



Einfluss von geologisch-hydrologischen Randbedingungen und bauliche Massnahmen auf das Quellen von Ton-Sulfat Gesteinen am Belchentunnel

Influence des contraintes hydrogéologiques et des mesures sur le gonflement des roches sulfuriques argileux dans le tunnel de Belchen

Role of hydrogeology and tunnel construction frame on swelling of anhydrite claystone; Belchentunnel

**Angewandte und Umweltgeologie
Departement Umweltwissenschaften
Universität Basel**

**Prof. Dr. Peter Huggenberger
Dr. Christoph Butscher
Dr. Horst Dresmann
Stefan Scheidler**

**Forschungsprojekt FGU 2012/004_OBF auf Antrag der Arbeitsgruppe
Tunnelforschung (AGT)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Einfluss von geologisch-hydrologischen Randbedingungen und bauliche Massnahmen auf das Quellen von Ton-Sulfat Gesteinen am Belchentunnel

Influence des contraintes hydrogéologiques et des mesures sur le gonflement des roches sulfuriques argileux dans le tunnel de Belchen

Role of hydrogeology and tunnel construction frame on swelling of anhydrite claystone; Belchentunnel

**Angewandte und Umweltgeologie
Departement Umweltwissenschaften
Universität Basel**

**Prof. Dr. Peter Huggenberger
Dr. Christoph Butscher
Dr. Horst Dresmann
Stefan Scheidler**

**Forschungsprojekt FGU 2012/004_OBF auf Antrag der Arbeitsgruppe
Tunnelforschung (AGT)**

Dezember 2016

1597

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Peter Huggenberger

Mitglieder

Christoph Butscher

Horst Dresmann

Stefan Scheidler

Begleitkommission

Präsident

Georgios Anagnostou

Mitglieder

Christian Amstad

Flavio Chiaverio

Christian Gammeter

Stefan Maurhofer

Martin Meyer

Antragsteller

Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Ausgangslage	13
2 Forschungsansatz	15
3 Geologie und Geologische 3D-Modelle	17
3.1 Geographischer Überblick und Perimeter	17
3.2 Geologische Situation	18
3.2.1 Tektonischer Bau im Belchengebiet	18
3.2.2 Stratigraphie	19
3.3 Geologisches Regionalmodell.....	20
3.3.1 Daten und Grundlagen	20
3.3.2 Modellerstellung	22
3.3.3 Beschreibung Regionalmodell und Strukturanalyse	23
3.4 Geologisches Detailmodell „Schuppenzone Süd“	27
4 Grundwassermodelle	31
4.1 Regionale Grundwassermodellierung	32
4.2 Lokales GW-Modell	36
4.2.1 Erstellung lokales GW-Modell	36
4.2.2 Integration des Tunnelbauwerks	37
4.2.3 Hydraulisches Basismodell	38
5 Bautechnische Aspekte	43
5.1 Evaluation Bauverfahren und Systeme zur Grundwasserhaltung	43
5.1.1 Bauverfahren	43
5.1.2 Systeme der Grundwasserhaltung.....	43
5.2 Abschätzung der geohydraulischen Parameter	45
6 Szenarienberechnungen	47
6.1 Grundwasserfließregime.....	47
6.2 Einfluss Bauverfahren auf EDZ.....	49
6.3 Systeme zur Grundwasserhaltung	50
6.3.1 Pumpenschächte in Position der bestehenden Weströhre	50
6.3.2 Optimierte Position der Pumpenschächte.....	51
6.3.3 Pumpenschächte kombiniert mit Abdichtungsbauwerken	52
6.3.4 Potenzialabsenkung in Aquiferen	53
6.3.5 Zusammenfassung Szenarien Grundwasserhaltung	54
6.4 Sensitivitätsanalyse	55
6.4.1 Sensitivitätsanalyse Basismodell	55
6.4.2 Sensitivitätsanalyse Szenarien Grundwasserhaltung	57
7 Schlussfolgerungen	61
Anhänge	63
Glossar	75
Literaturverzeichnis	77

Projektabschluss	79
Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	83

Zusammenfassung

Zur Frage, wie Wasser zu den quellfähigen Gesteinen gelangen kann, die infolge des Tunnelausbruchs eine Entlastung erfahren haben, ist ein Forschungsbedarf sowohl an methodischen, als auch an Prozesskenntnissen im Bereich Wasserzirkulation und Tunnelbau erwiesen. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die Erneuerungsarbeiten bei bestehenden und beim Bau von neuen Tunnelanlagen in den quellfähigen Gesteinsformationen der Nordwestschweiz. Grundsätzlich gibt es auch einen Bedarf an neuen Erkenntnissen zur Beantwortung von Fragen nach dem Zusammenhang zwischen Tunnelbau, Bildung von Auflockerungszonen in Abhängigkeit der geologischen Strukturen und den Veränderungen des Grundwasserfließregimes.

Auf Basis der 2D Profilbilanzierung im Vorgängerprojekt (Belchen Tunnel FGU 2008/004_OBF) und einer umfangreichen Datenrecherche wurde neu ein 4x4 km grosses regionales geologisches 3D-Modell entwickelt. Mit dem Belchentunnel im Zentrum beinhaltet es die geologischen Grundstrukturen bis in eine Tiefe von ca. -1000 m.ü.M. Anhand von 9 Modellhorizonten und aller relevanter Verwerfungen werden die geologischen Strukturen und die allgemeinen Lagerungsverhältnisse des gesamten Modellgebiets wiedergegeben. Im Norden des Belchentunnels beobachtet man eine für das Gesteinsquellen relevante kleinräumige Verschuppung der geologischen Schichten, während nach Süden hin die Strukturen offener und weitreichender werden. Generell fallen die Schichten nach SSO ein. Faltenachsen streichen im Modellgebiet West-Ost. Dabei nimmt die Einengung der Falten von West nach Ost zunächst stark zu, um dann abrupt, zugunsten von teils weitreichenden Überschiebungen abgelöst zu werden (laterale Entkopplung der Deformationsstrukturen).

Durch die detaillierte hydrogeologische Analyse der Modellstruktur war es möglich, die Geometrie der Grundwasserleiter und -stauer zu rekonstruieren. Das entwickelte Modellkonzept ermöglicht eine Weiterentwicklung des regionalen Modells, für den Fall, dass neue Erkenntnisse (z. B. aus Bohrungen) hinzukommen. Außerdem erlaubt das Vorgehen eine Extraktion von Teilmodellen. Im Projekt diente das regionale 3D-Modell als geometrisch-strukturelle Basis zur Erstellung eines hydraulischen Regionalmodells sowie des hydraulischen Detailmodells „Schuppenzone Süd“.

Die Resultate des 3D geologischen Modells bilden die strukturelle Grundlage für die neu aufgebauten 3D numerischen Grundwasser Modelle im regionalen und lokalen Massstab. Im lokalen Modell mitberücksichtigt ist das Tunnelsystem mit den drei Tunnelröhren, dem Versuchsdrainagestollen, Luftschächten und Verbindungsstollen sowie einer den Tunnel umgebenden Auflockerungszone (EDZ). Der Einfluss der hydraulischen Eigenschaften der Auflockerungszone wurde mittels Szenarien evaluiert. Ausserdem wurde mit den Modellen die Grundwasserströmung berechnet und analysiert, sowie Veränderungen der Grundwasserfließregimes durch den Tunnelbau illustriert. Die Modellberechnungen zeigen insbesondere, wie und woher Grundwasser nach dem Tunnelbau zu Anhydrit führenden Gesteinsschichten gelangen kann.

Das fast vollständige Fehlen von hydraulischen Messdaten im Gebiet des Belchentunnels erforderte die Definition von Randbedingungen aufgrund von konzeptionellen Überlegungen wie beispielsweise der topographie-getriebenen Grundwasserzirkulation. Daraus resultieren verschiedene Modellszenarien, welche Auswirkungen von Wasserhaltungssystemen beim Bau und Betrieb von Tunnel auf das Grundwasserfließregime, insbesondere in der EDZ im Gipskeuper, zeigen. Dabei wurden Pumpenschächte und Absperrbauwerke zur Verhinderung einer Längszirkulation in der EDZ berücksichtigt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Pumpenschächte gut geeignet sein können, Wasserzuflüsse in die EDZ im Gipskeuper, und somit das Quellpotenzial, zu reduzieren. Dabei kommt es jedoch darauf an, diese Pumpenschächte im Gipskeuper direkt im Anschluss von Aquiferen und Störungen zu installieren. Abdichtungsbauwerke tragen zu einer deutlichen Reduktion des Wasserflusses im Gipskeuper nur dann bei, wenn diese nicht um- oder durchströmt werden können. Eine Potenzialabsenkung im Oberer Muschelkalk durch Pumpbrunnen reduziert in den

Simulationen den Wasserfluss im Gipskeuper weniger effektiv als optimal platzierte Pumpenschächte, weil Wasser auch von lokalen Aquiferen und aus Störungszonen in die EDZ im Gipskeuper zuströmt. Ein Absenken der Potenziale durch Pumpbrunnen auch in diesen Strukturen dürfte in der Praxis schwer umsetzbar sein.

Résumé

Comment l'eau souterraine peut-elle parvenir à des roches gonflantes qui, suite à l'excavation d'un tunnel, ont subi une diminution des contraintes. Cette question mérite un effort scientifique tant au niveau des méthodes de recherche que de l'acquisition des connaissances quant aux processus liés à la circulation des eaux souterraines et à la construction de tunnels. Cela vaut tout particulièrement pour les travaux de rénovation et de construction de tunnels dans les formations rocheuses gonflantes du nord-ouest de la Suisse. En effet, des connaissances supplémentaires sont requises pour répondre à des problématiques qui associent les constructions de tunnels avec des modifications du régime d'écoulement souterrain et la formation de zones de désagrégation qui dépendent fortement des structures géologiques.

Basé sur les profils 2D balancés du projet précédant (Belchen Tunnel FGU 2008/004_OBF) ainsi que sur une vaste recherche de données, un nouveau modèle géologique en 3D à l'échelle régionale (4 km x 4 km) a été développé. Le modèle, qui est centré sur le tunnel du Belchen, comprend les structures géologiques globales jusqu'à environ -1000 mètres au-dessus du niveau de la mer. Intégrés au modèle, neuf horizons géologiques ainsi que toutes les failles majeures forment les structures et les conditions de dépôt géologiques générales. Au nord du tunnel du Belchen, on peut observer un écaillage à petite échelle des couches géologiques qui sont pertinentes pour les roches gonflantes. Vers le sud, les structures deviennent plus ouvertes et étendues. Globalement, les couches plongent vers le SSO et les axes des plissements sont orientés ouest-est. La compression des plis augmente d'abord massivement de l'ouest vers l'est puis ces derniers sont soudainement remplacés par d'étendus chevauchements (découplage des structures de déformation).

L'analyse hydrogéologique détaillée du modèle structurel a rendu possible la reconstruction géométrique des aquifères et aquitards. De plus, l'approche choisie permet un futur développement du modèle régional 3D dans le cas où de nouvelles informations seront disponibles (p. ex. forage) ainsi que l'extraction d'une partie du modèle en vue d'une analyse spécifique. Le modèle régional forme ainsi la base structurelle nécessaire à l'élaboration d'un modèle hydraulique régional et d'un modèle hydraulique détaillé de la zone d'écaillage au sud.

Ainsi, des modèles numériques d'écoulement souterrain 3D à l'échelle régionale et locale ont été développés sur la base structurelle du modèle géologique 3D. Le modèle d'écoulement souterrain local inclut le tunnel qui est composé de trois tubes, de la galerie expérimentale de drainage, de puits d'aération et de galeries de raccordement ainsi que les zones endommagées par l'excavation (*eng.* « excavation damaged zone, EDZ »). L'influence des propriétés hydrauliques de ces zones sur l'écoulement souterrain a été évalué en considérant différents scénarios. De plus, les modifications des flux souterrains suite à la construction du tunnel ont été analysés. Les simulations indiquent en particulier les voies empruntées par l'eau souterraine pour parvenir aux couches contenant de l'anhydrite.

La définition des conditions aux bords du modèle par des approches conceptuelles, tel que le contrôle topographique sur les nappes souterraines a été rendu nécessaire par l'absence quasi complète de données hydrologiques dans la région du tunnel du Belchen. Les scénarios proposés dévoilent l'impact du système de rétention de l'eau sur les flux souterrains durant la construction et l'exploitation du tunnel, particulièrement dans les zones endommagées par l'excavation dans le Keuper gypseux. Les puits de pompages ainsi que les ouvrages de retenue destinés à limiter la circulation longitudinale des eaux souterraines dans ces zones endommagées ont été aussi représentés dans les simulations. Ces dernières indiquent que les puits de pompage peuvent permettre de diminuer l'entrée d'eau dans les zones endommagées par l'excavation du Keuper gypseux et par là de réduire le risque de gonflement. Cependant, les puits de pompage doivent être installés dans le Keuper gypseux directement au contact d'aquifères et de failles afin de garantir un certain succès. Les ouvrages d'étanchéisation contribuent à une

réduction significative des entrées d'eau dans le Keuper gypseux à la condition que ces ouvrages ne puissent pas être contournés voire traversés par les eaux souterraines. Les simulations montrent que pour limiter l'entrée d'eau souterraine dans le Keuper gypseux, une diminution par pompage du potentiel hydraulique dans le muschelkalk supérieur est moins efficace que le placement judicieux de puits de pompage, car l'eau y pénètre par des aquifères locaux et des zones de failles. De plus, un abaissement du potentiel hydraulique par pompage dans ces structures devrait être difficile à réaliser.

Summary

There is a proven demand for research to advance both the methods as well as process knowledge on how water can reach swellable sulfatic clay stones, which were decompressed following tunnel excavation. This is especially valid regarding repair work for existing tunnels and during the construction of new tunnels in swellable geologic formations in North-western Switzerland. There is a basic demand for further knowledge on the relationship between tunnelling, building of excavation disturbed zones (edz) due to geologic structures and changes in groundwater flow regimes.

Based on a 2D cross-section balance developed in a previous project (Belchen Tunnel FGU 2008/004_OBF) and extensive data research, a 4x4km regional geologic 3D model was developed. The 3D-model of the geologic base-structures reaches a depth of about -1000 m a.s.l. and is centered around the Belchen Tunnel. The geologic structures and the general stratification proportions of the whole model area are represented by 9 model horizons and all relevant faults. North of the Belchen Tunnel, a small scaled imbrication of the geologic strata can be found, which is particularly relevant for swelling of the rock, while to the south, the structures are more open and extensive. In general, the strata dip to SSO. In the model area, the fault axis strikes from West to East. Thereby a narrowing of the faults initially increases strongly from West to East then detaches abruptly due to partly extensive overthrusts (lateral decoupling of deformation structures).

The geometry of the aquifer and aquitard was reconstructed based on the detailed hydrogeological analysis of the model structure. The model concept was designed to allow a further development of the regional model, for example to include new knowledge (e.g. from drillings). Furthermore, this approach allows an extraction of model parts. In the project, the regional scale 3D-model is the geometric-structural base for the construction of a hydraulic regional model and of the hydraulic detail model "Schuppenzone Süd".

The results of the 3D geologic model are the structural basis for the newly constructed 3D numerical groundwater model both at the regional and the local scale. The tunnel system with all three tunnel tubes, the drainage duct, air vents, connection ducts and the excavation disturbed zone are considered in the local scale model. The influence of hydraulic properties of the edz was evaluated using scenario calculations. Furthermore, groundwater flow was calculated and visualized using the models, as was the change of the groundwater flow regime due to the tunnelling. The model calculations show in particular, how and from where groundwater can reach geologic formations which contain anhydrite.

The near complete lack of hydraulic measurements in the area of the Belchen tunnel made the definition of boundary conditions based on conceptual considerations, for example the topographically driven groundwater circulation. This results in different model scenarios, illustrating the effect of dewatering systems during building and operation of the tunnel on the groundwater flow regime, particularly in the edz in the Gipskeuper formation. Pumping trays and buildings for sealing for prevention of a lateral circulation in the edz was considered. The results show, that pumping trays are suitable to reduce water flux in the edz in the Gipskeuper and therefore to reduce the swelling potential. It is imperative to install these pumping trays in the Gipskeuper directly adjacent to aquifers and faults. Buildings for sealing can reduce groundwater flux in Gipskeuper only if there is no circulation flow around them. The simulations showed that a lowering of the hydraulic potential in the oberer Muschelkalk through pumping wells reduces the groundwater flux in the Gipskeuper less effectively than optimally placed pumping trays do. This is because water flows from local aquifers and faults towards the edz of the Gipskeuper. However, it is difficult to practically achieve a lowering of the hydraulic potential in the Gipskeuper structure using pumping trays.

1 Ausgangslage

Das Wissen über die Gesetzmässigkeiten des Quellvorgangs in Anhydrit führendem Gebirge ist beschränkt. Dies führt zu grossen Prognoseunsicherheiten bezüglich des Endwertes und der zeitlichen Entwicklung der Quellhebung bzw. des Quelldrucks bei Tunnelbauten und hat zur Folge, dass bei Tunnelprojekten im Gipskeuper in der Projektierungs-, Bau-, und Betriebsphase häufig Rückschläge verzeichnet werden. Das Gebirge ist in der Regel kleinräumig von Gesteinen unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung aufgebaut (Anteil der quellfähigen Tonmineralien und des Anhydrits) und weist daher örtlich stark wechselhafte Quellfähigkeit auf (Heterogenität). Während der Problematik des Tunnelbaus in quellfähigem Gebirge mit verschiedenen technischen Massnahmen, die auf neueren Entwurfskonzepten (Amstad und Kovári 2001) oder Laboruntersuchungen beruhen, begegnet wird, legt das vorliegende Projekt den Fokus auf die Rolle des strukturellen Aufbaus des Juragebirges und insbesondere auch die dadurch beeinflusste Wasserzirkulation im Gebirge. Die Frage, wie das Wasser zu den quellfähigen Gesteinen gelangen kann, die infolge des Tunnelausbruchs eine Entlastung erfahren haben, und die damit zusammenhängen Frage nach der Möglichkeit der Quantifizierung der Wasserzirkulation beim Tunnelbau sind Gegenstand des vorliegenden Projektes. Der Forschungsbedarf an gesicherten und verbesserten Grundlagenkenntnissen im Bereich Wasserzirkulation und Tunnelbau im Hinblick auf die Erneuerungsarbeiten bei bestehenden und beim Bau von neuen Tunnelanlagen in den quellfähigen Gesteinsformationen der Nordwestschweiz gilt als erwiesen. Es stellt sich deshalb grundsätzlich auch die Frage nach dem Zusammenhang zwischen Tunnelbau, Bildung von Auflockerungszonen in Abhängigkeit der geologischen Strukturen und den Veränderungen des Grundwasserfließregimes.

Das vorliegende Projekt der Angewandten und Umweltgeologie der Uni Basel ist ein Folgegesuch zu den Gesuchen Chienberg FGU2008/5 und Belchentunnel FGU 2008/004_OBF und beschäftigt sich mit der Grundwasserzirkulation im Gebiet des Belchentunnels im regionalen und lokalen Massstab, insbesondere im Hinblick auf Änderungen durch das Tunnelbauwerk, und mit der Beeinflussung von Wasserwegsamkeiten durch technische Massnahmen. Die Erkenntnisse der vorgängigen Projekte Chienberg FGU2008/5 und Belchentunnel FGU 2008/004_OBF fliessen im vorliegenden Projekt ein.

Im Chienberg Projekt konnten Erklärungen gefunden werden, weshalb es beim Bau des Chienbergtunnels in einzelnen Abschnitten zu Gebirgsquellen gekommen ist, in anderen, vergleichbaren Abschnitten hingegen kein Gesteinsquellen beobachtet werden konnte. Der Grund für diese Unterschiede liegt in den Veränderungen des Grundwasserfließregimes beim Bau des Tunnels. Für den Belchentunnel sollen aufgrund dieser Erkenntnisse mit vergleichbaren hydrogeologischen Untersuchungen Vorschläge abgeleitet werden, wie Wasserzuflüsse zu anhydritführenden Schichten im Bereich des Belchentunnels beeinflusst werden können, um damit das Gebirgsquellen zu reduzieren.

Die geologisch-strukturelle Situation am Belchentunnel, der im Faltenjura liegt, unterscheidet sich von derjenigen am Chienbergtunnel im Tafeljura. Am Belchentunnel ist die Schichtlagerung nicht (nahezu) horizontal, sondern die Schichten stehen steil und sie sind teilweise gegeneinander verstellt. Grundwasser kann nicht nur aus den oberflächennahen Schichten (Quartär und verwitterte Schichten) zu quellfähigen Horizonten zufließen, sondern auch aus anderen Aquiferen, z. B. dem Oberen Muschelkalk oder lokalen kleineren Aquiferen wie dem Arietenkalk und Gansinger Dolomit. Zudem ändert am Belchen die Geologie rasch entlang dem Streichen der Schichten infolge von lateralen Versetzungen der geologischen Einheiten (Transferstörungen). Diese können einen noch nicht quantifizierten Einfluss auf Grundwasserzutritte in das Tunnelsystem haben. Neben Störungszonen können insbesondere Auflockerungszonen entlang der Tunnelröhre Wegsamkeiten für Grundwasserfluss bilden.

Das ASTRA-Projekt FGU-2008/5 und die Untersuchungen im Rahmen eines SNF-Forschungsprojekts am Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (MIT) (Butscher et al. 2011a-c) haben gezeigt, dass die Auflockerungszone um den Tunnel für den Wasserzufluss zu anhydritführenden Schichten eine Rolle spielt. Die Auflockerungszone kann, abhängig vom strukturellen und hydrogeologischen Kontext, zur Änderung von Wasserwegsamkeiten führen und ist somit eine wichtige Voraussetzung Grundwasser zu Anhydrit führenden Schichten zu bringen. Die Auflockerungszone entsteht beim Tunnelbau durch eine Umverteilung der Spannungen im Gebirge durch die Einführung eines Hohlraums im Untergrund, und auch durch mechanisches Einwirken auf das Gebirge beim Abbau. Die genauen Beziehungen zwischen Tunnelgeometrien, Abbaumethoden und den Spannungszuständen im Gebirge sind im Zusammenhang mit der Gefährdung des Gebirgsquellens im Gipskeuper noch wenig untersucht. Die hydraulischen Eigenschaften der Auflockerungszonen sind in konkreten Tunnelprojekten weitgehend unbekannt. Für ein besseres Verständnis der Quellerscheinungen wäre es wichtig, diese zu quantifizieren.

Im folgenden Bericht sind die Konzepte, die erarbeiteten Modellwerkzeuge und die Resultate der Berechnungen der regionalen und lokalen Grundwasserzirkulationssysteme des Belchenprojektes (FGU 2012/002) dargestellt. Zudem werden basierend auf den hydrogeologischen Modellen, Szenarienberechnungen des Einflusses der Tunnelbauten auf die Grundwasserzirkulation, sowie die daraus gewonnenen Schlussfolgerungen und Empfehlungen dargestellt.

2 Forschungsansatz

Wasser kann auf verschiedene Weise zum quellfähigen Gebirge gelangen: vom unmittelbar umgebenden Gebirgsbereich, als regionale, durch topographische Höhenunterschiede angetriebene Grundwasserzirkulationssysteme in durchlässigen Klüften und entlang von Auflockerungszonen entlang dem Tunnel selbst. Gängige geologische 2D Tunnel Prognoseprofile liefern lediglich einen Teil der erforderlichen geologischen Grundlagen für das Verständnis der Wasserzirkulation im Zusammenhang mit Tunnelbauwerken. Sowohl die für die Hydrogeologie relevanten 3D topographischen Unterschiede als auch die für regionale Zirkulationssysteme charakteristischen Tiefen (die wesentlich tiefer reichen als nur bis unter die Tunnelsohle) sollen berücksichtigt werden können. Die dazu erforderlichen Instrumente mussten im Rahmen dieses Projektes in einem ersten Schritt entwickelt werden. Konkret handelt es sich um die 3D geologische Modellbildung sowie den Aufbau der darauf basierenden hydraulischen Modelle.

Entsprechend den Erfahrungen beim Chienbergprojekt (FGU2008/5) soll mit der Konstruktion eines 3D geologischen Modells die Basis für eine Grundwassermodellierung geschaffen werden. Basierend auf dem 3D geologischen Modell erfolgte eine strukturelle Analyse, insbesondere zur Feststellung von Geometrien und strukturellen Besonderheiten, die für das Gebirgsquellen bzw. die Grundwasserzirkulation relevant sind. Dazu gehören die Raumlage des Gipskeupers und seine Beziehung zu wasserführenden Horizonten, die räumliche Beziehung zwischen Aquiferen, dem Tunnel und der ihn umgebenden Auflockerungszonen, sowie die Raumlage von Verwerfungszonen. Diese Arbeiten und die vorangegangenen hydrogeologischen Untersuchungen (FGU 2008/004) bilden die Grundlage für die Entwicklung und Kalibrierung von Grundwassermodellen zur Berechnung von Fließraten im Anhydrit führenden Gipskeuper im Tunnelbereich.

Die Grundwassermodellierung erfolgte mit der Software COMSOL multiphysics[®], welche auf der Methode der Finiten Elemente beruht. Zur stationären 3D-Simulation des Grundwasserflusses wurden die mit dem geologischen Modell erstellten Horizonte in Schichten/Volumen gleicher hydraulischer Durchlässigkeit unterteilt. Hydraulisch aktive Bruchflächen wurden im lokalen Detailmodell als Flächen miteinbezogen. Die 3D-Grundwassermodellierung erlaubt somit, die komplexen geologischen Lagerungsverhältnisse im Belchengebiet für eine Analyse des Grundwasserflusses mit einzubeziehen. Da nur wenige Messungen hydraulischer Potenziale (Porenwasserdrücke oder Grundwasserspiegel) vorlagen, basiert die Definition von Randbedingungen überwiegend auf konzeptionellen Überlegungen (vgl. Kap. 4.1 und 4.2). Die wenigen vorhandenen Messdaten wurden jedoch in den Berechnungen berücksichtigt. Eine Sensitivitätsanalyse für das lokale Grundwassermodell erlaubt eine Quantifizierung der Modellunsicherheiten (vgl. Kap. 6.4). Für die Interpretation der Resultate der hydraulischen Berechnungen wird angenommen, dass hohe Fließraten im Gipskeuper ein hohes Quellpotenzial anzeigen (Butscher et al. 2015).

Die erstellten Grundwassermodelle erlauben die Berechnung von Szenarien mit denen unterschiedlichen Randbedingungen bzw. baulichen Vorgaben berücksichtigt werden. Mit solchen Szenarienberechnungen kann das Verständnis für die sich im Gebirge abspielenden Vorgänge ortsspezifisch bezogen auf den Belchentunnel und prozessbezogen auf die Rolle der Veränderungen des Grundwasserfließregimes beim Gesteinsquellen verbessert werden. Diese Schritte erlauben es, bezüglich Wasserzirkulation wissenschaftlich fundierte Grundlagen für die Planung von Tunnelanierungen im Gipskeuper zur Verfügung zu stellen.

Anhand der Szenarien sollen die hydraulischen Prozesse, die zum Gebirgsquellen im Belchentunnel führen, analysiert werden. Ausserdem soll dadurch der Einfluss von möglichen Massnahmen (Drainage, Absperrbauwerk, u.a.) zur Reduzierung des Grundwasserflusses zu quellfähigen Horizonten im Tunnelbereich untersucht werden. Diese Ergebnisse liefern weiter Grundlagen für gezielte In-Situ Experimente (z. B. Mont

Terri Gipskeuper) mit dem Ziel, die wirksamen Prozesse während des Gesteinsquellens besser zu verstehen. Bei der Wahl wie auch die Umsetzung der Szenarien erfolgte eine enge Zusammenarbeit zwischen der Universität Basel und dem Massachusetts Institute of Technology (Prof. Herbert Einstein).

3 Geologie und Geologische 3D-Modelle

Um Fragestellungen im Zusammenhang mit Quellen von Ton-Sulfat-Gesteinen im Gebiet des Belchentunnels bearbeiten zu können, war es notwendig, in verschiedenen Modellen unterschiedlicher räumlicher Grössenordnung und Detaillierungsgrade zu arbeiten. Dafür wurde ein Modellkonzept entwickelt, das auf einem geologischen Basismodell dem „Regionalmodell“ aufbaut. Es beinhaltet die geologischen Grundstrukturen und bietet somit die Grundlage für Detaillierungen in kleineren Modellbereichen oder für die Definition regionaler Grundwasserleiter und -stauer.

Das Regionalmodell beinhaltet alle wichtigen Horizonte und Störungen, um die geologische Struktur des gesamten Modellgebiets darzustellen. Je nach Bedarf der anderen Modelle werden aus ihm nötige Horizonte und Störungen extrahiert.

Zur Charakterisierung des regionalen Grundwasserfließsystems im Bereich des Arbeitsgebiets wurde ein vereinfachtes hydro-geologisches 3D-Modell erstellt. Es dient als Grundlage für die hydrologische Modellierung in Comsol und berücksichtigt die Geometrie der Aquifer-Aquitard Architektur im Untergrund.

Zur Analyse der Grundwasserverhältnisse im unmittelbaren Tunnelbereich wurde anschliessend das detaillierte Modell „Schuppenzone Süd“ erstellt. Es ist ca. 880m x 200m x 410m gross und beinhaltet alle wichtigen Strukturen und Horizonte im direkten Tunnelbereich.

In der Folge werden die geologischen Verhältnisse allgemein und deren Modellierung in den verschiedenen Modellen beschrieben.

3.1 Geographischer Überblick und Perimeter

Das Modellgebiet erstreckt sich auf ein 4km x 4km Quadrat rund um den Belchentunnel (**Abb. 1**). Es liegt damit im Grenzbereich der Kantone Solothurn und Basel-Landschaft. Die Oberflächentopographie hat mit dem Belchen (1230m ü. M.) die höchste Erhebung und verringert sich nach Norden auf ca. 590m ü. M. (südlich Eptingen) und nach Süden auf ca. 500m ü. M. (nördlich Hägendorf). Durch das Gebiet streichen von WSW nach ONO die Höhenzüge des Allerheiligenberg und des Homberg, sowie des Belchen und des Ifelter Bergs. Der Belchentunnel liegt auf einer mittleren Höhe von etwa 650m ü. M. Damit liegt er maximal 600m unter der Geländeoberfläche.

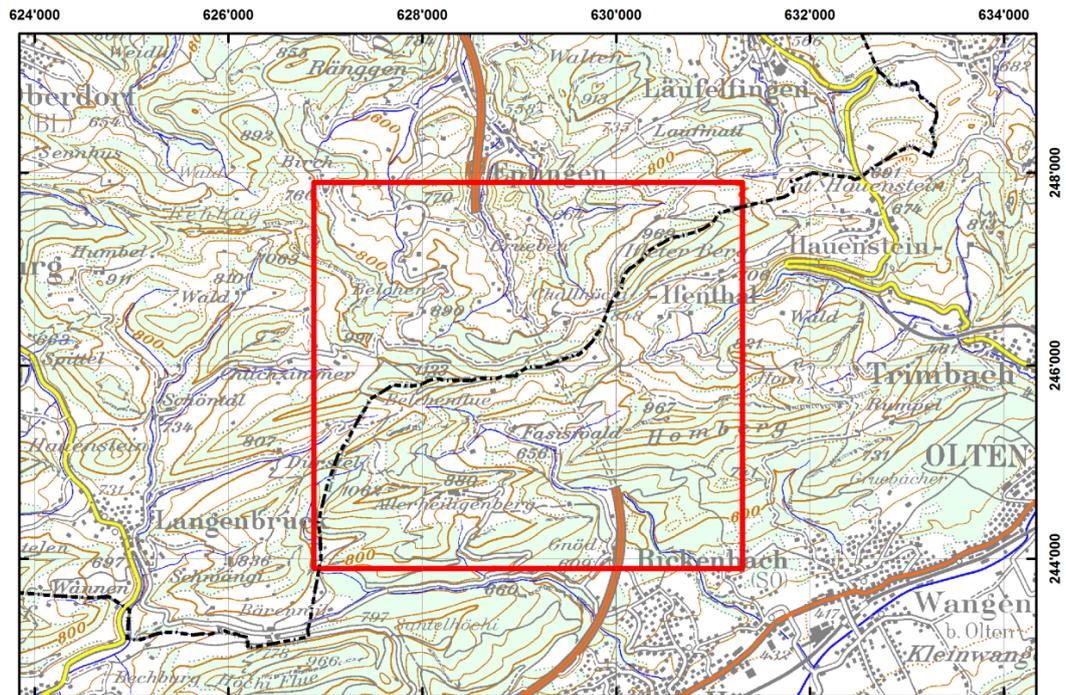


Abb. 1. Geographischer Überblick; Lage des geologischen 3D Modells (rot)

3.2 Geologische Situation

3.2.1 Tektonischer Bau im Belchengebiet

Der Faltenjura ist gekennzeichnet von einer intensiven Bewegung und Deformation der geologischen Einheiten. Grund ist ein auf die Alpenbildung zurückgehende Einengung des Gebiets nördlich der Alpen, wobei die geologischen Einheiten oberhalb eines Abscherhorizontes nach Norden geschoben wurden. Der Abscherhorizont liegt in den rheologisch schwachen Salz und Anhydritlagen des Mittleren Muschelkalkes. Im Faltenjura äussert sich diese Einengung durch die Ausbildung von geologischen Falten, Überschiebungen und Stapelung der geologischen Einheiten.

