lokalen hydraulischen Kennwerte des Aquifers ermittelt werden. Bei positiven Ergebnissen sollte diese Erkundungsbohrung zu einer Produktionsbohrung ausgebaut sowie für die Projektierung weiterer Bohrungen und als Monitoringstandort genutzt werden. Es wurden die folgenden Methoden angewendet bzw. entwickelt.

KARSYS-Ansatz

Zur Erfassung von Karstsystemen eignet sich der sogenannte KARSYS-Ansatz (KARst SYStems approach), der im Detail in Jeannin et al. (2012) und Malard et al. (2012) beschrieben ist.

Für das Untersuchungsgebiet werden die tektonischen und strukturellen geologischen Verhältnisse bezüglich der durchlässigen, verkarstungsfähigen und der undurchlässigen Schichten in einem 3D-Modell erfasst. Das Modell wird dann mit allen bestehenden hydrologischen Informationen versehen, wie Quellen und Versickerungsstellen mit Höhenangaben und Schüttungs- bzw. Versickerungsraten, Grundwasserständen aus Bohrungen und Höhlen sowie Vorflutern. Oft sind diese Datensätze nur unvollständig und müssen mittels groben Bilanzannahmen und semiquantitativen Angaben der für die Wasserbilanz am wichtigsten Quellen vervollständigt werden.

Im Modell werden folgende hydraulischen Annahmen zur Karstwasserzirkulation gemacht:

- Der Durchfluss durch unverkarstete Einheiten (Stauer) ist vernachlässigbar klein. Unterhalb des Niveaus der Basisquelle(n) ist das ganze Volumen der verkarsteten Formation wassergesättigt.
- Bis zum Erreichen des Grundwassers sickert das Wasser in der ungesättigten Zone hauptsächlich vertikal durch die verkarsteten Formationen.
- Oberhalb der gesättigten Zone bilden sich auf undurchlässigen Schichten geringmächtige Grundwasserstockwerke aus, die entsprechend des Schichtfallens dieser Schichten entwässern.
- In der gesättigten Zone ist der hydraulische Gradient bergwärts der Quelle(n) Null oder durch Messungen bekannt.
- Bei Hochwasser können die Grundwasserstände im Karstgrundwasserleiter von einigen Metern bis hunderte von Metern ansteigen.

Der KARSYS-Ansatz beinhaltet üblicherweise die folgenden vier Arbeitsschritte:

1. Zusammenstellung, Analyse und Geo-Referenzierung der in der Literatur und anderweitig vorhandenen Daten
2. Erstellung des geologischen 3D-Modells
3. Erstellung des konzeptionellen hydrogeologischen Modells
4. Identifikation der wichtigsten Karstsysteme

Die Grundlagendaten und Ergebnisse werden in einer Datenbank der Karstsysteme erfasst. Die Resultate können in Form von sogenannten KARSYS-Karteien und 3D-Modellen einheitlich dargestellt und exportiert werden. Weitere Informationen zur Methode und ihrer Anwendung finden sich in Filipponi et al. (2012), Weber et al. (2011) und Malard et al. (2013).

Seismik, Erkundungsbohrung, Bohrlochgeophysik, Pumpversuche

Die seismischen Messungen dienen der Identifikation der tektonischen und strukturellen Verhältnisse. Dabei werden Tiefenlage und Topographie der Felsoberfläche unter der quartären Talfüllung sowie Bruch- und Störungszonen im Aroser Dolomit kartiert. Mit der Erkundungsbohrung, ausgeführt als Spülbohrung, werden das Locker- und Festgestein aufgeschlossen und mittels lithologischer Ansprache der Bohrcuttings geologisch aufgenommen. Die ausgeführten Bohrlochmessungen dienen zur Bestimmung der Bohrlochdimension (Kaliber-Log) und -raumlage (Orientierungs-Log), des Gesteins und seiner Eigenschaften (Gamma-Ray-Log), des Gefüges (optischer Bohrlochscan) sowie der Grundwasserführung, Temperatur und Salinität des Grundwassers (Flowmeter-, Temperatur- und elektrisches Leitfähigkeits-Log). Die Bestimmung der hydraulischen Kennwerte des Aroser Dolomits am Bohrstandort und die Ermittlung der Brunnencharakteristik erfolgt durch die Auswertung von Pumpversuchen.

Bohrlochviewer

Mit dem Bohrlochviewer werden statische Bilder des optischen Bohrlochscans dynamisch dargestellt, sodass eine virtuelle Befahrung des Bohrlochs und eine Betrachtung der Bohrlochwand in alle Raumrichtungen möglich sind. Aufgrund der verschiedenen Projektionsansichten (sphärisch, zylindrisch, planar) lassen sich Texturen und Strukturen in einer Bohrung sowie die Beschaffenheit der Bohrlochwand besser auswerten und interpretieren.

Resultate und Diskussion

Geologisches 3D-Modell

Das geologische 3D-Modell der Aroser Dolomiten wurde mit der Software CINEMA 4D von MAXON erstellt. Die Datengrundlage bilden das digitale Höhenmodell mit geologischer Karte, rund 30 tektonische Profile sowie rund ein Dutzend Bohrungen und zwei seismische Talquerprofile im Raum Davos. Einige Bohrungen und Tunnelaufschlüsse der Rhätischen Bahn dokumentieren die starken lateralen Mächtigkeitsschwankungen und das Ausdünnen der Aroser Dolomiten nach S und E.

