



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel

Influence de l'écoulement souterrain sur le gonflement du Keuper gypseux dans le Tunnel du Chienberg

Influence of groundwater flow on the swelling of the Gipskeuper formation in the Chienberg tunnel

**Angewandte & Umweltgeologie, Departement Umweltwissenschaften,
Universität Basel
Prof. Dr. Peter Huggenberger
Dr. Christoph Butscher**

**Forschungsauftrag FGU 2008/005 auf Antrag der
Fachgruppe Untertagbau (FGU)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten 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 l' (les) auteur(s) mandaté(s) par 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)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

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

The content of this report engages only the author(s) commissioned 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)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel

Influence de l'écoulement souterrain sur le gonflement du Keuper gypseux dans le Tunnel du Chienberg

Influence of groundwater flow on the swelling of the Gipskeuper formation in the Chienberg tunnel

**Angewandte & Umweltgeologie, Departement Umweltwissenschaften,
Universität Basel
Prof. Dr. Peter Huggenberger
Dr. Christoph Butscher**

**Forschungsauftrag FGU 2008/005 auf Antrag der
Fachgruppe Untertagbau (FGU)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Peter Huggenberger

Mitglieder

Christoph Butscher

Begleitkommission

Präsident

Georgios Anagnostou

Mitglieder

Felix Amberg

Martin Bosshard

Walter Steiner

Alex Schneider

Christian Scholer

Andreas Hofer

Matthias Folly

Antragsteller

Fachgruppe Untertagbau (FGU)

Bezugsquelle

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

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	7
	Résumé	8
	Summary	9
1	Ausgangslage und durchgeführte1 Arbeiten	11
2	Hypothesen und Forschungsansatz	13
3	Datengrundlage	15
3.1	Geologische Dokumentation Chienbergtunnel	15
3.2	Geologische Berichte (chronologisch)	15
3.3	Weitere Bohrprofile	16
3.4	Geologische Kartierungen und Profile	16
3.5	Ergebnisse der regionalen und lokalen Grundwassermodellierung	16
4	Ergebnisse	17
4.1	Regionale Grundwassermodellierung	17
4.1.1	Geologie	17
4.1.2	Grundwassermodelle	18
4.1.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	19
4.2	Lokale Grundwassermodellierung	21
4.2.1	Geologie	22
4.2.2	Kalibrierte Grundwassermodelle	25
4.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	28
4.3	Parameterstudie	31
4.3.1	Referenzmodelle und Szenarien	32
4.3.2	Zusammenfassung der Ergebnisse	36
5	Bewertung	41
5.1	Ursachen für das Gesteinsquellen	41
5.2	Anforderungen an die Daten und Unsicherheiten	41
5.3	Vorläufige Vorschläge für mögliche Massnahmen	42
5.4	Forschungsbedarf	44
6	Schlussfolgerungen	46
	Anhänge	48
	Abkürzungen	51
	Literaturverzeichnis	53
	Projektabschluss	55
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	58

Zusammenfassung

Beim Bau des Chienbergtunnels sind in zwei Abschnitten im Gipskeuper Quellerscheinungen aufgetreten. Diese waren verbunden mit Hebungen der Tunnelröhre und der Geländeoberfläche. In anderen, geologisch ähnlichen Abschnitten, treten jedoch solche Phänomene nicht in Erscheinung. Eine Arbeitshypothese des ASTRA Forschungsprojekt FGU2008/5 war, dass das Quellverhalten des Gipskeupers mit den spezifischen Unterschieden und Veränderungen des Grundwasserfließregimes in den betrachteten Tunnelabschnitten in verschiedenen Massstabsbereichen im Zusammenhang steht.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden deshalb die regionalen und lokalen Grundwasser-Zirkulationssysteme am Chienberg näher erforscht und die existierenden Unterlagen über die aufgetretenen Quellerscheinungen sorgfältig analysiert. Die Basis dazu bildete eine Analyse des geologisch-strukturellen Aufbaus des Untergrundes, nicht nur in Profilschnitten parallel zum Tunnelverlauf, sondern insbesondere auch in Schnitten, welche für das Verständnis der regionalen hydrogeologischen Prozesse und für die Ermittlung der Potenzialverteilung, der Fließwege und der Volumenströme von Bedeutung sind. Diese Analyse basiert auf einer 2D Grundwassermodellierung in verschiedenen räumlichen Richtungen und Massstäben mit FEFLOW.

Das gewählte Vorgehen, die Kombination einer geologisch-strukturellen Analyse des Gebietes mit Simulationen von möglichen Grundwasserfließregimes, ergibt eine plausible Erklärung für die beobachteten Quellphänomene in den beiden begrenzten Abschnitten des Chienbergtunnels. Es wird ersichtlich, weshalb in gewissen Abschnitten Quellhebungen stattfinden, in anderen, geologisch ähnlichen Abschnitten jedoch nicht: In den Hebungszonen kommt es nach dem Tunnelbau zu deutlich höheren Wasserzutritten zu anhydritführenden Schichten als in den Zonen ohne Quellerscheinungen. Wasserzutritte finden in Abschnitten statt, in denen der Tunnel und die umgebende Auflockerungszone wasserführenden verwitterten Gipskeuper mit anhydritführenden Schichten hydraulisch verbindet („hydraulischer Kurzschluss“). Unsicherheiten bestehen in Bezug auf die Grösse der berechneten Fließraten am Anhydritspiegel. Hingegen zeigen Szenarienberechnungen übereinstimmend, dass nach dem Tunnelbau die Fließraten zu den quellfähigen, anhydritführenden Zonen, vor allem in den Hebungszonen, stark erhöht sind.

Die Kenntnisse des geologischen Aufbaus des Untergrundes, nicht nur entlang der Tunnelachse bis zur Tunnelbasis, sondern auch in Schnitten senkrecht dazu und in grössere Tiefen, sowie der Lage des Gips- und Anhydritspiegels und das Auftreten von Störungen, sind eine wichtige Voraussetzung für die Beurteilung der Quellgefährdungen mit Grundwassermodellierungen in verschiedenen Tunnelabschnitten. Eine Parameterstudie erlaubt zudem Aussagen über die hydraulischen und geotechnischen Grössen (Parameter), die bekannt sein sollten, um in Zukunft bei Tunnelbauten in quellfähigen Gesteinen bessere Voraussagen über das Quellrisiko machen zu können (sensitive Parameter). Als sensitive Parameter wurden insbesondere der K-Wert des Aquifers oberhalb des Tunnels, die Lage des Grundwasserspiegels und die hydraulischen Eigenschaften der Auflockerungszone um den Tunnel erkannt. Zudem sind die Kenntnisse der Lage von Gips- und Anhydritspiegel für die Abschätzung des Quellrisikos von grosser Bedeutung. Diese Parameter müssten bereits in der Planungsphase im Feld experimentell bestimmt werden.

Mögliche Massnahmen, wie dem Quellrisiko bei der Planung, dem Bau und während der Sanierung des Tunnels in Zukunft begegnet werden könnte, sollten zukünftig genauer untersucht werden. Die Massnahmen könnten sein: Eine Verringerung der hydraulischen Wirksamkeit der Auflockerungszone (z. B. durch die Wahl einer geeigneten Kombination von Ausbruchtechnik und möglichst rascher Stabilisierung des Tunnelprofils); eine Verringerung der Drainagewirkung des Tunnels (z. B. durch eine verbesserte Abdichtung der Betonhülle); und gegebenenfalls der Bau von geeigneten Drainagesystemen sowie die Absenkung des Grundwasserspiegels im Aquifer oberhalb des Tunnelprofils.

Résumé

Lors de la construction du Tunnel du Chienberg, des pénétrations d'eau ont eu lieu dans deux sections traversant le Keuper gypseux. Ces pénétrations d'eau, qui n'ont pas été constatées dans d'autres sections portant géologiquement similaire, étaient liées à des soulèvements du tube du tunnel et de la surface. Une hypothèse de travail du projet de recherche ASTRA FGU2008/5 est que le gonflement du Keuper gypseux était lié à des modifications de l'écoulement de la nappe souterraine ainsi qu'aux spécificités propres des divers tronçons, cela à différentes échelles.

Dans le cadre du projet, l'écoulement de la nappe à l'échelle régionale et locale a été étudié de près et les documents existant signalant des pénétrations d'eau ont été soigneusement analysés. La configuration géologique et structurelle du sous-sol fut évaluée, non seulement dans des profils parallèles à l'axe du tunnel mais aussi dans des profils d'une certaine importance quant à la compréhension des processus hydrogéologique à l'échelle régionale, à la détermination des potentiels hydrauliques et des flux d'écoulement de la nappe. Des simulations d'écoulements en 2D selon certains de ces profils à différentes ont été réalisées avec FEFLOW.