Die „ursprüngliche“ Lagerungen der geologischen Einheiten wies vor der Bildung des Faltenjuras „initiale“ Heterogenitäten, wie Wechsel in der Ausbildung der Gesteinszusammensetzung oder Mächtigkeitsänderungen (Faziesübergänge; z. B. Wetzel 2000 und 2003) in verschiedenen geologischer Einheiten auf. Zusätzlich prägten „alte“ paläozoische Störungsstrukturen, welche bis in den tieferen Untergrund reichen, das Gebiet (Laubscher und Noack 1997, Noack 1995). Während der gesamten Faltungsphase beeinflussten diese „initialen“ Heterogenitäten lokal die Deformationsprozesse.

Der Belchentunnel liegt in einem Gebiet, in dem mehrere „alte“ paleozoische Störungsstrukturen zusammentreffen und die Interpretation der Deformationsabfolge und damit des detaillierten geologischen Aufbaus erschweren. Im Untersuchungsgebiet streichen von WNW die Landskron-Linie und von ONO die Hauenstein-Linie herein (Laubscher 2008a). Diese überregionalen Lineamente gehen vermutlich auf eine den Sedimentstapel (Mesozoikum) unterlagernde Grabenstruktur (Permo-Karbon Trog, Laubscher und Noack 1997) zurück. Diese bildet sogenannte „Sockelsprünge“ (Verwerfungen im Grundgebirge). Es wird angenommen, dass an ihnen zahlreiche Deformationsstrukturen des Faltenjuras oberhalb des Abscherhorizontes erzeugt wurden (Laubscher und Noack 1997). Zusätzlich wird das Gebiet von NO bis NNO streichenden Querbrüchen durchzogen die im Zusammenhang mit aus dem nördlich gelegenen Tafeljura bekannten Grabenstrukturen stehen. Für die Bildung der Tafeljura-Gräben wird

ein Bezug zur Bildung des Oberrheingrabens hergestellt (Lauscher 1970, 1982, 2008b, Gürler et al. 1987).

Der Faltenjura ist charakterisiert durch Überschiebungen unterschiedlicher Grössenordnungen und meist weitläufigen Faltenstrukturen. Für das Gebiet um Eptingen kennzeichnend ist der Wechsel der Ausrichtung der Überschiebungsfrent des Faltenjuras (nördlichste, dem Faltenjura zugerechnete Überschiebung), welche hier abrupt aus einer ONO-Richtung in eine WNW-Richtung umbiegt. Gleichzeitig tauchen Faltenstrukturen wie Passwang (Antiklinale) und Waldweid-Humpel (Synklinale) im Gebiet zwischen Eptingen und Belchenflue vom Westen kommend ab und lösen sich teilweise auf. Die das Arbeitsgebiet durchziehenden Querbrüche (NO bis NNO Richtung) zerlegen es gemeinsam mit den zahlreichen Überschiebungen in ein komplexes Schollenmosaik. Dies spiegelt sich auch in den Oberflächenformen wieder. Während im Westen die steilen Fluehe der Geisflue und der Lauchflue die Landschaft prägen, verflacht das Gelände abrupt und ist dann über dem Belchentunnel von einem moderaten Taleinschnitt und mehr oder weniger sanften Hügeln geprägt.

Während im Bereich des Nordportals und weiter nördlich die Gesteine intensiv verschuppt sind (Muschelkalk-Schuppenzone), wurden die Gesteine südlich davon vorwiegend von weitreichenden Überschiebungen und Faltenwürfen deformiert (z.B. Chambersberg-Mulde). Im Süden durchschlägt der Belchentunnel die topographisch am deutlichsten hervortretende Faltenstruktur (Weisenstein Falte) des östlichen Juras.

Die Deformation betrifft in erster Linie die mesozoischen Gesteine des Mittleren und Oberen Muschelkalkes (Anhydritgruppe, Trigonodus-Dolomit und Hauptmuschelkalk), des Keupers (Ober Keuper und Gipskeuper) und des Juras (Staffeleleg Fm., Opalinuston Fm., Passwang Fm., Hauptrogenstein Fm., Ifenthal Fm., Wildegg Fm., Villingen Fm., Burghorn Fm.; **Abb. 2**).

3.2.2 Stratigraphie

Gegenüber dem Geologisch-geotechnischen Bericht zum Sanierungstunnel Belchen (Meyer und Nyfeler 2007) haben sich in den letzten Jahren einige stratigraphische Begriffe geändert. Ausserdem wurden im Regionalmodell geologische Einheiten bearbeitet, die nicht in den bestehenden Tunnelröhren aufgeschlossen wurden und damit nicht bei Pfirter et al. (2007) genannt wurden. **Abb. 2** gibt eine Übersicht zur stratigraphischen Abfolge und der Lage der Modellhorizonte. Zur Vollständigkeit und um Missverständnisse zu vermeiden wird auf die stratigraphische Stellung und die teilweise neue Nomenklatur eingegangen (**Abb. 2**, Anhang I).

Eine Beschreibung der lithologischen Ausbildung der stratigraphischen Einheiten im Arbeitsgebiet wird in Anhang I gegeben. Darüber hinaus sind die Verweise auf die angegebene Literatur, insbesondere auf den Geologisch-geotechnischen Bericht zum Sanierungstunnel Belchen (Meyer und Nyfeler 2007), zu beachten.

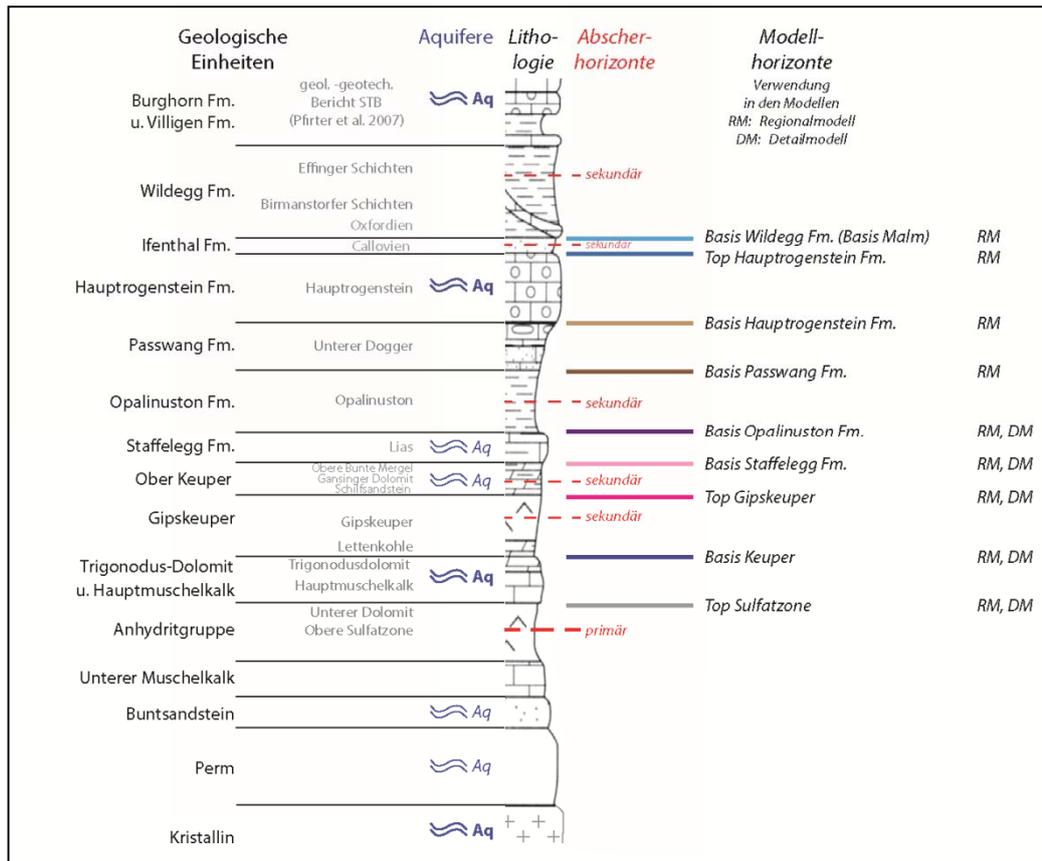


Abb. 2 Stratigraphischen Horizonte (leicht geändert aus TB Nagra 08-04 nach Jordan 2007) wie sie im vorliegenden Bericht verwendet wurden im Vergleich zur stratigraphischen Nomenklatur des Geologisch-geotechnischen Berichts STB (Meyer und Nyfeler 2007), sowie Position der Aquifere, der Abscherhorizonte und die Verwendung in den Modellen

3.3 Geologisches Regionalmodell

3.3.1 Daten und Grundlagen

Das geologische 3D-Modell basiert auf Daten aus der Literatur (Karten und Profile, siehe unten), Bohrungen, eigenen Feldbegehungen, der geologischen Aufnahme aus der Bauzeit und, als wichtigem Baustein, dem bilanzierten geologischen Profil entlang der Tunneltrasse aus dem Vorläuferprojekt (Huggenberger et al. 2012, FGU 2008 004). Durch das Vorliegen eines bilanzierten Profils im Arbeitsgebiet können auch lateral die Untergrundstrukturen in Abhängigkeit von der Oberflächengeologie (geol. Karten), relativ gesichert interpretiert werden. Da in dem Gebiet viele unterschiedliche Karten und Profile vorliegen, die oft widersprüchliche Informationen beinhalten, ist es wichtig, diese Informationsquellen gemäss ihrer Aussage zu gewichten. Neben dem bilanzierten Profil (Huggenberger et al. 2012, FGU 2008 004) wurden die Arbeiten von Prof. H. Laubscher (nicht veröffentlichte geol. Karten und Profile) am stärksten gewichtet.

- **Bohrungen**

Bohrungen im Gebiet wurden zum einen durch den Auftraggeber zur Verfügung gestellt und zum anderen der kantonalen Bohrdatenbank Basel-Landschaft entnommen. **Abb. 3** zeigt die Verteilung der Bohrpunkte.

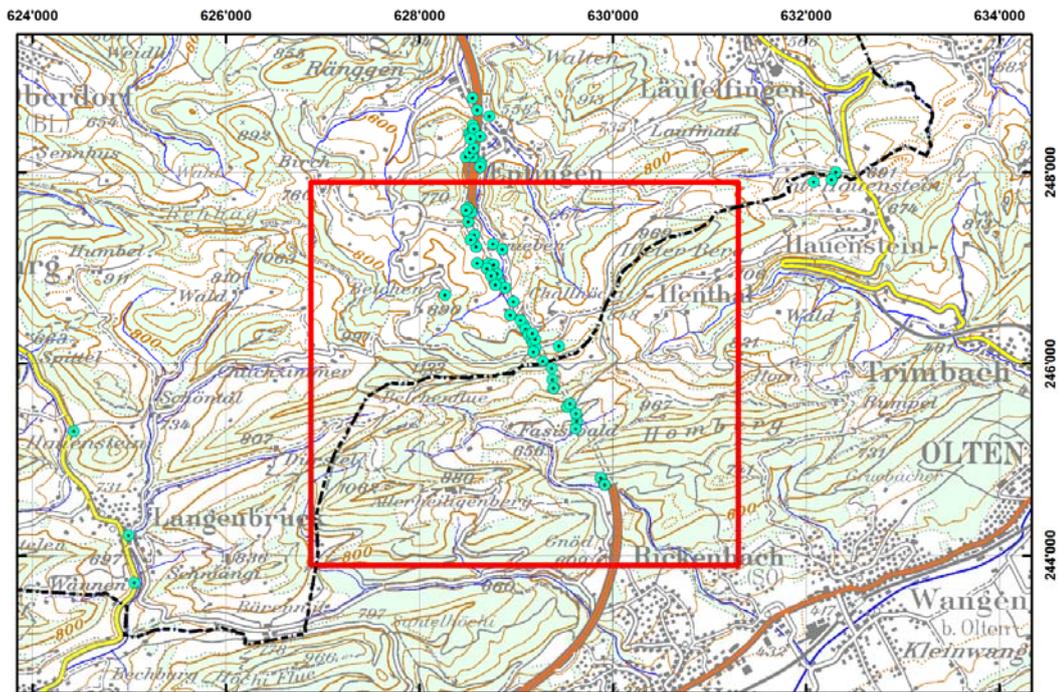


Abb. 3 Verteilung der Bohrungen in der Belchenregion; Modellgebiet (rot)

• Karten

Für das Arbeitsgebiet und die angrenzenden Gebiete lagen folgende geologische Karten in unterschiedlichen Massstäben vor.

- Laubscher, 2008c, (unveröffentlicht)
- Meyer und Nyfeler 2007, (STB-Bericht)
- Böhi, 1993
- Herold, 1992
- Isler, 1984
- Vonderschmitt 1965
- Goldschmidt, 1965
- Bartholet, 1964
- Mühleberg, 1914

• Profile

Die bestehenden geologischen Profile wurden meist im Zusammenhang mit Kartierungen (siehe oben) erstellt. Eine Ausnahme bildet das bilanzierte Profil (FGU 2008 004), welches im Zusammenhang mit dem Vorgängerprojekt erstellt wurde.

Bei bilanzierten 2D Profilen handelt es sich um Profilkonstruktionen, deren Qualität getestet wurde. Während der Konstruktion solcher Profile wird die Situation vor der Gebirgsdeformation mit dem Ist-Zustand verglichen. Hierbei wird eine Materialbilanz aufgestellt (vorher vs. nachher), welche Null ergeben sollte. Andernfalls ist das Profil nicht bilanziert und somit potenziell fehlerhaft.

Folgende Profile wurden für die Erstellung des 3D Modells herangezogen:

- Laubscher, 2008c, (unveröffentlicht): Walten West, Walten Ost, Ankenbollen
- Huggenberger et al. 2012, Bilanziertes Profil Belchen (FGU 2008 004)
- Meyer und Nyfeler 2007, Geologisches Profil entlang der Achse STB
- Schmassmann, 1964 geol. Aufnahme der Tunnelröhren, BGA Eptingen 46 und 65
- Herold, 1992

- **Schichtlagerung**

Auf vielen geologischen Karten ist die Lagerung der Gesteine im Untergrund durch Fallzeichen angegeben. Diese Fallzeichen wurden herausgelesen und kompiliert. Zusätzlich wurden in Gebieten mit Datenlücken bei Feldbegehungen eigene Messungen durchgeführt. Neben den oberflächlichen Lagerungsdaten lagen zahlreiche Messungen aus Bohrungen und entlang der ursprünglichen Tunnelröhren aus der Bauzeit vor (**Abb. 4**).

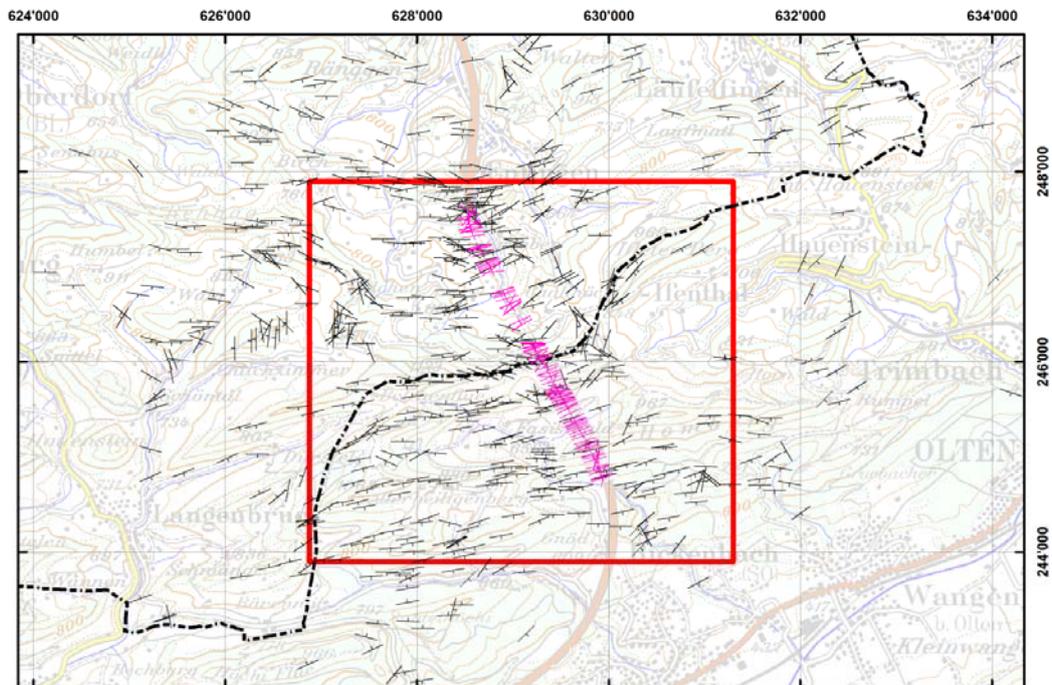


Abb. 4 Verteilung der Lagerungsdaten in der Belchenregion; oberflächlich (schwarz) und entlang des Tunnels (pink); Modellgebiet (rot).

- **Sonstiges**

Folgende sonstige Datensätze wurden verwendet:

- Höhenmodell: DHM25
- Geol. Aufnahme des Versuchsdrainagestollen, (BGA Eptingen 121)
- Geol. Aufnahme in den Lüftungsschächten (BGA/BL1: Eptingen 88)
- Vertikalprofil und Text Luftschaft (Kamin 1), (BGA Eptingen 73)
- Vertikalprofil, Text und Fotodokumentation Luftschaft (Kamin 2) (BGA Eptingen 88)
- Stratigraphische Tunnelprofile – Keuper, (BGA Eptingen 84)

3.3.2 Modellerstellung

Die 3D geologische Modellierung wurde mittels der Software GOCAD[®] (Geological Objects Computer Aided Design) durchgeführt. GOCAD bietet vielfältige Möglichkeiten zur Verarbeitung und Darstellung von geometrischen Daten (Punkte, Linien, Flächen, Volumen). Neben geologischen Formen können auch jegliche abstrakte Flächen und Körper wie Gebäude, Tunnel, Grundwasserhorizonte, etc. modelliert werden.

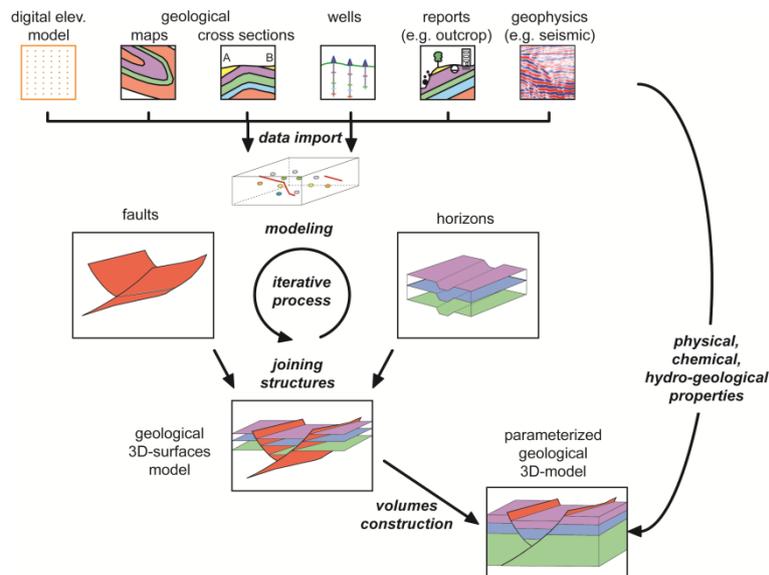


Abb. 5 Schema des iterativen Prozess zur 3D Modellerstellung.

Der Modellierungsvorgang ist ein iterativer Prozess, in dem die Eingangsdaten zusammengeführt und miteinander abgeglichen werden. Schritt für Schritt werden die Daten räumlich zueinander in Bezug gesetzt (**Abb. 5**). Auf diese Weise können widersprüchliche Eingangsdaten identifiziert werden. Um solche Widersprüche aufzulösen, muss der Bearbeiter die geologische Situation im Einklang mit den Einzeldaten beurteilen. Hierfür ist eine Gewichtung der Datenqualität wichtig. Generell wird in „harte“ (z. B. Bohraufnahmen) und „weiche“ (z. B. Profilinterpretationen) Daten unterschieden. Eine Zwischenposition nehmen Datensätze ein, die auf Interpretationen beruhen, deren Qualität überprüft wurde wie beispielsweise bilanzierte Profile (siehe oben).

Während der Bearbeitung werden die Störungsstrukturen mit den Modellhorizonten in Einklang gebracht. Das Ergebnis ist ein konsistentes geologisches 3D Modell, welches je nach zu bearbeitender Fragestellung weiterentwickelt werden kann.

3.3.3 Beschreibung Regionalmodell und Strukturanalyse

Als Voraussetzung für eine Beschreibung der räumlichen Anordnung von Aquifer- und Aquitardkörper und möglichen Wasserwegsamkeiten wurde eine detaillierte Strukturanalyse im regionalen geologischen 3D Modell durchgeführt. Die detaillierte Beschreibung in Anhang II gibt die Lagerungsverhältnisse der Modellhorizonte und die Ausrichtung der Verwerfungen wieder. Hier wird kurz auf die wichtigsten Lagerungs- und Strukturmerkmale und deren Berücksichtigung in der hydraulischen Modellierung eingegangen.

Das regionale geologische 3D Modell oder auch Basismodell hat den Belchentunnel im Zentrum und umfasst das gesamte Arbeitsgebiet (4km x 4km). Die 9 Modellhorizonte wurden so gewählt, dass die geologische Struktur und die allgemeinen Lagerungsverhältnisse des gesamten Modellgebiets wiedergegeben werden können (**Abb. 2** und **Abb. 6**). Zusätzlich kann insbesondere die Raumlage von Aquiferen charakterisiert werden. Drei Horizonte (Basis Hauptrogenstein Fm., Basis Staffelegg Fm. und Basis Keuper) wurden modellweit modelliert, während die übrigen Modellhorizonte je nach Datenlage nur gebietsweise modelliert wurden. Insbesondere in Tunnelnähe besteht eine sehr gute Abdeckung durch die Horizontmodellierung (**Abb. 6**).

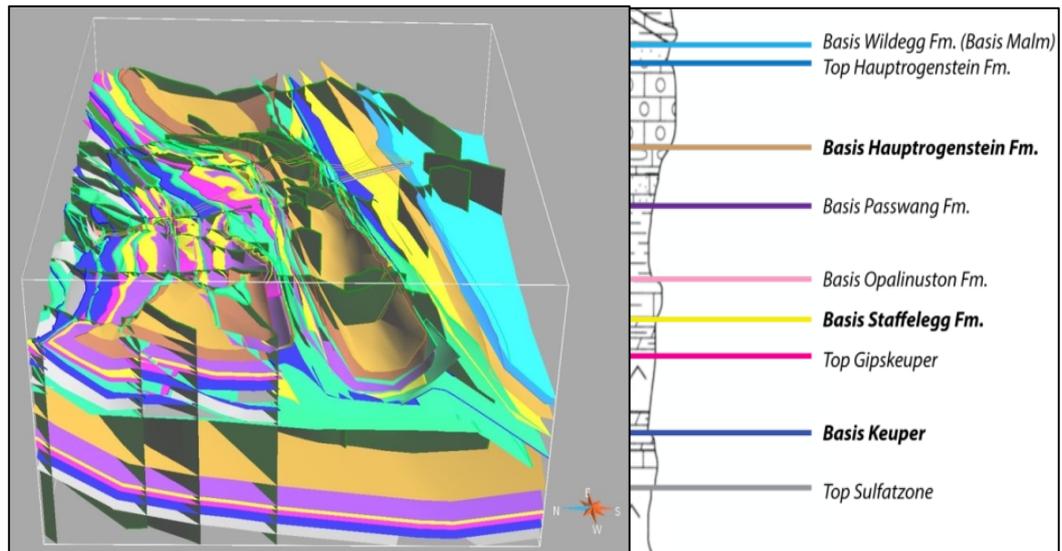


Abb. 6 Übersicht zur Verteilung der Modellhorizonten im geologischen Regionalmodell.

Die generelle Schichtlagerung lässt sich an einem 2D Schnitt entlang des Tunnels gut charakterisieren (**Abb. 7**). Im Norden kommt es zu einer intensiven kleinräumigen Verschuppung, während nach Süden hin die Strukturen offener und weitreichender werden. Generell fallen die Schichten nach SSO ein. Durch Faltungen gibt es aber auch Bereiche, die gegen NNW einfallen. Falten sind vor allem im zentralen Bereich des Profils erhalten. In den stratigraphisch älteren (tieferen) Einheiten sind Falten durch die intensive Verschuppung nicht mehr oder nur noch Abschnittsweise erhalten. Hingegen lassen sich insbesondere in den jüngeren Einheiten, wie dem Hauptrogenstein, Faltungen noch sehr gut erkennen.

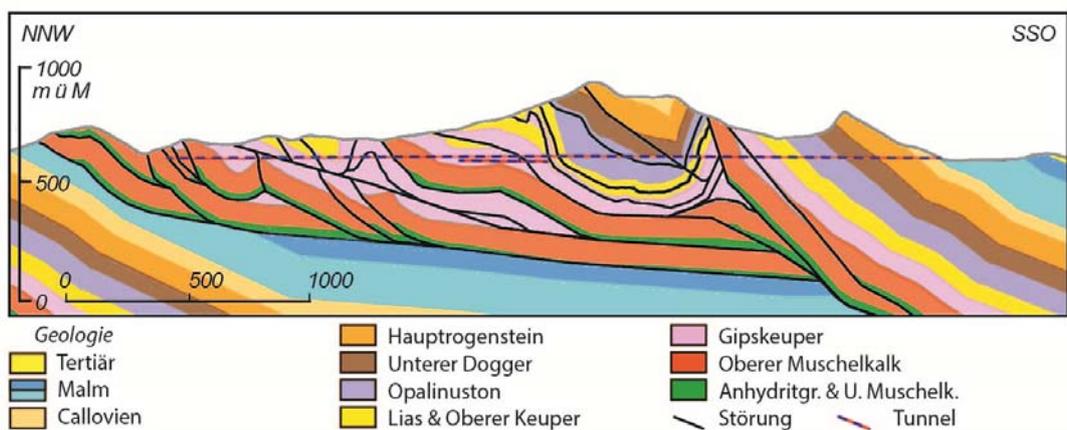


Abb. 7 Schnitt entlang der Tunneltrasse durch das geologische 3D Modell.

Das Vorgehen bei der Modellierung von Verwerfungen berücksichtigt vor allem diejenigen Störungen, welche aufgrund von deutlichen Versätzen der stratigraphischen Schichten oder aus kinematischen Gründen eine signifikante Bedeutung für das Modellgebiet haben. Generell kann man die Verwerfungen im Arbeitsgebiet in 2 Gruppen einteilen, in Querstörungen und Überschiebungen.

Querstörungen (auch Transformstörungen oder Blattverschiebungen) gelten als „Leitschienen“ für die Deformationsprozesse während der Bildung des Faltenjuras (Laubscher 2008b). Sie verlaufen im Arbeitsgebiet im Allgemeinen in NNO-Richtung (Anhang II). Da die generelle „Schubrichtung“ oder „Verkürzungsrichtung“ während der Gebirgsbildung als NNW-NW angenommen wird, kommt es je nach Lokalität und

Stadium der Deformation zu mehr oder weniger starken Interferenzen zwischen der überregionalen Verkürzungsrichtung und lokalen Heterogenitäten wie den Querbrüchen, was sich in den heute vorliegenden Deformationsstrukturen widerspiegelt (**Abb. 8**).

Entlang der meist NNO-streichenden Querbrüche kommt es im zentralen und nördlichen Modellgebiet zunehmend zu Entkopplungen der Deformationsstrukturen, d. h. Falten und Überschiebung lassen sich durch Querbrüche hindurch nicht zwingend weiterverfolgen. Die Deformation (Verkürzung) wird durch neue Strukturen kompensiert.

Wie schon in Kapitel 3.2.1 „Tektonischer Bau im Belchengebiet“ beschrieben, kommt es in der Belchen-Region zu einem Umbiegen der Streichrichtung der nördlichen Überschiebungsfrent des Faltenjuras von ONO nach WNW. Dieses Umbiegen findet sich auch für weitere Überschiebungen und verliert sich sukzessive nach Süden, wo die ONO Streichrichtung vorherrscht. Der Belchentunnel verläuft in etwa entlang der Achse dieser Umbiegung (**Abb. 8**). Trotz der Trendänderung im Nordwesten dominiert eine generelle Einfallsrichtung nach SSO für die Überschiebungen und die stratigraphischen Horizonte (siehe auch Anhang II).

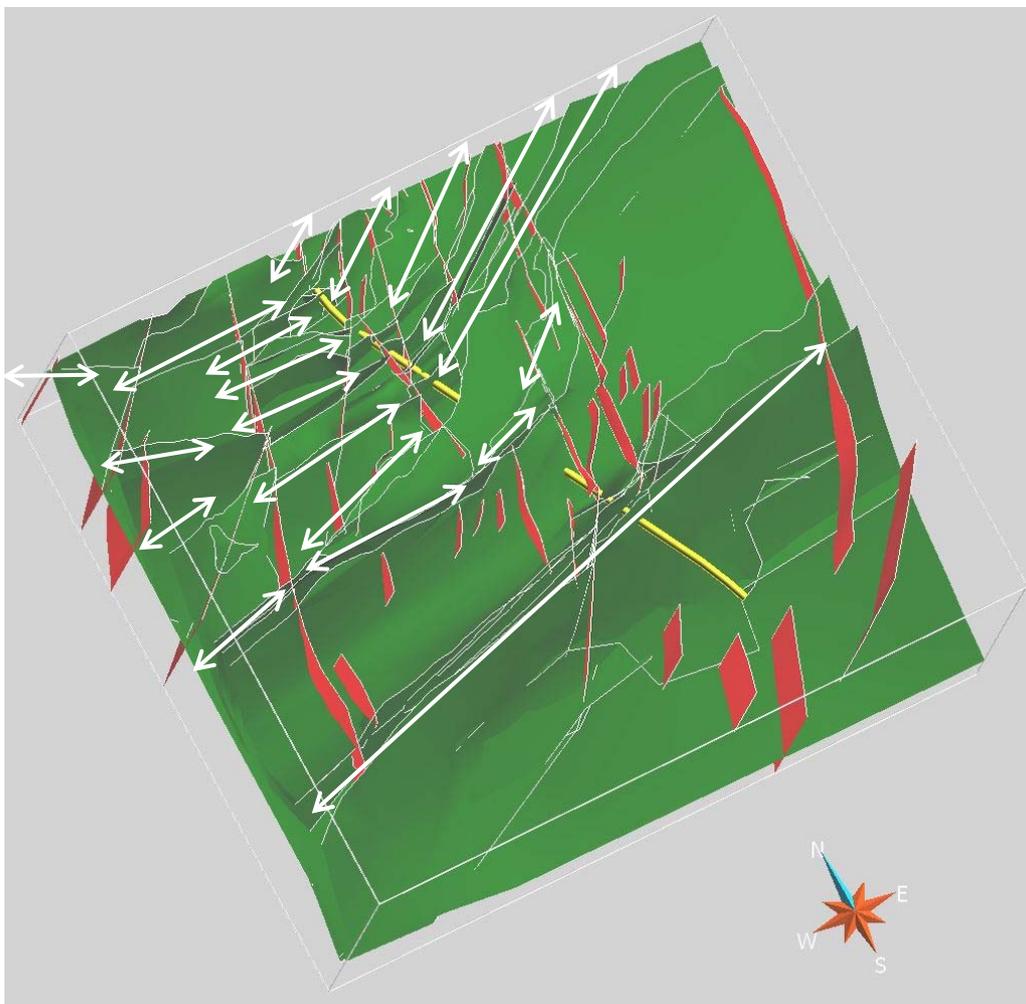


Abb. 8 3D Ansicht des Regionalmodells – Umbiegen der Überschiebungsfrenten (Doppelpfeile), Überschiebungen (grün), Querstörungen (rot), Belchentunnel (gelb, schematisch)

Einzelne Überschiebungspakete und Falten sind im Süden durch das gesamte Modellgebiet in Ost-West Richtung gut zu verfolgen (**Abb. 6**). Die Falten streichen von Westen kommend in das Modellgebiet hinein, in dem die Einengung der Falten von West nach Ost stark zu nimmt, um dann abrupt, zugunsten von teils weitreichenden Überschiebungen, abgelöst zu werden (Entkopplung der Deformationsstrukturen).