Die wichtigsten Trennflächen, welche verkarstungsfähige Einheiten begrenzen, sind die Basis der quartären Talfüllung von Davos, die Basis der karbonatischen Mitteltrias der Silvretta-Decke im SW des Landwassertales, das Dach und die Basis der Aroser Dolomiten sowie das Dach der Aroser Zone (Abb. 2).

Konzeptuelles hydrogeologisches Modell

Ausgehend von der Geometrie des geologischen 3D-Modells lässt sich das konzeptuelle, hydrogeologische Modell beschreiben, in dem die Aroser Dolomiten nach oben durch die Silvretta-Decke und nach unten durch die Aroser Zone inklusive Auflage der Davoser Dorfberg- und der Rothorn-Decke begrenzt wird (Abb. 2). Der tiefere Teil der Aroser Dolomiten ist weniger verkarstet, die Fließgeschwindigkeiten sind dort langsamer und die Wassertemperaturen höher. Bei durchdringender Klüftung resultiert eine gute Wasserzirkulation mit einem praktisch horizontalen Wasserspiegel im Reservoir. Eine Entlastung des Systems erfolgt über die Tobelmühlequelle, bei der es sich um eine Überlaufquelle handelt. Die quartäre Talfüllung spannt das Grundwasser und führt lokal zu artesischen Verhältnissen im Landwassertal. Unter einer optimistischen Annahme eines Kluft-/Karstvolumens von 2% (Bonacci 1987) resultieren rund $400 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ Wasser für den NE-Teil der Aroser Dolomiten unterhalb des Niveaus der Tobelmühlequelle.

Lithologie des Aroser Dolomits

Die lithologische Ansprache der Bohrcuttings dokumentiert einen grauen bis schwarzen, mikritischen Dolomit mit wechselndem Anteil an Calcit. Der optische Bohrlochscan zeigt den Dolomit abschnittsweise brekziös und den Calcit oft in filigranen Netzen von Adern im Millimeterbereich ausgebildet. Ab einer Tiefe von 285 m ist der Dolomit kompakt. Ein markanter Fazieswechsel ist im untersten Bereich der Bohrung, von 356 m bis zur Endtiefe in 402 m, durch konstante Signale im Gamma-Ray-Log belegt (Abb. 4). Dieses gibt die gesamte natürliche Radioaktivität des Gesteins an und weist durch erhöhte Messwerte auf einen erhöhten Tonanteil hin. Damit erklären sich auch die verstärkten Richtungswechsel des Bohrlochverlaufs in diesem Tiefenbereich (Abb. 4).

Die Aroser Dolomiten repräsentieren sub- bis intertidale Ablagerungen einer Karbonatplattform. Diese mächtigen, relativ homogenen Ablagerungen dokumentieren eine ausgeglichene Sedimentations- und Subsidenzrate. Tektonische Diskordanzen sind durch abrupte farbliche Wechsel des Dolomits in Kombination mit abrupten Wechseln der Anteile an Calcit erkennbar. Sie weisen auf Repetitionen innerhalb des Aroser Dolomits hin.

Strukturauswertung

Die statistische Auswertung der insgesamt 1.262 im optischen Bohrlochscan ausgemessenen Trennflächen (Schichtung, Schieferung, Klüftung) erfolgte in stereographischen Projektionen (Abb. 3). Die Pole der Flächen wurden in der unteren Halbkugel eines Schmidt'schen Netzes abgebildet. Die angegebenen Mittelwerte entsprechen nicht dem arithmetischen Mittel, sondern dem Dichtemaximum in der Verteilung. Die Auswertung erfolgte für 7 Bohrschnitte, wobei die Tiefenbereiche zufällig gewählt wurden. Die Abbildung 3 enthält zudem einen Ausschnitt des von NW nach SE verlaufenden Seismogramms sowie den Vertikalverlauf der Bohrung in einem N-S- und einem W-E-Schnitt.

Die dominanteste Trennfläche weist eine Fallrichtung von 133° und einen Fallwinkel von 32° auf. Sie repräsentiert das allgemeine Einfallen der Schichtung im Aroser Dolomit. In Richtung SW und N einfallende Trennflächen sind ebenfalls vorhanden. Die eindeutig als Klüftung identifizierbaren Trennflächen fallen mit 55 bis 65° deutlich steiler ein. Die Einfallrichtung ist nach NNE, NNW und nach E orientiert. Sehr stark geneigte Strukturen konnten aufgrund der Materialwechsel und der Verschnitte durch andere Trennflächen nur ungenau bestimmt werden. Der Bohrlochviewer visualisiert den Aroser Dolomit im erbohrten Tiefenbereich als Kluft-/Karstaquifer. Die Orientierung der Trennflächen in der Bohrung stimmt mit den seismischen Reflektoren überein.