L'approche suivie – une analyse combinée de la configuration géologique structurelle et de l'écoulement de la nappe – a permis d'expliquer plausiblement le gonflement dans les deux sections du tunnel. La raison pourquoi des gonflements ont lieu dans certains tronçons du tunnel uniquement devient évidente : ces pénétrations d'eau ont lieu, là où le tunnel et la zone endommagée par l'excavation (excavation damaged zone, EDZ) relie hydrauliquement le Keuper gypseux effrité (au-dessus du toit du gypse) avec les couches contenant de l'anhydrite (en-dessous du toit de l'anhydrite). On peut parler d'un court-circuit hydraulique. Cependant des incertitudes quant aux débits calculés dans le toit de l'anhydrite subsistent. Les différents scénarios simulés ont unanimement montré qu'après la construction du tunnel les débits d'eaux ont massivement augmenté, particulièrement dans la zone de soulèvement.

La connaissance de la construction géologique du sous-sol, non seulement selon des coupes verticales suivant l'axe du tunnel jusqu'à la base du tunnel mais aussi selon des coupes perpendiculaire très profonde, tout comme la détermination de la position des toits du gypse et de l'anhydrite ainsi que l'apparition de perturbations est importante condition préalable importante pour l'évaluation du risque de gonflement via des simulations d'écoulement de la nappe. Une analyse des paramètres permet de cerner les paramètres hydrauliques et géotechniques qui devraient être connus afin de mieux prédire le risque de gonflement pour des futures constructions de tunnel dans des roches sensibles (paramètres sensitifs). Les paramètres sensitifs révélés par cette analyse sont en particulier les conductivités hydrauliques de l'aquifère situé au-dessus du tunnel, la position de la nappe souterraine ainsi que les propriétés hydrauliques de la zone endommagée par l'excavation. De plus, la détermination des toits du gypse et de l'anhydrite est d'une importance majeure quant à la prédiction du risque de gonflement. Ces paramètres devraient être prédits de manière expérimentale sur le terrain durant la phase de planification.

Les possibles mesures à entreprendre afin de réduire le risque de gonflement durant la phase de planification, de construction et d'assainissement devraient être, à l'avenir, étudiées précisément. Les recommandations pourraient être les suivantes : éviter des situations géologiques caractérisées par un risque de gonflement élevé ; réduction de l'impact hydraulique de l'EDZ (par exemple en utilisant un tunnelier et des injections) ; diminution de l'effet de drainage produit par le tunnel grâce à une meilleure imperméabilisation du revêtement en béton ; système de drainage adapté ; abaissement de la nappe dans l'aquifère situé au-dessus du tunnel.

Summary

During construction of the Chienberg tunnel, swelling phenomena occurred in two sections of the Gipskeuper formation. The swelling led to heave of the tunnel sections and at the ground surface. In other, geologically similar sections, such phenomena do not occur. It was a working hypothesis of the ASTRA research project FGU2008/5 that swelling behavior of the Gipskeuper formation is related to specific differences and changes of the groundwater flow regime at the regarded tunnel sections at different scales.

Hence, this research project investigated in great detail the regional and local flow systems at the Chienberg, and thoroughly analyzed existing data and documentation of observed swelling phenomena. The basis of conducted research was the analysis of the geological-structural configuration of the subsurface, not only in cross-sections parallel to the course of the tunnel, but particularly in cross-sections that are important for understanding regional hydrogeological processes and for determining the hydraulic head field, flow paths and water fluxes. The analysis was based on 2D groundwater modeling in various directions and scales using the software FEFLOW.

The approach of combining geological-structural analysis of the site with the simulation of potential groundwater flow systems offers a plausible explanation for observed swelling phenomena in the two limited sections of the Chienberg tunnel. It becomes obvious why swelling occurs in certain sections, while in other, geologically similar sections no swelling occurs: water inflow to anhydrite containing layers after tunneling is significantly higher in the swelling zones than in zones without swelling. Water inflow occurs in sections in which the tunnel and its surrounding excavation-damaged zone hydraulically connects water containing layers of the weathered (leached) Gipskeuper with anhydrite containing layers ("hydraulic short circuit"). Uncertainties exist with respect to calculated flow rates at the anhydrite level. However, all scenario calculations consistently show that flow rates after tunneling towards anhydrite containing layers are strongly increased in particular in the swelling zones.

Important requirements for assessing the swelling risk using groundwater models of different tunnel sections are the knowledge of the geological structure of the subsurface (not only along the tunnel axis and down to the tunnel invert, but also in cross-sections perpendicular to the tunnel axis and to greater depths); the position of the gypsum and anhydrite levels; and the occurrence of faults. A parameter study reveals information about hydraulic and geotechnical parameters that should be known in order to make better predictions of the swelling risk in future tunneling projects (sensitive parameters). Sensitive parameters of this study were the hydraulic conductivity of the aquifer above the tunnel; the position of the groundwater level; and the hydraulic properties of the excavation-damaged zone. In addition, knowledge of the position of the gypsum and anhydrite levels is of major importance for estimating the swelling risk. These parameters have to be determined in field experiments already during the planning phase.

Possible measures to counteract the swelling risk during planning, construction and remediation of tunnels need to be investigated in more detail in the future. Possible measures could be: reduction of the hydraulic effectiveness of the excavation-damaged zone (e.g., by choosing an adequate combination of excavation technique and rapid installation of the tunnel support); reduction of the drainage effect of the tunnel (e.g., by improving the sealing of the liner); and possibly the implementation of adequate drainage systems and drawdown of the water level above the tunnel.

1 Ausgangslage und durchgeführte Arbeiten

Das Phänomen der Hebungen infolge von Quellerscheinungen in anhydritführenden Tongesteinen ist eine im Tunnelbau bekannte Gefährdung (Einstein 1996). Diesem Phänomen wird heute überwiegend auf ingenieur-technischer Ebene durch konstruktive Massnahmen (z. B. geeignete Ankersysteme) begegnet (Abb. 1). Das Gebirgsquellen erfolgt durch ein Zusammenwirken von Anhydritlösung, Lösungstransport und Ausfällung von Gips. Bei der Ausfällung von Gips findet eine Volumenvergrösserung von 60 % gegenüber dem Anhydrit statt. Verlässliche Voraussagen über die zu erwartenden Quellhebungen und Quelldrücke sind jedoch bei konkreten Bauprojekten in der Projektierungsphase äusserst schwierig (Nüesch et al. 1995), da eine Vielzahl von Prozessen und die Interaktion mit dem Bauwerk eine Rolle spielen können. Zudem sind die Parameter, welche es erlauben würden gewisse Abschätzungen vorzunehmen, meist zu wenig bekannt.



Abb. 1: Den Deformationen im Chienbergtunnel aufgrund von Gebirgsquellen im Gipskeuper wird durch Felsanker und Knautschkörper unterhalb der Fahrbahn begegnet.

Beim Bau des Chienbergtunnels traten in zwei Abschnitten im Gipskeuper Quellerscheinungen auf, die zu Hebungen der Tunnelröhre und der Geländeoberfläche führten. In anderen, geologisch ähnlichen Abschnitten treten solche Erscheinungen bis heute jedoch nicht auf. Im vorliegenden Projekt wurde davon ausgegangen, dass für das Verständnis der beobachteten Unterschiede im Quellverhalten des Gipskeupers die Grundwasserzirkulation eine wichtige Rolle spielt (s. Kapitel 2). Übergeordnetes Ziel des Forschungsprojekts war es deshalb, die Kenntnisse über die Rolle der Wasserzirkulation zu verbessern und Grundlagen zu erarbeiten, die es erlauben, den Einfluss der Grundwasserströmung auf die Quellerscheinungen im Gipskeuper des Chienbergtunnels zu ermitteln. Die Resultate der Studie liefern Hinweise für eine hydrogeologisch-geotechnische Vorgehensweise bei der Planung von Tunnelbauten in quellfähigen Gesteinen.

Mit dem Forschungsprojekt wurden die regionalen und lokalen Grundwasserzirkulationssysteme am Chienberg erforscht und mit den aufgetretenen Quellerscheinungen in Zusammenhang gebracht. Dazu wurden die Potenzialverteilung, die Fliesswege und die Volumenströme mit Hilfe von 2D Grundwassermodellierungen in verschiedenen räumlichen Richtungen und Massstäben ermittelt. Die hydrogeologischen Studien hatten zum Ziel, die Beziehungen zwischen Morphologie, geologischen Strukturen und dem Tunnel für das Gebiet des Chienbergs herauszuarbeiten und ihr Einfluss auf unterirdische Zuflüsse zu anhydritführenden Gesteinen zu bewerten.

Der Bericht gliedert sich in die drei Teile:

- (1) regionale Grundwassermodellierung,
- (2) lokale Grundwassermodellierung und
- (3) Auswertung in Bezug auf die Quellerscheinungen.