Aquifer – Aquitard Geometrie

Um die Grundwasserfließsysteme im Belchengebiet untersuchen zu können, ist es notwendig die geometrische Anordnung der Aquifere im deformierten Untergrund zu kennen. In dem teils stark gesicherten, gestapelten und gefaltetem Arbeitsgebiet ergeben sich Konstellationen, durch die Aquifere durchtrennt werden oder mit anderen in Kontakt kommen, welche bei normaler Lagerung durch Aquitarde getrennt wären.

Schwer zu charakterisieren sind in der Natur die hydraulischen Eigenschaften von Störungen. Die schematische Darstellung in **Abb. 9** zeigt mögliche strukturelle Konstellationen, welche zur hydraulischen Trennung oder Verbindung durch Verwerfungen führen können. Wasseraustritte (oberflächlich und in Untertagebauten) sind oft an Bruchstrukturen gekoppelt, jedoch können die Bruchstrukturen auch zur Unterbrechung eines Aquifers führen und somit als Stauer oder Barriere fungieren.

Für die hydraulische Charakterisierung einer Bruchstruktur fehlen generell notwendige Beobachtungsmöglichkeiten entlang einer Störung. Eine Beurteilung kann sich also nur auf die Beobachtung eines Wasseraustritts oder den Befund aus einer Bohrung stützen. In einem stark deformierten Umfeld, wie im Belchengebiet, in dem verschiedenen Bruchstrukturen sich gegenseitig kreuzen, wird eine hydraulische Charakterisierung einzelner Strukturen zusätzlich stark erschwert und ist mit grossen Unsicherheiten behaftet oder sie wird gar verunmöglicht.

Aufgrund der grossen Unsicherheiten bezüglich einer hydraulischen Charakterisierung der Bruchstrukturen, wurde für die hydraulische Modellierung im regionalen Modell den Bruchstrukturen keine hydraulischen Eigenschaften zugewiesen (siehe auch Kap. 4.1). Dadurch können verschiedene Aquiferkörper (mit gleichen Eigenschaften) und Aquitardkörpern über Bruchstrukturen hinweg zusammengefasst werden. (**Abb. 9** c u. d)

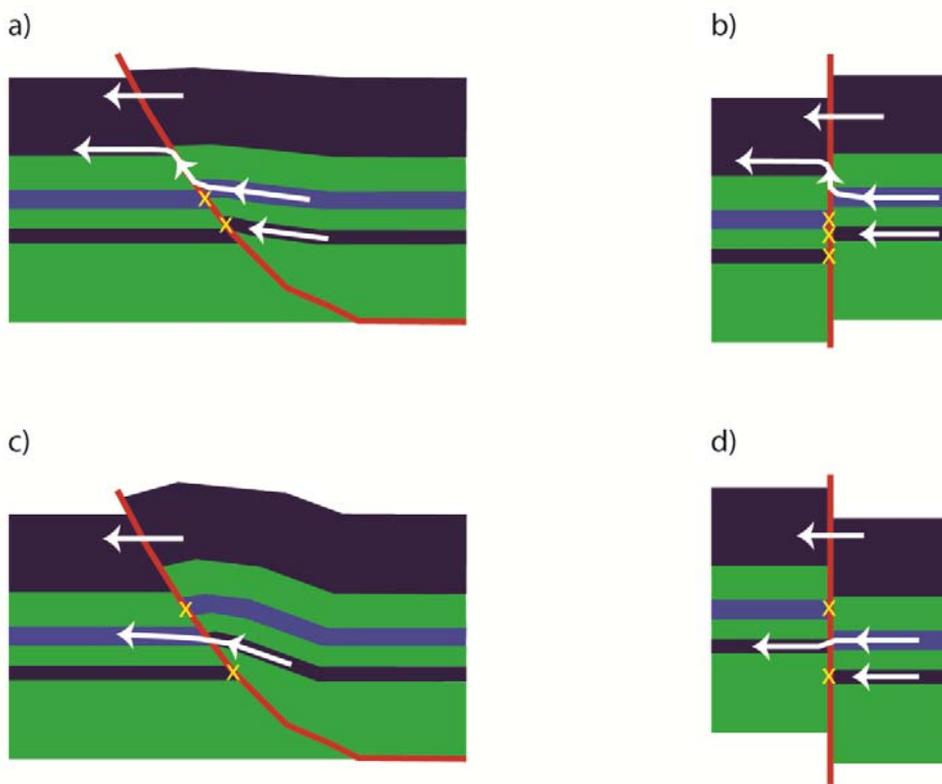


Abb. 9 Schematische Darstellung möglicher struktureller Konstellationen, welche zur hydraulischen Trennung oder Verbindung durch Verwerfungen führen können; hydraulische Verbindung bzw. Trennung von Aquiferhorizonten durch eine Über-

schiebung (a und c) oder einen Querbruch (b und d); mögliche hydraulische Verbindungen (weise Pfeile), mögliche Trennung von kontinuierlichen Aquiferhorizonten (gebe Kreuze), Stauerhorizonte (grün), Aquifere (blau)

3.4 Geologisches Detailmodell „Schuppenzone Süd“

Zur Beurteilung der Grundwasserfliesssysteme im unmittelbaren Tunnelbereich wurden hydraulische Grundwassermodelle gerechnet. Als geologische Grundlage für diese Grundwassermodelle diente das Modell „Schuppenzone Süd“ (**Abb. 12**). Als „Ausschnitt“ aus dem regionalen geologischen 3D Modell ist es ca. 880m x 200m x 410m gross und beinhaltet den Teil des Belchentunnels, welcher auch von dem Drainagestollen unterlagert wird. Es befindet sich im Bereich der Tunnelkilometrierung 793m bis 1674m bezogen auf die Weströhre (**Abb. 10**).

Koordinaten (LV03)

SW-Ecke: 629330 / 246037

NO-Ecke: 628747 / 246909

Top: 930m ü. M.,

Basis: 520m ü. M.

Die Horizonte besitzen eine höhere Auflösung und somit eine höhere Detailgenauigkeit als im Regionalmodell. Zusätzlich wurden weitere Untertagebauten integriert. Es verfügt über alle 3 Tunnelröhren, Verbindungstunnel, Luftschächte und Drainagetunnel.

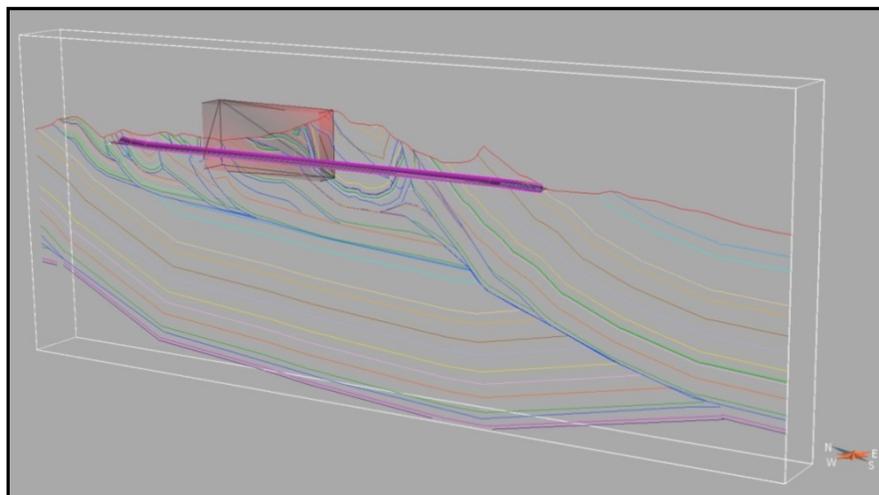


Abb. 10 Lage des Detailmodells im geologischen 2D Profil entlang des Belchentunnels (Huggenberger et al. 2012), zwischen 800m und 1660m bezogen auf Kilometrierung der Weströhre

Im Detailmodell wurden 6 Horizonte modelliert (**Abb. 11**). Neben dem Oberen Muschelkalk (Trigonodusdolomit u. Hauptmuschelkalk) als regionalem Aquifer kommen auch die Staffelegg Fm. und der Oberkeuper, Aquifere mit eher lokaler Bedeutung, im Detailmodell zu liegen.

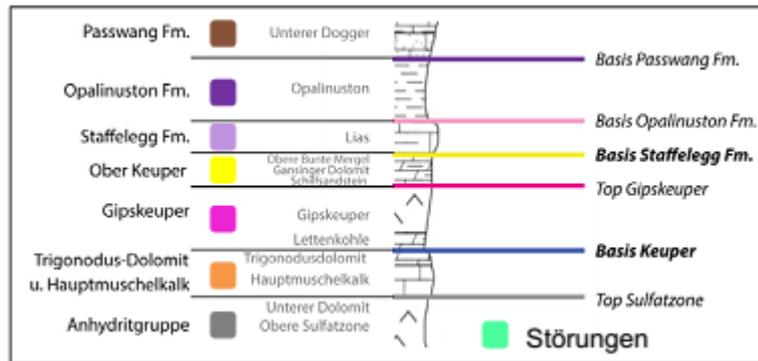


Abb. 11 Modellhorizonte des Detailmodells

Lagerungsverhältnisse im Detailmodell „Schuppenzone Süd“

Das Detailmodell befindet sich im Übergangsbereich zwischen der Muschelkalk-Schuppenzone und der raumgreifenden Chambersberg-Mulde (auch Hauenstein-Synklinale). Der nördliche Muldenschapel bildet das südliche Ende des Detailmodells, hier ist die Schichtlagerung des Ober Keupers, der Staffelegg Fm. (Lias) und des Opalinustones, sowie das Einfallen der Störungen sehr steil (Einfallswinkel 75°-85°) nach Süden geneigt. Im mittleren Modellbereich sorgt eine Überschiebung für eine Verdoppelung des Gipskeupers und Teilen des Ober Keupers, und es kommt zu flacheren Lagerungsverhältnissen. Der Tunnel liegt hier zu grossen Teilen im Gipskeuper. Der Gipskeuper wird von Muschelkalk unterlagert, der im nördlichen Modellbereich, begrenzt von einer weiteren Überschiebung, die Tunnelröhren schneidet. Den nördlichen Modellrand bildet dann wieder eine Gipskeuperschuppe.

Querstörungen, die einen signifikanten Versatz zeigen, kommen im Bereich des Detailmodells nicht vor. Allerdings befinden sich im Regionalmodell direkt nördlich und südlich des Detailmodells „Schuppenzone Süd“ Querstörungen, welche NNO verlaufen.

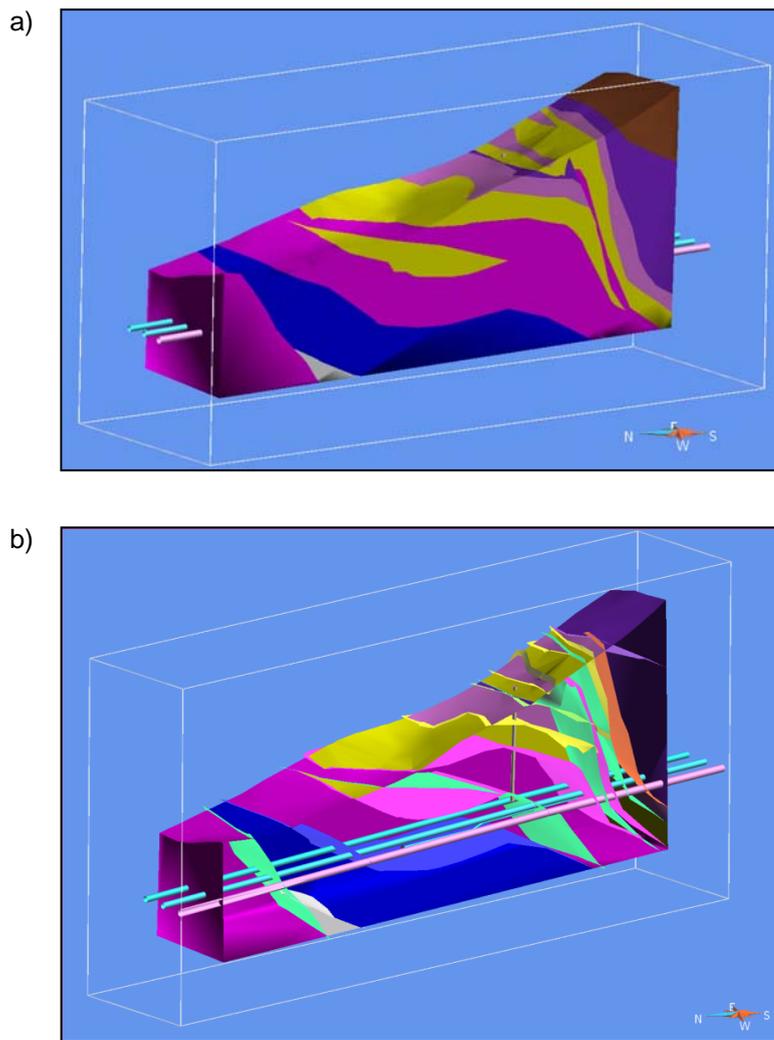


Abb. 12 Perspektivische Ansicht des geologischen Detailmodells; Blockmodell (a), mit Anschnitt (b); für Legende siehe **Abb. 11**, Modelldimensionen: ca. 880m x 200m x 410m

4 Grundwassermodelle

Die geologische 3D Modellierung liefert detaillierte Grundlagendaten für die hydraulische Modellierung, mit welcher verschiedene Ziele erreicht werden sollen:

- (1) Die Prozesse, welche zum Gesteinsquellen führen, in verschiedenen Massstäben zu analysieren.
- (2) Die Veränderung des Grundwasserfließregimes bedingt durch Tunnelbau, Sanierungsmassnahmen, sowie den Bau der dritten Röhre zu rekonstruieren.
- (3) Die Auswirkungen von Massnahmen zur Reduzierung von Grundwasserfluss zu quellfähigen Horizonten zu untersuchen.

Durch Tunnelkonstruktionen wird im Allgemeinen das Grundwasserfließregime sowohl im lokalen als auch im regionalen Kontext beeinflusst. Entscheidend im Hinblick auf Gesteinsquellen ist ob neue Grundwasserwegsamkeiten geschaffen werden und Wasser zu quellfähigen Gesteinsschichten gelangen kann. Dabei spielt die Menge an Wasser eine untergeordnete Rolle, da schon geringe kontinuierliche Wasserzutritte ausreichen können, den Quellvorgang zu initiieren. Um oben genannten Punkt (1) beantworten zu können ist daher die detaillierte Kenntnis der Geologie genauso wichtig wie Informationen über Veränderungen beim Grundwasser. Um sowohl den regionalen Bezug als auch detaillierte Auswirkungen auf einzelne Tunnelabschnitte berechnen zu können, wurde ein regionales und ein lokales Grundwassermodell erstellt (vgl. Kapitel 3.3 und 3.4). Die hydraulische Durchlässigkeit der Auflockerungszone (EDZ) um den Tunnel kann bautechnisch bedingt um mehrere Grössenordnungen höher sein (Tsang et al., 2005). Für die Beantwortung von Punkt (2) wurde eine solche Zone in dem lokalen Grundwassermodell um den Tunnel eingefügt. Anschliessend war es möglich mittels der Szenarientechnik verschiedene bautechnische Möglichkeiten, welche den Grundwasserfluss zu quellfähigen Horizonten reduzieren sollen, zu berechnen und zu analysieren (Punkt (3)).

In Kapitel 4.1 (regionale Grundwassermodellierung) und Kapitel 4.2 (lokale Grundwassermodellierung) werden der Aufbau und die Besonderheiten der beiden Modelle beschrieben. Für die hydraulischen Modelle müssen Randbedingungen festgelegt werden, welche als „Motor“ für den Grundwasserfluss angesehen werden können. Für die Festlegung dieser Randbedingungen wird normalerweise auf gemessene „harte“ Daten zurückgegriffen. Aufgrund der sehr geringen Datenlage bezüglich hydraulischer Messdaten (Piezometrie, Schüttungsmessungen im Tunnel, Niederschlagsdaten etc.) musste anhand konzeptioneller Überlegungen ein in sich konsistentes Modell erstellt werden. Die Vorgehensweise hierzu ist ebenfalls in den Kapiteln für das regionale, bzw. lokale Grundwassermodell beschrieben. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Konstruktion des Tunnelsystems inklusive des Drainagetunnels, der Luftschächte, sowie der Verbindungsstollen gelegt (Kapitel 4.2.2, Integration des Tunnelbauwerks). Dies soll vor allem die Aussagekraft im kleinskaligen Bereich um den Tunnel herum erhöhen. Detaillierte Abklärungen zu den Auswirkungen von baulichen Massnahmen (Kapitel 5, Bautechnische Aspekte) und verschiedenen Annahmen bezüglich der Auflockerungszone sind mit Hilfe der Szenarientechnik berechnet worden (Kapitel 6, Szenarienberechnungen). Inwieweit einzelne Parameter Einfluss auf die Modellergebnisse haben, konnte mittels Sensitivitätsanalyse ermittelt werden (Kapitel 6.4, Sensitivitätsanalyse). Die Hydraulische Modellierung zeigt, dass es auch mit nur wenigen gemessenen hydraulischen Grundlagendaten möglich ist, konsistente und realistische Ergebnisse zu erhalten, welche für die Planung und den Bau eines Tunnels durch potentiell quellfähige Gesteinsschichten wichtige Entscheidungsgrundlagen bieten. Dennoch würden weitere gemessene hydraulische Grundlagendaten die Aussagekraft des Modells deutlich steigern, und bestehende Ergebnisse könnten verifiziert werden. Im Verhältnis zu den Gesamtkosten beim Bau eines Tunnels sind die anfallenden Kosten für ein umfangreiches Messdispositiv gering, der Nutzen daraus jedoch sehr hoch.

4.1 Regionale Grundwassermodellierung

Das regionale Grundwassermodell basiert auf dem regionalen geologischen 3D Modell (vgl. Kapitel 3.3). Ziel war es die detaillierten geologischen Informationen in einem Gebiet von 16km^2 und einer Tiefe von ca. 2km wie sie mit der geologischen Modellierung erarbeitet wurden möglichst umfassend in ein hydraulisches Modell zu überführen. Aufgebaut wurde das hydraulische Modell mit der Software Comsol 5.1. Um das Modell in Hinblick auf die Mesh-Generierung bzw. CPU-Rechenleistung des Computers nicht zu „überfrachten“ wurden einige Vereinfachungen vorgenommen. Da bei der hydraulischen Modellierung im regionalen Modell den Bruchstrukturen keine hydraulischen Eigenschaften zugewiesen werden sollten, mussten sie nicht als trennende Elemente übertragen werden. Dadurch konnte auf die Integration insbesondere vertikaler Bruchstrukturen verzichtet werden. Dies ermöglichte die Zusammenfassung verschiedener Aquiferkörper (mit gleichen Eigenschaften) und Aquitardkörpern über Bruchstrukturen hinweg. Durch die Ausglättung der einzelnen Horizonttopologien bzw. von Bruchstrukturen mit geringem Versatz konnten weitere Vereinfachungen der geometrischen Auflösung erreicht werden.

Die verschiedenen geologischen Einheiten konnten in folgende drei Hauptgruppen eingeteilt bzw. zusammengefasst werden (**Abb. 11**).

- 1) Hohe hydraulische Durchlässigkeiten bzw. regionaler Aquifer (k_f -Wert: $1\text{e-}6$ m/s)
 - Effinger Schichten bis Hauptrogenstein (incl.), Trigonodusdolomit und Hauptmuschelkalk
- 2) Mittlere hydraulische Durchlässigkeiten bzw. lokaler Aquifer (k_f -Wert: $5\text{e-}8$ m/s)
 - Staffelegg Fm. bis Schilfsandstein (incl.)
- 3) Geringe hydraulische Durchlässigkeiten, Aquitard (k_f -Wert: $1\text{e-}11$ m/s)
 - Passwang Fm. und Opalinuston Fm., Gipskeuper und Lettenkohle, Anhydritgruppe

Für ein Grundwassermodell in dieser Grössenordnung ist damit ein sehr hoher Detaillierungsgrad verwirklicht worden. Insgesamt besteht das Modell aus 37 einzelnen Volumina, welchen differenziert hydrogeologische Eigenschaften zugewiesen werden können (**Abb. 13**).

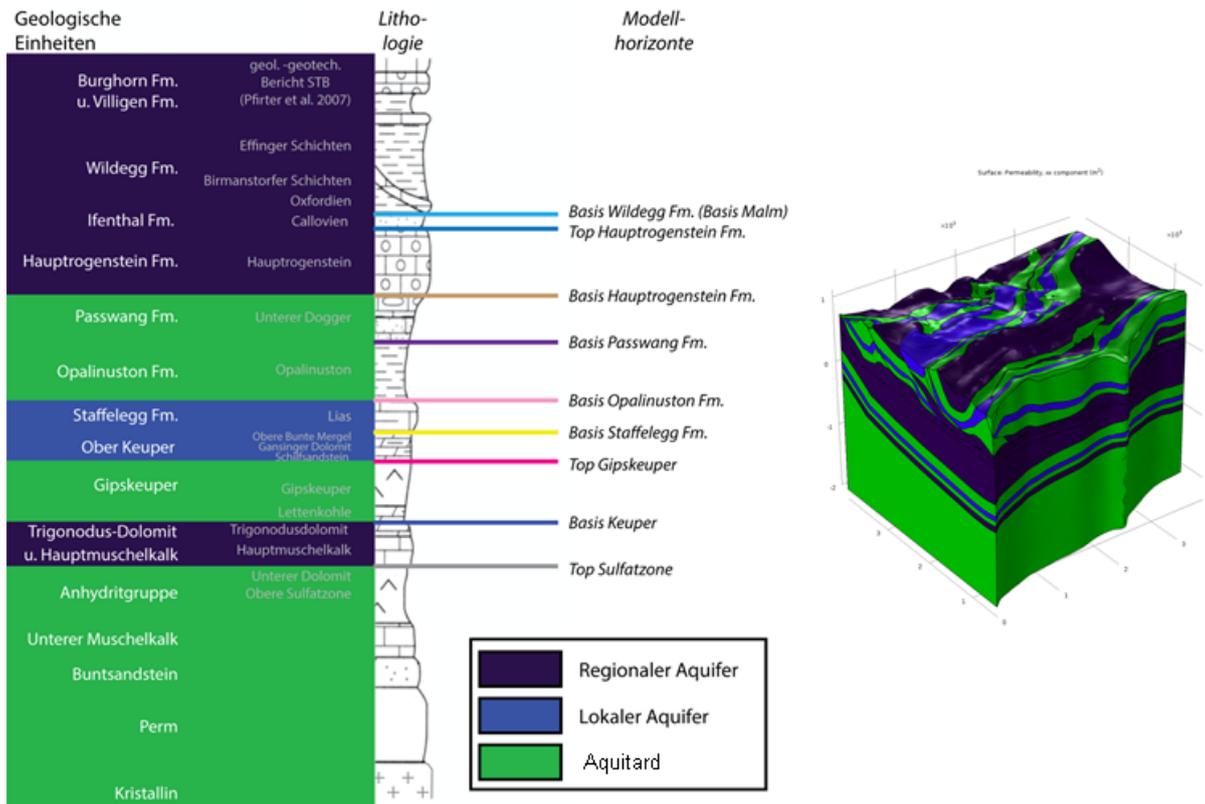


Abb. 13 Zusammenfassung stratigraphischer Einheiten aufgrund ihrer hydraulischen Eigenschaften und die Umsetzung im regionalen hydraulischen Modell (rechte Abbildung).

Eine Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften der jeweiligen geologischen Formationen ist in Anhang I zu finden. Die geologischen Formationen unterhalb des basalen Abscherhorizontes innerhalb der Anhydritgruppe (siehe auch Kap. 3.2) sind von dem deformierten Bereich des Faltenjuras hydraulisch nahezu getrennt. Aus diesem Grund haben die tiefer liegenden Formationen „Unterer Muschelkalk“, „Buntsandstein“, „Perm“ und das kristalline Grundgebirge im Hinblick auf die Grundwasserzirkulation keine Bedeutung für die Skala der betrachteten Fragestellung. Obwohl einige dieser Formationen als lokale oder regionale Aquifere wirken können, sind dennoch aus oben genanntem Grund diese Bereiche für das regionale Grundwassermodell mit stauender Eigenschaft (Aquitard) integriert (**Abb. 13**).

Für die Planung und Konstruktion eines Tunnels sind eine möglichst detaillierte Abschätzung von Grundwasserzuflüssen zum Tunnel, sowie mögliche Veränderungen des Grundwasserfließregimes im regionalen Kontext wichtig. Bisherige analytische Verfahren basieren auf Vereinfachungen wie homogene und isotrope Aquifereigenschaften und horizontaler Tunnel, und sind ausserdem auf 2D Profile beschränkt (Zhang et al., 2007). Obwohl analytische Lösungen für viele Fragestellungen wichtig sind, reichen diese für diverse Probleme aufgrund ihrer limitierenden Faktoren nicht aus. Zudem gibt es in vielen Regionen nur wenig oder keine grundlegenden hydraulischen Informationen. Dieser Mangel an gemessenen hydraulischen Daten ist auch für numerische Modellierungen problematisch, allerdings ist es dennoch möglich mit einer Kombination aus konzeptionellen Überlegungen und numerischer 3D Modellierung eine realistische Abschätzung der Grundwasserzirkulation zu erhalten. Voraussetzung dafür ist die Berücksichtigung der geologischen Strukturen im hydraulischen 3D Modell.

Die Abfolge und Lage der Stauer, bzw. Aquifergeometrien steuert im grossskaligen Bereich insgesamt die von der Gravitation getriebene Grundwasserzirkulation. Die grossräumige Potentialverteilung ist dabei direkt abhängig von der Topographie (Toth,

2009) (vgl. **Abb. 14**). Aus diesem Grund wurde als „Motor“ der Grundwasserzirkulation ein Festpotential entsprechend der Topographie definiert, welches einem Grundwasserflurabstand von 30m entspricht (vgl. **Abb. 15**). Alle anderen Ränder des regionalen Grundwassermodells sind als undurchlässig (no-flow) Randbedingung definiert. Von Süden war aufgrund der angenommenen Grundwasserzirkulation und der nach Norden einfallenden Schichten ebenfalls mit einem Grundwasserzustrom zu rechnen. Da die Unsicherheit diesbezüglich jedoch sehr hoch war, wurde das Grundwassermodell entlang des südlichen Höhenrückens abgeschnitten (**Abb. 15**). Dadurch war es möglich, auch diesen Rand als undurchlässig (no-flow) Randbedingung festzulegen.

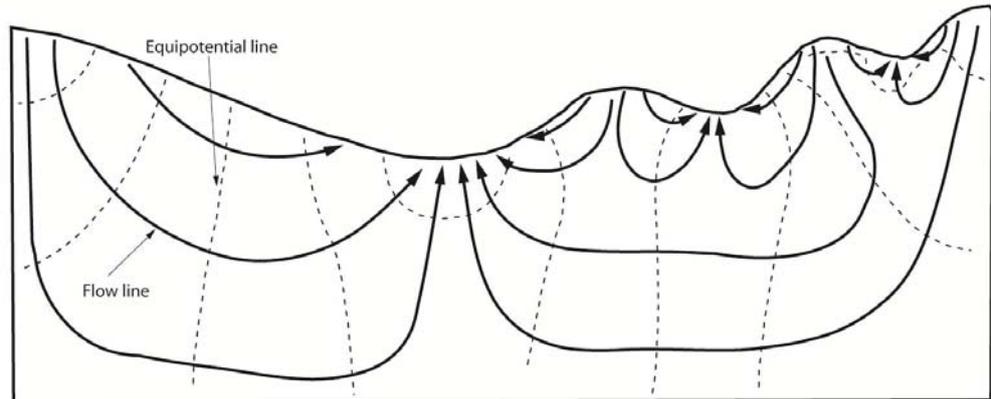


Abb. 14 Konzeptionelle Illustration einer Potentialverteilung bzw. Grundwasserfließsystems in regionaler Skala (verändert nach Tóth, 1999).

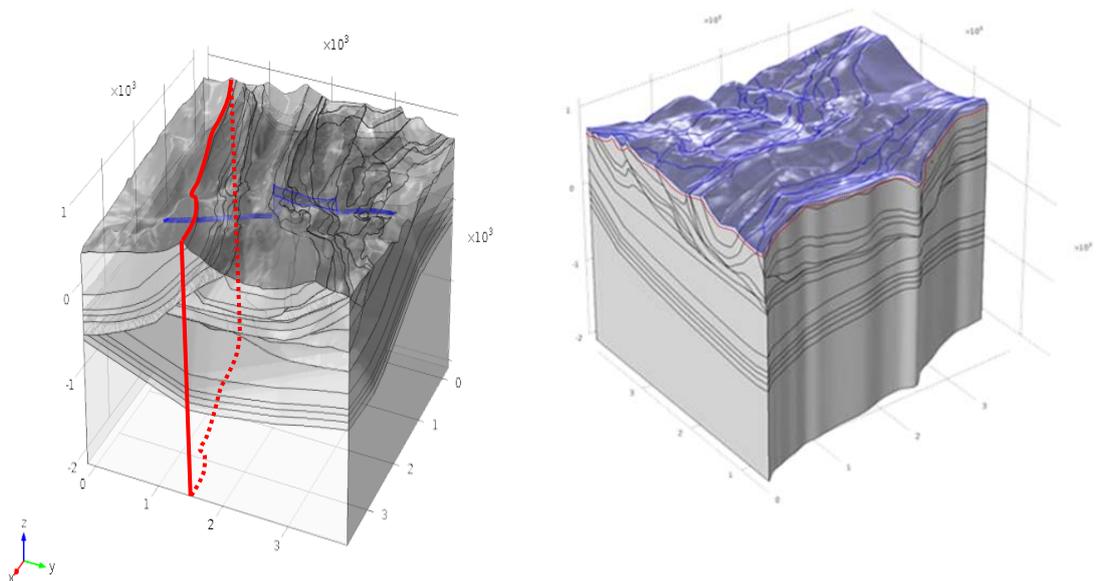


Abb. 15 Regionales Grundwassermodell, in Rot eingezeichnet der Schnittbereich entlang des südlichen Höhenrückens (linke Abbildung) und Lage des Tunnels, sowie des lokalen Grundwassermodells. Rechts: Lage des Festpotentialrandes unterhalb der Topographie (rot eingezeichnet).

Um den Einfluss des Tunnels im regionalen Kontext darzustellen, wurden die Druckverteilung und das Grundwasserfließfeld sowohl mit als auch ohne Tunnel

berechnet. Für den Tunnel wurden atmosphärische Druckverhältnisse angenommen. Der Vergleich der beiden Ergebnisse (**Abb. 16**) zeigt wie erwartet deutlich die Druckabsenkung im Bereich des Tunnels und damit einen verstärkten Grundwasserzufluss. Auffallend ist allerdings die räumliche Ausdehnung des Einflussbereiches. Insbesondere unterhalb des regionalen Aquifers drehen die Pfeile (Angabe für Grundwasserfliessrichtung) von einer abwärts gerichteten Komponente nach oben. Im gesamten regionalen Aquifer wird der Druck um ca. 100kPa reduziert.

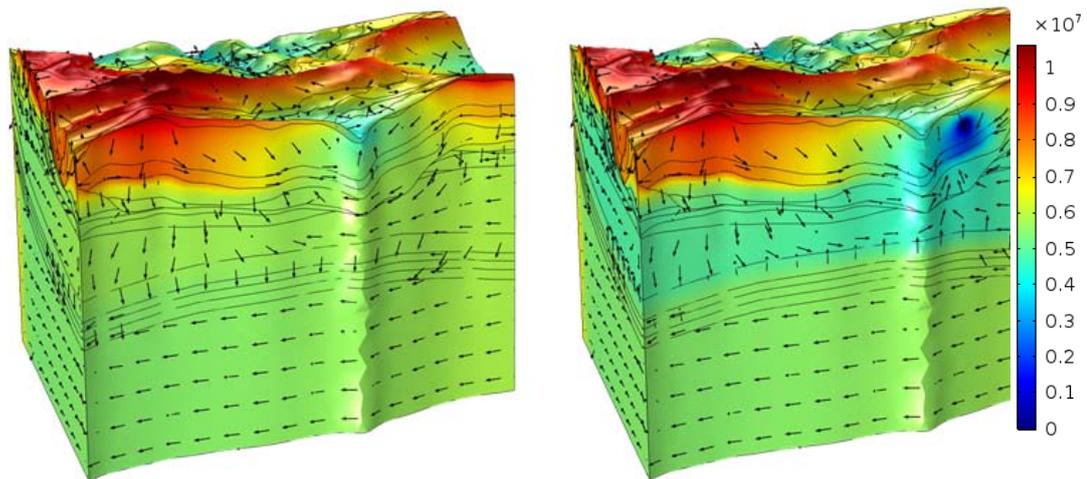


Abb. 16 Resultate der regionalen Grundwassermodellierung; die Farben zeigen die Druckverteilung in Pascal, die Pfeile repräsentieren die standardisierte Darcy Fliessgeschwindigkeit. Im linken Modell ohne Tunnel, im rechten Modell mit Tunnel.