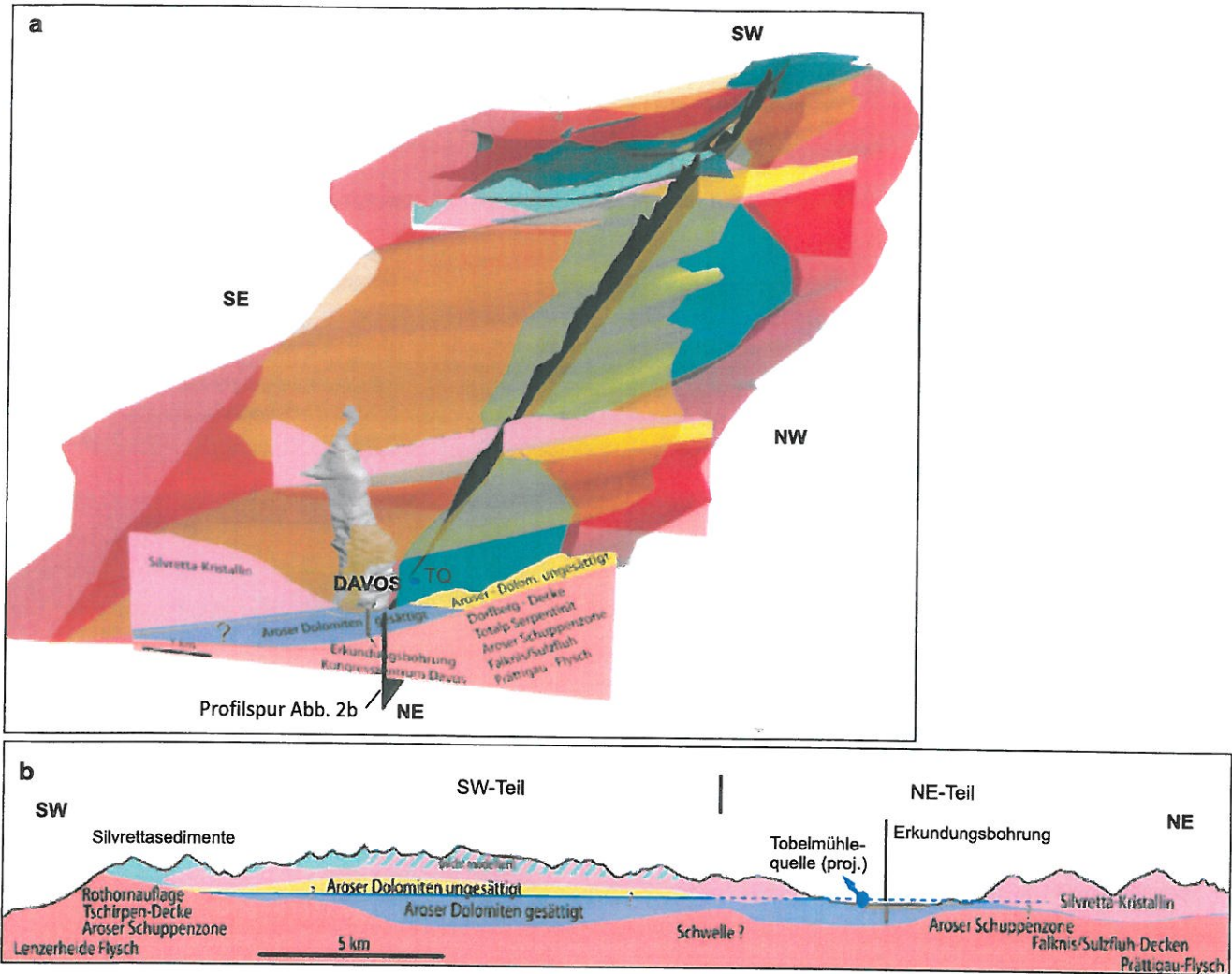


Abb. 2 3D-Modell des Aquifers der Arosar Dolomiten mit gesättigtem (blau) und ungesättigtem Teil (gelb) der Arosar Dolomiten, Lage des Gebirgswasserspiegels (türkis), Aquiferbasis (rot), Aquiferdach

(braun), Tobelmühlequelle TQ (blaue Kugel) und quartäre Talfüllung von Davos (grau) (a). Die Abgrenzung der Teileinzugsgebiete (b) kann hydraulischer Natur oder aber auch durch eine Schwelle bestimmt sein

Hydrostratigraphie

Der gemessene Wasserdruck am Kopf der Bohrung beträgt rund 2,6 bar. Die Flowmeter-, Temperatur- und elektrische Leitfähigkeitsmessungen (Abb. 4) wurden bei einem artesischen Ausfluss von rund 1.300 l min⁻¹ durchgeführt. Die Häufigkeit der Klüfte und Bohrwandausbrüche ist zwischen 102 und 285 m deutlich größer als im unteren Bereich der Bohrung. Der produktive Teil des Aquifers weist im erbohrten Abschnitt somit eine Mächtigkeit von 163 m auf (Flowmeter-Log). In einer Tiefe von 263 bis 402 m ist der Dolomit sehr gering wasserführend.

Die Wasserzuflüsse erfolgen sowohl diskret über einzelne dominante Kluft-/Karstzonen (Mächtigkeit < 10 m) als auch kontinuierlich über weite Bereiche der Bohrung (Mächtigkeit >> 100 m). Die einzelnen Zonen und Bereiche können durch die Messung der Temperatur und elektrischen

Leitfähigkeit lokalisiert werden. Die Sohlentemperatur bei einem Ausfluss von rund 1.300 l min⁻¹ beträgt 14,5 °C, die Temperatur des Mischwassers 11,4 °C. Unter Berücksichtigung einer mittleren Jahrestemperatur von 3,7 °C für Davos ergibt sich ein geothermischer Gradient von 2,7 °C pro 100 m. Die Mineralisation des Mischwassers ist mit 600 bis 700 µS cm⁻¹ verhältnismäßig gering.