Die Arbeiten zur regionalen Grundwassermodellierung (Projektteil 1) wurden im 2009 abgeschlossen. Dabei wurden die regionalen Fliessfelder im Bereich des Chienberg und dessen weiterer Umgebung durch Grundwassermodelle abgebildet (Zwischenbericht regionale Grundwassermodellierung vom 06.01.2010). Auf diese Weise konnte der Einfluss der regionalen Fliesssysteme auf die hydraulischen Verhältnisse im Tunnelbereich abgeschätzt werden. Durch die Kenntnis des Einflusses der regionalen Fliesssysteme auf den unmittelbaren Bereich des Tunnels konnten die Randbedingungen für die Simulation der lokalen Grundwasserströmung abgeschätzt werden. Dies war eine Voraussetzung für die anschliessende lokale Grundwassermodellierung. Der Schlussbericht fasst deshalb die wichtigsten Ergebnisse der regionalen Grundwassermodellierung (siehe Zwischenbericht vom 06.01.2010) nochmals zusammen.

Die lokale Grundwassermodellierung (Projektteil 2) wurde im 2010 abgeschlossen. Mit den lokalen Grundwassermodellen konnten die Fliessverhältnisse in der näheren Umgebung des Chienbergtunnels quantitativ charakterisiert werden (Zwischenbericht lokale Grundwassermodellierung vom 26.08.2010). Dazu wurden neben dem Tunnellängsprofil vier Querprofile bearbeitet. Die Querprofile umfassen die zwei Zonen, in denen Quellhebungen aufgetreten sind, sowie zwei weitere Zonen, in denen trotz ähnlicher geologischer Verhältnisse keine Quellhebungen beobachtet werden. Der vorliegende Schlussbericht dokumentiert diese Ergebnisse insbesondere in Hinblick auf die geologischen und hydrogeologischen Unterschiede zwischen diesen Zonen und liefert dadurch eine Erklärung für das Gebirgsquellen in den Hebungszonen des Tunnels.

Neu findet sich im dritten Teil eine detaillierte Auswertung der Ergebnisse der Modellierungen mit Blickwinkel Gebirgsquellen (Projektteil 3). Die mit den Grundwassermodellen berechneten Wasserzuflüsse zu anhydritführenden Schichten werden mit den geologischen Strukturen und dem Tunnelbauwerk in Beziehung gebracht und mit den beobachteten Quellphänomenen verglichen. Ergänzend wurde eine Parameterstudie durchgeführt, um Modellunsicherheiten zu minimieren. Der Bericht führt die Ergebnisse der einzelnen Projektteile zusammen, und macht ausserdem Vorschläge, welche mögliche Massnahmen zukünftig genauer untersucht werden sollten, um dem Risiko des Gebirgsquellens beim Tunnelbau besser begegnen zu können.

2 Hypothesen und Forschungsansatz

An den Quellprozessen im Gipskeuper sind Anhydritlösung, Transport der gelösten Stoffe mit dem Grundwasserfluss und Gipsausfällung beteiligt. Die Kinetik der Lösungs- und Ausfällungsprozesse im lokalen Bereich wird von den geochemischen Verhältnissen im Bereich des Tunnels (z. B. Druck, Temperatur, Konzentrationen) beeinflusst. Diese sind unter anderem stark abhängig von den hydraulischen Verhältnissen und der Herkunft des Porenwassers im Untergrund (Abb. 2). Das Forschungsprojekt konzentriert sich auf die Einflüsse der hydraulischen Aspekte, bzw. deren Veränderungen, im Zusammenhang mit den beobachteten Quellerscheinungen. Ein wichtiges Ziel des Projekts ist deshalb die Ermittlung der Grundwasserfließsysteme im Bereich des Chienbergtunnels. Die Prozesse der Lösungs-/Ausfällungskinetik hingegen waren nicht Gegenstand des aktuellen Projektes.

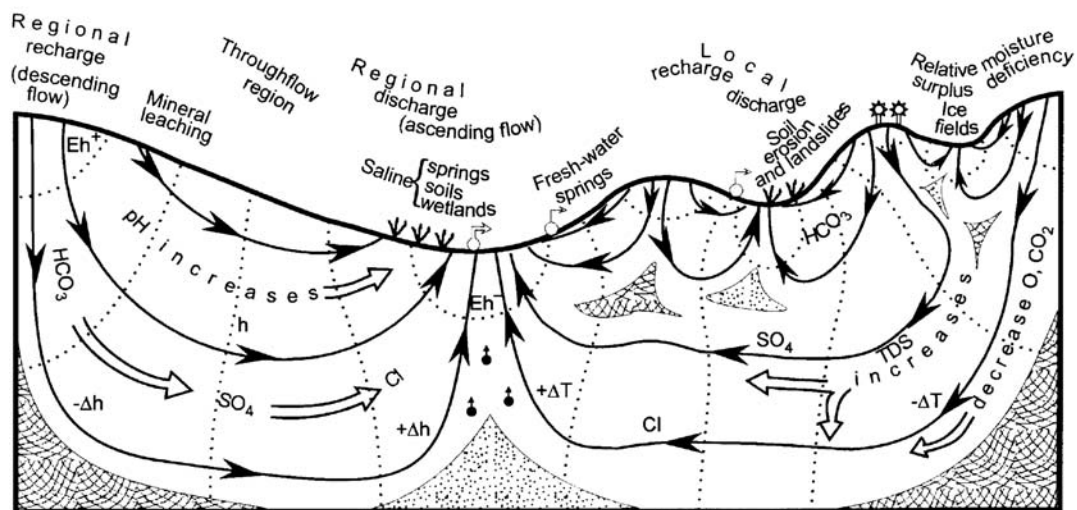


Abb. 2: Konzept der geochemischen Bedingungen im Untergrund in Abhängigkeit der Zirkulationssysteme (aus Tóth 1999).

Seit den Arbeiten von Tóth (1963) ist bekannt, dass regionale und lokale Potentialverteilungen im Untergrund insbesondere mit der Topographie in Beziehung stehen. Ob und wie viel Wasser im Untergrund fließt ist unter anderem von den geologischen Strukturen und der Hydrologie (Grundwasseranreicherung) bestimmt. Generell lassen sich regionale, intermediäre und lokale Fließsysteme unterscheiden. Der Grundwasserfluss an einem konkreten Ort kann dann als Überlagerung dieser Systeme verstanden werden (Zijl 1999). Um das lokal im Tunnelbereich existierende Fließfeld und dessen Veränderung zu verstehen, ist es notwendig, auch die intermediären und regionalen Fließsysteme in die Betrachtungen mit einzubeziehen.

Der Einbezug der regionalen Grundwasserfließsysteme ist erforderlich, um die hydraulischen Randbedingungen im Bereich des Tunnelperimeters abschätzen zu können. Diese sind meist unbekannt, und oft existieren nur sehr wenige Messungen der Porenwasserdrücke. Vorhandene Porenwasserdruckmessungen beschränken sich im Wesentlichen auf das Niveau der Tunnelröhre und etwas oberhalb davon. Zeitreihen über Veränderungen der Druckverhältnisse fehlen fast ausschliesslich. Es kann deshalb aufgrund der Datenlage meist nicht angegeben werden, welche Fließraten im Umfeld des Tunnelperimeters vorhanden sind, und in welche Richtung das Grundwasser fließt.

Im regionalen Massstab ist es jedoch mit vertretbarem Aufwand möglich, realistische Annahmen für Randbedingungen zu definieren:

- Regionale Vorfluter entwässern regionale Fliesssysteme. Sie markieren i.a. unterirdische Wasserscheiden. Darunter findet bei einer Schnittlage senkrecht zur Richtung der Vorfluter kein horizontaler Fluss statt (Freeze & Witherspoon 1967).
- Im regionalen Massstab kann der Grundwasserspiegel näherungsweise der topographischen Höhe gleichgesetzt werden (Tóth 1963; Hubbert 1940).
- Die Eindringtiefe der Zirkulationssysteme in den Untergrund ist begrenzt. Sie kann durch eine Fourier-Dekomposition der Topographie ermittelt werden (siehe Zwischenbericht regionale Grundwassermodellierung vom 06.01.2010). In grösseren Tiefen kann der Grundwasserfluss vernachlässigt werden (Tóth 1963; Zijl 1999).

Basierend auf diesen Annahmen können regionale Grundwassermodelle entwickelt und dabei realistische Annahmen für die Randbedingungen verwendet werden. Im vorliegenden Projekt wurde beispielsweise ein Grundwassermodell entwickelt, welches als Ränder das Rheintal im Norden und das Aaretal im Süden aufweist (vgl. Kapitel 4.1). Diese Ränder markieren Grundwasserscheiden. Es findet dort kein Wasserfluss ins Modellgebiet statt. Aus den regionalen Modellen wurden die hydraulischen Bedingungen in verschiedener Tiefe ermittelt, und entsprechend ihrer Richtung (Orientierung der Schnittlage) als Randbedingungen der lokalen Grundwassermodelle verwendet.