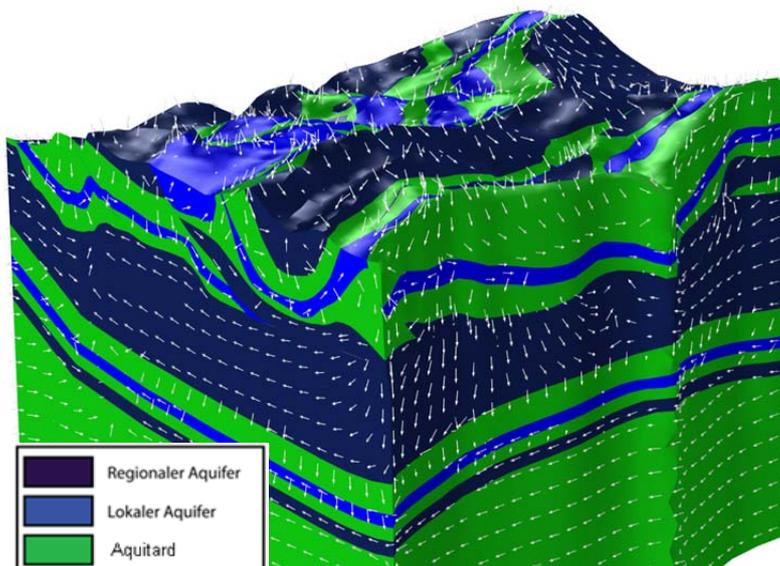


Abb. 17 Regionales Modell, eingezeichnet sind regionale und lokale Aquifere und Aquitarde, sowie die Grundwasserzirkulation mit normierten Pfeilen.

Das regionale Modell ist in der Lage den Tunnelleinfluss auf das regionale Grundwasserfliessfeld darzustellen. Es zeigt, dass der Einfluss des Tunnelbauwerks nicht nur lokale Auswirkungen hat, sondern auch im grossen Massstabsbereich Einflüsse sichtbar sind. Gut zu sehen ist der Einfluss von Abfolge und Lage der Stauer bzw. Aquifergeometrien. Vor allem an den Randbereichen der regionalen Aquifere kommt es zu einer Änderung der Grundwasserfliessrichtung. Zudem ist der Einfluss der

Topographie auf das grossräumige Zirkulationssystem anhand aufsteigenden Grundwassers in topographisch tieferen Gebieten und absteigenden Grundwassers in topographischen Höhenlagen zu erkennen.

Eine Basisdatenlage, welche für eine Kalibration und anschliessender Validierung notwendig gewesen wäre war nicht vorhanden. Daher kann eine Bilanzierung des Grundwasserflusses nicht mit der nötigen Genauigkeit durchgeführt werden. Dennoch steht mit diesem Modell ein Werkzeug zur Verfügung, welches vor allem aufgrund der konzeptionellen Überlegungen und der detaillierten Geologie wertvolle Informationen zum Einfluss einer Tunnelkonstruktion auf das Grundwasserfliessfeld liefert.

4.2 Lokales GW-Modell

Für eine detaillierte Aussage über den Einfluss der EDZ und des Tunnels auf das Grundwasserfliessfeld und um von Gebirgsquellen gefährdete Zonen zu lokalisieren, wurde ein lokales hochaufgelöstes Grundwassermodell erstellt. Das lokale Modell befindet sich in der Schuppenzone Süd. Die nördliche Begrenzung ist bei Tunnelmeter 1340, die südliche bei Tunnelmeter 2150 (Bezogen auf Tunnelmetrierung Weströhre). Die Lage bezogen auf das regionale Modell kann **Abb. 18** entnommen werden.

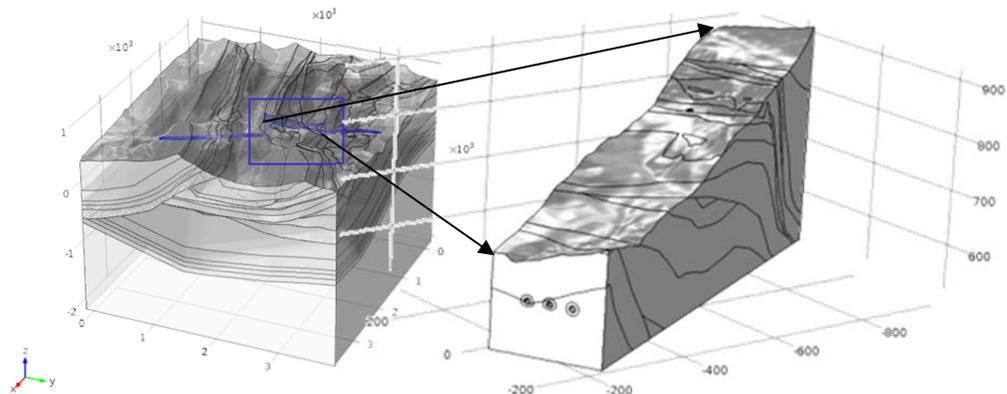


Abb. 18 Lage Lokales Grundwassermodell bezogen auf das regionale Grundwassermodell, sowie erstellte Geometrien basierend auf dem geologischen Modell mit Tunnelsystem und EDZ beim lokalen Grundwassermodell (rechts).

4.2.1 Erstellung lokales GW-Modell

Die hydrogeologischen Eigenschaften der verschiedenen geologischen Formationen wurden wie beim regionalen Modell in drei Haupteigenschaften eingeteilt, in stauende, gering leitende (lokaler Aquifer) und stark leitende (regionaler Aquifer) Formationen. In **Abb. 11** und **Abb. 12** können die verschiedenen stratigraphischen Einheiten und die Lage der Störungen entnommen werden. Im Unterschied zur Erstellung des regionalen Grundwassermodells, wurde bei der Überführung der Horizonte aus dem geologischen 3D Modell die einzelnen Topologien nicht vereinfacht, sondern bezüglich ihrer Genauigkeit in Bezug auf die Basisdaten verfeinert und somit eine hochauflösende Modellgeometrie erreicht. Die Umsetzung in das Grundwassermodell mit der räumlichen Verteilung der hydraulischen Eigenschaften ist in **Abb. 19** dargestellt.

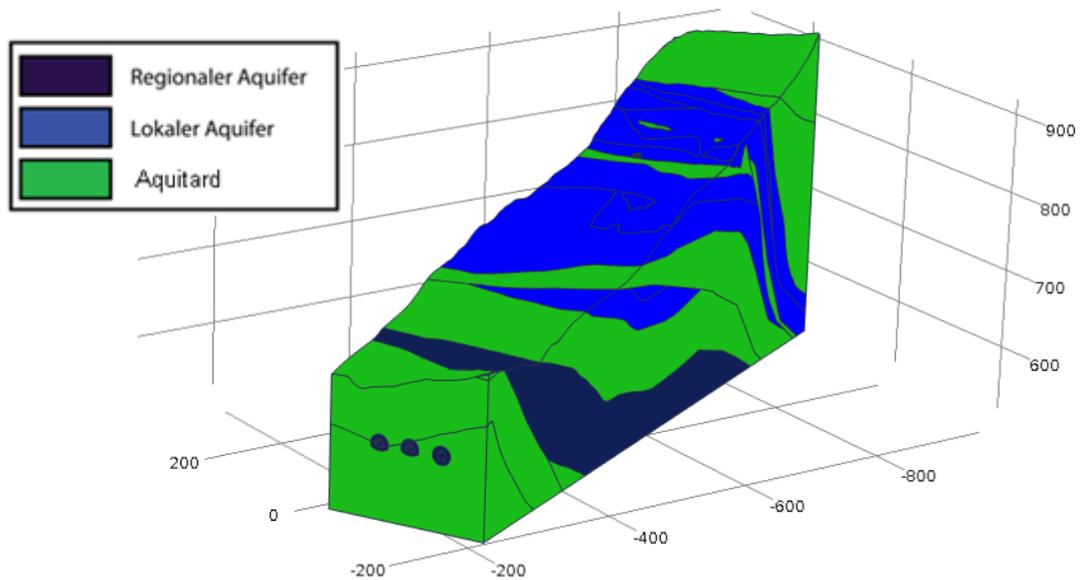


Abb. 19 Räumliche Verteilung der *hydraulischen Eigenschaften* im lokalen Modell auf Basis des 3D geologischen Modells.

4.2.2 Integration des Tunnelbauwerkes

Für das regionale Grundwassermodell wäre der Aufwand für eine detaillierte Berücksichtigung des Tunnelbauwerkes in keinem Verhältnis zur Aussagekraft des Modells. Daher wurde für den grossen Massstabsbereich eine vereinfachte Tunnelröhre verwendet. Um den Fragestellungen für das lokale Modell gerecht zu werden, war jedoch eine Anpassung des Detaillierungsgrades auch in Bezug auf die Tunnelstrukturen notwendig, weshalb diese entsprechend berücksichtigt wurden. Für die Integration des Tunnelbauwerkes im lokalen Grundwassermodell wurden daher alle drei Tunnelröhren entsprechend der Darstellung im STB Bericht vom 23.02.2007 (Meyer und Nyfeler 2007) konstruiert (**Abb. 20**). Das Lokale Modell ist daher nicht nur ein vergrößerter Ausschnitt des regionalen Modells, sondern ein eigenständiges Modell mit hoher stratigraphischer Auflösung, allen erkannten Brüchen und einer detaillierten Wiedergabe der Tunnelgeometrien.

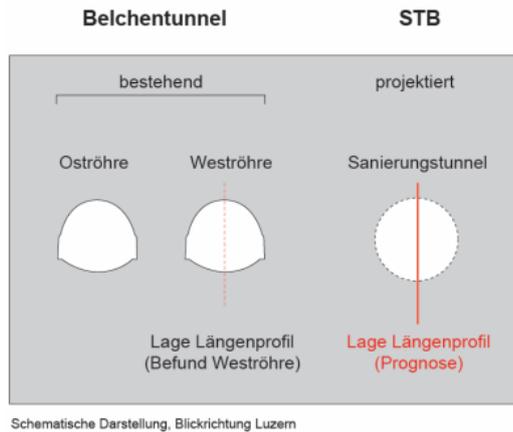


Abb. 20 Querprofile der zwei bestehenden, sowie der geplanten Tunnelröhre (aus Meyer und Nyfeler 2007).

Zusätzlich zu den bestehenden Tunnelröhren und des Sanierungstunnels wurden der Drainagetunnel, der Luftstollen, sowie Verbindungsstollen in das Modell integriert. Alle Tunnelbauwerke erhielten eine umgebende Hülle welche die Auflockerungszone (EDZ) repräsentiert. Die Mächtigkeit der Auflockerungszone beträgt einen halben Tunneldurchmesser. **Abb. 21** zeigt das in das Detailmodell integrierte Tunnelsystem, sowie die separate Berücksichtigung von EDZ und Tunnelröhre.

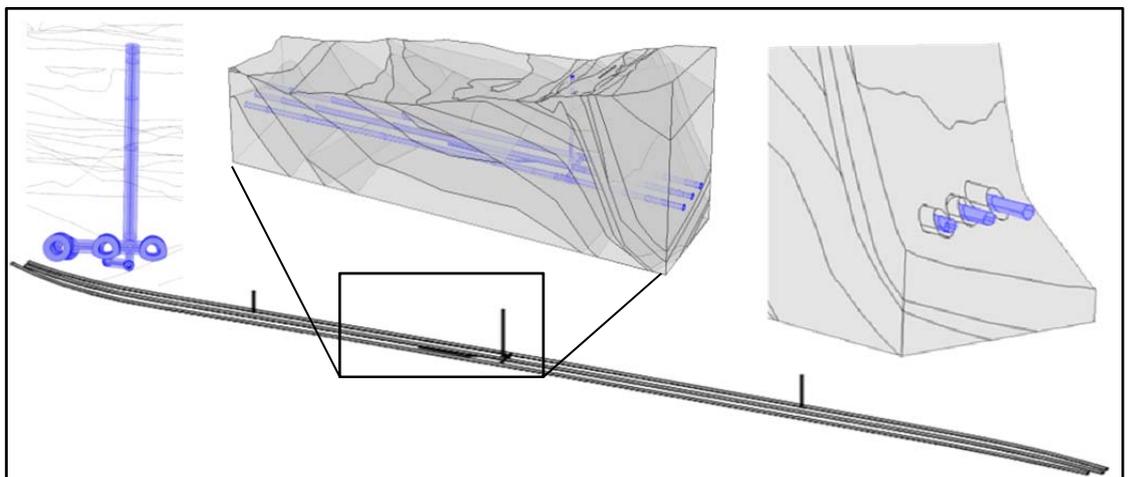


Abb. 21 Konstruktion und Integration des Tunnelsystems im lokalen Grundwassermodell.

4.2.3 Hydraulisches Basismodell

Basierend auf dem geologischen Modell wurde ein 3D Finite-Elemente-Grundwassermodell mit der Software Comsol-Multiphysics aufgebaut. Mit dem Modell können die Verteilung des hydraulischen Potentials sowie Wasserflüsse quantitativ berechnet werden. In einem ersten Schritt wurde das Modell ohne Tunnelröhren aufgebaut. Zum einen sollten dadurch die Grundwasserverhältnisse vor dem Tunnelbau rekonstruiert werden, um später die hydraulischen Veränderungen durch den Tunnelbau analysieren zu können. Zum anderen war dieser Schritt notwendig, weil der Einfluss der Tunnelröhren auf die Grundwasserverhältnisse *a priori* schwer abzuschätzen ist. Hingegen können die Grundwasserverhältnisse vor dem Tunnelbau besser abgeschätzt werden, indem Informationen zur Grundwasserneubildung (Huggenberger et al., 2012)

und zur Potenzialverteilung aus Erkundungsbohrungen (Meyer und Nyfeler 2007) herangezogen werden. Deshalb wurde zunächst ein Grundwassermodell ohne Tunnelröhren aufgebaut und kalibriert. Dieses Modell diente anschliessend zur Ableitung von Randbedingungen für das Basismodell mit Tunnel.

Basismodell ohne Tunnel

Die hydraulischen Eigenschaften der geologischen Einheiten und von Störungszonen wurden zunächst entsprechend Literaturwerten (NAGRA, 2002; Delleur, 1999) sowie der Erfahrungen aus dem vorangegangenen Projekt am Chienbergtunnel (Huggenberger und Butscher, 2012) gewählt. An allen Aquitarden, sowie an den West- und Ostbegrenzungen des Modells wurde als Randbedingung eine „no-flow“ (undurchlässig) Randbedingung gewählt. An den Aquiferen an der Geländeoberfläche wurde als Randbedingung ein Festpotenzial definiert, welches einem Grundwasserflurabstand von 30 m entspricht (Potenzial = Geländehöhe minus 30 m). An den Aquiferen der übrigen Modellränder wurde die Potenzialverteilung so gewählt, dass die anschliessend berechneten Potenziale möglichst gut mit Messungen in Erkundungsbohrungen übereinstimmen („trial and error“). In einem nächsten Schritt wurde die Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeiten so modifiziert, dass eine Wasserbilanzierung einen Zufluss ins Modellgebiet über die Geländeoberfläche ergab, welcher der abgeschätzten Grundwasserneubildung von 350 mm/Jahr entspricht. Durch diese Vorgehensweise wurde ein Basismodell ohne Tunnel entwickelt, welches plausible und bestmöglich an Messwerte angepasste Grundwasserverhältnisse widerspiegelt. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die hydraulischen Modelleigenschaften des Basismodells ohne Tunnel.

Tab. 1 Übersicht Modelleigenschaften lokales Basismodell ohne Tunnel

k _f -Wert Oberer Muschelkalk (m/s)	1e-6
k _f -Wert Oberer Keuper, Lias, (m/s)	5e-8
k _f -Wert Anhydritgruppe, Gipskeuper, Opalinuston, Unterer Dogger (m/s)	1e-11
k _f -Wert Störungen (m/s)	1e-6
Mächtigkeit Störungen (m)	1
Hydraulisches Potenzial Geländeoberfläche (m)	GOK – 30 m
Hydraulisches Potenzial Oberer Keuper und Lias südlicher Modellrand (m)	836
Hydraulisches Potenzial Oberer Keuper unterer Modellrand (m)	836
Hydraulisches Potenzial Oberer Muschelkalk unterer Modellrand (m)	Von 806 im S zu 724 im N

Basismodell mit Tunnel

Die Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeiten im Basismodell mit Tunnel wurde aus dem Modell ohne Tunnel übernommen. Für die Auflockerungszone um die Tunnelröhre (EDZ) wurde eine hydraulische Leitfähigkeit von 1e-6 m/s angenommen. Als Randbedingungen an der Oberfläche und am südlichen Modellrand wurden jedoch nicht das Festpotenzial aus dem Modell ohne Tunnel übernommen, sondern die Zuflüsse mit dem Modell ohne Tunnel über diese Modellränder berechnet, und anschliessend diese Zuflüsse als Randbedingung in das Modell mit Tunnel integriert. Dieses Vorgehen wurde gewählt, weil es plausibel ist, dass sich die Zuflüsse aus dem Süden sowie die über die Geländeoberfläche (Grundwasserneubildung!) nicht durch den Tunnelbau ändern. Hingegen muss angenommen werden, dass durch den Bau der Tunnelröhren aufgrund ihrer entwässernden Wirkung das hydraulische Potenzial insbesondere oberhalb des Tunnels um einen unbekanntes Wert abgesenkt wird. Da es unklar ist, ob und wie stark durch den Tunnel das Potenzial in oder Zuflüsse aus Schichten unterhalb des Tunnels verändert werden, wurde sowohl ein Basismodell mit einer Festpotenzial-Randbedingung im Oberen Muschelkalk und Oberen Keuper am unteren Modellrand (Wert wie im Modell ohne Tunnel vorgegeben), als auch ein Modell mit einem vorgegebenen Wasserzufluss (Wert wie mit dem Modell ohne Tunnel berechnet) erstellt.

Als Randbedingung an allen Tunnelröhren wurde als hydraulisches Potenzial das topographische Höheniveau vorgegeben. Diese Vorgabe entspricht der Annahme eines atmosphärischen Drucks (kein Wasserdruck) im Tunnel oder in einer Drainageschicht um den Tunnel. Außerdem wurde an diesem Modellrand eine Transferrate r von 0,1 1/s vorgegeben. Dies simuliert einen „Fließwiderstand“ für das Grundwasser, welches das Modellgebiet über diesen Modellrand verlässt. Dadurch soll das Abführen des anfallenden Grundwassers in einer Drainagelage um den Tunnel berücksichtigt werden (kein freies Ausfließen in einen offenen Tunnel; zu Randbedingungen am Tunnel vgl. z. B. Butscher, 2012; Butscher et al., 2015). Tabelle 2 gibt einen Überblick über die hydraulischen Modelleigenschaften des Basismodells mit Tunnel.

Tab. 2 Übersicht Modelleigenschaften lokales Basismodell mit Tunnel

k_f -Wert Oberer Muschelkalk (m/s)	1e-6
k_f -Wert Oberer Keuper, Lias,(m/s)	5e-8
k_f -Wert Anhydritgruppe, Gipskeuper, Opalinuston, Unterer Dogger (m/s)	1e-11
k_f -Wert Störungen (m/s)	1e-6
k_f -Wert EDZ (m/s)	1e-6
Mächtigkeit Störungen (m)	1
Zufluss über Geländeoberfläche	Verteilt wie berechnet mit dem Basismodell ohne Tunnel (entspricht in der Summe einer Grundwasserneubildung von 350 mm/Jahr).
Zufluss über Oberen Keuper und Lias am südlichen Modellrand	Verteilt wie berechnet mit dem Basismodell ohne Tunnel (entspricht in der Summe rund 5 m ³ /Tag).
Hydraulisches Potenzial Oberer Keuper am unteren Modellrand (m) bzw. Zufluss über Oberen Keuper am unteren Modellrand	836 bzw. verteilt wie berechnet mit dem Basismodell ohne Tunnel (entspricht in der Summe rund 0,07 m ³ /Tag).
Hydraulisches Potenzial Oberer Muschelkalk am unteren Modellrand (m) bzw. Zufluss über Oberen Muschelkalk am unteren Modellrand	Von 806 im S zu 724 im N bzw. verteilt wie berechnet mit dem Basismodell ohne Tunnel (entspricht in der Summe rund 318 m ³ /Tag).
Hydraulisches Potenzial am Tunnel	Entspricht topographischer Höhe
Transferrate am Tunnel (1/s)	0,1

Abb. 22 zeigt das Basismodell mit Tunnel sowohl für die Randbedingung „Festpotenzial am unteren Modellrand“ (oben), als auch für die Randbedingung „Zufluss am unteren Modellrand“ (unten). Bei der Annahme des Festpotenzials sind das hydraulische Potenzial und entsprechend auch die Grundwasserflüsse im Oberen Muschelkalk größer. Um entscheiden zu können, welches der beiden Modellversionen besser geeignet ist, die realen Verhältnisse wiederzugeben, müssten die Modellergebnisse anhand von Feldmessungen überprüft werden. Dazu wären entweder Potenzialmessungen im Oberen Muschelkalk mithilfe von Grundwassermessstellen oder Messungen der Zuflüsse in die Drainage des Tunnels (Zugang über Pumpenschächte) geeignet. In der vorliegenden Studie wurde für alle weiteren Untersuchungen (Szenarienberechnungen, siehe Kapitel 6) das Modell mit der Randbedingung „Festpotenzial am unteren Modellrand“ ausgewählt.

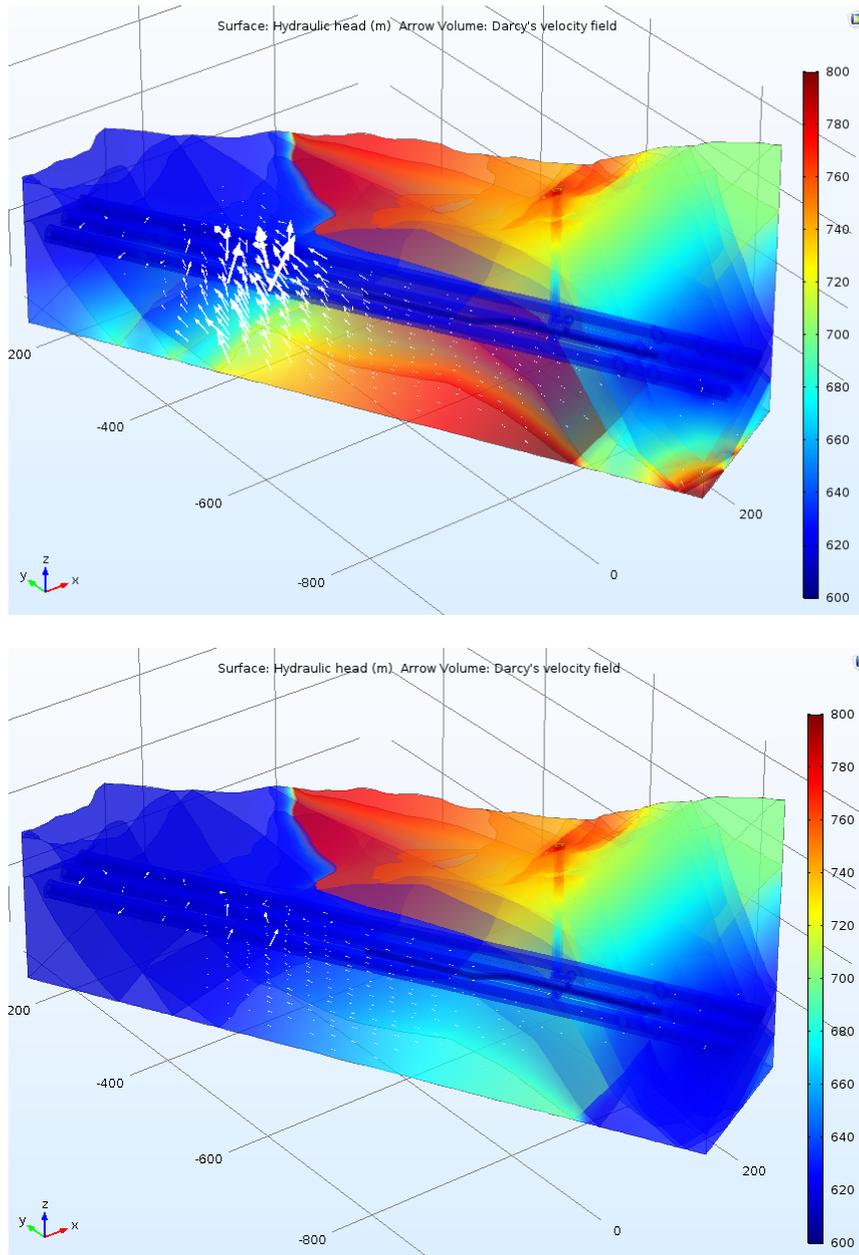


Abb. 22 Basismodell mit Tunnel. Die Farbskala gibt das hydraulische Potenzial, die weißen Pfeile geben den Grundwasserfluss an (Pfeillänge proportional zum Betrag des Grundwasserflusses). Große Wasserflüsse finden insbesondere im Oberen Muschelkalk statt und entwässern dort in die Drainage des Tunnels, wo der Tunnel den Oberen Muschelkalk quert. Das Modell, bei dem das gleiche Festpotenzial am unteren Modellrand wie im Basismodell ohne Tunnel vorgegeben wurde (oben), zeigt größere Wasserflüsse im Oberen Muschelkalk und in die Drainage des Tunnels, als das Modell, bei dem der gleiche Zufluss am unteren Modellrand wie im Basismodell ohne Tunnel vorgegeben wurde (unten).

Mit dem entwickelten Basismodell steht ein Grundwassermodell zur Verfügung, mit dem die Grundwasserverhältnisse im lokalen Bereich der „Schuppenzone Süd“ des Belchentunnels vor und nach dem Tunnelbau analysiert werden können. Die Analyse des Basismodells sowie verschiedener Szenarien, welche unterschiedliche Randbedingungen am Tunnel durch unterschiedliche Systeme des Tunnelausbaus und der Grundwasserhaltung berücksichtigen, sind im Kapitel 6 (Szenarienberechnungen) dargestellt.

5 Bautechnische Aspekte

5.1 Evaluation Bauverfahren und Systeme zur Grundwasserhaltung

5.1.1 Bauverfahren

Wir gebrauchen in diesem Bericht den Begriff „Auflockerungszone“, um Auflockerungen um die Tunnelröhren durch den Ausbruchvorgang und damit zusammenhängende Veränderungen der Gebirgsparameter zu beschreiben. Die vor allem durch Spannungsumlagerungen verursachte Auflockerung führen insbesondere zur Veränderung der Gebirgsdurchlässigkeit. In den hier verwendeten Modellen wird die Auflockerungszone als eine Zone mit veränderten (höheren) hydraulischen Leitfähigkeiten im Vergleich zum vom Tunnelbau unbeeinflussten Gestein berücksichtigt. Die Auflockerungszone um den Tunnel wird in der englischsprachigen Literatur, überwiegend im Zusammenhang mit der Erforschung nuklearer Endlager, als „EDZ“ (excavation-damaged zone) bezeichnet. In diesem Bericht wird der Begriff EDZ synonym für die Auflockerungszone um die Tunnelröhren verwendet.

Untersuchungen in den Felslaboren Mont Terri (Schweiz) und Tournemire (Frankreich) (Tsang et al., 2005) haben gezeigt, dass die hydraulische Leitfähigkeit der EDZ in Tonsteinen bis zu 6 Grössenordnungen gegenüber dem unbeeinflussten Gestein erhöht sein kann, und bis zu einen Tunnelradius in die Umgebung des Tunnels hineinreicht. Die Eigenschaften der EDZ hängen jedoch von vielen Faktoren ab, wie z. B. der ursprünglichen Druckverteilung, Materialeigenschaften, Klüftung und Inhomogenitäten des Gesteins, sowie der Tunnelgeometrie und der Abbaumethode (Blümling et al., 2007; Sato et al., 2000). Das Risiko des Gebirgsquellens könnte potenziell entschärft werden, wenn Massnahmen ergriffen werden, die die Ausbildung der EDZ gering halten. Mögliche Massnahmen, die die hydraulische Leitfähigkeit der Auflockerungszone reduzieren, könnten das Verwenden einer Tunnelbohrmaschine statt Sprengvortrieb, die sofortige Stabilisierung der Tunnelröhre (sofortiger Ausbau) und/ oder das Einpressen von Silikon hinter die Tunnelwände (Butrón et al., 2010) sein. Die konkreten Auswirkungen solcher Massnahmen auf die hydraulischen Eigenschaften der EDZ, sowie potenzielle weitere (auch negative) Auswirkungen solcher Massnahmen auf das Gebirgsquellen, sind jedoch noch wenig untersucht.

Mögliche Auswirkungen des Bauverfahrens (z. B. Sprengvortrieb oder Tunnelbohrmaschine) auf das Quellpotenzial des Gipskeupers wurden in dieser Studie indirekt über die Auswirkungen der Ausbildung der Auflockerungszone auf den Grundwasserfluss in der EDZ im Gipskeuper untersucht. Dazu wurde der Parameter hydraulische Leitfähigkeit der EDZ in mehreren Modellrechnungen systematisch geändert und jeweils die Änderung des Wasserflusses beobachtet und analysiert. Die Ergebnisse dieser Analyse werden im Kapitel 5.2 (Einfluss Bauverfahren auf EDZ) vorgestellt.

5.1.2 Systeme der Grundwasserhaltung

Zur Untersuchung von Baumassnahmen, welche Systeme der Grundwasserhaltung umsetzen, wurde ein vereinfachtes Modell erstellt. Dieses Modell beinhaltet (bei gleicher Geologie) nur eine Tunnelröhre mit Kreisquerschnitt, welche in ihrer Lage der bestehenden Weströhre entspricht. Um die Tunnelröhre wurde eine 0,2 m mächtige Lage eingeführt, welche eine hohe hydraulische Leitfähigkeit besitzt ($k_f = 1e-3$ m/s) und eine Drainageschicht um die Tunnelröhre bzw. den offenen Raum zwischen Tunnelschale und Gebirge repräsentiert. Wie beim Basismodell ist eine Auflockerungszone um die Tunnelröhre mit einer Mächtigkeit von einem Tunnelradius und einer hydraulischen Leitfähigkeit von $1e-6$ m/s vorhanden.

In der Tunnelschale befinden sich Pumpenschächte. Als erstes System der Grundwasserhaltung werden diese im Modell als in Richtung der Tunnellängsachse 1 m breite Bereiche der Tunnelröhre eingeführt, welche zuströmendes Wasser über eine Festpotenzial-Randbedingung abführen. Als Festpotenzial wurden 605 m gewählt (etwas tiefer als die Tunnelsohle am Nordportal). Ausserhalb dieser Pumpenschächte wird die Tunnelschale als dicht angenommen (no-flow Randbedingung).

Neben den Pumpenschächten wurden als zweites System der Grundwasserhaltung Abdichtungsbauwerke untersucht, wie sie beispielsweise von Wittke (2012) vorgeschlagen werden. Diese sollen eine Längszirkulation entlang der Tunnelachse zwischen Tunnelschale und Gebirge sowie innerhalb der EDZ behindern. Die Abdichtungsbauwerke wurden im Modell als eine (in Richtung der Tunnellängsachse) 1 m dicke Struktur mit geringer Durchlässigkeit eingeführt, die von der Tunnelbegrenzung bis zum äusseren Rand der EDZ reicht.

Frühere hydraulische Untersuchungen am Chienbergtunnel (Huggenberger und Butscher, 2012) deuten darauf hin, dass durch ein Absenken des hydraulischen Potenzials in Aquiferen, aus denen Grundwasser in die EDZ im Gipskeuper zuströmt, eine erhebliche Reduktion des Wasserflusses in der EDZ im Gipskeuper bewirken kann (und somit zu einer Reduktion des Quellpotenzial des Gipskeupers führt). Deshalb wurde hier als drittes System der Grundwasserhaltung untersucht, welche Auswirkungen ein Absenken des Potenzials im Oberen Muschelkalk auf den Grundwasserfluss in der EDZ im Gipskeuper hat.