Aquifer- und Brunnencharakteristik

Zur Charakterisierung des Aquifers am Bohrstandort wurde ein mehrere Monate andauernder, mehrstufiger Auslauf- und Pumpversuch durchgeführt. Die freie Ausflussrate des artesischen Wassers beträgt rund 1.300 l min⁻¹. Bei der mittels einer Tauchpumpe geförderten Ausflussrate von rund 1.760 l min⁻¹ resultiert in der Erkundungsbohrung eine Absenkung des Druckspiegels von rund 31 m. Die Statio-

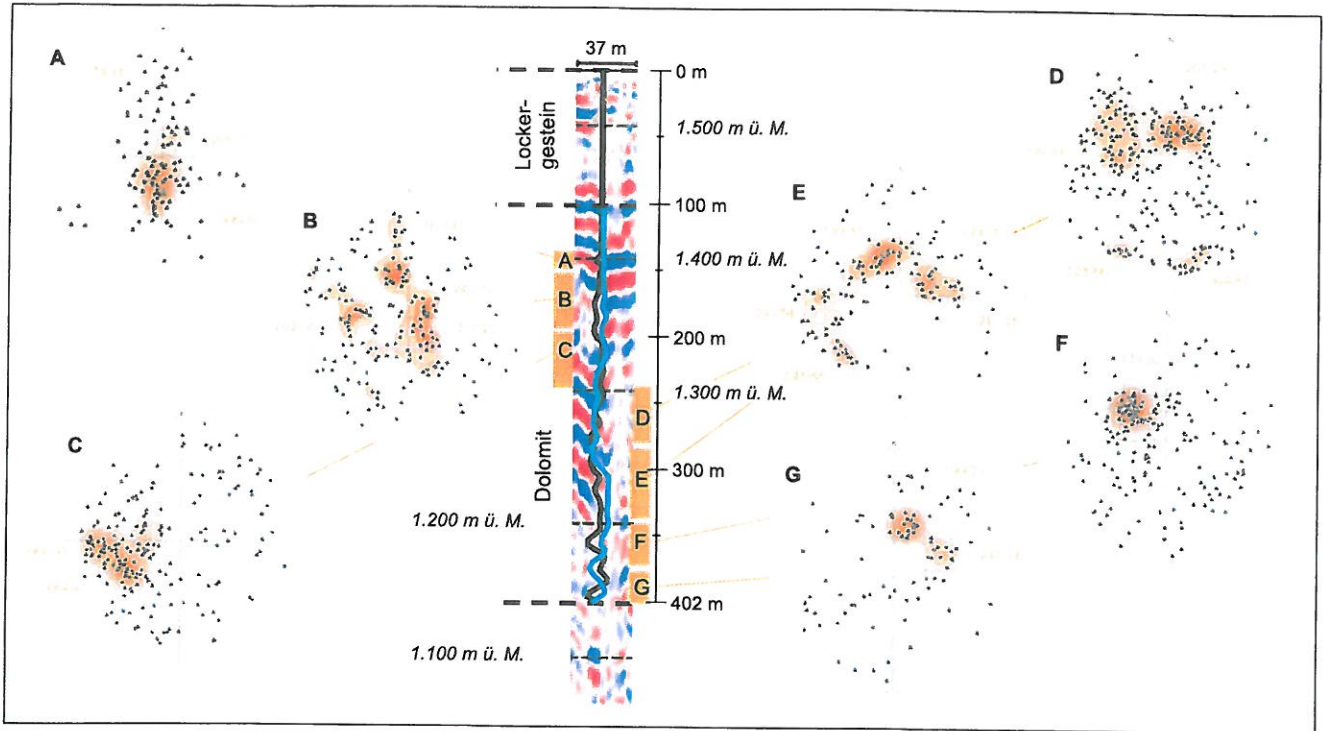


Abb. 3 Strukturauswertung für verschiedene Tiefenbereiche A bis G der Erkundungsbohrung mit Darstellung der Trennflächenpole im Schmitt'schen Netz, untere Halbkugel; Trennflächen: Schichtung, Schieferung, Klüftung; Ausschnitt NW-SE orientiertes Seismogramm und Vertikalverlauf der Bohrung im N-S- (schwarz) und W-E-Schnitt (türkis)