Mit den lokalen Grundwassermodellen kann in der Folge überprüft werden, welche hydraulischen Veränderungen der Tunnelbau im Untergrund hervorruft, und in welchen Situationen diese Veränderungen zu erhöhtem Wasserzufluss zu anhydritführenden Gesteinsschichten führen. Dazu wurde die Herkunft des Grundwassers in den anhydritführenden Gesteinsschichten der Tunnelumgebung vor und nach dem Tunnelbau rekonstruiert, und die Volumenströme für verschiedene Szenarien berechnet.

Es wird angenommen, dass Gebirgsquellen (nur) dann stattfindet, wenn nach dem Tunnelbau der Wasserzufluss zum Anhydritspiegel einen kritischen Schwellenwert übersteigt, und der Wasserfluss vor dem Tunnelbau kleiner als dieser Schwellenwert war. Mit Hilfe der Grundwassermodelle wird evaluiert, ob es entsprechend dieser Hypothese (nur) in den Abschnitten des Chienbergtunnels zum Gebirgsquellen kommt, in denen Quellphänomene tatsächlich beobachtet wurden.

Die Hypothesen wurden für verschiedene Szenarien überprüft (Parameterstudie). Dadurch konnten sensitive Parameter ermittelt werden, das heisst Parameter, die auf die Modellergebnisse und die hydraulischen Bedingungen im Tunnelumfeld einen grossen Einfluss haben. Die Parameterstudie zeigt:

- welche Daten (Parameter) durch gezielte Feldexperimente ermittelt werden sollten,
- welche möglichen Massnahmen besonders effektiv sein könnten, und
- welche Bedingungen ein besonders grosses Risiko für das Gebirgsquellen bergen.

3 Datengrundlage

3.1 Geologische Dokumentation Chienbergtunnel

Diverses Material, Geotechnisches Institut AG, Basel:

- Sondierbohrungen
- Laboranalysen: Druckfestigkeiten, Sulfat- und Wassergehaltsbestimmungen, Wasseranalysen, Analysen Bohrung Tm 1184
- Tunneldokumentation: Firststollenaufnahmen West und Ost, Firststollenaufnahmen Ost, Pilotstollenaufnahmen, Kalottenaufnahmen West, Aufnahmen Sohle/Strosse West, Kalottenaufnahmen Ost, Umgehungsstollenaufnahmen, Aufnahmen Kalotte Verbruch, Aufnahmen Sohle/Strosse Verbruch, Aufnahmen Sohle/Strosse Ost, Einzelaufnahmen, Ventilatorenraumaufnahmen, Abluftstollenaufnahmen, Steuerungsraumaufnahmen, Abluftschachtaufnahmen
- Dokumentation Hebungszonen: Hebungszone West, Sanierung Längsbalken/Unterfangung bergseits, Hebungszone West, Sanierung Längsbalken/Unterfangung talseits, Hebungszone Ost, Sanierung Längsbalken/Unterfangung bergseits, Hebungszone Ost, Sanierung Längsbalken/Unterfangung talseits, Hebungszone West, Sanierung Sohle/Sohlenausbruch.

3.2 Geologische Berichte (chronologisch)

- Rüegg, F. (06.04.1993): Umfahrung Sissach, Tunnel Kienberg. Refraktionsseismische Untersuchungen. Geotest AG, Zollikofen.
- Hauber, L., Noak, T., Vögtli, B., Noher, H. P. (01.06.1993): J2 Umfahrung Sissach, Tunnel Kienberg. Geologisch-geotechnischer Bericht. GPI Universität Basel, Geotechnisches Institut AG, Basel.
- Vögtli, B. (27.06.1995): Tunnel Umfahrung Sissach: Quellversuche und Messung der Porenwasserdruckgeber / Zwischenbericht. Geotechnisches Institut AG, Basel.
- Noher, H. P., Vögtli, B. (08.09.1997): Jurastrasse J2 Umfahrung Sissach. Tagbautunnel West. Geotechnisches Institut AG, Basel.
- Hauber, L., Noher, H. P., Vögtli, B., Meyer, M. (13.03.1998): Jurastrasse J2 Umfahrung Sissach. Teilbericht Bergmännischer Tunnel mit Portal Ost. Geotechnisches Institut AG, Basel.
- Rotzler, R., Meyer, M. (21.02.2001): Jurastrasse J2, Umfahrung Sissach, Chienbergtunnel, Bergmännische Strecke, Übergangszone West "Wilimatt" Tm 760-1110, Untersuchung betreffend Sohlhebungen, Schlussbericht. Aegerter & Bosshardt AG, Gruner AG, Geotechnisches Institut AG, Basel.
- Noher, H. P., Meyer, M. (05.04.2002): Jurastrasse J2, Umfahrung Sissach, Chienbergtunnel, Tagbruch vom 1.2.2002, Geologisch - geotechnische Untersuchung, Zwischenbericht. Geotechnisches Institut AG, Basel.
- Noher, H. P., Meyer, M. (24.10.2002): Jurastrasse J2, Umfahrung Sissach, Chienbergtunnel, Tagbruch vom 1.2.2002, Geologisch-geotechnische Untersuchung, Schlussbericht. Geotechnisches Institut AG, Basel.
- Noher, H. P., Meyer, M. (06.08.2003): Jurastrasse J2, Umfahrung Sissach, Übergangszone West, Hebung Hofackerweg, Geologischer Bericht. Geotechnisches Institut AG, Basel.
- Anagnostou, G. (14.11.2005): H2, Umfahrung Sissach, Hebungen Chienbergtunnel. ETH Zürich.

3.3 Weitere Bohrprofile

Bohrkataster Baugrundarchiv Baselland

3.4 Geologische Kartierungen und Profile

- Geologisches Längsprofil, Chienbergtunnel Bergmännische Strecke, Stand: 31.05.2007. Aegerter & Bosshardt AG, Gruner AG, Basel.
- Geologische Karte der zentralen Nordschweiz 1:100'000 (NAGRA, SGK1984).
- Die Geologie des Faltenjura zwischen Olten und Unterem Hauenstein 1:25'000 (Goldschmid 1965).
- Geologie des Tafel- und Faltenjuras zwischen Eptingen und Oltingen (BL) 1:25'000 (Bartholet 1964).
- Die Geologie der Umgebung von Basel mit Hinweisen über die Nutzungsmöglichkeiten der Erdwärme: Tektonische Karte des Tafeljuras und diverse Profile (Gürler et al. 1987).
- Deep Structure of the Swiss Alps, Results of NRP 20: diverse Profile (Pfiffner et al. 1997).
- Diverse unpublizierte Kartierungen aus dem Archiv des Geologischen Instituts der Universität Basel (Autoren: Griesser, Hauber, Hüne).

3.5 Ergebnisse der regionalen und lokalen Grundwassermodellierung

Huggenberger, P., Butscher, C. (06.01.2010): Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel. 1. Zwischenbericht ASTRA/FGU 2008/5 Regionale Grundwassermodellierung. Universität Basel, Angewandte und Umweltgeologie, Basel.

Huggenberger, P., Butscher, C. (26.08.2010): Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel. 2. Zwischenbericht ASTRA/FGU 2008/5 Lokale Grundwassermodellierung. Universität Basel, Angewandte und Umweltgeologie, Basel.

Butscher, C., Einstein, H. H., Huggenberger, P. (2011): Effects of tunneling on groundwater flow and swelling of clay-sulfate rocks. *Water Resources Research* 47, W11520.

Butscher, C., Huggenberger, P., Zechner, E., Einstein, H. H. (2011): Relation between hydrogeological setting and swelling potential of clay-sulfate rocks in tunneling. *Engineering Geology* 122, 204-214.

Butscher, C., Huggenberger, P., Zechner, E. (2011): Impact of tunneling on regional groundwater flow and implications for swelling of clay-sulfate rocks. *Engineering Geology* 117, 198-206.

4 Ergebnisse

4.1 Regionale Grundwassermodellierung

Das Hauptziel der regionalen Grundwassermodellierung war die Ermittlung der Potenzialverteilung und der Fliesswege im Untergrund in einem regionalen Zusammenhang sowie die Quantifizierung von Wasserflüssen im Bereich des Chienbergtunnels. Diese Grössen wurden stationär basierend auf Simulationen mit Grundwassermodellen auf verschiedenen regionalen Skalen und in verschiedenen Schnittlagen sowie durch die Anwendung einer Fourier-Dekomposition auf die Topographie (Zijl, 1999) berechnet. Sie waren eine wichtige Voraussetzung für die lokale Grundwassermodellierung (Kapitel 4.2), wo diese als Randbedingungen benötigt wurden. Auf diese Weise konnte der Einfluss der regionalen Fliesssysteme auf die Hydraulik im Tunnelbereich besser quantifiziert werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der regionalen Grundwassermodellierung zusammengefasst. Für eine detaillierte Darstellung aller durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse sei auf den 1. Zwischenbericht des Projekts vom 06.01.2009 verwiesen.