In Szenarien wurde untersucht, wie sich eine Drainage über Pumpenschächte an verschiedenen Positionen und das Einführen von Absperrbauwerken auf die Grundwasserzirkulation, insbesondere den Grundwasserfluss in der EDZ im Gipskeuper auswirken (siehe Kap. 6.3). Außerdem wurde untersucht, wie sich eine Potenzialabsenkung in Aquiferen auf das Fließgeschehen auswirkt. Der Wasserfluss wurde anhand von Horizontalschnitten 1 m unterhalb der Tunnelröhre evaluiert. In diesen Horizontalschnitten wird der Wasserfluss über die Darcy-Fließgeschwindigkeit („Filtergeschwindigkeit“) visualisiert. Dabei wird eine logarithmische (Basis 10) Farbskala verwendet. Ein Farbton, welcher auf der angegebenen Skala beispielsweise dem Wert -8 entspricht, zeigt eine Darcy-Fließgeschwindigkeit von $1e-8$ m/s ($1 \cdot 10^{-8}$ m/s) an. Zur besseren Orientierung in den Horizontalschnitten zeigt **Abb 23** einen solchen Horizontalschnitt mit der Zuordnung der geologischen Einheiten und Strukturen.

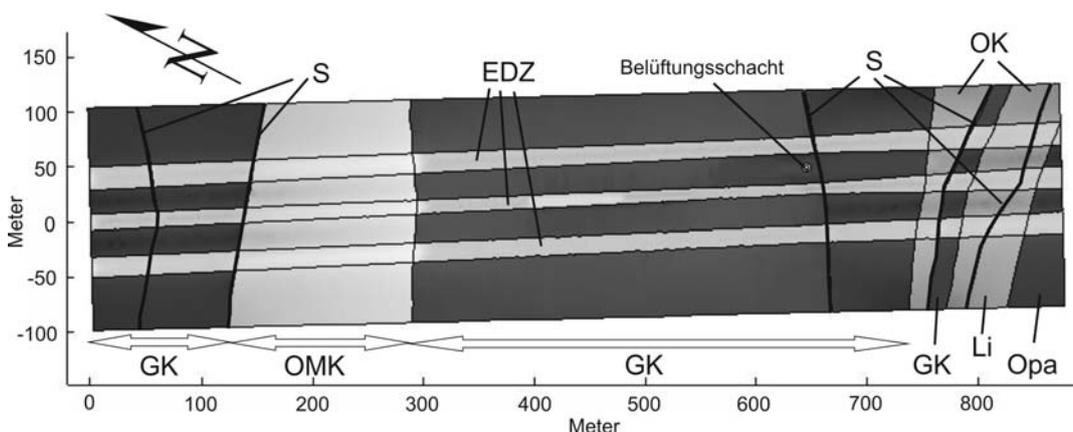


Abb. 23 Horizontalschnitt 1m unterhalb der Tunnelsohle mit der Bezeichnung der geologischen Einheiten und Strukturen. EDZ: Auflockerungszone („Excavation-damaged-zone“); GK: Gipskeuper; OK: Oberer Keuper; OMK: Oberer Muschelkalk; Opa: Opalinuston; Li: Lias; S: Störung

5.2 Abschätzung der geohydraulischen Parameter

Die Abschätzung der geohydraulischen Parameter des Basismodells wurde in Kapitel 4 (Grundwassermodelle) erläutert. Die geohydraulischen Parameter für die Szenarienberechnungen werden in Kapitel 6 (Szenarienberechnungen) erläutert.

6 Szenarienberechnungen

6.1 Grundwasserfließregime

Mithilfe des lokalen Grundwassermodells (Basismodell, vgl. Kapitel. 4.2.3) wurde das Grundwasserfließregime im Bereich der „Schuppenzone Süd“ (Tm 793 bis 1670 bezogen auf Weströhre) untersucht. Dazu wurden die Verteilung des hydraulischen Potentials sowie Richtung und Geschwindigkeit des Grundwasserflusses berechnet. Die Modelle berücksichtigten die Verhältnisse vor und nach dem Tunnelbau. Nach dem Tunnelbau werden die Grundwasserverhältnisse mit dem Basismodell, bei dem ein Ausfluss des Grundwassers in eine gut durchlässige Drainageschicht angenommen wird (vgl. Kapitel 4.2.3), untersucht und mit Verhältnissen verglichen, bei denen ein freies Ausfließen in einen offenen Tunnel bzw. ein undurchlässiger Tunnel angenommen wird.

Abb. 24 zeigt die Potenzialverteilung vor und nach dem Tunnelbau. Die Absenkung des hydraulischen Potentials um die Tunnelröhren ist nach dem Tunnelbau deutlich erkennbar. Vor dem Tunnelbau strömt das Grundwasser vor allem im Oberen Muschelkalk aufwärts und tritt dort an der Erdoberfläche aus (weisse Pfeile in **Abb. 24** oben). Nach dem Tunnelbau wird der obere Muschelkalk durch den Tunnel entwässert, d. h. das Grundwasser im Oberen Muschelkalk fließt nicht mehr bis zur Erdoberfläche sondern in die Drainage des Tunnels (**Abb. 24** oben und **Abb. 25**).

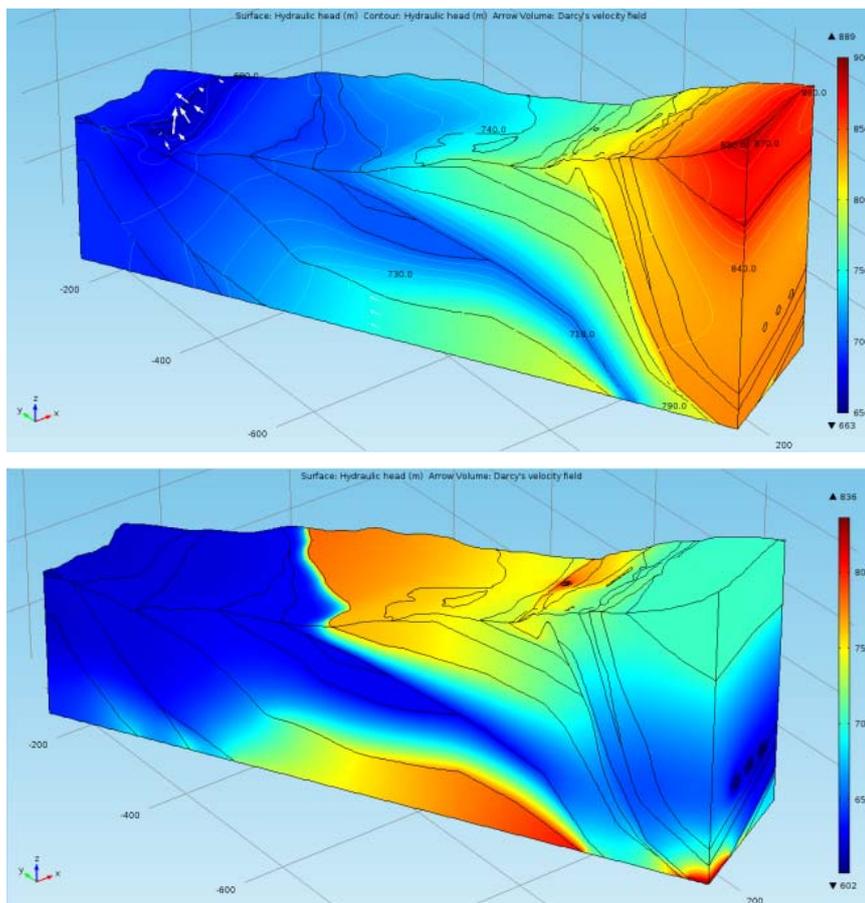


Abb. 24 Potenzialverteilung vor (oben) und nach dem Tunnelbau (unten). Die Tunnelröhren entwässern und senken das Potenzial ab. Vor dem Tunnelbau treten grössere Wassermengen aus dem Oberen Muschelkalk an der Erdoberfläche aus (weisse Pfeile im Bild oben). Nach dem Tunnelbau sind diese an der Erdoberfläche nicht mehr erkennbar, da sie im Untergrund in die Drainage des Tunnels entwässern (vgl. **Abb. 25**).

Die berechneten Grundwasserverhältnisse nach dem Tunnel ändern sich nicht, wenn statt der gut leitenden Drainageschicht um den Tunnel (Basismodell) ein offener Tunnel angenommen wird (**Abb. 25** oben). Wenn der Tunnel jedoch als undurchlässig angenommen wird, fließt das Grundwasser insbesondere im Abstrom der Aquifere in der Auflockerungszone entlang der Tunnelröhren („Längszirkulation“, **Abb. 25** unten).

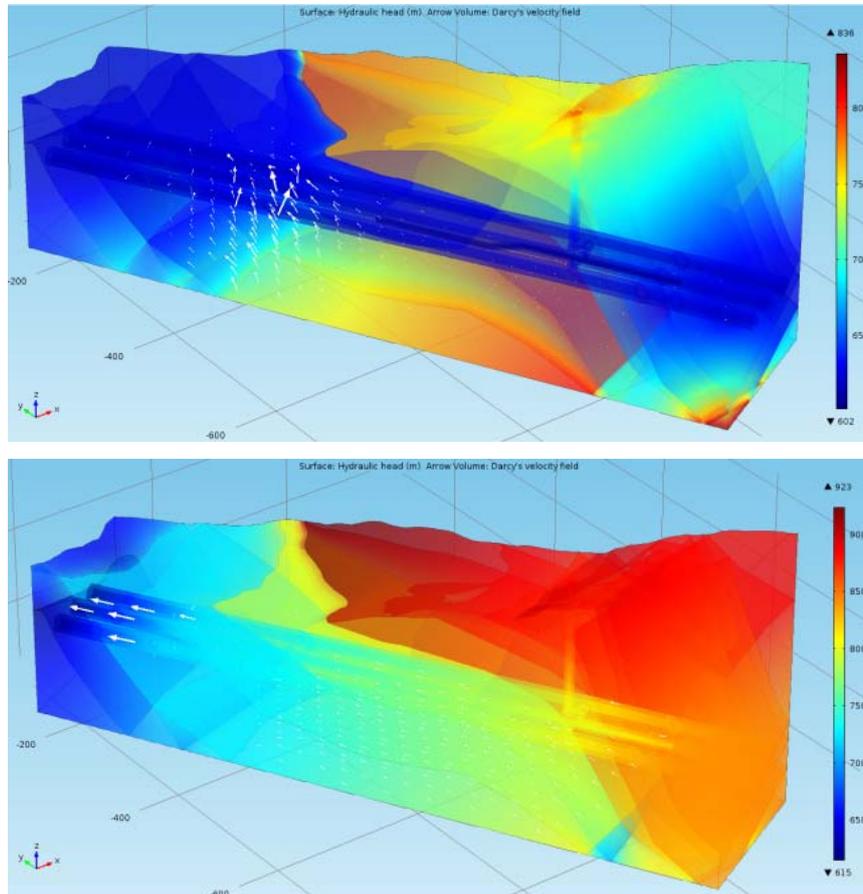


Abb. 25 Vergleich der Grundwasserverhältnisse bei einem offenen Tunnel (oben, entspricht Basismodell mit gut durchlässiger Drainage) mit denen bei einem dichten Tunnel (unten). Die Farbskala gibt das hydraulische Potenzial an, die weissen Pfeile zeigen den Grundwasserfluss. Ist der Tunnel offen oder gut drainiert, fließt das Grundwasser aus dem Oberen Muschelkalk in den Tunnel bzw. in dessen Drainage. Ist der Tunnel dicht, fließt das Grundwasser im Abstrom des Oberen Muschelkalks in der Auflockerungszone parallel zu den Tunnelröhren.

Um mögliche Auswirkungen der verschiedenen Grundwasserverhältnisse auf das Quellpotenzial des Gipskeupers zu untersuchen, wurde der Grundwasserfluss (Darcy-Fliessgeschwindigkeit) in der Auflockerungszone unterhalb der Tunnelröhren berechnet. Dabei wird angenommen, dass der Grundwasserfluss das Quellpotenzial widerspiegelt (je höher der Fluss, desto höher das Quellpotenzial; Butscher et al. 2015). Abbildung 26 zeigt den Grundwasserfluss in einem Horizontalschnitt 1 m unterhalb der Tunnelröhren. Im Falle der dichten Tunnelröhren ist der Grundwasserfluss im Oberen Muschelkalk geringer, im Abstrom des Oberen Muschelkalks in der Auflockerungszone im Gipskeuper jedoch höher verglichen mit dem Fall der offenen/drainierten Röhren. Aufgrund der fehlenden Drainage des Tunnels wird bei einem dichten Tunnel das Grundwasser aus Aquiferen in der Auflockerungszone entlang der Tunnelröhren weitergeleitet („Längszirkulation“). Dadurch erhöht sich das Quellpotenzial im Gipskeuper.

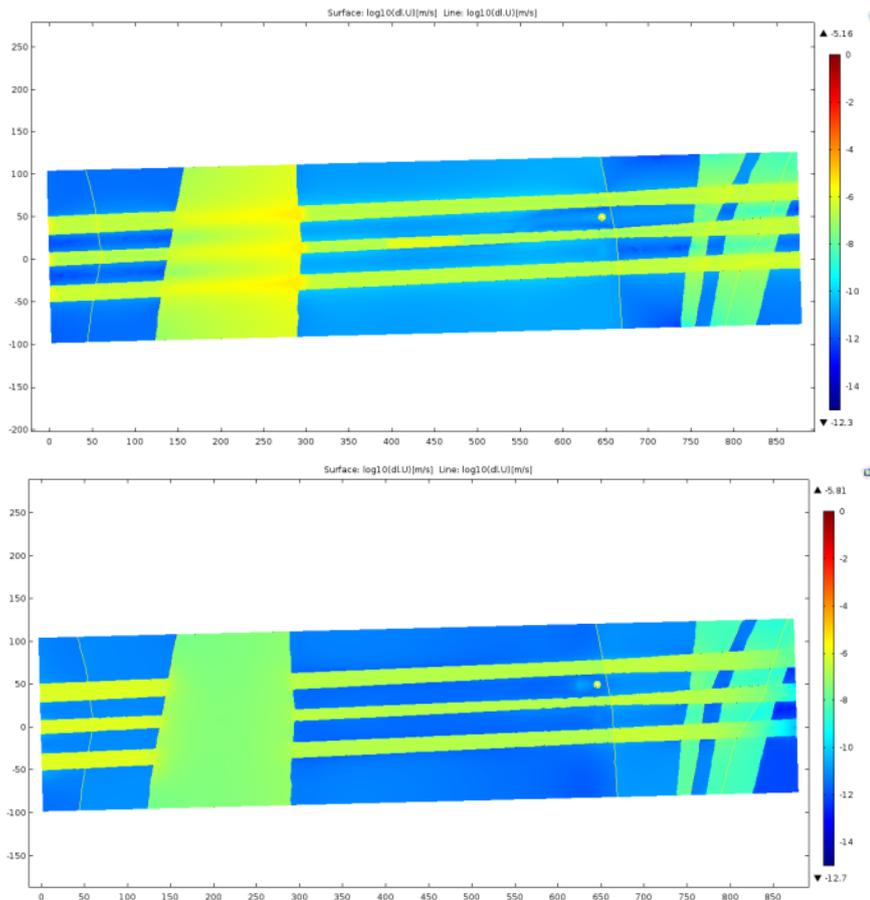


Abb. 26 Grundwasserfluss (Farbskala: \log_{10} der Darcy-Fliessgeschwindigkeit in m/s) in einem Horizontalschnitt 1m unterhalb der Tunnelröhren als Indikator für das Quellpotenzial. Hohe Grundwasserflüsse sind in den Aquiferen (kein quellfähiges Gestein) sowie in der Auflockerungszone um die Tunnelröhren in den Aquitarden (quellfähiger Gipskeuper!) zu beobachten. Im Vergleich zu einem offenen/drainierten Tunnel (oben) ist der Grundwasserfluss bei einem dichten Tunnel (unten) in den Aquiferen erniedrigt, im Abstrom der Aquifere in der Auflockerungszone jedoch leicht erhöht. Dadurch steigt das Quellpotenzial bei einem dichten Tunnel in der Auflockerungszone im Gipskeuper im Abstrom von Aquiferen.

6.2 Einfluss Bauverfahren auf EDZ

Wie bereits im Kapitel 5.1 erläutert, wurden in dieser Studie mögliche Auswirkungen des Bauverfahrens (z. B. Sprengvortrieb oder Tunnelbohrmaschine) auf das Quellpotenzial des Gipskeupers indirekt über die Auswirkungen der Ausbildung der Auflockerungszone auf den Grundwasserfluss in der EDZ im Gipskeuper untersucht. In unserer Studie wurde für das Basismodell für die hydraulische Leitfähigkeit der EDZ ein Wert von $1e-6$ m/s gewählt. Die EDZ reicht dabei einen Tunnelradius in das umgebende Gestein hinein. Die hydraulische Leitfähigkeit innerhalb der EDZ wurde in Szenarien schrittweise um je eine Grössenordnung verringert bzw. erhöht, um die Auswirkungen von Baumassnahmen zu untersuchen, welche die Ausbildung der EDZ reduzieren oder erhöhen. Auf Szenarien mit unterschiedlicher radialer Ausdehnung der EDZ wurde verzichtet. Untersuchungen am Chienbergtunnel (Huggenberger und Butscher, 2012) haben gezeigt, dass die radiale Ausdehnung der EDZ für die Fliessverhältnisse und das Gebirgsquellen nur dann eine Rolle spielt, wenn diese die hydraulische Verbindung von Aquiferen mit anhydritführenden Schichten steuert. In der vorliegenden geometrischen Situation findet eine solche Verbindung jedoch ausschliesslich longitudinal entlang der Tunnelröhren statt. Die radiale Ausdehnung der EDZ spielt deshalb keine Rolle.

Um den Einfluss der EDZ auf das Quellpotenzial zu untersuchen, wurde der durchschnittliche Grundwasserfluss (Darcy-Fliessgeschwindigkeit) in der Auflockerungszone im Gipskeuper mit dem Basismodell und mit den Modellen, die eine reduzierte oder erhöhte hydraulische Leitfähigkeit der EDZ berücksichtigen, berechnet. **Abb. 27** zeigt die Wasserflüsse in der Auflockerungszone im Gipskeuper abhängig von der hydraulischen Leitfähigkeit der Auflockerungszone. Die Berechnungen zeigen eine deutliche Reduktion des Wasserflusses bei niedrigeren hydraulischen Leitfähigkeiten und eine Erhöhung des Wasserflusses bei hohen hydraulischen Leitfähigkeiten. Der Wasserfluss in der EDZ im Gipskeuper ändert sich dabei linear mit der hydraulischen Leitfähigkeit der EDZ. Ausbruchverfahren, die geeignet sind, die Ausbildung der EDZ gering zu halten, sind also potenziell gut geeignet, der Gefahr des Gebirgsquellens im Gipskeuper zu begegnen.

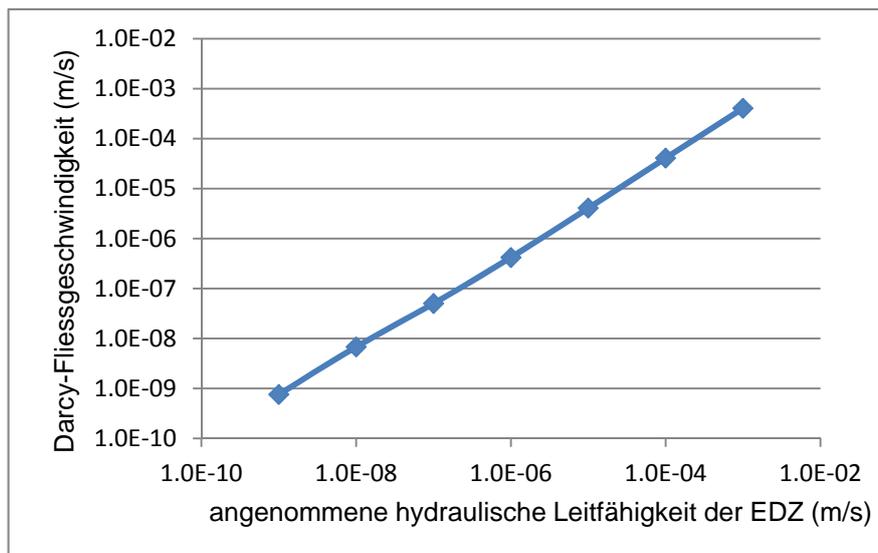


Abb. 27 Grundwasserfluss (Darcy-Fliessgeschwindigkeit) in der Auflockerungszone im Gipskeuper in Abhängigkeit der angenommenen hydraulischen Leitfähigkeit der EDZ. Der Wasserfluss in der EDZ im Gipskeuper, und somit das Quellpotenzial im Gipskeuper, wird deutlich reduziert, wenn es gelingt, durch geeignete Ausbruchverfahren die hydraulische Leitfähigkeit der EDZ gering zu halten.

6.3 Systeme zur Grundwasserhaltung

Systeme der Grundwasserhaltung wurden mit vereinfachten Modellen (nur eine Tunnelröhre in der Lage der bestehenden Weströhre) untersucht, welche Pumpenschächte und Abdichtungsbauwerke beinhalten können. Die Positionen der Pumpenschächte und Abdichtungsbauwerke sind in den Abbildungen dieses Kapitels (**Abb. 28, Abb. 29, Abb. 30**) anhand von kurzen schwarzen Linien innerhalb der EDZ zu erkennen. Die Umsetzung der Systeme zur Grundwasserhaltung ist in Kapitel 5.1.2 beschrieben. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellberechnungen vorgestellt.

6.3.1 Pumpenschächte in Position der bestehenden Weströhre

In diesem Szenarium wurden Pumpenschächte in der Position ins Modell integriert, in der sie in der bestehenden Weströhre vorkommen. **Abb. 28** stellt dieses Szenarium einem als dicht angenommenen Tunnel (mit Drainagelage um die dichte Tunnelröhre) gegenüber. Insgesamt sind mit den Pumpenschächten nur geringe Änderungen des Grundwasserflusses gegenüber einem Szenarium ohne diesen Schächten zu erkennen. Der Grundwasserfluss wird durch das Einführen der Pumpenschächte in allen Einheiten leicht erhöht.

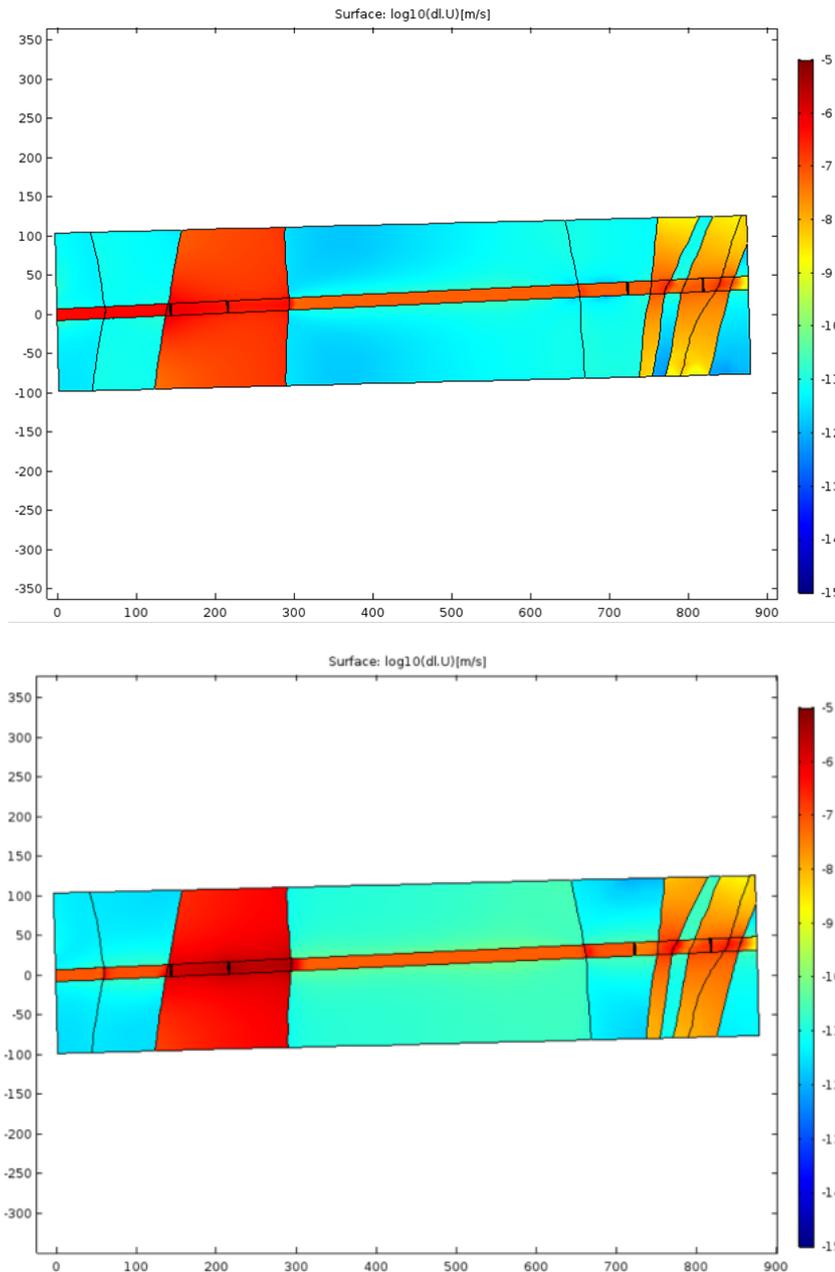


Abb. 28 Einfluss von Pumpenschächten (Position erkennbar als kleine schwarze Linien innerhalb der EDZ um die Tunnelröhre) auf den Grundwasserfluss (Farbskala: \log_{10} der Darcy-Fliessgeschwindigkeit in m/s). Die Pumpenschächte befinden sich an der Position wie in der bestehenden Weströhre. Im oberen Bild ist der Tunnel als dicht und ohne wirksame Pumpenschächte angenommen. Im unteren Bild entwässern die Pumpenschächte das zuströmende Grundwasser. Die Unterschiede im Wasserfluss zwischen den Szenarien mit und ohne Pumpenschächte sind insgesamt gering.

6.3.2 Optimierte Position der Pumpenschächte

In diesem Szenarium wurden die Pumpenschächte so positioniert, dass sie sich in Tunnelabschnitten im Gipskeuper direkt im Anschluss von Aquiferen und Störungen befinden. In dieser Position können die Pumpenschächte das durch Aquifere und Störungen herangebrachte Wasser entwässern und verhindern so das Einfließen dieser Wässer entlang der Tunnelröhre in die EDZ. **Abb. 29** zeigt klar, dass der Wasserfluss in der EDZ im Gipskeuper über große Strecken deutlich reduziert ist.

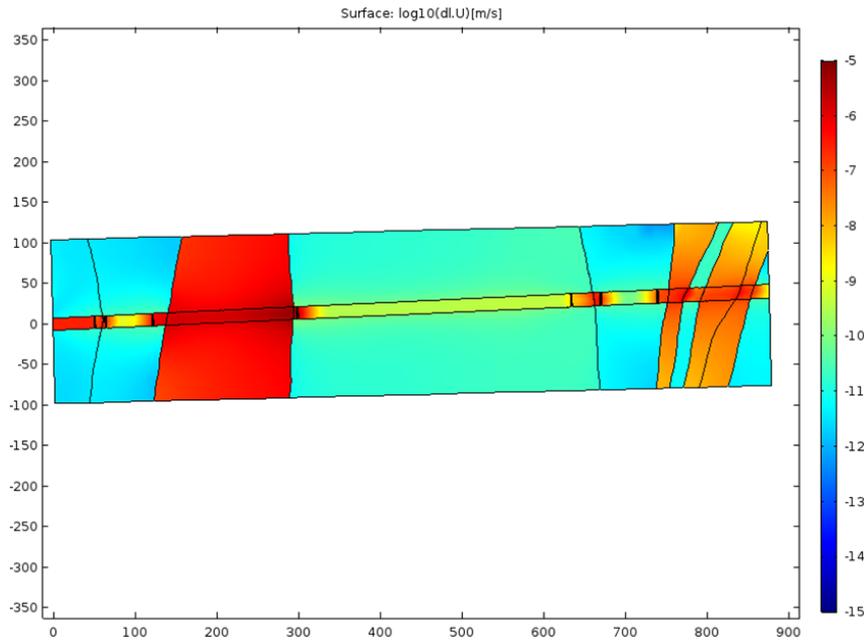


Abb. 29 Szenarium mit optimierter Position von Pumpenschächten. Die Pumpenschächte befinden sich direkt im Anschluss an Aquifere und Störungen in Tunnelabschnitten im Gipskeuper. Die Pumpenschächte entwässern das durch Aquifere und Störungen herangebrachte Grundwasser und verhindern ein Eindringen dieser Wässer in die EDZ im Gipskeuper. Der Grundwasserfluss in der EDZ im Gipskeuper wird dadurch deutlich reduziert (Farbskala: \log_{10} der Darcy-Fliessgeschwindigkeit in m/s).

6.3.3 Pumpenschächte kombiniert mit Abdichtungsbauwerken

In diesen Szenarien wurden zusätzlich zu den optimal positionierten Pumpenschächten Absperrungsbauwerke berücksichtigt, die sich „Aquitard-seitig“ direkt im Anschluss an die Pumpenschächte befinden. Ein erstes Szenarium geht davon aus, dass die Abdichtungsbauwerke in der Lage sind, gegen das um den Tunnel und in der EDZ strömende Grundwasser vollständig abzudichten. Dazu wurde eine hydraulische Leitfähigkeit des Abdichtungsbauwerks von $1e-12$ m/s gewählt. Ein weiteres Szenarium sieht vor, dass es durch das Abdichtungsbauwerk nicht gelingt, gegen das anströmende Wasser vollständig abzudichten, d. h. ein gewisser Teil kann das Bauwerk um- oder durchströmen. Dies wurde im Modell durch eine höhere (aber gegenüber dem Wert in der EDZ immer noch geringere) hydraulische Leitfähigkeit von $1e-8$ m/s realisiert. Durch die Kombination der Pumpenschächte mit Abdichtungsbauwerken wird der Grundwasserfluss in der EDZ im Gipskeuper erheblich reduziert. Werden die Abdichtungsbauwerke als vollständig dicht angenommen, sind die berechneten Grundwasserflüsse in der EDZ im Gipskeuper gleich groß wie im vom Tunnelbau unbeeinflussten Bereichen des Gipskeupers (Abb. oben), d. h. ein Quellen des Gipskeupers würde theoretisch verhindert werden. Ein vollständig abdichtendes Abdichtungsbauwerk scheint in der Praxis jedoch unrealistisch. Das Szenarium, das ein unvollständig abdichtendes Absperrbauwerk vorsieht, zeigt zwar auch eine deutliche Reduktion des Grundwasserflusses in der EDZ im Gipskeuper (Abb. 30 unten), jedoch ist der Grundwasserfluss ähnlich hoch wie im Szenarium mit optimal positionierten Pumpenschächten ohne Abdichtungsbauwerk.