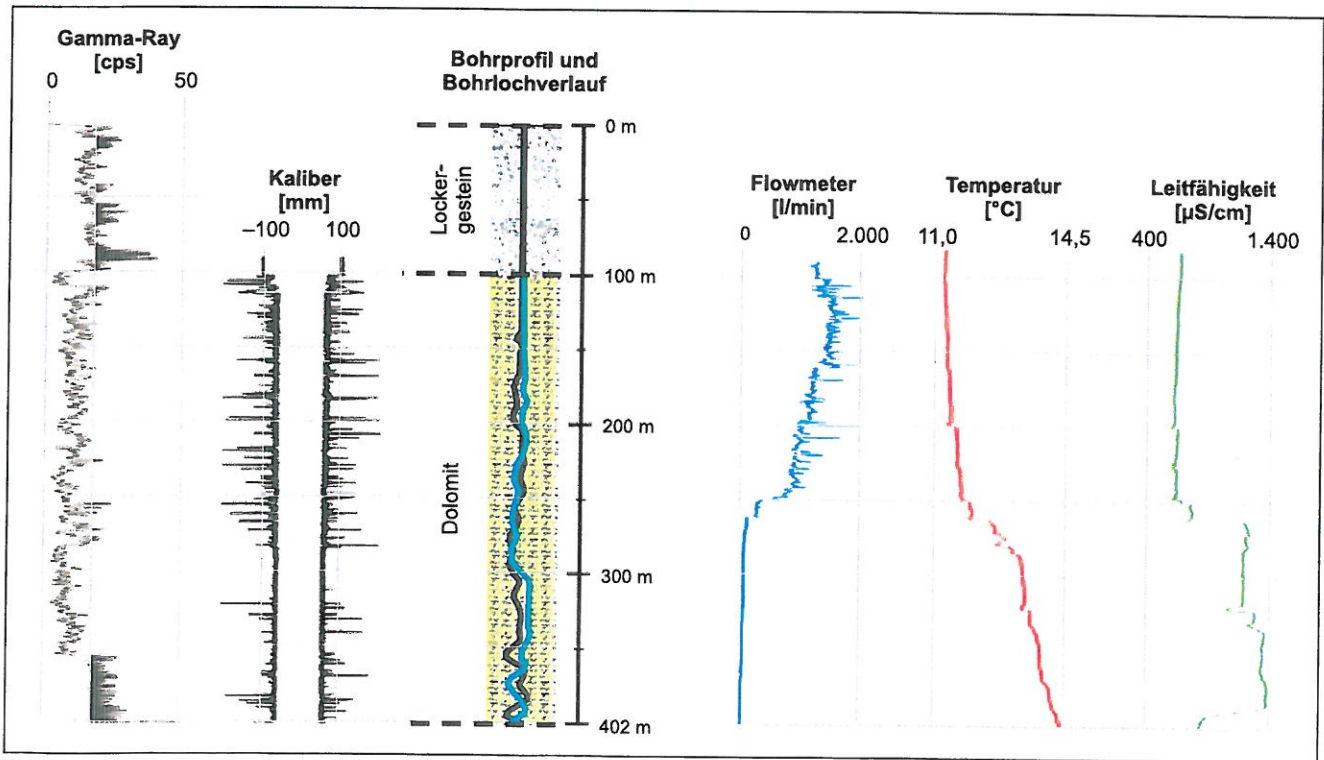


Abb. 4 Bohrloch-Logs im Arosener Dolomit der Erkundungsbohrung, Bohrprofil und Vertikalverlauf der Bohrung im N-S- (schwarz) und W-E-Schnitt (türkis), Flowmeter-, Temperatur- und elektrische Leitfähigkeitsmessung bei einem Ausfluss von rund 1.300 l min^{-1}

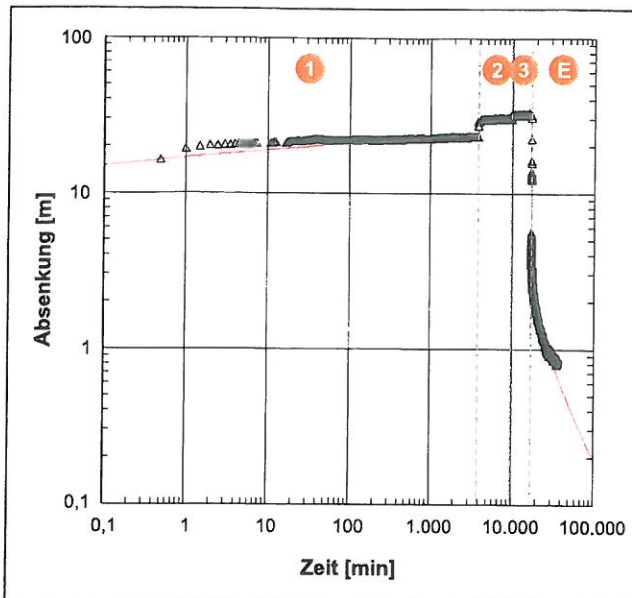


Abb. 5 Pumpversuch, Auswertung mit der Theis-Methode für Stufentests, Transmissivität $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; Förderraten: 1 1.380 l min^{-1} , 2 1.690 l min^{-1} , 3 1.760 l min^{-1} , E Erholungsphase

närzustände des Druckspiegels wurden bei der stufenweisen Absenkung und Erholung innerhalb weniger Stunden erreicht (Abb. 5). Die Auswertung nach der Theis-Methode für Stufentests (Kruseman & de Ridder 1994) ergibt für die Transmissivität einen Wert von $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Bei einer Mächtigkeit des Aquifers von 163 m ergibt sich eine mittlere hydraulische Durchlässigkeit von $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$. Der Arosler Dolomit stellt im Grundwasser führenden Bereich einen ergiebigen Aquifer dar. Die rasche Reaktion des Druckspiegels auf Änderungen in der Versuchsanordnung dokumentiert die hohe Konnektivität und laterale Ausbreitung der Klüfte und Verkarstung im Dolomit.