4.1.1 Geologie

Als strukturelle Grundlage für regionale Grundwassermodelle wurden geologische Profile in verschiedenen Orientierungen und Massstäben konstruiert. Für die Konstruktion wurden die in Kapitel 3 aufgelisteten geologischen Karten, Bohrprofile und geologischen Profile verwendet. Abb. 3 zeigt die Lage des geologischen Profils mit der grössten Erstreckung. Es reicht vom Rheintal bei Rheinfeldern (Aargau) im NNW bis zum Aaretal bei Olten (Solothurn) im SSE. Der Chienbergtunnel wird im Bereich der Hebungszone 2 ungefähr bei Tunnelmeter 1100 geschnitten. Die Profillage wurde so gewählt, dass die grossen regionalen Vorfluter Rhein und Aare das Profil begrenzen. Die Orientierung (NNW-SSE) ist ungefähr senkrecht zur Ausrichtung dieser Vorfluter sowie auch senkrecht zum Streichen der Höhenzüge des Faltenjuras (Hauenstein), welche die topographisch höchsten Erhebungen bilden.



Abb. 3: Lage des regionalen geologischen Profils.

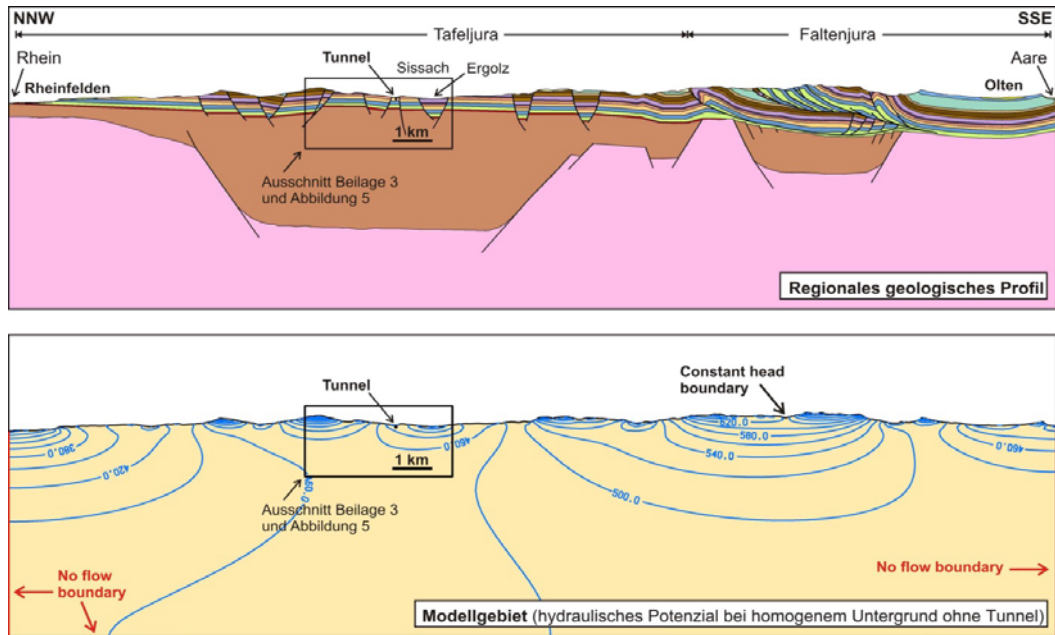


Abb. 4: Regionales geologisches Profil (oben) und Grundwassermodell (unten) mit berechneter Potenzialverteilung bei homogenem Untergrund ohne Tunnel.

Das Profil (Abb. 4 oben und vergrößert in Beilage 1) umfasst im Norden den Tafeljura (Dominanz von Horst und Graben Strukturen) und im Süden den Faltenjura (Existenz eines basalen Abscherungshorizontes verbunden mit der Entwicklung von Überschiebungen und Faltenstrukturen). Der Faltenjura ist nordwärts dem Tafeljura überschoben. Der Chienbergtunnel befindet sich im Tafeljura wenige km nördlich der Hauptüberschiebung. Dort sind die geologischen Schichten nahezu horizontal gelagert und gliedern sich in SSW-NNE streichende Horst- und Grabenstrukturen. Die geologische Schichtfolge des Juras reicht vom Buntsandstein bis ins Tertiär (Beilage 2). Diese Schichtfolge liegt einem kristallinem Grundgebirge auf, das im Untersuchungsgebiet Permokarbontröge enthält, die sich ebenfalls durch ein charakteristisches Bruchschollenmuster auszeichnen. Oberflächennah finden sich Quartäre Lockersedimente mit Mächtigkeiten von wenigen bis zu mehreren Zehner von Metern.

4.1.2 Grundwassermodelle

Auf Grundlage der konstruierten geologischen Profile wurden zweidimensionale Grundwassermodelle entwickelt, die die Verteilung des hydraulischen Potenzials stationär für gesättigte Grundwasserverhältnisse berechnen. Die Berechnungen basieren auf der Finite-Elemente-Methode und wurden mit dem Computerprogramm FEFLOW (Diersch, 2005) durchgeführt. Die Modelle sind kalibriert bezüglich der Grundwasser-Neubildung: Der Zufluss von der Oberfläche ins Modellgebiet (Grundwasseranreicherung des Modells) entspricht der realen mittleren Grundwasser-Neubildung des Gebiets (550 mm/Jahr; BAFU 2010). Bei der Kalibrierung wurden die hydraulische Leitfähigkeit (K-Wert) und ihre Anisotropie (Verhältnis vertikale/horizontale Leitfähigkeit) variiert. Die so bestimmten Werte (Beilage 2) entsprechen Werten, wie sie auch in der Literatur für vergleichbare geologische Einheiten angegeben werden (NAGRA, 2002; Delleur, 1999). Mit den Modellen wurden Fließpfade durch die „particle tracking“ Methode berechnet. Dazu wurden ausgehend vom Tunnelperimeter 20 Wasserteilchen („particles“) entsprechend des Potenzialfelds des Untergrundes zurückverfolgt.

Randbedingungen

Das Modellgebiet (Abb. 4 unten) entspricht dem regionalen geologischen Profil (Abb. 4 oben und Beilage 1). Die Randbedingungen basieren auf folgenden Annahmen:

- Der Rhein und die Aare sind regionale Vorfluter., Darunter werden die vertikalen Modellgrenzen im NNW und SSW als unterirdische Wasserscheiden definiert (Freeze und Witherspoon, 1967). Aufgrund der Schnittlage senkrecht zum Verlauf der Vorfluter findet durch diese Grenzen kein Wasserfluss statt („no flow boundary“).

- Im regionalen Massstab folgt der Grundwasserspiegel ungefähr der Topographie und kann durch diese angenähert werden (Hubbert, 1940; Tóth, 1963). Diese Modellgrenze wurde deshalb als Randbedingung 1. Art („constant head boundary“) definiert, wobei das hydraulische Potenzial der topographischen Höhe der Erdoberfläche entspricht.
- In grosser Tiefe ist der Grundwasserfluss senkrecht zur Horizontalen vernachlässigbar (Tóth, 1963; Zijl, 1999). Durch eine Fourier-Dekomposition wurde als maximale Eindringtiefe regionaler Zirkulationssysteme 5'235 m ermittelt (siehe Zwischenbericht vom 06.01.2010). Durch den unteren Modellrand (5000 m unter Meer) findet deshalb kein Wasserfluss statt („no flow boundary“).
- In den Modellen mit Tunnel wurde der Tunnelsohle eine Randbedingung 1. Art („constant head“) zugeordnet. Das hydraulische Potenzial entspricht dort der topographischen Höhe. Diese Zuordnung basiert auf der Annahme, dass im Innern des Tunnels kein Wasserdruck herrscht (Druck=Atmosphärendruck).