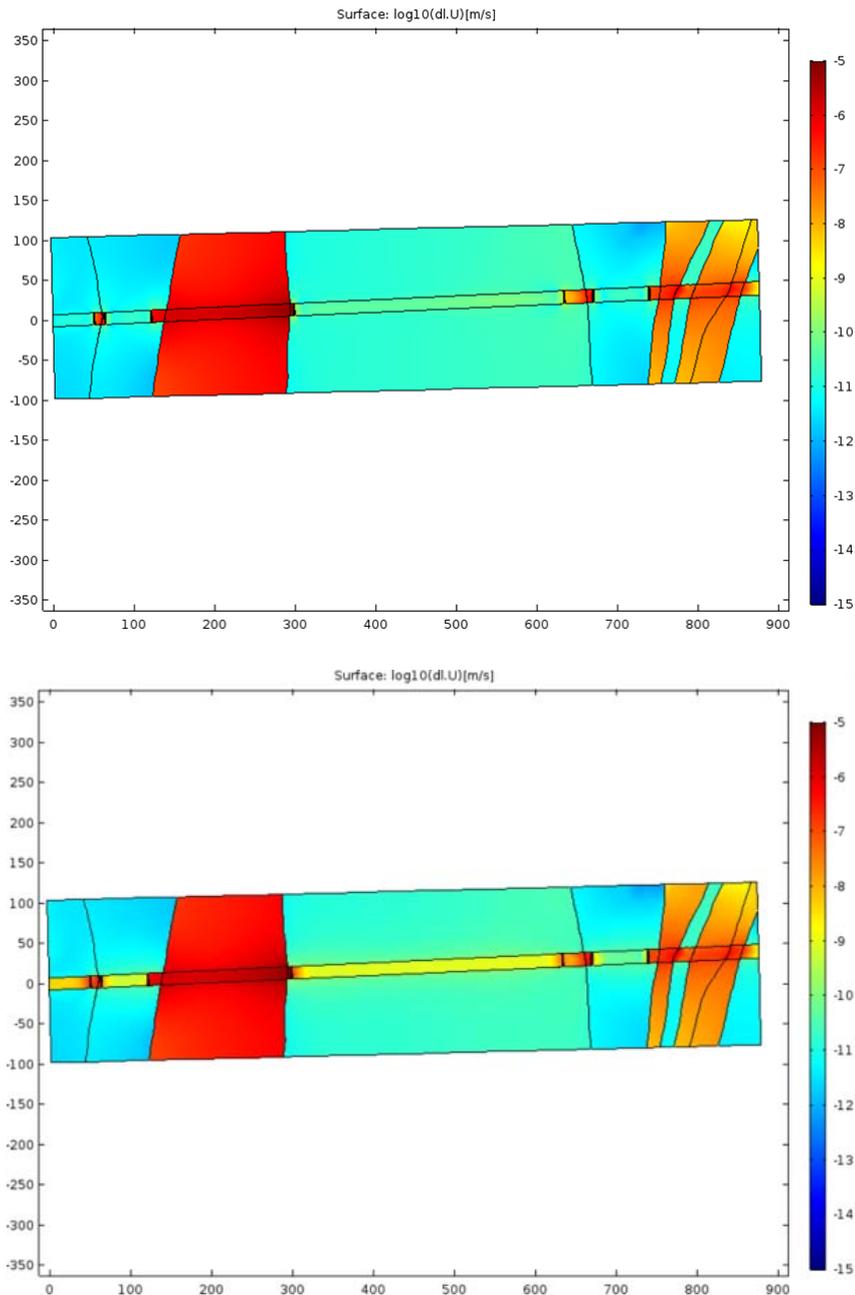


Abb. 30 Szenarien mit Pumpenschächten kombiniert mit Abdichtungsbauwerken. Im oberen Szenarium wird ein vollständiges Abdichten der EDZ durch das Abdichtungsbauwerk angenommen. Der Grundwasserfluss in der EDZ im Gipskeuper ist hier gegenüber dem vom Tunnelbau unbeeinflussten Bereichen des Gipskeupers nicht erhöht (Farbskala: \log_{10} der Darcy-Fliessgeschwindigkeit in m/s), ein Gebirgsquellen findet theoretisch nicht statt. Im unteren Szenarium wird davon ausgegangen, dass es in der Praxis nicht gelingt, die EDZ im Gipskeuper durch ein Abdichtungsbauwerk vollständig abzudichten. Die Grundwasserflüsse in der EDZ im Gipskeuper sind ähnlich wie im Szenarium mit optimal positionierten Pumpenschächten ohne Abdichtungsbauwerk.

6.3.4 Potenzialabsenkung in Aquiferen

Um mögliche Auswirkungen einer Potenzialabsenkung in Aquiferen auf das Quellpotenzial des Gipskeupers zu untersuchen, wurde als Randbedingung am unteren Modellrand im Oberen Muschelkalk ein abgesenktes Festpotenzial von 600 m vorgegeben, sodass das Potenzial im Oberen Muschelkalk in diesem Szenarium ca. 15

m unterhalb des Niveaus der Tunnelsohle liegt. In diesem Szenarium befinden sich die Pumpenschächte an der Position wie in der bestehenden Weströhre. **Abb. 31** zeigt, dass dadurch der Wasserfluss in der EDZ im Gipskeuper gegenüber dem Szenarium ohne Potenzialabsenkung (und ohne optimal positionierte Pumpenschächte; vgl. **Abb. 28**) zwar reduziert wird, jedoch nicht in dem Ausmass, wie im Szenarium mit optimal positionierten Pumpenschächten (ohne Potenzialabsenkung im Oberen Muschelkalk; vgl. **Abb. 29**). Die EDZ im Gipskeuper wird von Grundwasser durchströmt, das von lokalen Aquiferen (Oberer Keuper und Lias) sowie von Störungen geliefert wird. Ein Absenken des Potenzials im Oberen Muschelkalk könnte durch Förderbrunnen in dieser Formation erreicht werden. Ein Absenken der Potenziale in lokalen Aquiferen und Störungen ist in der Praxis jedoch nicht realistisch.

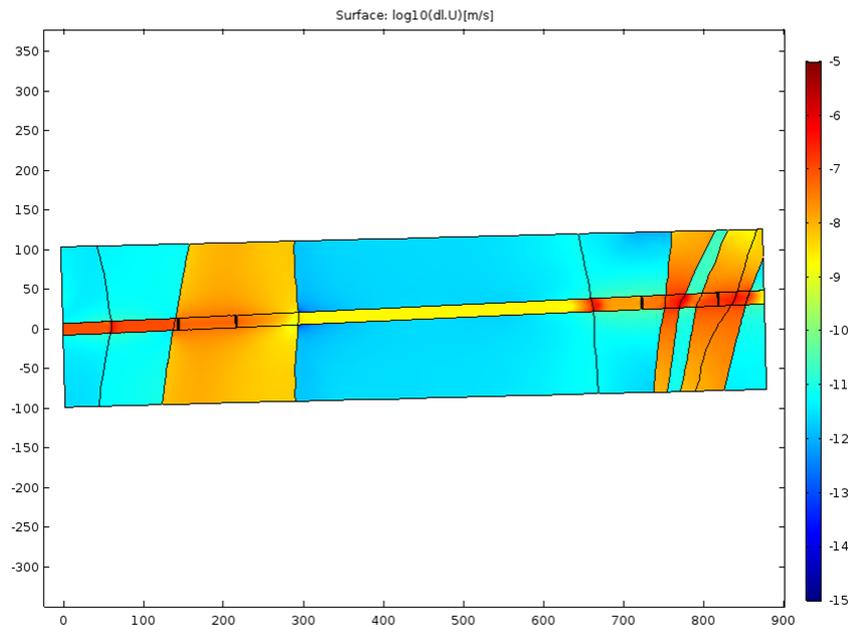


Abb. 31 Szenarium mit Absenkung des hydraulischen Potenzials im Oberen Muschelkalk unterhalb des Niveaus der Tunnelsohle. Gegenüber dem Szenarium ohne Potenzialabsenkung sind die Wasserflüsse in der EDZ im Gipskeuper zwar reduziert, jedoch strömt Wasser aus lokalen Aquiferen und Störungen in die EDZ im Gipskeuper (Farbskala: \log_{10} der Darcy-Fliessgeschwindigkeit in m/s). Das Szenarium mit optimal positionierten Pumpenschächten (ohne Potenzialabsenkung im oberen Muschelkalk) ist gegenüber diesem Szenarium effektiver bezüglich einer Reduktion des Wasserflusses in den quellfähigen Bereichen.

6.3.5 Zusammenfassung Szenarien Grundwasserhaltung

In verschiedenen Modellszenarien wurde mit einem vereinfachten Modell (nur eine Tunnelröhre) untersucht, welche Auswirkungen Systeme der Wasserhaltung auf den Wasserfluss insbesondere in der EDZ im Gipskeuper haben können. Dazu wurden über geeignete Randbedingungen am Tunnel Pumpenschächte simuliert und Absperrbauwerke eingeführt, die die EDZ im Gipskeuper gegen Zuströme aus Aquiferen und Störungen abdichten. Die Auswertung erfolgte über die Berechnung und Betrachtung des Grundwasserflusses (Darcy-Fliessgeschwindigkeit) in einem Horizontalschnitt 1 m unterhalb der Tunnelsohle. Dabei wird die Annahme gemacht, dass ein hoher Grundwasserfluss im Gipskeuper einem hohen Quellpotenzial entspricht (Butscher et al., 2015).

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Pumpenschächte gut geeignet sein können, Wasserzuflüsse in die EDZ im Gipskeuper, und somit das Quellpotenzial, zu reduzieren. Dabei kommt es darauf an, diese Pumpenschächte im Gipskeuper direkt im Anschluss von Aquiferen und Störungen zu installieren. Abdichtungsbauwerke tragen zu einer deutlichen Reduktion des Wasserflusses im Gipskeuper nur dann bei, wenn diese

tatsächlich undurchlässig sind und nicht etwa um- oder durchströmt werden können. Eine Potenzialabsenkung in regionalen Aquiferen (hier Oberer Muschelkalk) durch Pumpbrunnen reduziert in den Simulationen den Wasserfluss im Gipskeuper weniger effektiv als optimal platzierte Pumpenschächte, weil Wasser auch von lokalen Aquiferen (Oberer Keuper und Lias) und aus Störungszonen in die EDZ im Gipskeuper zuströmt. Ein Absenken der Potenziale durch Pumpbrunnen auch in diesen Strukturen dürfte in der Praxis schwer umsetzbar sein.

6.4 Sensitivitätsanalyse

Durch eine Sensitivitätsanalyse werden die Modellparameter ermittelt, die einen grossen Einfluss auf die Modellergebnisse haben. Diese sensitiven Parameter sollten möglichst durch unabhängige Methoden (Feld- und Laborversuche) ermittelt werden. Ist eine genaue Ermittlung der sensitiven Parameter durch Versuche nicht möglich, kann durch eine Sensitivitätsanalyse die Modellunsicherheit quantitativ angegeben werden.

6.4.1 Sensitivitätsanalyse Basismodell

In dieser Studie wurde eine Sensitivitätsanalyse des lokalen Basismodells (vgl. Kap. 3.4) durchgeführt. Dazu wurde als Modellergebnis der durchschnittliche Wasserfluss (Darcy-Fliessgeschwindigkeit) in der EDZ der drei Tunnelröhren in den zwei grossen Gipskeuper-Abschnitten herangezogen (ohne Querschläge, Versuchsdrainagegestollen, vertikaler Abluftschacht). Das Modellergebnis spiegelt also das Quellpotenzial im Gipskeuper wider unter der Annahme, dass das Quellpotenzial hoch ist, wenn der Grundwasserfluss im Gipskeuper gross ist (Butscher et al., 2015). Getestet wurden folgende Parameter:

- $k_{f\text{-raqt}}$: hydraulische Leitfähigkeit regionaler Aquifer (Oberer Muschelkalk)
- $k_{f\text{-laqt}}$: hydraulische Leitfähigkeit lokale Aquifere (Oberer Keuper, Lias)
- $k_{f\text{-aqt}}$: hydraulische Leitfähigkeit Aquitarde (Anhydritgruppe, Gipskeuper, Opalinuston, Unterer Dogger)
- $k_{f\text{-fault}}$: hydraulische Leitfähigkeit Störungszonen
- $k_{f\text{-edz}}$: hydraulische Leitfähigkeit EDZ
- r : Transferrate Tunnelrandbedingung
- inlet : Zufluss über südlichen Modellrand
- a_{fault} : Mächtigkeit Störungszonen

In Tabelle 3 sind die Werte dieser Parameter im Referenzmodell (unverändertes Basismodell) sowie die Variation der Parameter zusammengefasst.

Tab. 3 Werte Parameter und ihre Variation		
Parameter	Wert Referenzmodell	Variation: Multiplikation des Referenzwerts mit...
$k_{f\text{-raqt}}$ (m/s)	1e-6	0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000
$k_{f\text{-laqt}}$ (m/s)	5e-8	0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000
$k_{f\text{-aqt}}$ (m/s)	1e-11	0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000
$k_{f\text{-fault}}$ (m/s)	1e-6	0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000
$k_{f\text{-edz}}$ (m/s)	1e-6	0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000
r (1/s)	0.1	0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000
inlet (m ³ /s)	6e-5	0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10
a_{fault} (m)	1	0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen Abbildungen 32 und 33. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden sowohl die Modellergebnisse (Wasserfluss im Gipskeuper in der EDZ) als auch die Parameterwerte normiert auf das Referenzmodell dargestellt. Ein

normierter Wasserfluss im Gipskeuper von 2 bei einem normierten Parameterwert von 10 bedeutet beispielsweise, dass der Wasserfluss im Gipskeuper 2-mal größer ist als im Referenzmodell, wenn für den untersuchten Parameter der 10-fache Wert des Referenzmodells angenommen wird.

Alle untersuchten Parameter außer die hydraulische Leitfähigkeit der EDZ (k_{f-edz}) und des regionalen Aquifers (Oberer Muschelkalk, k_{f-raqf}) zeigen eine geringe Sensitivität. Unsicherheiten in der Ermittlung oder bei der Annahme dieser Parameter wirken sich also nur geringfügig auf die Modellergebnisse aus. Einen klaren Einfluss auf die Modellergebnisse zeigt die hydraulische Leitfähigkeit des Oberen Muschelkalks. Ist diese beispielsweise um einen Faktor von 100 höher als im Referenzmodell angenommen, ist der durchschnittliche Wasserfluss in der EDZ in den zwei großen Gipskeuper-Abschnitten des Modells rund 1,6-mal größer als im Referenzmodell. Untersuchungen der NAGRA (NAGRA 2002) zeigen, dass für die hydraulische Leitfähigkeit der Oberen Muschelkalks wie im Referenzmodell im Mittel ein Wert von $1e-6$ m/s angenommen werden kann, dass die Variabilität aber mehrere Größenordnungen betragen kann. Eine bessere Ermittlung dieses Parameters würde die Modellsicherheit erhöhen und könnte experimentell durch Feldversuche (Pumpversuche oder hydraulische Packertests) erreicht werden.

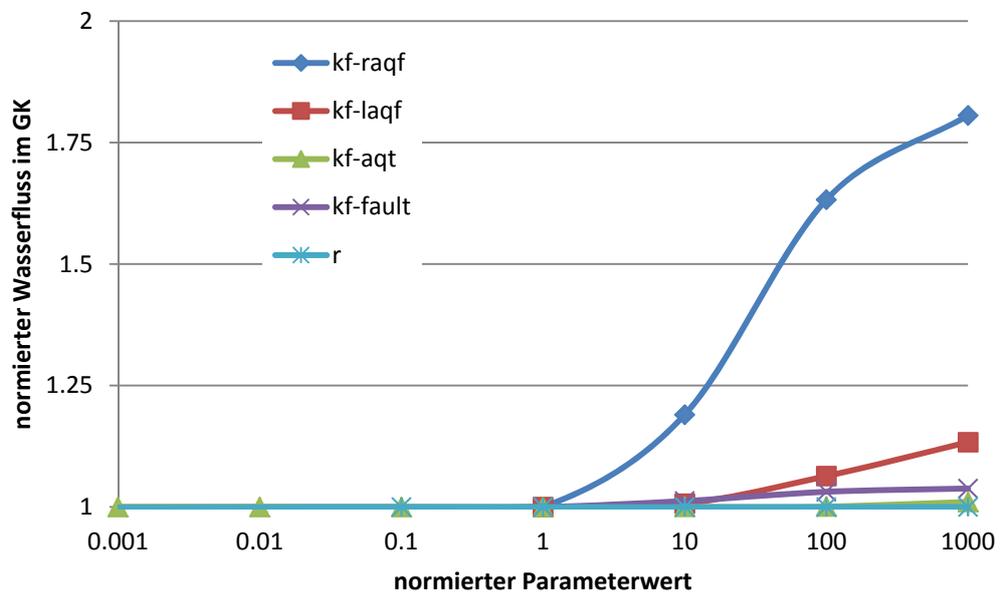


Abb. 32 Änderung der Modellergebnisse des Basismodells (Wasserfluss im Gipskeuper in der EDZ als Mass für das Quellpotenzial) in Abhängigkeit der Modellparameter k_{f-raqf} , k_{f-laqf} , k_{f-aqt} , $k_{f-fault}$ und r .

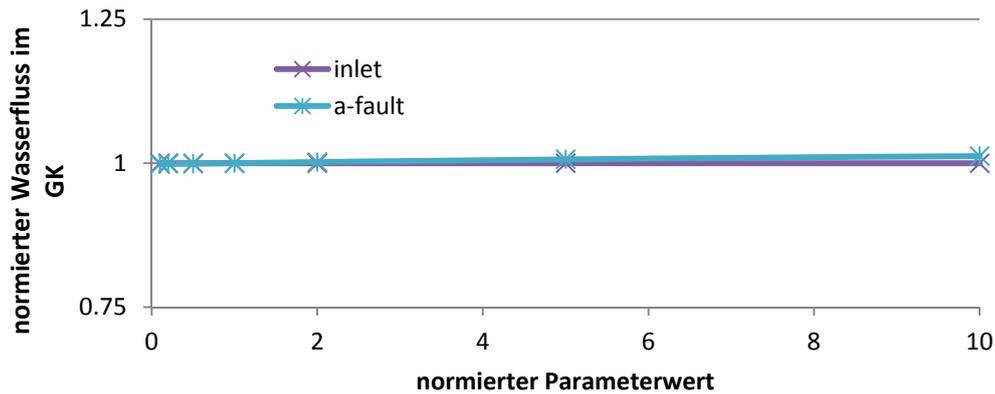


Abb. 33 Änderung der Modellergebnisse des Basismodells (Wasserfluss im Gipskeuper in der EDZ als Mass für das Quellpotenzial) in Abhängigkeit der Modellparameter inlet und a_{fault} .

Den mit Abstand größten Einfluss auf die Modellergebnisse hat die angenommene hydraulische Leitfähigkeit der EDZ. Die Ergebnisse der Sensitivitätsrechnungen zu diesem Parameter wurden bereits oben (vgl. Kapitel 6.2) vorgestellt und in **Abb. 27** dargestellt. Der Wasserfluss in der EDZ im Gipskeuper ändert sich proportional zu diesem Parameter, d. h. eine Änderung dieses Parameters um mehrere Größenordnungen zieht auch eine Änderung des Wasserflusses im Gipskeuper von mehreren Größenordnungen nach sich. Untersuchungen in den Felslaboren Mont Terri (Schweiz) und Tournemire (Frankreich) (Tsang et al., 2005) haben gezeigt, dass die hydraulische Leitfähigkeit der EDZ in Tonsteinen bis zu 6 Größenordnungen gegenüber dem unbeeinflussten Gestein erhöht sein kann. Die entstehende Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit um den Tunnel als Folge des Tunnelbaus ist jedoch ein komplexer Prozess. Die räumliche Verteilung und die hydraulischen Eigenschaften der EDZ im Gipskeuper, sowie Abhängigkeiten von verschiedenen Faktoren (z. B. Ausbildung und Orientierung des Gipskeupers, Vortriebsmethode, Tunnelausbau etc.) wurden bisher noch nicht untersucht. Aufgrund des großen Einflusses der EDZ auf den Wasserfluss im Gipskeuper ist zu erwarten, dass Forschungsarbeiten, die auf eine Quantifizierung der hydraulischen Eigenschaften der EDZ im Gipskeuper zielen, eine Abschätzung und Prognose des Quellrisikos beim Tunnelbau im Gipskeuper stark verbessern würden.

6.4.2 Sensitivitätsanalyse Szenarien Grundwasserhaltung

Zusätzlich zur Sensitivitätsanalyse der Parameter des Basismodells wurde außerdem die Sensitivität folgender Parameter der Szenarienmodelle zur Grundwasserhaltung untersucht:

- h_{drain} : vorgegebenes hydraulisches Potenzial der Pumpenschächte
- h_{OMK} : vorgegebenes hydraulisches Potenzial am unteren Modellrand im Oberen Muschelkalk
- $k_{f-drain}$: hydraulische Leitfähigkeit der Drainagelage
- $k_{f-retain}$: hydraulische Leitfähigkeit der Abdichtungsbauwerke

In Tabelle 4 sind die Werte dieser Parameter, die zugehörigen Referenzmodelle sowie die Variation der Parameter zusammengefasst.

Parameter	Wert (Referenzmodell)	Variation
h_{drain} (m)	600 (Modell mit optimierter Position der Pumpenschächte)	585; 590; 595; 600; 605; 610; 615

h_{OMK} (m)	600 (Modell mit Pumpenschächten wie in bestehender Weströhre)	585; 590; 595; 600; 605; 610; 615
$k_{f-drain}$	1e-3 (Modell mit optimierter Position der Pumpenschächte)	1e-6; 1e-5; 1e-4; 1e-3; 1e-2; 1e-1; 1
$k_{f-retain}$ (m/s)	1e-12 (Modell mit Abdichtungsbauwerken)	1e-12; 1e-11; 1e-10; 1e-9; 1e-8; 1e-7; 1e-6

Zur besseren Vergleichbarkeit wurden wie im vorangegangenen Abschnitt sowohl die Modellergebnisse (Wasserfluss im Gipskeuper in der EDZ) als auch die Parameterwerte – bis auf das hydraulische Potenzial – normiert auf das Referenzmodell dargestellt.

Den Einfluss des hydraulischen Potenzials (h_{drain}), das in den Pumpenschächten als Randbedingung vorgegeben wurde, zeigt **Abb. 34**. Für die Berechnungen wurde das Szenarienmodell herangezogen, in denen eine optimale Positionierung der Pumpenschächte angenommen wird. Das Modellergebnis hängt deutlich vom hydraulischen Potenzial der Randbedingung an den Pumpenschächten ab. Eine Erniedrigung des Potenzials um 15 m bewirkt beispielsweise eine 1,3-fache Erhöhung des Wasserflusses in der EDZ im Gipskeuper. Um mehr Modellsicherheit zu erreichen, sollten die aus den Pumpenschächten abgepumpten Wassermengen (einzeln für jeden Pumpenschacht) im Tunnel gemessen werden. Diese Werte könnten dann anstelle des Potenzials als Randbedingung im Modell vorgegeben werden.

Den Einfluss des hydraulischen Potenzials (h_{OMK}), das an der Modellbasis im Oberen Muschelkalk als Randbedingung vorgegeben wurde, zeigt ebenfalls **Abb. 34**. Für die Berechnungen wurde das Szenarienmodell herangezogen, in denen die Pumpenschächte wie in der bestehenden Weströhre positioniert sind. Die Modellergebnisse hängen deutlich von dieser Randbedingung ab. Messungen des hydraulischen Potenzials im Oberen Muschelkalk durch eine oder mehrere Grundwassermessstellen würden die Modellsicherheit deutlich erhöhen.

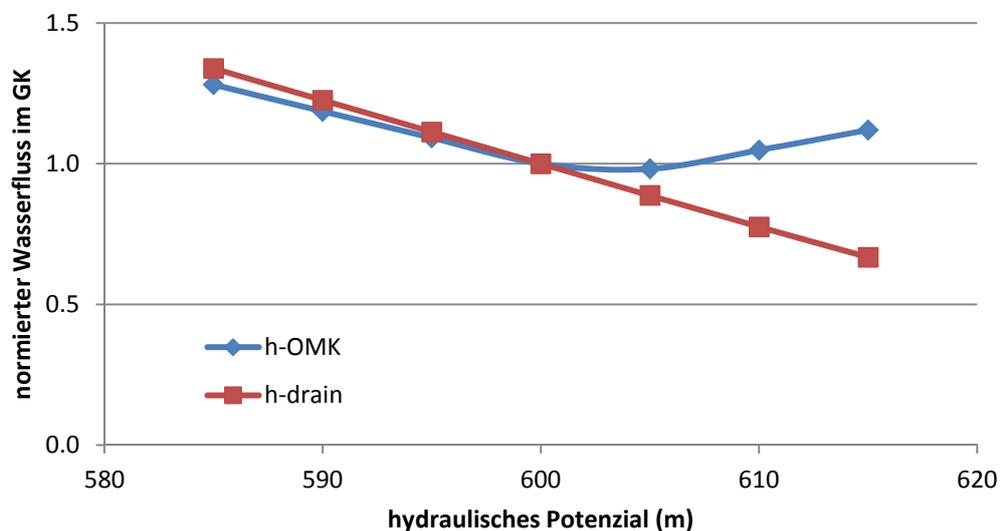


Abb. 34 Änderung der Modellergebnisse der Szenarienmodelle (Wasserfluss im Gipskeuper in der EDZ als Mass für das Quellpotenzial) in Abhängigkeit der Modellparameter h_{drain} und h_{OMK} .

Mit dem Parameter $k_{f-drain}$ wurde der Einfluss der hydraulischen Leitfähigkeit der Drainageschicht um die Tunnelröhre untersucht (**Abb. 35**). Für die Berechnungen wurde wiederum das Szenarienmodell herangezogen, in denen eine optimale Positionierung der Pumpenschächte angenommen wird. Für hydraulische Leitfähigkeiten der

Drainageschicht, die größer sind als im Referenzmodell angenommen ($1e-3$ m/s), ändern sich die Modellergebnisse nur geringfügig, bei geringeren Leitfähigkeiten jedoch deutlich. Wird eine hydraulische Leitfähigkeit der Drainageschicht von nur $1e-6$ m/s angenommen, ist der Wasserfluss in der EDZ im Gipskeuper gegenüber dem Referenzmodell mehr als 3-fach größer. Eine schlechte Drainage um die Tunnelröhre erhöht in den Modellen also den Wasserfluss in der EDZ im Gipskeuper, und somit das Quellpotenzial. Dieses Verhalten kann dadurch erklärt werden, dass am Tunnel anfallendes Wasser, das nicht unzureichend drainiert wird, in der EDZ den Tunnel entlang fließt (auch im Gipskeuper).

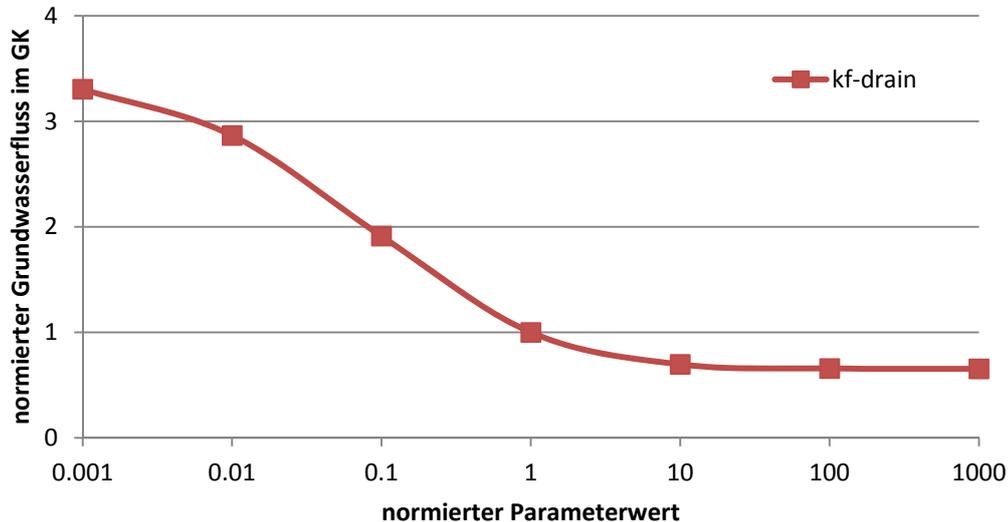


Abb. 35 Änderung der Modellergebnisse des Szenarienmodells mit optimal positionierten Pumpenschächten in Abhängigkeit der angenommenen hydraulischen Leitfähigkeit der Drainageschicht um den Tunnel ($k_{f-drain}$).

Mit dem Parameter $k_{f-retain}$ wurde der Einfluss der hydraulischen Leitfähigkeit der Abdichtungsbauwerke untersucht, die vor und nach grundwasserleitenden geologischen Einheiten um den Tunnel in die EDZ hinein im Modell integriert wurden (Abb. 36). Dadurch können die Auswirkungen untersucht werden, die sich bei einer unvollständigen Abdichtung der EDZ durch diese Bauwerke ergeben. Ab einer hydraulischen Leitfähigkeit, die 1000-mal höher ist als im Referenzmodell angenommen, steigt der Wasserfluss in der EDZ im Gipskeuper deutlich an. Abdichtungsbauwerke scheinen also nur dann zielführend, wenn sie tatsächlich eine gute Abdichtung der Wasserwegsamkeiten entlang der EDZ gewährleisten. Abdichtungsbauwerke in der EDZ, die eine Längszirkulation parallel zum Tunnel in der EDZ verhindern sollen, wurden bisher noch nicht in einem realen Projekt realisiert. Welche Wirkung damit in der Praxis erzielt werden kann, ist unklar.

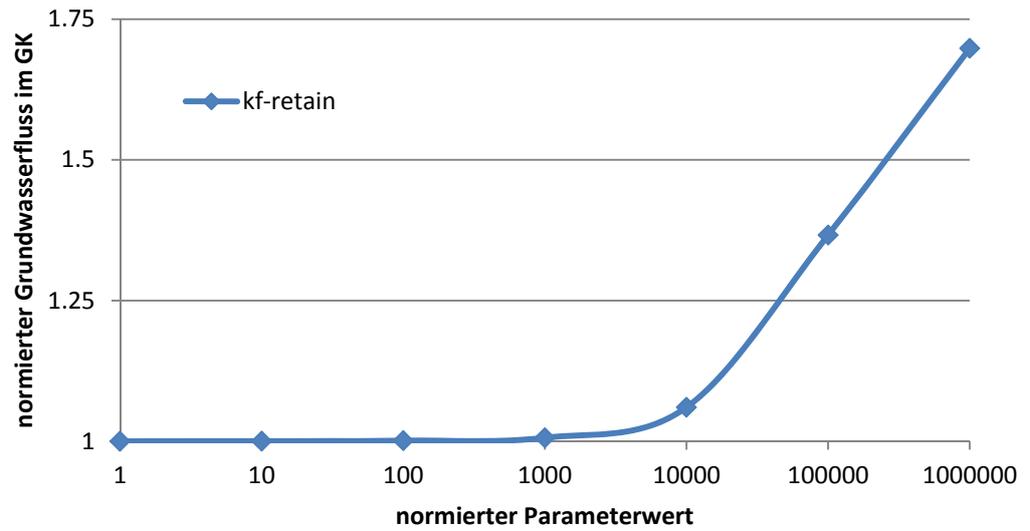


Abb. 36 Änderung der Modellergebnisse des Szenarienmodells mit Abdichtungsbauwerken in der EDZ in Abhängigkeit der angenommenen hydraulischen Leitfähigkeit der Abdichtungsbauwerke ($k_{f-retain}$).

7 Schlussfolgerungen

Auf der Basis von geologischen und hydraulischen 3D-Modellen in verschiedenen Massstäben können die Grundwasserfließregimes und deren Veränderungen infolge eines Tunnelbaus analysiert werden. Der Einfluss solcher Veränderungen der Grundwasserfließregimes, bedingt durch den Tunnelbau, unterschiedlicher Bauverfahren und Systemen zur Grundwasserhaltung ist anhand von Szenarienberechnungen für den Belchentunnel abgeschätzt worden. Der Zusammenhang von Quellerscheinungen im Tunnel, geologischen Lagerungsverhältnisse und Veränderung der Bergwasserzirkulation kann dadurch in verschiedenen Projektphasen besser beurteilt werden.

Die Auswirkungen von Massnahmen zur Reduzierung des Grundwasserflusses zu quellfähigen Horizonten im Tunnelbereich konnten anhand von Modellrechnungen analysiert und auf ihre Wirksamkeit überprüft werden. Infolgedessen ist es in Zukunft möglich, Quellrisiken schon während der Bau- oder Sanierungsplanung zu berücksichtigen.

Mit dem neuentwickelten geologischen 3D-Modell der Belchenregion steht nun ein Werkzeug zur Verfügung, welches die Charakterisierung der Untergrundstrukturen in ihrer Raumlage ermöglicht. Für Detailbetrachtungen können Teilmodelle in beliebiger Grösse extrahiert werden. Bei neuen Erkenntnissen (z. B. Bohrungen) ist eine flexible Weiterentwicklung sowohl räumlich wie inhaltlich möglich.

Das 4x4 km grosse geologische 3D-Modell beinhaltet alle geologischen Grundstrukturen im Umfeld des Belchentunnels. Anhand von 9 Modellhorizonten (u.a. Basis Hauptrogenstein, Basis Staffelegg Fm., Basis Keuper) und aller relevanter Verwerfungen werden die natürlichen Lagerungsverhältnisse wiedergegeben.

Eine detaillierte Strukturanalyse zur Beschreibung der Raumlage der Grundwasserleiter und –stauer liefert die Grundlage für die Entwicklung von hydraulischen Modellen. Das gewählte Vorgehen ermöglichte die Überführung der hydro-geologischen Strukturen in ein hydraulisches Regionalmodell und in das bezüglich Gesteinsquellen sensitive hydraulische Detailmodell „Schuppenzone Süd“.