Gewinnbare Energie

Bei einer Förderung von 1.500 bis 2.000 l min^{-1} , einer Abkühlung um 8 K und der spezifischen Wärmekapazität des Wassers von $4.182 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ resultiert für die Erkundungsbohrung eine rechnerische, erdseitige Leistung von 0,84 bis 1,12 MW. Bei einem Betrieb von 7.000 h pro Jahr resultiert eine Jahresarbeit von 5,9 bis 7,8 GWh, vorausgesetzt das Wasser wird nicht in die Entnahmeformation zurückgeführt. Die effektiv gewinnbare Energie aus der Erkundungsbohrung und darüber hinaus aus dem gesamten Aquifer der Arosler Dolomiten kann zum derzeitigen Stand der Untersuchungen noch nicht quantifiziert werden.

Bohrlochviewer

Bei einem optischen Bohrlochscan werden die aufgenommenen Bilder der Bohrlochwand ausgerollt dargestellt.

Um eine bessere Darstellung der vorhandenen Bilddaten zu generieren und sich „ins Bohrloch“ begeben zu können, wurde ein Bohrlochviewer entwickelt. Dabei wurde auf einem bereits bestehenden Viewer für sphärische Panoramen (Reinfeld 2012) aufgebaut. Insbesondere wurde die Funktionalität geschaffen, den Betrachtungsstandort im Bohrloch vertikal verschieben zu können. Damit ist es möglich, das Bohrloch interaktiv zu befahren und die Bohrlochwand aus allen Richtungen zu betrachten. Daraus ergibt sich ein 3D-Effekt des Bohrlochs sowie der vorhandenen Texturen und Strukturen.

Der Bohrlochviewer mit den integrierten Steuerungselementen ist in Abbildung 6 dargestellt. Beim Bohrlochviewer wird das Ausgangsbild in viele kleine Bildsegmente zerlegt, die entsprechend dem Betrachtungsstandort dynamisch geladen oder verborgen werden. Es werden also nur diejenigen Bildsegmente angezeigt, die sich auch wirklich im Blickfeld befinden. Bei einem Blick in einer Bohrung in Richtung der Mittelachse nach oben oder nach unten müssten sehr viele Bildsegmente in den Zwischenspeicher geladen werden. Um jedoch eine lange Ladezeit von großen Datenmengen zu verhindern und dem Einfrieren bzw. Abstürzen des Viewers vorzubeugen, werden nur die wirklich gut sichtbaren Bildsegmente in den Zwischenspeicher geladen und angezeigt. Bei einer vertikalen Verschiebung des Betrachtungsstandortes werden diese dynamisch nachgeladen respektive wieder ausgeblendet. Die Betrachtung des Bohrlochs ist ab lokal gespeicherten Daten möglich. Der Bohrlochviewer kann problemlos in eine Präsentation oder ein PDF-Dokument integriert werden.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die durchgeführte Voruntersuchung dokumentiert die ersten Erkenntnisse zum bisher unerforschten, im Raum Davos gespannten bis artesischen, nutzbaren und ergiebigen Aquifer der Arosler Dolomiten. Der Aquifer befindet sich im mitteltiefen Untergrund und ist von regionaler Bedeutung.

Um eine Quantifizierung der gewinnbaren Energie vorzunehmen wird eine vorerst befristete Nutzung der Erkundungsbohrung mit Einleitung des gefördert Wassers in ein Oberflächengewässer realisiert. Dabei wird geprüft, in welchem Umfang eine langfristige und nachhaltige Nutzung an diesem und allfälligen weiteren Standorten gewährleistet werden kann und ob umliegende, bereits bestehende Nutzungen beeinträchtigt werden.

Im geologischen 3D-Modell ist der Aquifer der Arosler Dolomiten keilförmig ausgebildet. Unbekannt sind vorläufig die genaue Begrenzung und die Kluff-/Karstverteilung sowie die Erneuerung und die Kommunikation des Grundwassers mit Teilen des darüber liegenden Quartärs.