Modelleigenschaften

Es wurden Modelle mit verschiedenen strukturellen Elementen aufgebaut (Tab. 1), um den Einfluss verschiedener Strukturen auf die Grundwasserverhältnisse zu analysieren. Folgende Strukturen wurden berücksichtigt:

- Der Tunnel: Alle Modelle wurden ohne und mit Tunnel aufgebaut, um die hydraulischen Unterschiede vor und nach dem Tunnelbau zu analysieren.
- Verteilung des K-Werts (hydraulische Leitfähigkeit) im Untergrund: Zunächst wurden Modelle mit homogenem Untergrund (K-Wert überall gleich) verwendet, um den Einfluss des Tunnels auf die Fliessverhältnisse ohne den Einfluss wechselnder geologischer Einheiten untersuchen zu können. Dann wurden Modelle verwendet, die zwischen Aquiferen und Aquitarden unterscheiden, und Modelle, in denen den verschiedenen geologischen Einheiten verschiedene hydraulische Eigenschaften (Leitfähigkeit und Anisotropie) zugeordnet wurden. Die hydraulischen Eigenschaften der geologischen Einheiten der verschiedenen Modelle sind in der stratigraphischen Tabelle in Beilage 2 angegeben.
- Störungen: Störungen können Wegsamkeiten für präferenzielles Fliessen enthalten (Caine et al., 1996). In zwei Modellen wurden Störungen als eindimensionale Elemente mit einem erhöhten K-Wert ($2,5e-5$ m/s) berücksichtigt.

Tab. 1: Übersicht regionale Grundwassermodelle.

Modell	Modellbezeichnung	
	Ohne Tunnel	Mit Tunnel
Homogenes Modell	Ho	Ho-t
Homogenes Modell mit Störungen	Ho-s	Ho-st
Aquifer-Aquitard Modell	Aa	Aa-t
Hydrostratigraphisches Modell	Hs	Hs-t

4.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

In Beilage 3 werden die Potenzialverteilung und Fliesspfade zum Tunnel für die einzelnen Modelle vor und nach dem Tunnelbau gezeigt. Anhand des hydrostratigraphischen Modells (verschiedene geologische Einheiten haben verschiedene hydraulische Eigenschaften) wird der Einfluss des Tunnelbaus auf die Grundwasserverhältnisse beschrieben (Abb. 5). Vor dem Tunnelbau ist der Zustrom des Tunnelbereichs schmal. Wasser strömt diesem Bereich von unten aus dem Muschelkalkaquifer zu. Der weitere Einzugsbereich umfasst den Buntsandstein (und in einem Graben den Muschelkalk) im Süden des Tunnels. Nach dem Tunnelbau ist der Zustrom zum Tunnel weiträumig verteilt. Dem Tunnel fliesst Wasser von allen Seiten zu. Das Einzugsgebiet umfasst nicht nur den Buntsand-

stein im Süden des Tunnels, sondern auch den Muschelkalk nördlich des Tunnels. Ein Hügel zwischen dem Tunnel und dem Limpberg bildet ein Gebiet, wo Grundwasser angereichert wird, das nach dem Tunnelbau dem Tunnel zuströmt. Mit den Grundwassermodellen kann die Fliessrate berechnet werden, mit der der Tunnelbereich durchströmt wird. Im hydrostratigraphischen Modell nimmt die Fliessrate im Tunnelbereich nach dem Tunnelbau um das 60-fache zu (Tab. 2).

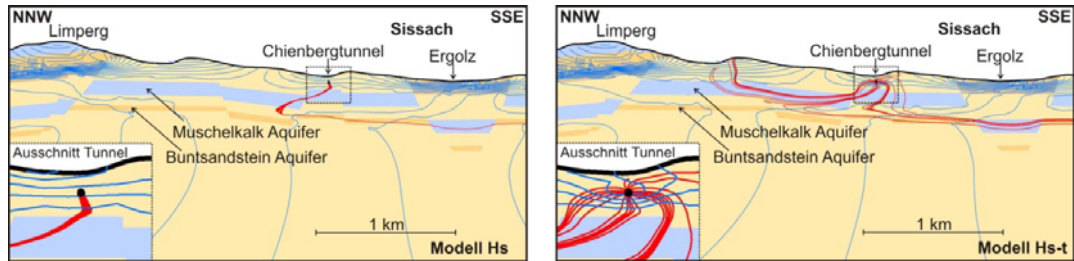


Abb. 5: Hydraulisches Potenzial und Fliesswege zum Tunnel berechnet mit dem hydrostratigraphischen Modell (vgl. Beilage 3). Links: ohne Tunnel; rechts: mit Tunnel.

Die einzelnen Modelle zeigen unterschiedliche Potenzialverteilungen und Fliesspfade zum Tunnel (vgl. Beilage 3), jedoch gibt es Gemeinsamkeiten bezüglich des Einflusses des Tunnelbaus auf die Fliessverhältnisse:

- Das hydraulische Potenzial nimmt im Tunnelbereich ab, der Gradient des Potenzials nimmt zu (Drainageeffekt des Tunnels).
- Im Nahbereich des Tunnels ändert sich die Grundwasserfliessrichtung von senkrecht nach oben vor dem Tunnelbau, zu waagrecht von beiden Seiten oder allseitig auf den Tunnel gerichtet nach dem Tunnelbau.
- Das Einzugsgebiet des Grundwassers, das den Tunnelbereich durchströmt, ist nach dem Tunnelbau weiträumiger verteilt. Die Gebiete, in denen dieses Wasser an der Erdoberfläche versickert, sind grösser.
- Die Fliessraten im Bereich des Tunnels sind nach dem Tunnelbau 10 bis 60 Mal grösser als vor dem Tunnelbau (Tab. 2).

Tab. 2: Fliessraten (in L/Tag pro Tunnelmeter) im Tunnelbereich für die verschiedenen regionalen Grundwassermodelle (vgl. Tab. 1), vor und nach dem Tunnelbau. (Hinweis: Die generell kleineren Fliessraten im Aquifer-Aquitard-Modell und im Hydrostratigraphischen Modell sind bedingt durch die geringeren K-Werte im Untergrund im Bereich des Tunnels im Vergleich zu den anderen Modellen; vgl. Beilage 2).

Modell	Homogenes Modell	Homogenes Modell mit Störungen	Aquifer-aquitard Modell	Hydrostratigraphisches Modell
Vor Tunnelbau	19,8	18,0	4,7e-3	4,8e-3
Nach Tunnelbau	623,0	363,0	47,4e-3	283,4e-3
Verhältnis (nach/vor Tunnelbau)	31,5	20,2	10,1	59,0

Zusammenfassung Einfluss des Tunnels auf das regionale Fließfeld und das Quellverhalten des Gipskeupers:

Die durch den Tunnelbau erzeugten Veränderungen können auf folgende Weise das Quellverhalten des Gipskeupers beeinflussen:

- Die erhöhten Fließraten nach dem Tunnelbau erhöhen den Wasserzufluss zu anhydritführenden Schichten im Tunnelbereich. Dadurch ist eine Voraussetzung für das Auslösen des Gebirgsquellen erfüllt.
- Eine Veränderung der Zuströmbereiche kann eine Änderung der chemischen Zusammensetzung der Porenwässer erklären. Dies begünstigt in ungünstigen Fällen die Lösung von Anhydrit und Ausfällung von Gips.
- In den Modellen mit Störungen wird nach dem Tunnelbau vermehrt Wasser aus Störungen vom Tunnel angezogen. Der vergrößerte Zufluss kann ebenfalls einen auslösenden Faktor für das Gebirgsquellen darstellen.
- Das hydraulische Potenzial, und somit die Porenwasserdrücke, sind nach dem Tunnelbau im Tunnelbereich abgesenkt (Drainageeffekt des Tunnels). Eine Änderung der Druckverhältnisse kann das geochemische Gleichgewicht im Untergrund stören und dadurch Prozesse auslösen, die das Gebirgsquellen fördern.

4.2 Lokale Grundwassermodellierung

Die lokale Grundwassermodellierung hatte zum Ziel, die Fließverhältnisse im lokalen Masstab des Tunnelbereichs herauszuarbeiten, und mit den geologischen Strukturen und dem Tunnelbauwerk in Beziehung zu setzen. Die Fließverhältnisse wurden wie bei der regionalen Grundwassermodellierung vor und nach dem Tunnelbau ermittelt. Dadurch sollten hydraulische Veränderungen quantifiziert werden und Situationen erkannt werden, die zum Gebirgsquellen führen können. Die geologischen Strukturen und die Fließverhältnisse wurden für das Tunnellängsprofil sowie für vier weitere Profile ermittelt, die den Tunnel senkrecht zur Tunnelachse schneiden (Abb. 6). Die Querprofile bilden die zwei Zonen im Gipskeuper des Chienbergtunnel ab, in denen es zum Gebirgsquellen kam, sowie zwei weitere Zonen, in denen der Tunnel ebenfalls im Gipskeuper angelegt ist, jedoch kein Gebirgsquellen festgestellt wurde.