Mit den Grundwassermodellen wurden Werkzeuge aufgebaut, mit welchen regionale und lokale Grundwasserflüsse und deren Änderung durch den Tunnelbau berechnet und visualisiert werden können. Die Ergebnisse der regionalen Berechnungen zeigen die von der Topographie beeinflusste grossräumige Grundwasserzirkulation, sowie den Einfluss der geologischen Abfolge von Stauern und Aquiferen auf den Grundwasserfluss. Szenarienberechnungen mit dem lokalen hydrogeologischen Modell zum Vergleich verschiedener baulicher Massnahmen können in verschiedenen Projektphasen zur Entscheidungsfindung beitragen.

Der Aufbau von auf die Fragestellungen bezogenen Monitoringsystemen (zusätzliche Messungen der Grundwasserneubildung, des Grundwasserzuflusses in den Tunnel, sowie der lokalen und regionalen Verteilung des hydraulischen Potentials) würden es einerseits erlauben, die entwickelten Modelle zu verifizieren, und andererseits detaillierte Berechnungen von Wasserbilanzen (quantitative Grundwasserzuflüsse zu einzelnen Tunnelabschnitten) durchzuführen, als Grundlage für eine bessere Abschätzung des Quellpotentials von Tunnelabschnitten im Gipskeuper.

In verschiedenen Modellszenarien wurde lokal für die „Schuppenzone Süd“ untersucht, welche Auswirkungen Systeme der Wasserhaltung auf den Wasserfluss, insbesondere in der EDZ im Gipskeuper, haben können. Eine unzureichende Drainage um die Tunnelröhre erhöht in den Modellen den Wasserfluss in der EDZ im Gipskeuper und somit das Quellpotential. Die Ergebnisse deuten weiter darauf hin, dass Pumpenschächte gut geeignet sein können, Wasserzuflüsse in der EDZ zu reduzieren. Dabei spielt die Lage dieser Pumpenschächte eine grosse Rolle: am besten ist eine

Position im Gipskeuper direkt im Anschluss von Aquiferen und Störungen geeignet, Wasserzutritte in den Gipskeuper zu reduzieren. Abdichtungsbauwerke hingegen tragen zu einer deutlichen Reduktion des Wasserflusses im Gipskeuper nur dann bei, wenn diese tatsächlich undurchlässig sind und nicht etwa um- oder durchströmt werden können. Abdichtungsbauwerke in der EDZ, die eine Längszirkulation parallel zum Tunnel in der EDZ verhindern sollen, wurden bisher noch nicht in einem realen Projekt realisiert. Welche Wirkung damit in der Praxis erzielt werden kann, ist daher unklar. Eine Potenzialabsenkung im Oberer Muschelkalk durch Pumpbrunnen reduziert in den Simulationen den Wasserfluss im Gipskeuper weniger effektiv als optimal platzierte Pumpenschächte, weil Wasser auch von lokalen Aquiferen (Oberer Keuper und Lias) und aus Störungszonen in die EDZ im Gipskeuper zuströmt. Ein Absenken der Potenziale durch Pumpbrunnen auch in diesen Strukturen dürfte in der Praxis schwer umsetzbar sein. Um mehr Modellsicherheit zu erreichen, sollten außerdem die aus den Pumpenschächten abgepumpten Wassermengen (einzeln für jeden Pumpenschacht) im Tunnel gemessen werden. Diese Werte könnten dann anstelle des Potenzials als Randbedingung im Modell vorgegeben werden.

Eine Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass die hydraulische Leitfähigkeit der EDZ den mit Abstand größten Einfluss auf die Modellergebnisse hat. Der Wasserfluss in der EDZ im Gipskeuper ändert sich dabei linear mit der hydraulischen Leitfähigkeit der EDZ. Die hydraulischen Eigenschaften der EDZ im Gipskeuper, sowie Abhängigkeiten von verschiedenen Faktoren (z. B. Ausbildung und Orientierung des Gipskeupers, Vortriebsmethode, Tunnelausbau etc.) wurden bisher noch nicht untersucht. Forschungsarbeiten, die auf eine Quantifizierung der hydraulischen Eigenschaften der EDZ im Gipskeuper zielen, könnten die Abschätzung und Prognose des Quellrisikos beim Tunnelbau im Gipskeuper stark verbessern.

Einen klaren Einfluss auf die Modellergebnisse zeigen außerdem die hydraulische Leitfähigkeit des Oberen Muschelkalks, sowie das hydraulische Potenzial in dieser Formation. Eine bessere Ermittlung dieses Parameters würde die Modellsicherheit weiter erhöhen und könnte experimentell durch Feldversuche (Pumpversuche, hydraulische Packertests, Potenzialmessungen) erreicht werden.

Anhänge

I	Lithologische Beschreibung der stratigraphischen Einheiten	65
II	Strukturanalyse im regionalen geologischen 3D Modell	69
II.1	Verwerfungen	69
II.2	Überschiebungen	70
II.3	Modellhorizonte	72

I Lithologische Beschreibung der stratigraphischen Einheiten

a. Kristallines Grundgebirge

Das Kristalline Grundgebirge der Region NW-Schweiz ist am besten durch die Bohrungen der NAGRA beschrieben (Müller et al. 1984 und enthaltene Referenzen). Oberflächliche Aufschlüsse gibt es nur im Grenzbereich zu Deutschland. Hydrologisch handelt es sich um einen Kluft-Grundwasserleiter von regionaler Bedeutung.

b. Perm (bzw. Permo-Karbon)

Das Permo-Karbon wird in der Belchen Region im liegenden des Buntsandsteins vermutet. In Bohrungen in der Nordschweiz und in Aufschlüssen wurden Sandsteine, Arkosen, Ton- und Siltsteine beschrieben (Müller et al. 1984 und enthaltene Referenzen). In der Belchenregion ist das Perm weder aufgeschlossen noch direkt erbohrt worden. Generell gilt das Permo-Karbon in Klüften und in sandigen Schichtpaketen als Grundwasserführend.

c. Buntsandstein

Der Buntsandstein wird in der Belchen Region nicht oberflächlich aufgeschlossen. Er besteht aus Sandsteinen, teils Konglomeraten, Ton- und Siltsteinen (Müller et al. 1984 und enthaltene Referenzen). Der Buntsandstein stellt, meist in Verbindung mit dem kristallinen Untergrund, einen regionalen Grundwasserleiter dar.

d. Unterer Muschelkalk

Der Untere Muschelkalk wird in der Belchen Region nicht aufgeschlossen. Er besteht aus Kalken, Mergeln und Mergelkalken. Die Beschreibungen gehen auf Beobachtungen in Nachbargebieten zurück (Jordan et al. 2011).

e. Anhydritgruppe

Die Anhydritgruppe beginnt im Hangenden mit Dolomitbänken, welche bei Mühlberg (1914) und Pfirter et al. (2007) als „Unterer Dolomit“ bezeichnet werden. Sie werden zum Liegenden hin zunehmend durch Anhydritlagen, Mergel und Tone abgelöst (Mühlberg 1914, Goldschmid 1965 und Meyer und Nyfeler 2007). Innerhalb der Anhydritgruppe liegt der basale Abscherhorizont, über dem sich die Jurafaltung ereignete. Generell gilt die Anhydritgruppe eher als Grundwasserstauer, jedoch kann lokale Verkarstung zu Wasserwegsamkeiten führen (Matousek 1985). Insbesondere der Obere Abschluss der Anhydritgruppe, die Dolomitzone, zeigt im Belechengebiet immer wieder Wasserführungen (Meyer und Nyfeler 2007).

f. Hauptmuschelkalk

Der Hauptmuschelkalk gliedert sich in Trochiten- und Plattenkalk. Bei beiden handelt es sich um gut gebankte meist graue Kalke. Im Trochitenkalk finden sie oft fossilreiche Lagen, insbesondere Echinodermen (z.B. Seelilienstengel), was zum Hangenden hin sukzessive abnimmt (Mühlberg 1914, Goldschmid 1965 und Meyer und Nyfeler 2007r et al. 2007). Der Hauptmuschelkalk, welcher gemeinsam mit dem Trigonodus-Dolomit den regionalen Muschelkalk-Aquifer bildet, ist vor allem entlang von Klüften, Schichtfugen und in Lösungshohlräumen (Karst) wasserführend (Matousek 1985, Meyer und Nyfeler 2007)

g. Trigonodus-Dolomit

Der Trigonodus-Dolomit ist durch beige bis graue zuckerkörnige Dolomitbänke gekennzeichnet und zeigt zusammen mit dem Hauptmuschelkalk oft starke Auslaugungserscheinungen. Auf Grund seiner Neigung zur Verkarstung ist er ein regionaler Karstaquifer (Mühlberg 1914, Goldschmid 1965, Matousek 1985 und Pfirter et al. 2007).

h. Gipskeuper und Lettenkohle

Der Gipskeuper im Belchentunnel wird ausführlich in der Arbeit von Prasad (1970) beschrieben. Die komplexe Abfolge ist gekennzeichnet durch Mergel, Tonstein, Anhydritlagen, Fasergips, Sulfate und einzelne Dolomitbänke. Weitere Beschreibungen finden sich in Mühlberg (1914), Goldschmid (1965) und Pfirter et al. (2007). Generell gilt der Gipskeuper als wasserundurchlässig, jedoch können lokaler Gipskarst und Wegsamkeiten entlang von Störungen zu Wasserführung führen (Matousek 1985, Pfirter et al. 2007).

Die Lettenkohle im Liegenden des Gipskeupers baut sich aus dunklen grauen Mergel und Tonlagen sowie Dolomitbänken auf. Vereinzelt finden sich kleinere Vorkommen von Wasserführung in der Lettenkohle. (Mühlberg 1914, Goldschmid 1965 und Meyer und Nyfeler 2007).

i. Oberer Keuper

Der Obere Keuper umfasst die Oberen Bunten Mergel, den Gansinger Dolomit und den Schilfsandstein, der dem Gipskeuper im Liegenden aufliegt. Die Oberen Bunten Mergel fallen insbesondere durch ihre Rot-, Grau- und Grünfärbung auf. Es handelt sich um dolomitische Mergel mit einzelnen mergeligen Dolomitlagen.

Der Gansinger-Dolomit besteht aus grauen bis beigen gut geschichteten harten Dolomitbänken.

Da die Unteren Bunten Mergel hier nicht ausgebildet sind bzw. sich nicht abtrennen lassen, wird der Gansinger-Dolomit von dem Schilfsandstein direkt unterlagert.

Der Schilfsandstein wird aus gefleckten, grauen, grauschwarzen, grünlichen und rötlichen siltigen, dolomitischen Mergeln bis mergeligen Dolomiten aufgebaut. Die typischen Sandsteine treten nur untergeordnet auf (Mühlberg 1914, Goldschmid 1965 und Meyer und Nyfeler 2007).

Sowohl der Schilfsandstein, in seinen sandigen Passagen, als auch der Gansinger-Dolomit, welcher zu Verkarstung neigt, sind lokal wasserführend. Vereinzelt Dolomitlagen innerhalb der Oberen Bunten Mergeln können ebenfalls gering wasserführend sein. (Meyer und Nyfeler 2007).

j. Staffelegg Fm. (früher: „Lias“)

Die traditionelle Bezeichnung „Lias“ wurde nach Reisdorf et al. (2011) für die Nordschweiz mit der Definition der Staffelegg Fm. abgelöst. Es handelt sich um eine heterogen aufgebaute Schichtenfolge aus spätigen, sandigen oder mergeligen Kalken und untergeordneten Mergelsteinlagen (Mühlberg 1914, Goldschmid 1965 und Meyer und Nyfeler 2007, Reisdorf et al. 2011). Aufgrund seiner lokal straken Zerklüftung, sowie dem Vorkommen von Sandsteinen, bildet er einen Aquifer von lokaler Bedeutung (Matousek 1985, Meyer und Nyfeler 2007).

k. Opalinuston Fm.

Der Opalinuston wird durch eine grösstenteils monotone Abfolge von Tonsteinen gebildet, die teils mergelig, teils siltig ausgebildet sind (Mühlberg 1914, Goldschmid 1965, Wetzel u. Allia 2000 u. 2003 und Meyer und Nyfeler 2007). Aufgrund seiner Undurchlässigkeit für Grundwässer und seiner relativ grossen Mächtigkeit (ca. 100m) ist die Opalinuston Fm. ein wichtiger Aquitard in der Region (Matousek 1995, Jordan et al. 2011).

l. Passwang Fm. (früher: „Unterer Dogger“, u.a. bei Meyer und Nyfeler 2007)

Die Bezeichnung Passwang Fm. hat den älteren Namen „Unterer Dogger“ abgelöst. Die Grenze zum Liegenden, dem Opalinuston, bilden eisenschüssige Mergel. Nach oben

folgen dann Wechsellagerungen von Mergeln, Tonsteinen, Mergelkalken und Sandklagen. Oft treten biodetritische Kalke und Eisenoolithe auf (Mühlberg 1914, Goldschmid 1965 und Meyer und Nyfeler 2007). Im Allgemeinen gilt die Passwang Fm. als Geringleiter bzw. Nichtleiter in Bezug auf die Wasserführung. Zerklüftete Partien können untergeordnete Wasserwegsamkeiten ermöglichen (Matousek 1985, Meyer und Nyfeler 2007).

m. Hauptrogenstein Fm.

Die Hauptrogenstein Fm. wird durch hellgelbe bis graue oolithische Kalke aufgebaut. Daneben finden sich Mergel und vor allem biodetritische Kalke (Mühlberg 1914, Gonzales u. Wetzel 1993, Goldschmid 1965 und Meyer und Nyfeler 2007). Morphologisch fällt er durch die Bildung steiler Geländestufen wie Homberg, Chambersberg, Belchenflue, Geissflue und Lauchflue auf. Obwohl die Wasserdurchlässigkeit lokal sehr verschieden sein kann, gilt er als einer der wichtigsten Aquifere der Region. Dies begründet sich in guten Durchlässigkeiten durch seine ausgeprägte Klüftung, entlang von Schichtfugen und aufgrund von lokalen Karstbildungen (Matousek 1985, Meyer und Nyfeler 2007)

n. Ifenthal Fm. (bei Pfirter et al. (2007) „Callovien“ u. „Oxfordien“)

Der „Obere Dogger“ und die Grenze zum Malm wurden in der Arbeit von Bitterli-Dreher (2012) stratigraphisch neu gegliedert und benannt. Die Ifenthal Fm. umfasst 5 Member und löst die bisherige Gliederung im Arbeitsgebiet von Oxfordian, Callovien und Varians Schichten ab (**Abb. 11**).

<i>Erläuterungen Blatt 1089 Aarau des Geologischen Atlas der Schweiz (Jordan, et al. 2012)</i>	<i>Geologische Karte der Umgebung von Aarau, 1:25000 (Geologische Spezialkarte 45, 1908)</i>
Ifenthal-Formation (Bitterli, 2012)	Oxfordien, Callovien und Varians- Schichten
Schellenbrücke-Bank Herznach-Member	Lamberti-Cordatus-Schichten und Athleta- und Anceps-Schichten
Unter-Erli-Bank Ängistein-Member	Macrocephalus-Schichten (gegen Westen Callovien-Tone)
Bözen-Member	
Saulcy-Member	
Anwil-Bank Schelmenloch-Member	Varians-Schichten

Abb. 11 Gliederung der Ifenthal Fm. im Vergleich zur traditionellen Einteilung im Arbeitsgebiet (Bitterli-Dreher 2012).

Lithologisch kennzeichnen eisenschüssige Mergelkalke und Kalke sowie feinspätige Kalkarenite und Mergel, teils mit Knauerlagen oder mergeligen Tonen, die Formation. Für Beschreibungen der oberflächlichen Ausbildung siehe Goldschmid (1965), Mühlberg (1914) und Pfirter et al. (2007). Letzterer beschreibt insbesondere auch die Sondierbohrungen im Belchengebiet. Hydrologisch gilt die Ifenthal Fm. eher als Nicht- bis Geringleiter (Matousek 1985, Meyer und Nyfeler 2007)

o. Wildeggen Fm. (umfasst Birmenstorfer Schichten und Effinger Schichten)

Die Birmenstorfer Schichten sind als graubraune, teils mergelige Kalke und Mergelkalke ausgebildet (Mühlberg 1915, Goldschmid 1964, Meyer und Nyfeler 2007). Die Birmensdorfer Schichten können teilweise ein wichtiger Aquifer sein (Jordan et al. 2011), zeigen aber im Belchengebiet nur eine begrenzte Wasserführung (Meyer und Nyfeler 2007).

Die Effinger Schichten werden durch graue Mergel und Mergelkalke aufgebaut, die nach oben hin zunehmend mergelig-tonig werden (Mühlberg 1915, Goldschmid 1964, Meyer und Nyfeler 2007). Durch tiefgründige Zerklüftung und oberflächliche Verwitterung

können die Effinger Schichten eine geringe Wasserführung aufweisen (Matousek 1985, Meyer und Nyfeler 2007).

p. Villingen Fm. und Burghorn Fm.

Beide Formationen kommen nur südlich des Belchentunnels vor und werden nicht im Tunnel angefahren.

Die Villingen Fm. gliedert sich in Geissberg-Schichten (Mb.), Crenularis-Schichten (Mb.), Wangen-Schichten (Mb.), Letzi-Schichten (Mb.). Die Burghorn Fm., im Hangenden der Villingen Fm., unterteilt sich in die Badener-Schichten (Mb.) und Wettinger-Schichten (Mb.) (nach Gygi 2000).

Die Geisberg-Schichten stellen den Übergang von den Effinger-Schichten der Wildegg Fm. zur Villingen Fm. dar. Sie zeichnen sich durch eine grössere Anzahl von Kalkbänken aus und leiten über in die massigeren Kalke der hangenden Schichten und bilden so morphologische Geländestufen.

Nach Goldschmidt (1965) können im Gebiet südlich des Belchentunnels die Badener-Schichten nicht von den Wangener-Schichten der Villingen Fm. unterschieden werden. Die Letzi-Schichten sind für dieses Gebiet nicht beschrieben.

II Strukturanalyse im regionalen geologischen 3D Modell

In der Strukturanalyse wird die Raumlage der Modellfläche ermittelt. Da die meisten Modellflächen unregelmässige Topologien haben, werden insbesondere die allgemeinen topologischen Trends diskutiert, wobei die Modellflächen nach Verwerfungen und Modellhorizonten getrennt untersucht werden.

Die einzelnen Modellflächen bestehen aus unregelmässigen triangulierten Netzwerken. Dies bedeutet, dass die Modellflächen aus einer Vielzahl von einzelnen ebenen Dreiecken aufgebaut sind. Zur Strukturanalyse kann die Raumlage jedes einzelnen Dreiecks ermittelt werden, in der gesamthaften Betrachtung ergibt sich dann der topologische Trend für eine Modellfläche oder Gruppe gleichartiger Modellflächen. Zur Beschreibung der räumlichen Ausrichtung von geologischen Flächen wird in der Geologie auch von Streichen (Streichrichtung oder Streich-Azimut) und (Ein-)Fallen (Fallrichtung oder Fall-Azimut) gesprochen. Der Fallwinkel gibt die Neigung der Schichten gegenüber einer horizontalen Fläche an (**Abb. 12**)

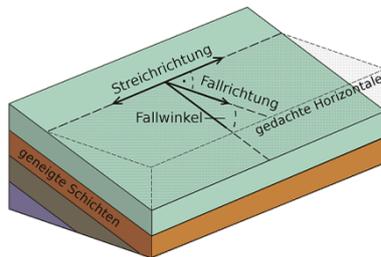


Abb. 12 Streichen und (Ein-)Fallen zur Definition der räumlichen Ausrichtung einer geologischen Fläche. Die Fallrichtung liegt senkrecht auf der Streichrichtung (auch Streich-Azimut)

II.1 Verwerfungen

Querstörungen (auch Transformstörungen oder Blattverschiebungen)

Im Belchengebiet streichen die Querbrüche hauptsächlich gegen N bis NO, wobei die NNO-Richtung dominiert. Gegen NO streichende Querbrüche treten vor allem im Nordwesten und im zentralen Bereich des Modells in Erscheinung. Beide Störungsrichtungen interferieren teilweise stark im Bereich des Tunnels.

Generell sind die Querbrüche als vertikale bis semi-vertikale (Einfallswinkel 85° - 90°) Modellflächen modelliert. Die Darstellung der Querstörungen und das Rosendiagramm, bezogen auf die Streichrichtung der Querbrüche, zeigt, dass die Ausbildung der Querbrüche in NNO-Richtung (Streich-Azimut $22,6^{\circ}$) überwiegt (**Abb. 13**)

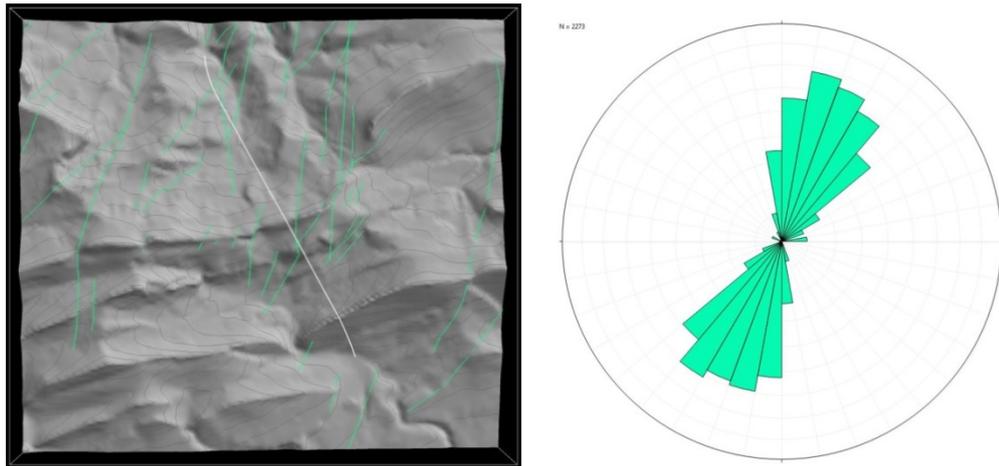


Abb. 13 Querbrüche (grün, Topographie grau) in der Modellansicht von oben (links) und Ausrichtung der Querbrüche im Rosendiagramm (rechts); gezeigt ist die Häufigkeit der modellflächeninternen Triangulationen bezogen auf deren Streichrichtung

II.2 Überschiebungen

Wie schon in Kapitel 3.2.1 „Tektonischer Bau im Belchengebiet“ beschrieben, kommt es in der Belchen-Region zu einem Umbiegen der Streichrichtung der nördlichen Überschiebungsfrent des Faltenjuras von ONO nach WNW. Dieses Umbiegen findet sich auch im Nordwesten des Arbeitsgebiets und verliert sich sukzessive nach Süden, wo die ONO Richtung vorherrscht (vgl. **Abb. 8**).

Trotz der Trendänderung im Nordwesten dominiert eine generelle Einfallsrichtung nach SSO (165.4°) (**Abb. 14 a**) Wie für die meisten Überschiebungen im Faltenjura typisch zeigen die einzelnen Überschiebungen im Norden ein stärkeres Einfallen und verflachen sukzessive nach Süden (listrische Störungsform). Auch zeigt sich, dass einzelne Überschiebungen nach Norden geneigt sind (Einfallsrichtung NNW). Diese ist bedingt durch die Ausbildung von Rück-überschiebungen und der nachträglichen Faltung von ursprünglich süd-fallenden Überschiebungen.

In der nach östlich und westlich des Belchentunnels getrennten Betrachtung ändert sich in Bezug auf die generelle Einfallsrichtung (SSW) nichts. Jedoch zeigt sich eine deutliche Änderung im Erscheinungsbild der Überschiebungen. Auch ist die nachträgliche Faltung einzelner Überschiebungen östlich des Tunnels deutlich schwächer ausgeprägt als westlich. Dies spiegelt sich auch in der deutlich stärker elongierten Form der Konturierung der Flächenpole westlich des Tunnels gegenüber der Konturierung östlich des Tunnels wider (**Abb. 14 b und c**).

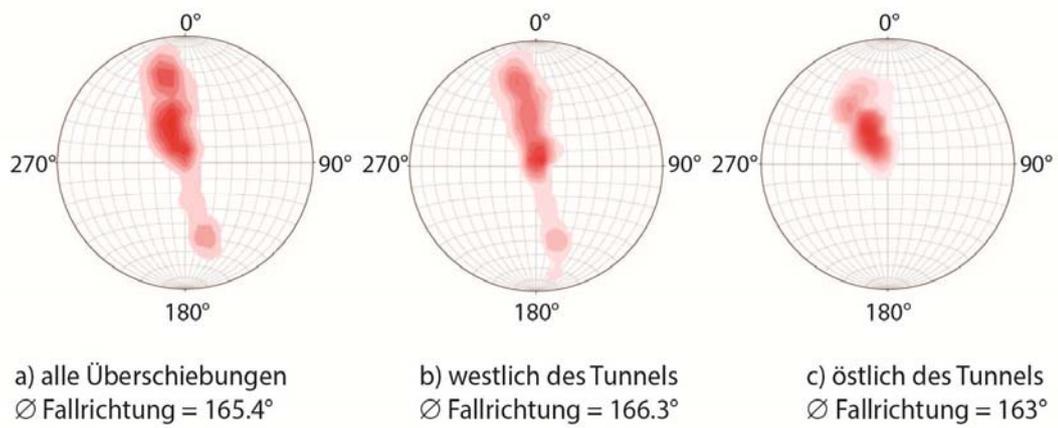


Abb. 14 Raumlage modellierter Verwerfungsflächen. Darstellung der Konturierung der Flächenpole in der stereographischen Projektion (z. B. Eisbacher 1996), gesamthaft und getrennt nach westlich und östlich des Tunnels.

II.3 Modellhorizonte

Die allgemeine Orientierung der Schichtlagerung wird exemplarisch für die 3 modellweit erstellten Horizonte aufgezeigt (siehe auch **Tab. 11**).

Tab. 11 Im Modell umgesetzte Lagerung geologischer Horizonte

Grenzfläche	„best fit“ Streichrichtung durch die Flächenpole (hier: Fallrichtung der SSO fallenden Horizonte)		
	generell	westlich des Tunnels	östlich des Tunnels
Basis Hauptrogenstein Fm	166°	161°	163°
Basis Staffelegg Fm.	170°	171°	165°
Basis Keuper	166°	179°	159°

Für die **Grenzfläche Basis Hauptrogenstein Fm.** (=Top Passwang Fm.) zeigt sich, dass die Schichtlagerung generell WSW – ONO streicht (Streich-Azimut 76°), das generell Einfallen ist gegen SSO (166°) gerichtet und variiert nur um wenige Grad. Die durch Faltung nach NNW (256°) geneigte Bereiche belegen eine generell zylindrische Ausbildung der Faltung.

Die Faltenachsen neigen sich beidseits des Tunnels leicht mit jeweils 4° vom Tunnel weg, d. h. westlich des Tunnels nach Westen und östlich des Tunnels nach Osten. Die punktuellen Maxima (**Abb. 15**), sowohl westlich wie östlich des Tunnels, zeigen an, dass es sich strukturell eher um eine Kofferfalte handelt.

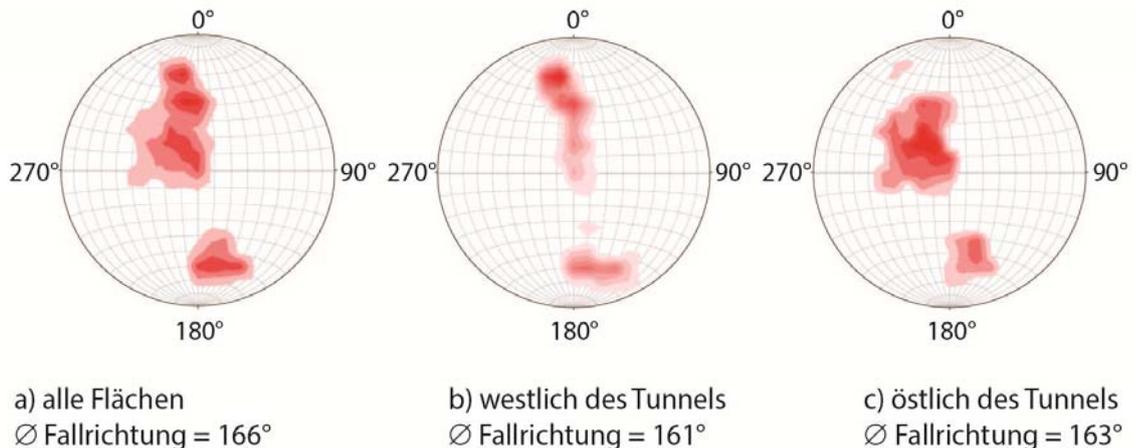


Abb. 15 Raumlage der Grenzfläche Basis Hauptrogenstein. Darstellung der Konturierung der Flächenpole in der stereographischen Projektion (z.B. Eisbacher 1996), gesamthaft und getrennt nach westlich und östlich des Tunnels.

Die **Grenzflächen Basis Staffelegg Fm.** (=Top Keuper) streichen generell WNW-ONO (Streich-Azimut 80°). Die Fallrichtung ist generell gegen SSO (170°). Durch Faltung sind einige Bereiche gegen NNW (350°) geneigt (**Abb. 16**). In der differenzierten Betrachtung östlich und westlich des Tunnels zeigen sich kleine Unterschiede. Westlich des Tunnels ist die Faltung der Einheiten stärker und kontinuierlich ausgeprägt, wodurch die

Verteilung im Stereonetz eine fast durchgängige Konturierung zeigt im Gegensatz zu einem eher einfachen Maxima östlich des Tunnels.

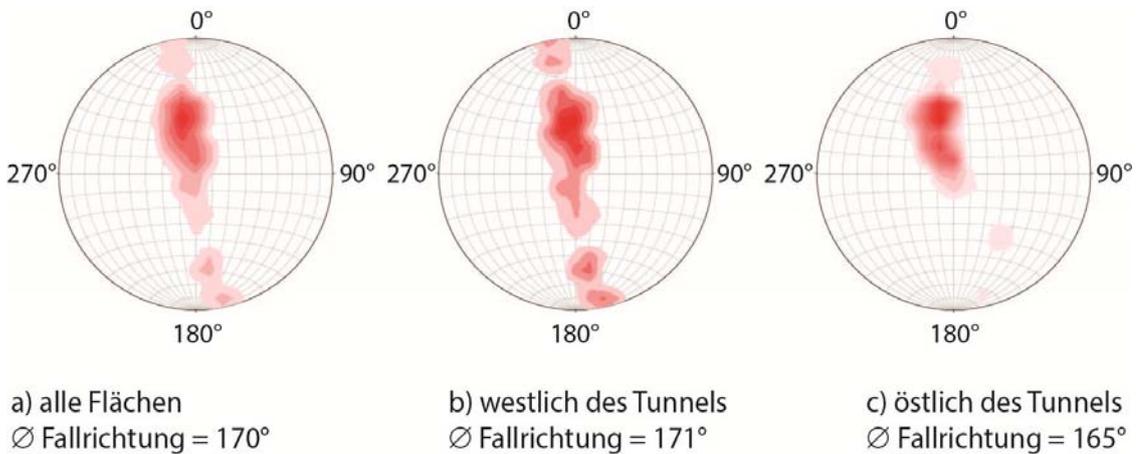


Abb. 16 Raumlage der Grenzfläche Basis Staffelegg Fm.. Darstellung der Konturierung der Flächenpole in der stereographischen Projektion (z.B. Eisbacher 1996), gesamthaft und getrennt nach westlich und östlich des Tunnels.

Für die **Grenzfläche Muschelkalk zu Keuper** (=Top Trigonodusdolomit) zeigt sich, dass die Schichtlagerung ebenfalls generell gegen ONO-streicht (Streich-Azimut 76°), das generell Einfallen ist gegen SSO (166°) gerichtet (**Abb. 17**).

Die differenzierte Betrachtung östlich und westlich des Tunnels zeigt für die Konturierung der Flächenpole jeweils ein generelles eher konzentriertes Maximum. Dies weist auf eine geringe Rolle von Faltungen gegenüber den gestaffelten Überschiebungen der Schuppenzone hin. Unterschiede finden sich in der Streichrichtung der Schichtlagerung, welche östlich des Tunnels eher bei ONO bis NO liegt (Streich-Azimut 69°), während westlich des Tunnels die Schichten fast exakt O-W streichen (Streich-Azimut 89°).