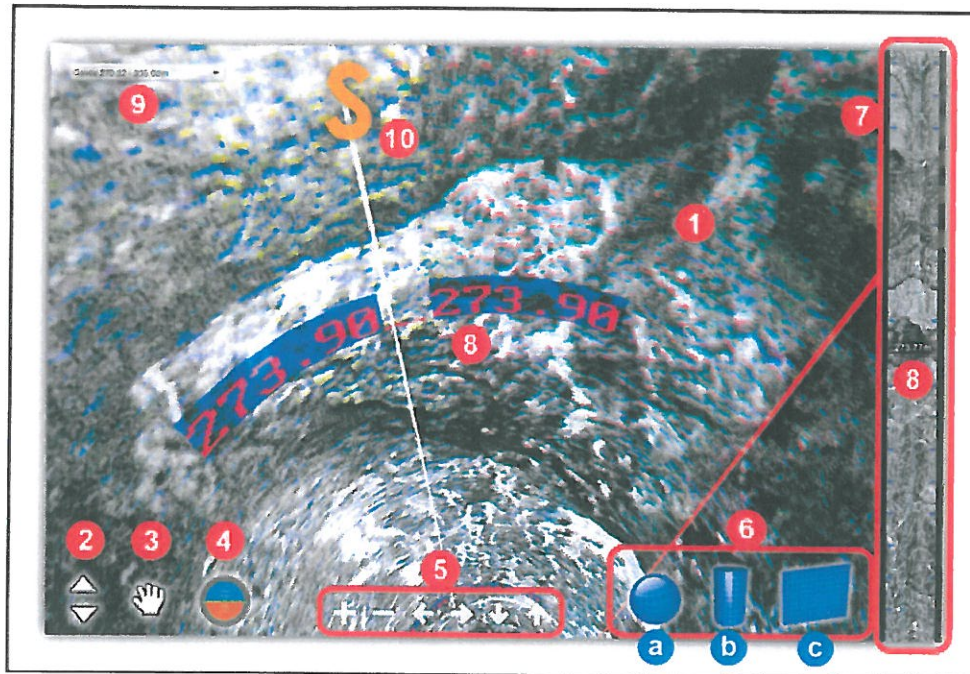


Abb. 6 Bohrlochviewer mit Hauptfenster und Steuerungselementen: 1 – Hauptfenster des Viewers; 2 – Pfeile für die vertikale Verschiebung nach oben und unten; 3 – Knopf zum Ändern der Bewegungsmodi (ziehen/stoßen); 4 – Knopf zum Zurückschwenken in die horizontale Ausgangsposition; 5 – Allgemeine Navigationsleiste (bewegen/zoomen); 6 – Knöpfe zum Wählen der verschiedenen Projektionen, a) sphärisch mit Drehpunkt in Bohrlochachse, b) zylindrisch mit Drehpunkt in Bohrlochachse, c) flach wie optischer Bohrlochscan, jedoch

zoom- und verschiebbar; 7 – Leiste mit Miniaturansicht des Bohrlochscans; 8 – Tiefenangabe in Meter der aktuellen Ansicht im Hauptfenster und in der Miniaturansicht; 9 – Auswahlmenü der verschiedenen Tiefensequenzen; 10 – mitlaufende Angabe der Himmelsrichtung. Die Miniaturansicht auf der rechten Seite (7) lässt sich per Mausclick und gleichzeitigem Ziehen in der Höhenlage verschieben. Bei nochmaligem Klicken auf den gewünschten Ausschnitt wechselt die Ansicht im Hauptfenster auf die angeklickte Position

Um eine weitergehende, auf Fündigkeit optimierende und Risiken minimierende Explorations- und Bohrplanung sowie eine nachhaltige Nutzungsplanung zu ermöglichen, sind vertiefte geologische Kenntnisse des Aquifers sowie vertiefte Prozesskenntnisse hinsichtlich Grundwasserneubildung, -fließregime und -abfluss erforderlich. Weitergehende Untersuchungen stehen in folgenden Bereichen an:

1. Um das im Rahmen der Voruntersuchung erstellte geologische Reservoirmodell weiterzuentwickeln sind zusätzliche geologische Kartierungen, die Aufnahme von lithologischen Referenzprofilen, seismische Messungen und Beobachtungsbohrungen erforderlich. Dadurch werden eine vertiefte strukturgeologische Interpretation und eine weitergehende Faziesdifferenzierung der Aroser Dolomiten möglich. Das geologische 3D-Modell bildet die geometrische Grundlage für ein hydraulisch-thermisches Modell.
2. Der entwickelte Bohrlochviewer ist ein nützliches Werkzeug, um Texturen und Strukturen in Bohrungen besser analysieren und die Tiefenwirkung der Klüftung und Verkarstung besser beurteilen zu können. Die Weiterentwicklung des Viewers sieht die Integration von

Funktionen vor, die ein direktes Ansteuern von definierten Positionen im Bohrloch ermöglichen.

3. Die Wasserzirkulation in den Aroser Dolomiten erfolgt vorwiegend entlang von Klüften, Störungszonen und in verkarsteten Bereichen. Die Bilanzierung der Grundwasserneubildung auf der Basis von hydrologischen Daten und die Auswertung und Interpretation von Markier- und Pumpversuchen sowie von geochemischen Wasseranalysen bilden die Grundlage für die Festlegung der Randbedingungen und der hydraulischen Kennwerte des hydraulisch-thermischen Modells. Damit können Anlagekonfigurationen getestet und Produktivitätsprognosen, die auf Simulationen beruhen, erstellt werden.

Danksagung Die vorliegende Arbeit wurde vom Bundesamt für Energie (BFE), der Gemeinde Davos und dem Amt für Natur und Umwelt Graubünden (ANU) gefördert. Besonderen Dank gilt Gunter Siddiqi, Rudolf Minder, Gian Paul Calonder und Hansruedi Aebli für die anregenden Diskussionen bei der Entwicklung und Umsetzung des Projekts. Zudem danken wir Jannis Epting und Sven Rumohr für die wertvollen Anmerkungen zum Manuskript.