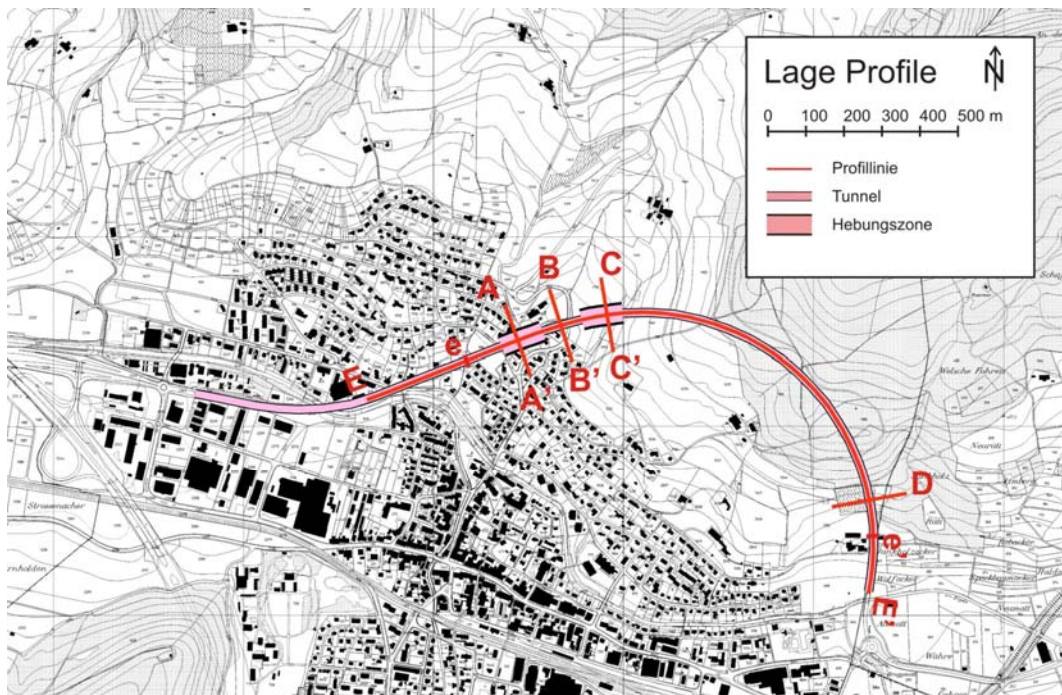


Abb. 6: Lage der geologischen Profile der lokalen Grundwassermodellierung.

4.2.1 Geologie

Überblick

Der Chienbergtunnel quert, neben Quartären Lockersedimenten nahe der Erdoberfläche, Triassische und Jurassische Sedimentgesteine die vom Opalinuston (oben) bis zum Gipskeuper (unten) reichen (Abb. 7). Darunter folgen der Lettenkeuper und der Muschelkalk. Die Schichtfolge enthält wechselnd tonig-mergelige Gesteine und Kalksteine, wodurch die hydraulischen Leitfähigkeiten (ca. $1E-12$ m/s für tonig-mergelige Einheiten und $1E-6$ m/s für verkarstete Kalksteine) im Untergrund stark variieren. Grosse Teile des Chienbergtunnels führen durch den Gipskeuper. Der Gipskeuper besteht aus dunklen, grauen Mergelsteinen mit tonigen und dolomitischen Einschaltungen. Der Gipskeuper enthält die Kalziumsulfat-Mineralen Anhydrit ($CaSO_4$) und Gips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), die als Adern (nur Gips), Linsen, Knollen und fein verteilt in der Gesteinsmatrix sowie als massive Bänke auftreten. Im oberen Teil der Schichtfolge treten die Kalziumsulfate als Gips auf, im unteren Teil als Anhydrit. Die Grenze zwischen diesen Teilen wird als Anhydritspiegel bezeichnet.

Bei Verwitterung nahe der Erdoberfläche werden die Kalziumsulfate ausgelaugt (gelöst). Der Gipskeuper verliert durch die Verwitterung seine Festigkeit und erscheint bodenartig und „krümelig“. In Bohrkernen ist er nur schwer oder gar nicht von den verwitterten Buntmergeln zu unterscheiden, die ihn überlagern. Bei der Auslaugung des Gipskeupers kann ein Gipskarst entstehen. In einem Gipskarst gibt es Wegsamkeiten für präferenzielles Fließen. Tatsächlich wurden beim Bau des Chienbergtunnels Wasserzutritte aus dem verwitterten Gipskeuper mit Raten bis zu 60 L/min dokumentiert. Der unverwitterte Gipskeuper unter dem verwitterten Gipskeuper wirkt als Grundwasserstauer. Diese Grenzschicht wird als Gipsspiegel bezeichnet.

Stratigraphie		Lithologie	Lithologische Beschreibung	Mächtigkeit (-m)	Aquifer / Aquitard
Quartär			Fluvio-glaziale Kiese und Sande		Porenaquifer
Jura	Dogger		Monotone Abfolge siltiger, glimmerhaltiger Tonsteine	95	
	Lias		Bioklastische Kalksteine, sandige Tonsteine	5 20 5	
Trias	Keuper		Bunte Mergelsteine, Dolomite, Bunte Sandsteine	5 25	Geringleiter mit lokalen Aquiferen
			Tonige Mergelsteine mit knolligem und lagigem Gips/Anhydrit	80	
			Zellendolomite und Mergel	5	
	Muschelkalk		Dolomite	90	Oberer Muschelkalk Aquifer
			Dolomite Wechsel aus tonigen Mergelsteinen mit gebanktem, massigem Anhydrit Steinsalzlager Mergelsteine, gebankter und massiger Anhydrit	80	
			Dolomite, dolomitische Mergel und Tonsteine	10	
	Bunt-Sst.		Röt (Tonsteine)	10	
			Laminierte Sandsteine	20	Mittlere Durchlässigkeiten
			(Quarz-) Sandsteine		
	Permo-Karbon		PK Klastische Sedimentgesteine		

Abb. 7: Stratigraphische Übersicht mit hydrogeologischen Eigenschaften der geologischen Einheiten im Modellgebiet (Abkürzungen der geologischen Einheiten sind in Tab. 4 erläutert). Verändert nach Bitterli-Brunner und Fischer (1988) und Pearson et al. (1991).

Geologische Profile

Längsprofil: Als strukturelle Grundlage für das lokale Grundwassermodell des Längsprofils wurde das Tunnel-Längsprofil des Plans des Ausführungsprojekts (Aegerter & Bossardt AG, Gruner AG) weitgehend übernommen. Das hier verwendete Profil (Beilage 4 und Abb. 8) entspricht bis zum Niveau der Tunnelsohle diesem Profil. Es reicht von Tunnelmeter 458 bis 2312. Im Gegensatz zum Längsprofil des Ausführungsprojekts wird zwischen verwitterten Unteren Bunten Mergeln und verwittertem Gipskeuper differenziert (diese Unterscheidung ist in Bohraufschlüssen häufig nicht möglich). Die in der vorliegenden Arbeit gewählte Interpretation stützt sich dabei auf die Erdwärmesondenbohrung BL 71 Z 19, die im Juli 2003 nur ca. 50 m neben dem Tunnel abgeteuft wurde. Die Bohrung setzt im Keuper an und erreicht den Hauptmuschelkalk. Deshalb lässt sich die Basis der Gipskeuper Formation in der Bohrung gut nachvollziehen und in das Längsprofil projizieren. Um den Grundwasserfluss auch unterhalb der Tunnelröhre berücksichtigen zu können, wurde das vorgegebene Längsprofil des Ausführungsprojekts in die Tiefe erweitert. Als untere Begrenzung wurde -500 m ü. M. gewählt. Die Konstruktion verwendet dabei die Störungen des vorgegebenen Profils und konstruiert die geologischen Schichten unterhalb der Tunnelsohle unter Annahme von Schichtmächtigkeiten (basierend auf NAGRA/SGK 1984, Goldschmid 1965, Bartholet 1964, Bericht Hauber et al. vom 03.03.1998) und aufgrund tektonischer Überlegungen.

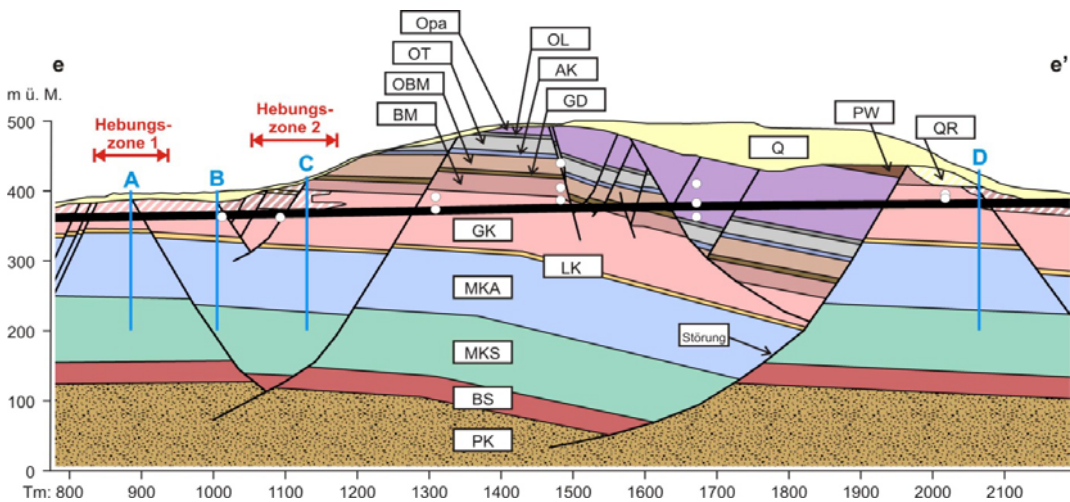


Abb. 8: Ausschnitt des geologischen Längsprofils (Beilage 4). Abkürzungen der geologischen Einheiten sind in Tab. 4 erläutert. Verwitterte Bereiche sind schraffiert. Blaue Linien: Lage der Querprofile. Weiße Punkte: Lage von Porenwasserdruckgebern.