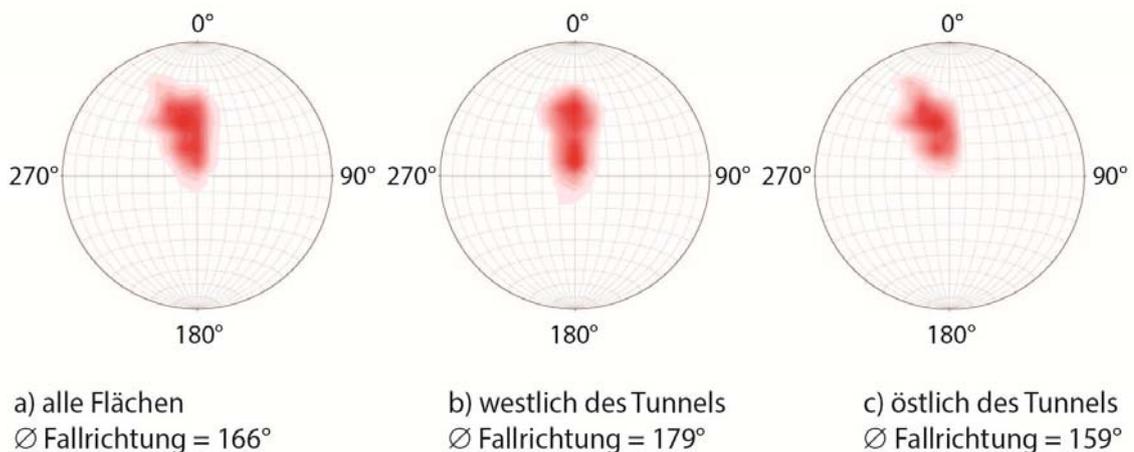


Abb. 17 Raumlage der Grenzfläche Top Muschelkalk. Darstellung der Konturierung der Flächenpole in der stereographischen Projektion (z.B. Eisbacher 1996), gesamthaft und getrennt nach westlich und östlich des Tunnels.

Glossar

Begriff	Bedeutung
AGT	Arbeitsgruppe Tunnelforschung
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BGA	Baugrundarchiv
DATEC	Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
EDZ	Excavation Damaged Zone
FGU	Fachgruppe Untertagbau)
Fm	Formation
GK	Gipskeuper
GOCAD	Geological Objects Computer Aided Design
GOK	Geländeoberkante
Li	Lias
OPA	Opalinuston
Mb	Member (?)
NAGRA	Nationale Gesellschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NO	Nordost
NNO	Nordnordost
NNW	Nordnordwest
NW	Nordwest
OK	Oberer Keuper
OMK	Oberer Muschelkalk
ONO	Ostnordost
OPA	Opalinuston
SNF	Schweizerischer Nationalfonds
SSO	Südsüdost
WNW	Westnordwest.
WSW	Westwärts
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation

Literaturverzeichnis

-
- [1] C. Amstad und K. Kovári (2001), „**Untertagbau in quellfähigem Fels**“, ASTRA-Forschungsauftrag 52/94, Institut für Geotechnik, Professur für Untertagebau, ETH Zürich
-
- [2] Anagnostou, G. (2007), **Design uncertainties in tunnelling through anhydritic swelling rocks**. Felsbau – Rock and Soil Engineering, 25, No. 4, 48-54
-
- [3] H. Bartholet (1964), „**Geologie des Tafel- und Faltenjuras zwischen Eptingen und Oltingen**“, Tätigkeitsberichte der Naturforschenden Gesellschaft Baselland. Liestal . 23 (1961-1963)
-
- [4] P. Bitterli-Dreher (2012). „**Die Ifenthal-Formation im nördlichen Jura**“ Swiss Bull. angew.Geol. Vol. 17/2, 2012, S. 93-117
-
- [5] BGA Eptingen 88 (1964), „**Vertikalprofil, Text und Fotodokumentation Luftschaft (Kamin 2)**“ , (Autor unbekannt Schweizerische Eidgenossenschaft (1960)
-
- [6] Blümling, P., Bernier, F., Lebon, P., Martin, C.D., 2007. „**The excavation damaged zone in clay formations – time-dependent behaviour and influence on performance assessment**“. Physics and Chemistry of the Earth 32, 588–599
-
- [7] Butrón, C., Gustafson, G., Fransson, Å., Funehag, J., 2010. „**Drip sealing of tunnels in hard rock: A new concept for the design and evaluation of permeation grouting**“. Tunnelling and Underground Space Technology 25, 114–121.
-
- [8] Butscher, C. 2012. „**Steady-state groundwater inflow into a circular tunnel**“. Tunnelling and Underground Space technology 32, 158–167
-
- [9] Butscher, C., Einstein, H.H., Huggenberger, P., 2015. „**Darcy flux as hydrological indicator for the swelling potential of clay-sulfate rocks in tunneling**“. Engineering Geology 197, 11–19.
-
- [10] Delleur, J.W. (Hrsg.), 1999. „**The handbook of groundwater engineering**“. CRC press, Boca Raton (FL), Springer.
-
- [11] G.H. Eisbacher (1996), „**Einführung in die Tektonik**“ (2.Auflage), Enke Verlag, 374 s
-
- [12] H.O. Goldschmidt (1965), „**Die Geologie des Faltenjuras zwischen Olten und Unterem Hauenstein**“, Ph.D. thesis, Geol.-Paläont. Inst. Univ. Basel, Tätigkeiten der Naturforschenden Gesellschaft Baselland, Band 24
-
- [13] R. Gonzalez und A. Wetzel (1996), „**Stratigraphy and paleogeography of the Hauptrogenstein and Klingnau Formations (middle Bajocian to late Bathonian), northern Switzerland**“ Eclogae Geologicae Helvetiae, 89: 695-720
-
- [14] B. Gürler, L. Hauber und M. Schwander (1987) „**Die Geologie der Umgebung von Basel**“, Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz, Landeshydrologie und-geologie und der Schweizerischen Geologischen Kommission. NF 160
-
- [15] R. Gygi (2000), „**Integrated Stratigraphy of the Oxfordian and Kimmeridgian (Late Jurassic) in Northern Switzerland and Adjacent Southern Germany**“ Basel: Birkhäuser Verlag
-
- [16] T. Herold (1992), „**Die Geologie der „Eptinger Bucht“ unter besonderer Berücksichtigung der Sedimentologie des Hauptmuschelkalks**“, Diplomarbeit GPI, Universität Basel.
-
- [17] Huggenberger, P., Butscher, C., 2012. **Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel**. Berichte der Forschung im Strassenwesen Nr. 1383. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen, Bern.
-
- [18] Huggenberger, P., zechner, E., Dresmann, H., 2012. „**Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel**“. Berichte der Forschung im Strassenwesen Nr. 1390. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen, Bern.
-
- [19] A. Isler, F. Pasquier und M. Huber (1984), „**Geologische Karte der zentralen Nordschweiz**“, 1:100'000. Geologische Spezialkarte 121
-
- [20] P. Jordan (2007), „**Sammelprofile der Sedimentgesteine der verschiedenen geologisch-tektonischen Einheiten der Schweiz**“, Nagra Arb. Ber. NAB 07-35. Nagra, Wettingen, Schweiz
-
- [21] P. Jordan, H.R. Graf, M. Eberhard, J. Jost, D.Kälin, und P. Bitterli-Dreher (2011), „**Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, Blatt 1089 Aarau (Atlasblatt 135), Erläuterungen**“, Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Wabern (Bern)
-
- [22] H. Lauscher (1970), „**Grundsätzliches zur Tektonik des Rheingrabens**“, In: Graben Problems (Ed. by Illies. J.H. & Müller. St.), 79-86. Schweizerbart. Stuttgart.
-

-
- [23] H. Laubscher (1982), „**Die Südostecke des Rheingrabens ein kinematisches und dynamisches Problem**“, *Eclogae geol. Helv.* 75,101-116.
-
- [24] H. Laubscher und T. Noack (1997), „**The deep structure of the Basel Jura**“, In: Pfiffner, O.A., Lehner, P., Heitzmann, P., Mueller, S., Steck, A. (Eds.), *Deep structure of the Swiss Alps. Results of NRP 20.* Birkhäuser, Basel, pp. 54-58.
-
- [25] H. Laubscher (2008a), „**Hundert Jahre Abschermodell für den Faltenjura – seine Beziehung zum Tafeljura aus heutiger Sicht**“, *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F.* 90, 19–43, 11 Abb., Stgt. 25. 3.
-
- [26] H. Laubscher (2008b), „**100 years Jura décollement hypothesis: how it affects Steinmann's (1892) "Schwarzwaldlinie"**“, *International Journal of Earth science*, Vol. 97, Issue 6, pp 1231–1245
-
- [27] H. Laubscher (2008c), „**geol. Karten des Belchengebiets**“, (unpubliziert)
-
- [28] F. Matousek (1885) *Hydrogeologie und Hydrogeochemie des Waldenburger Tales (Baselbieter Jura)*. Diss. ETH Zürich
-
- [29] Meyer, M. und Nyfeler, J. (2007), „**Nationalstrasse N2, Sanierungstunnel Belchen**“ STB, Geologisch-geotechnischer Bericht (incl. Bericht, geologische Karte und Profile)
-
- [30] F. Mühleberg (1914), „**Geologische Karte des Hauenstein-Gebietes, Waldenburg-Olten**“, 1:25'000, mit Profil-Tafel. U. Erl. Geol. Spez.-Karte 73.-Schweiz. Geol. Komm.,Basel
-
- [31] W.H. Müller, M. Huber, A.Isler und P. Kleeboth (1984), „**Erläuterung Zur Geologischen Karte der zentralen Nordschweiz**“, 1:100.000". - Nagra Tech. Ber. NTB 84-25. Nagra, Baden.
-
- [32] NAGRA, 2002. Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungen. NAGRA Technischer Bericht (NTB) 02-03, NAGRA, Baden.
-
- [33] T. Noack (1995), „**Thrust development in the eastern Jura Mountains related to pre-existing extensional structures**“, *Tectonophysics* 252, 419–431
-
- [34] A.G. Reisdorf, A.Wetzel, R. Schlatter und P. Jordan (2011), „**The Staffelegg-Formation: a new stratigraphic scheme for the Early Jurassic of northern Switzerland**“ *Swiss J. Geosci.*, 104: 97–146, Basel.
-
- [35] Sato, T., Kikuchi, T., Sugihara, K., 2000. In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan. *Engineering Geology* 56, 97–108.
-
- [36] H. Schmassmann (1964), „**geol. Aufnahme Tunnelröhre Ost**“, BGA Eptingen 46
-
- [37] H. Schmassmann (1964), „**geol. Aufnahme Tunnelröhre West**“, BGA Eptingen 65
-
- [38] H. Schmassmann (1965), „**Stratigraphische Tunnelprofile – Keuper**“, (BGA Eptingen 84).
-
- [39] Toth, J., 2009, Gravity flow of groundwater: a geologic agent: *Gravitational Systems of Groundwater Flow: Theory, Evaluation, Utilization*, p. 91-127.
-
- [40] Tsang, C.F., Bernier, F., Davies, C., 2005. Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays - in the context of radioactive waste disposal. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 42 (1), 109–125.
-
- [41] Vonderschmitt (1965), „**Geol. Karte Bereich Belchentunnel**“, (1:5000) (unpubliziert), Vertikalprofil und Text Luftschaft (Kamin 1). Baugrundarchiv (BGA) BL- Eptingen/73
-
- [42] A. Wetzel und V. Allia (2000), „**The significance of hiatus beds in shallow-water mudstones: an example from the middle Jurassic of Switzerland**“, *Journal of Sedimentary Research*, 80: 170-180
-
- [43] A. Wetzel und V. Allia (2003), „**Der Opalinuston in der Nordschweiz: Lithologie und Ablagerungsgeschichte**“ *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 96: 451-469.
-
- [44] A. Wetzel und V. Allia (2000), „**The significance of hiatus beds in shallow-water mudstones: an example from the middle Jurassic of Switzerland**“, *Journal of Sedimentary Research*, 80: 170-180
-
- [45] Witke, M., 2012. Einflüsse auf den Entwurf von Tunneln im anhydritführenden Gebirge. *Mining + geo* 4, 644–648.
-
- [46] Zhang, E., Jaramillo, C. A., and Feldsher, T. B., Transient Simulation of Groundwater Flow for Tunnel Construction Using Time-Variable Boundary Condition, in *Proceedings American Geophysical Union, Fall Meeting 2007*.
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 13.12.2016

Grunddaten

Projekt-Nr.: FGU 2012/004
Projekttitel: Einfluss von geologisch-hydrologischen Randbedingungen und baulichen Massnahmen auf das Quellen von Ton-Sulfat Gesteinen am Belchentunne
Enddatum: 30.09.2016

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Zur Frage, wie das Wasser zu den quellfähigen Gesteinen gelangen kann, die infolge des Tunnelausbruchs eine Entlastung erfahren haben, ist ein Forschungsbedarf sowohl an methodischen, als auch an Prozesskenntnissen im Bereich Wasserzirkulation und Tunnelbau erwiesen. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die Erneuerungsarbeiten bei bestehenden und beim Bau von neuen Tunnelanlagen in den quellfähigen Gesteinsformationen der Nordwestschweiz. Grundsätzlich gibt es auch einen Bedarf an neuen Erkenntnissen zur Beantwortung von Fragen nach dem Zusammenhang zwischen Tunnelbau, Bildung von Auflockerungszonen in Abhängigkeit der geologischen Strukturen und den Veränderungen des Grundwasserfließregimes.

Auf Basis der 2D Profilbilanzierung im Vorgängerprojekt (Belchen Tunnel FGU 2008/004_OBF) und einer umfangreichen Datenrecherche wurde neu ein 4x4 km grosses regionales geologisches 3D-Modell entwickelt. Mit dem Belchentunnel im Zentrum beinhaltet es die geologischen Grundstrukturen bis in eine Tiefe von ca. -1000 m.ü.M. Anhand von 9 Modellhorizonten (u.a. Basis Hauptrogenstein, Basis Staffelegg Fm., Basis Keuper) und aller relevanter Verwerfungen werden die geologischen Strukturen und die allgemeinen Lagerungsverhältnisse des gesamten Modellgebiets wiedergegeben. Im Norden des Belchentunnels beobachtet man, eine für das Gesteinsquellen relevante kleinräumige Verschiebung der geologischen Schichten, während nach Süden hin die Strukturen offener und weitreichender werden. Generell fallen die Schichten nach SSO ein. Fallachsen streichen im Modellgebiet West-Ost. Dabei nimmt die Einengung der Falten von West nach Ost zunächst stark zu, um dann abrupft, zugunsten von teils weitreichenden Überschiebungen, abgelöst zu werden (laterale Entkopplung der Deformationsstrukturen).

Durch die detaillierte hydrogeologische Analyse der Modellstruktur war es möglich, die Geometrie der Grundwasserleiter und -stauer zu rekonstruieren. Das entwickelte Modellkonzept ermöglicht eine Weiterentwicklung des regionalen Modells, für den Fall, dass neue Erkenntnisse (z.B. aus Bohrungen) hinzukommen. Außerdem erlaubt das Vorgehen eine Extraktion von Teilmodellen. Im Projekt diente das regionale 3D-Modell als geometrisch-strukturelle Basis zur Erstellung eines hydraulischen Regionalmodells sowie des hydraulischen Detailmodells „Schuppenzone Süd“.

Die Resultate des 3D geologischen Modells bilden die strukturelle Grundlage für die neu aufgebauten 3D numerischen Grundwasser Modelle im regionalen und lokalen Massstab. Im lokalen Modell mitberücksichtigt ist das Tunnelsystem mit den drei Tunnelröhren, dem Versuchsdrainagegestollen, Luftschächten und Verbindungsstollen sowie einer den Tunnel umgebenden Auflockerungszone (EDZ). Der Einfluss der hydraulischen Eigenschaften der Auflockerungszone kann mittels Szenarien evaluiert werden. Mit den Modellen kann die Grundwasserströmung berechnet und visualisiert, sowie Veränderungen der Grundwasserfließregimes illustriert werden. Die Modellberechnungen zeigen insbesondere, wie und woher Grundwasser nach dem Tunnelbau zu Anhydrit führenden Gesteinsschichten gelangen kann.

Das fast vollständige Fehlen von hydraulischen Messdaten im Gebiet des Belchentunnels erforderte die Definition von Randbedingungen aufgrund von konzeptionellen Überlegungen wie beispielsweise der topographie getriebenen Grundwasserzirkulation. Daraus resultieren verschiedene Modellszenarien, welche die Auswirkungen der Wasserhaltungssysteme beim Bau und Betrieb von Tunnel auf das Grundwasserfließregime, insbesondere in der EDZ im Gipskeuper haben können. Dabei wurden Pumpenschächte und Absperrbauwerke zur Verhinderung einer Längszirkulation in der EDZ berücksichtigt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Pumpenschächte gut geeignet sein können, Wasserzuflüsse in die EDZ im Gipskeuper, und somit das Quellpotenzial, zu reduzieren. Dabei kommt es jedoch darauf an, diese Pumpenschächte im Gipskeuper direkt im Anschluss von Aquiferen und Störungen zu installieren. Abdichtungsbauwerke tragen zu einer deutlichen Reduktion des Wasserflusses im Gipskeuper nur dann bei, wenn diese nicht um- oder durchströmt werden können. Eine Potenzialabsenkung im Oberer Muschelkalk durch Pumpbrunnen reduziert in den Simulationen den Wasserfluss im Gipskeuper weniger effektiv als optimal platzierte Pumpenschächte, weil Wasser auch von lokalen Aquiferen und aus Störungszonen in die EDZ im Gipskeuper zuströmt. Ein Absenken der Potenziale durch Pumpbrunnen auch in diesen Strukturen dürfte in der Praxis schwer umsetzbar sein.

Durch die detaillierte Analyse der Modellstruktur war es möglich, die Geometrie der Grundwasserleiter und -stauer zu rekonstruieren als Basis für die Entwicklung von regionalen hydraulischen Modellen. Das entwickelte Modellkonzept ermöglicht eine Weiterentwicklung des regionalen Modells, wenn neue Erkenntnisse (z. B. aus Bohrungen) hinzukommen. Außerdem erlaubt es die Extraktion von Teilmodellen. Im Projekt diente das regionale 3D-Modell als geometrisch-strukturelle Basis zur Erstellung eines hydraulischen Regionalmodells sowie des hydraulischen Detailmodells „Schuppenzone Süd“.

Die Entwicklung der numerischen Grundwassermodelle basiert auf dem 3D geologischen Modell und konnte für den regionalen und lokalen Massstab realisiert werden. Die Integration des Tunnelsystems mit drei Tunnelröhren, dem Versuchsdrainagegestollen, Luftschächten und Verbindungsstollen, sowie einer umgebenden Auflockerungszone (EDZ) in das lokale Grundwassermodell ist wichtiger Bestandteil der lokalen Modellierung. Mit den Modellen können nun Grundwasserflüsse quantitativ berechnet werden. Die Modellberechnungen zeigen insbesondere, wie und woher Grundwasser nach dem Tunnelbau in Anhydrit führende Schichten eintritt und somit das Gebirgsquellen auslöst. In verschiedenen Modellszenarien wurde mit den Grundwassermodellen untersucht, welche Auswirkungen Systeme der Wasserhaltung auf den Wasserfluss insbesondere in der EDZ im Gipskeuper haben können. Dabei wurden Pumpenschächte und Absperrbauwerke zur Verhinderung einer Längszirkulation in der EDZ simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass Pumpenschächte gut geeignet sein können, Wasserzuflüsse in die EDZ im Gipskeuper, und somit das Quellpotenzial, zu reduzieren. Inwieweit dies bei einer Umsetzung in die Praxis zu einer deutlichen Reduktion des Wasserflusses im Gipskeuper führt könnte mit entsprechenden Versuchsarrangements evaluiert werden.

Eine Potenzialabsenkung im Oberer Muschelkalk durch Pumpbrunnen reduziert in den Simulationen den Wasserfluss im Gipskeuper weniger effektiv als optimal platzierte Pumpenschächte, weil Wasser auch von lokalen Aquiferen und aus Störungszonen in die EDZ im Gipskeuper zuströmt. Ein Absenken der Potenziale durch Pumpbrunnen auch in diesen Strukturen dürfte in der Praxis schwer umsetzbar sein.



Zielerreichung:

Die in der Projektbeschreibung formulierten Arbeitsschritte wurden mit zwei Ausnahmen vollumfänglich durchgeführt und im vorliegenden Bericht ausführlich beschrieben. Eine Ausnahme bildet der lokalisierbare Zusammenhang von Quellerscheinungen im Tunnel und geologischen Lagerungsverhältnisse. Mangels relevanter Monitoring Daten (z.B., lokalisierbare und mengenmässig erfasste Bergwasserzuflüsse, fehlende Hydraulik Daten), konnte der Zusammenhang von Quellerscheinungen im Tunnel und geologischen Lagerungsverhältnisse lediglich modellmässig, und nicht ortsspezifisch erfasst werden. Die zweite Ausnahme bilden Aussagen über Auswirkungen des Bauverfahrens (z.B. Sprengvortrieb oder Tunnelbohrmaschine) auf das Quellpotenzial des Gipskeupers. Diese konnten in dieser Studie mangels hydraulischer Daten, nur indirekt über die Auswirkungen der Ausbildung der Auflockerungszone auf den Grundwasserfluss in der EDZ im Gipskeuper untersucht werden. Dazu wurde der Parameter hydraulische Leitfähigkeit der EDZ in mehreren Modellrechnungen systematisch geändert und jeweils die Änderung des Wasserflusses beobachtet und analysiert.

Folgerungen und Empfehlungen:

Das im Rahmen dieses Projektes erstellte 3D geologische Modell (skizziert) des Belchen Gebietes, mit dem Belchen Tunnel im Zentrum, entspricht einem erweiterten Werkzeug, das sich für weitere geologische Analysen und die Extraktion von Detailmodellen eignet und zukünftig auch eine solide Basis für die Planung von Sanierungsarbeiten darstellen kann.

- Mit Projektabschluss liegt ein 3D geologisches Modell vor, das den Kenntnisstand der Geologie des Belchen Gebietes 2015 wiedergibt. Das 3D geologische Modell ermöglichte eine detaillierte geologische Strukturanalyse des Belchen Gebietes zur Feststellung der Anstufen Anständer Geometrien.
- Die beiden 3D hydraulischen Modelle (regional, lokal) erlauben zum ersten Mal, auch komplexe 3D Abläufe von Grundwasser fließenden und stauenden Schichten zu berücksichtigen. Im lokalen Massstab stehen nun Werkzeuge zur Verfügung, unterschiedliche Szenarien zur Evaluaton von baulichen Massnahmen im Bereich des Belchen Tunnels zu vergleichen.
- Mittels des lokalen Grundwassermodells (Basismodell, vgl. Kap. 3.4) wurde das Grundwasserfließregime im Bereich der „Schuppenzone Süd“ (Tm 793 bis 1070 bezogen auf Westströme) untersucht. Die berechneten Grundwasserfließverhältnisse nach dem Tunnelbau ändern sich nicht, wenn statt einer fallenden Drainageschicht um den Tunnel (Basismodell) ein offener Tunnel angenommen wird (Abb. 5.2 oben). Wenn der Tunnel jedoch als unkerständig angenommen wird, lässt das Grundwasser ausbleibenden im Abstand der Aquifere in der Auflockerungszone entlang der Tunnelstrecke („Längstkalulation“, Abb. 5.2 unten).
- Um mögliche Auswirkungen der verschiedenen Grundwasserfließverhältnisse auf das Quellpotenzial des Gipskeupers zu untersuchen, wurde der Grundwasserfluss (Darcy Fließgeschwindigkeit) in der Auflockerungszone unterhalb der Tunnelstrecke korreliert. Dabei wird angenommen, dass der Grundwasserfluss das Quellpotenzial widerspiegelt (je höher der Fluss, desto höher das Quellpotenzial; Butcher et al 2015).
- Der Wasserfluss in der EDZ im Gipskeuper ändert sich dabei linear mit der hydraulischen Leitfähigkeit der EDZ. Die Berechnungen zeigen eine deutliche Reduktion des Wasserflusses bei niedrigeren hydraulischen Leitfähigkeiten.
- Systeme der Grundwasserhaltung berechnet mit vereinfachten Modellen (nur eine Tunnelstrecke in der Lage der bestehenden Westströme) zeigen, dass durch die Kombination von Pumpenschächte, optimale Positionierung der Pumpenschächte oder durch Kombination mit Abdichtungsbauteilen der Grundwasserfluss in der EDZ im Gipskeuper erheblich reduziert wird. Werden die Abdichtungsbauteile als vollständig dabei angenommen, sind die berechneten Grundwasserflüsse in der EDZ im Gipskeuper um bis zu 100% niedriger. Um die Auswirkungen von unvollständig abgedichteten Abdichtungsbauteilen zu untersuchen, wurde ein vereinfachtes abgedichtetes Abdichtungsbauteil erstellt, zeigt zwar auch eine deutliche Reduktion des Grundwasserflusses in der EDZ im Gipskeuper (Abb. 5.7 unten), jedoch ist der Grundwasserfluss ähnlich hoch wie im Szenario mit optimal positionierten Pumpenschächten ohne Abdichtungsbauteil (Abb. 5.6).
- Eine Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass die hydraulische Leitfähigkeit der EDZ den mit Abstand größten Einfluss auf die Modellergebnisse hat. Der Wasserfluss in der EDZ im Gipskeuper ändert sich dabei linear mit der hydraulischen Leitfähigkeit der EDZ.
- Die hydraulischen Eigenschaften der EDZ im Gipskeuper wurden bisher noch nicht untersucht. Forschungsarbeiten, die auf eine Quantifizierung der hydraulischen Eigenschaften der EDZ im Gipskeuper zielen, könnten die Abschätzung und Prognose des Quellrisikos beim Tunnelbau im Gipskeuper erheblich verbessern.
- Einen klaren Einfluss auf die Modellergebnisse zeigen außerdem die hydraulische Leitfähigkeit des Oberen Muschelkalks, sowie das hydraulische Potenzial in dieser Formation. Eine bessere Ermittlung dieses Parameters würde die Modellierbarkeit weiter erhöhen und könnte durch Feldversuche erreicht werden.

Publikationen:

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Huggenberger

Vorname: Peter

Amt, Firma, Institut: Angewandte und Umweltgeologie, Dept. Umweltwissenschaften

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Schlussfolgerungen und die Beurteilung der Zielerreichung durch die Forschungsstelle sind grösstenteils treffend. Für die Beurteilung der Quellphänomene in anhydrit- und tonhaltigen Gesteinen sind Kenntnisse der Wasserzirkulation und der Wasserdruckverhältnisse äusserst wichtig. Diese Thematik wurde in der Vergangenheit nur wenig untersucht. Im Bereich des Belchentunnels gibt es eine relativ gute Datenbasis zu geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen. Diese sind Grundlage für die vorliegende Arbeit, die daraus konzeptionelle Überlegungen und Modellierungen ableitet. Damit können vor allem die regionalen geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse abgebildet werden. Für die Beurteilung der Quellphänomene sind dazu, entsprechend der Modellierung, nur grossräumige Aussagen möglich. Das Forschungsprojekt ist gut strukturiert, logisch aufgebaut und verständlich formuliert und liefert einen bedeutenden Beitrag zur kombinierten 3D-Modellierung von Geologie, Hydrogeologie und Bauwerken in verschiedenen Massstäben.

Jedoch muss eine zentrale Annahme des Forschungsprojekts (dass hohe Fliessraten im Gipskeuper ein hohes Quellpotenzial anzeigen) kritisch hinterfragt werden. Erstens gibt es im Gipskeuper Gesteinsabschnitte von mehreren Metern Mächtigkeit, die wenig Anhydrit enthalten und deshalb auch bei hohen Fliessraten zu leichten Quellerscheinungen neigen. Auf der anderen Hand kann man die Entwicklung von signifikanten Quellerscheinungen auch ohne bedeutende Fliessraten (auch ohne Auflockerungserscheinungen) beobachten (z.B. in alte Gesteine können sehr hohe Quelldrücke entwickeln und dies bei einfacher Benässung). Würden hohe Fliessraten bzw. die sogenannte Auflockerungszone (EDZ) die postulierte Bedeutung haben, so würden signifikante Quellerscheinungen nicht nur in der Tunnelsohle sondern in der Firse auftreten, was den Beobachtungen widerspricht.

Aus diesen Gründen ist die IBK der Auffassung, dass das Quellpotenzial nicht einzig aufgrund von Sickerströmungsberechnungen bzw. der erwarteten Fliessraten evaluiert werden darf; eine genügend zuverlässige Zuordnung der Tunnelabschnitte mit erhöhtem Widerstand gegen den sich entwickelnde Quelldruck lässt das Modell kaum zu. Man wird das Risiko nicht eingehen in Zonen mit mineralogisch bedingtem hohem Quellpotenzial (z.B. Gipskeuper mit Anhydrit), aber gemäss der Sickerströmungsberechnungen kleiner Eintrittswahrscheinlichkeit, ein schwächere Tunneltragstruktur vorzusehen. Würde sich in dieser Zone dennoch ein Quelldruck entwickeln, wäre die Betriebstauglichkeit des ganzen Tunnel in Frage gestellt.

Bei der Analyse bestehender Verhältnisse mit dem detaillierten Kenntnisstand der Geologie und Hydrologie lassen sich möglicherweise gewisse beobachteten Quellerscheinungen besser erklären. Wenn die Modellierung aufzeigen kann, dass gewisse Gebirgszonen Wasserzulfüsse erfahren und andere nicht und sich damit die Quellerscheinungen korrelieren lassen, könnte dies z.B. im Hinblick auf Sanierungsmassnahmen nützlich sein. Evtl. liessen sich mit ein solchen Modellierung die Sanierungsmassnahmen für die bestehenden Belchentunnelbohren besser eingrenzen.

Umsetzung:

Die komplizierten geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse wurden sorgfältig betrachtet und in die entsprechenden regionale Modelle übertragen. Untersuchungen der Quellvorgänge in der Praxis zeigen jedoch, dass häufig lokale, singuläre bzw. kleinstufige Verhältnisse oder Ereignisse zu bautechnischen Problemen führen. Entscheidend dabei sind u.a. die Verteilung quellhafter Gesteinsanteile (Tongesteine, Anhydrit), das Schichteinfallen, die Lage von Klüftsystemen und die Mineralisierung des Bergwassers. So zum Beispiel kann im Belchentunnel und im Chienbergstunnel im Gipskeuper beobachtet wurden, dass die Quellerscheinungen (Quellverformungen) innerhalb von wenigen 10 Metern in Tunnelängsrichtung wesentlich ändern können; es ist daher zu bezweifeln, ob ein globales Modell diese lokale Ausprägung abbilden kann.

Damit bleiben die Möglichkeiten für konkrete Anwendungen auf Basis der durchgeführten Modellierung beschränkt. Wie es auch im Bericht erwähnt wird, ist die Modellierung (aufgrund der grossen Vielfalt an regionalen und lokalen Modellannahmen sowie Vereinfachungen betreffend Geologie, Grundwasserzulfüssen, k-Werte der geologischen Formationen, Bauverfahren etc.) mit bedeutenden Unsicherheiten behaftet, welche die praktische Aussagekraft der 3D-Berechnungen und ihr Nutzen für die Konzeption von Tunnelneubauten im quellfähigem Gebirge stark einschränken.

Eine Umsetzung in der Praxis wäre allenfalls bei bestehenden Tunnelbauten (z.B. Belchentunnel) gegeben, wo bereits detaillierte geologische und hydrogeologische Kenntnisse des Gebirges sowie das Quellverhalten bekannt ist. Ob eine Modellierung zusätzliche Erkenntnisse für die praktische Konzeption von allfälligen Sanierungsmassnahmen beisteuern kann nicht abschliessend beurteilt werden, weil dies im wesentlichen auch von der Strategie der Sanierung abhängt (lokale oder umfassende Sanierungsmassnahmen).

weitergehender Forschungsbedarf:

Wie im Bericht erwähnt, besteht weiterhin Unklarheit über den möglichen Einfluss des Bauverfahrens auf die Quellerscheinungen.

Farmer steht eine empirische Überprüfung der Modellprognosen bzgl. des Einflusses von Dammringen und Pumpschächten noch aus. Die Modellberechnungen zeigen folgerichtig auf, dass eine Entnahme von Wasser, sei es mittels Schächten oder Sickerschlitzen (Belchentunnel), die Menge des längs laufenden Wassers vermindert. Ob damit der Quellprozess entscheidend günstig beeinflusst werden kann, bleibt aufgrund der Tatsache, dass nur wenig Wasser für die Aktivierung bzw. Aufrechterhaltung des Quellprozesses notwendig ist, offen.

Einfluss auf Normenwerk:

-

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Anagnostou

Vorname: Georg

Amt, Firma, Institut: ETH Zürich

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (*Forschung im Strassenwesen --> Downloads --> Formulare*) heruntergeladen werden.