Literatur

- Brauchli, R., Glaser, T.: Geologische Karte von Mittelbünden, Lenzenhorn. 1:25'000, Geologische Spezialkarte 94C. Schweizerische Geologische Kommission (1924)
- Bonacci, O.: Karst Hydrology with Special Reference to the Dinaric Karst. Springer Series in Physical Environment, S. 184. Springer-Verlag (1987)
- Büchi, U.P., Müller, E.R.: Schlussbericht Pilotprojekt Geothermische Bohrung Phase II, Landschaft Davos. Bericht Nr. 2063 im Auftrag des Bundesamtes für Energie, des Amtes für Natur und Umwelt Graubünden und des Kleinen Landrates der Landschaft Davos, S. 35 (1986)
- Cadisch, J.: Geologische Karte von Mittelbünden. Arosa, 1:25'000, Geologische Spezialkarte 94A. Schweizerische Geologische Kommission (1922)
- Cadisch, J., Leupold W.: Geologische Karte von Mittelbünden, Davos, 1:25'000, Geologische Spezialkarte 94B. Schweizerische Geologische Kommission (1929)
- Dedual, E., Böhm, C.: Grundwasser Davos, Hydrogeologisches Gutachten. Bericht Nr. 3319 im Auftrag des Amtes für Natur und Umwelt Graubünden, S. 78 (1993)
- Eichenberger, U.: Die Mitteltrias der Silvretta-Decke (Ducankette und Landwassertal, Ostalpin). Dissertation, ETH Zürich 8008, S. 212 (1986)
- Eugster, H., Leupold, W.: Geologische Karte von Mittelbünden, Landwasser, 1:25'000, Geologische Spezialkarte 94D. Schweizerische Geologische Kommission (1930)
- Filipponi, M., Schmassmann, S., Jeannin, P.Y., Parriaux, A.: KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagebau. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen, S. 200 (2012)
- Fitze, M.: Der spätglaziale Grossdavosersee und Spuren dessen Ausbruchs, Untersuchungen an den Megarippen bei Filisur. Diplomarbeit Universität Zürich, S. 96 (2009)
- Flisch, M., Streckeisen, A.: Nutzung geothermischer Energie in Davos, Geologie und Tektonik. In: Büchi, U.P., Müller, E.R. (Hrsg.) Schlussbericht Pilotprojekt Geothermische Bohrung Phase II, Landschaft Davos. Bericht Nr. 2063 im Auftrag des Bundesamtes für Energie, des Amtes für Umweltschutz Kanton Graubünden und des Kleinen Landrates der Landschaft Davos, S. 11 (1986)
- Frei, F., Ott, E.: Geologische Karte von Mittelbünden. Piz Michèl, 1:25'000, Geologische Spezialkarte 94E. Schweizerische Geologische Kommission (1926)
- Jeannin, P.Y., Eichenberger, U., Sinreich, M., Vouillamoz J., Malard A., Weber E.: KARSYS: a pragmatic approach to karst hydrogeological system conceptualisation. Assessment of groundwater reserves and resources in Switzerland. *Environ. Earth Sci.* (2012). doi:10.1007/s12665-012-1983-6
- Kaiser, T., Minder, R., Siddiqi, G.: Geothermie. In: Aegerter, I., Berg, M., Burger, P., Gutscher, H., Hirschberg, St., Kiener, E., Kirchässner, G., Ritz, Ch., Zuberbühler, A. (Hrsg.) Zukunft Stromversorgung Schweiz. Akademien der Wissenschaften Schweiz, S. 61–63 (2012)
- Kruseman, G.P., de Ridder, N.A.: Analysis and Evaluation of Pumping Test Data (2nd ed.), Publication 47, Intern. Inst. for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands, 370p. (1994)
- Mählmann, R.F., Giger, M.: The Arosa zone in Eastern Switzerland: oceanic, sedimentary burial, accretional and orogenic very low to low grade patterns in a tectono-metamorphic mélange. *Swiss J. Geosci.* **105**, 203–233 (2012)
- Maisch, M.E.: Glazialmorphologische und gletschergeschichtliche Untersuchungen im Gebiet zwischen Landwasser- und Albulatal (Kt. Graubünden, Schweiz). Dissertation, Universität Zürich, S. 215 (1981)
- Malard, A., Vouillamoz, J., Weber, E., Jeannin, P.Y.: Swisskarst Project – toward a sustainable management of karst water in Switzerland. Application to the Bernese Jura. In: Actes du 13e Congrès National de Spéléologie, Muotathal, Suisse, 29 Sept. au 01 Oct. 2012, S. 215–219
- Malard, A., Jeannin, P.Y., Vouillamoz, J., Weber, E.: Documenting Swiss karst aquifers using KARSYS approach – Examples of recent applications. In: Proceedings of the 16th International Congress of Speleology. Brno. Czech Republic. 21–28 July 2013.
- Minder, R., Siddiqi, G.: BFE Forschungsprogramm Geothermie, Überblicksbericht 2012. <http://www.bfe.admin.ch/forschunggeothermie/index>
- Reinfeld, K.: KRPan Viewer and KRPan Tools. www.krpano.com, Zugriffsdatum: 1. September 2012
- Thöni, M.: A review of geochronological data from the Eastern Alps. *Mineralogische und Petrographische Mitteilungen* **79**, 209–230 (1999)
- Weber, E., Jordan, F., Jeannin, P.Y., Vouillamoz, J., Eichenberger, U.: Swisskarst project (NRP61): towards a pragmatic simulation of karst spring discharge with conceptual semi-distributed model. The Flims case study (Eastern Swiss Alps). In: Proceedings of the H2Karst, 9th Conference on Limestone Hydrogeology, Besançon, France, 1–4 Sept. 2011, S. 483–486