Querprofile: Die Querprofile (Beilage 5) verlaufen senkrecht zur Tunnelachse. Sie erstrecken sich lateral 100 m vom Zentrum des Tunnels in beide Richtungen und reichen bis in die Tiefe von 200 m ü. M. Zur Konstruktion der Profile wurden das Tunnel-Längsprofil, die Erkundungsbohrungen des Projekts (s. Bericht Hauber et al. vom 03.03.1998) sowie Sondierbohrungen verwendet, die später in Zusammenhang mit den Hebungserscheinungen (s. Bericht Rotzler & Meyer, 21.02.2001; Noher & Meyer, 06.08.2003) sowie dem Tagbruch (s. Bericht Noher & Meyer, 24.10.2002) abgeteuft wurden. Ausserdem standen die geologischen Tunnel-Aufnahmen (s. Geotechnisches Institut: geologische Dokumentation Chienbergtunnel) zur Verfügung. Die Querprofile wurden an vier Stellen konstruiert (vgl. Abb. 6):

- Querprofil A bei Tunnelmeter (Tm) 885: Hier treten die grössten Deformationen der Hebungszone 1 auf.
- Querprofil B bei Tm 1005: In der Mitte des Bereichs ohne Deformationen zwischen Hebungszone 1 und 2.
- Querprofil C bei Tm 1130 (Abb. 9): Hier treten die grössten Deformationen der Hebungszone 2 auf.
- Querprofil D bei Tm 2065: In diesem Bereich nahe dem Ostportal sind bisher keine Quelldeformationen zu verzeichnen. Aufgrund der ähnlichen geologischen Situation (Lage des Tunnels im Gipskeuper im Bereich des Anhydritspiegels) wurden in diesem

Abschnitt Massnahmen getroffen, die einem potenziellen Gebirgsquellen entgegenwirken sollen.

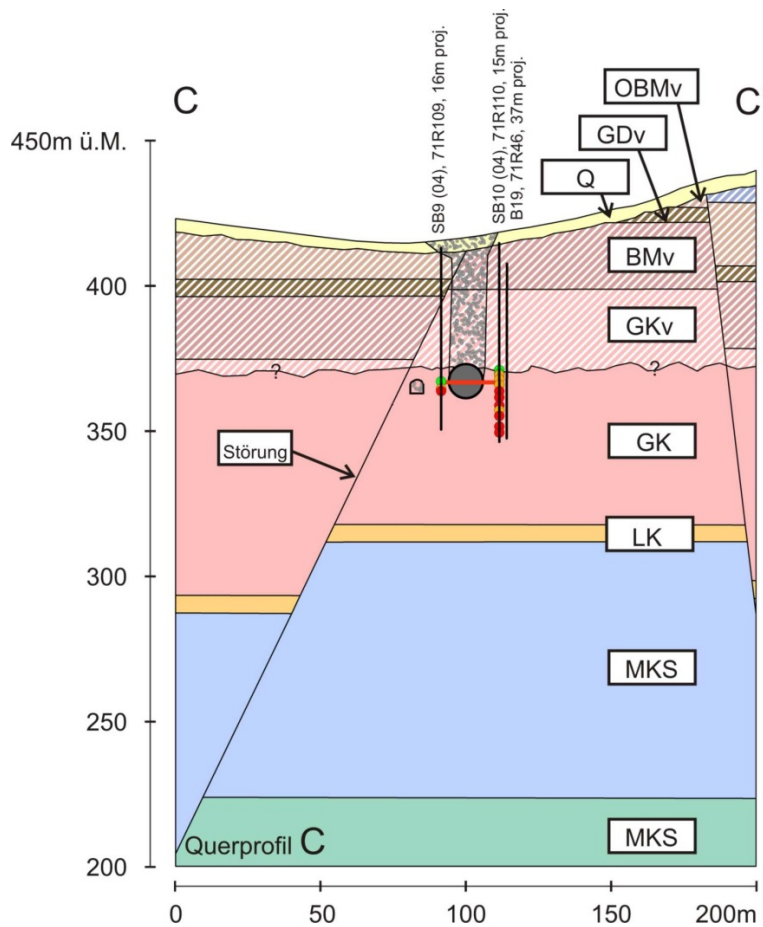


Abb. 9: Geologisches Querprofil C. Abkürzungen der geologischen Einheiten sind in Tab. 4 erläutert. Verwitterte Bereiche sind schraffiert. Schwarze Linien: Erkundungsbohrungen. Punkte: Bohrkerneproben mit Bestimmung der Sulfatminerale (grün: mit Gips; orange: mit Gips und Anhydrit; rot: mit Anhydrit). Rote Linie: Lage des Anhydritspiegels. Gepunkteter Bereich: Tagbruch.

Strukturelle Unterschiede zwischen den Querschnitten

Tab. 3 fasst die unterschiedlichen strukturellen Eigenschaften der Querschnitte A bis D zusammen. Ein Hauptunterschied ist die Lage des Anhydritspiegels relativ zur Lage des Tunnels. Die Lage des Anhydritspiegels wurde anhand der mineralogischen Analysen abgeschätzt, die an Bohrkerneproben der Erkundungsbohrungen durchgeführt wurden (vgl. auch Beilage 5). In den Querschnitten A und C befindet sich der Anhydritspiegel auf Höhe der Tunnelröhre (Querschnitt A: ca. 2 m über der Sohle; Querschnitt C: ca. 5,5 m über der Tunnelsohle). In den Querschnitten B und D hingegen befindet sich der Anhydritspiegel unter der Tunnelsohle (Querschnitt B: ca. 1,5 m unter der Sohle; Querschnitt D: ca. 3 m unter der Sohle). Auch die Lage des Gipsspiegels (Grenze verwitterter-unverwitterter Gipskeuper, ermittelt durch das Auftreten von Gips in den Kernen der Erkundungsbohrungen) ist in den Querschnitten verschieden. Der Gipsspiegel befindet sich im Querschnitt A knapp oberhalb des Tunnelfirsts. In den Querschnitten B und C liegt der Gipsspiegel im Bereich der Tunnelröhre (Querschnitt B: ca. 4,5 m unterhalb des Firsts; Querschnitt C: ca. 1,5 m unterhalb des Firsts). Im Querschnitt D befindet sich der Gipsspiegel ca. 5 m über dem First (im Tunnelbereich treten ebenfalls verwitterte Gipskeuper-sedimente auf, diese sind jedoch von unverwittertem Gipskeuper überlagert; vgl. Beilage 5).

Tab. 3: Lage des Anhydritspiegels, Gipsspiegels (verwitterter-unverwitterter Gipskeuper) und Basis des Gipskeupers (GK) relativ zur Lage des Tunnels (S: Sohle; F: First; GO: Geländeoberfläche).

	Querprofil A	Querprofil B	Querprofil C	Querprofil D
Tunnelsohle (S) ca.	356,6 m ü.M.	359,2 m ü.M	361,5 m ü.M.	375,1 m ü.M.
	39,8 m unter GO	38,3 m unter GO	55,4 m unter GO	48,0 m unter GO
Anhydritspiegel ca.	2,0 m über S	1,5 m unter S	5,5 m über S	3,0 m unter S
Gipsspiegel ca.	0,3 m über F	4,5 m unter F	1,5 m unter F	5,0 m über F
Basis GK ca.	11,6 m unter S	24,4 m unter S	43,5 m unter S	51,0 m unter S

4.2.2 Kalibrierte Grundwassermodelle

Basierend auf dem geologischen Längsprofil und den Querprofilen wurden zweidimensionale (2D) Finite-Elemente-Grundwassermodelle aufgebaut (z. B. Bear, 1972). Das Netz wurde so generiert, dass geologische Schichtgrenzen und Störungen mit Elementlinien exakt zusammenfallen, d.h. jedes Element kann exakt einer geologischen Einheit zugeordnet werden. Mit den Modellen werden das hydraulische Potenzial und Wasserflüsse berechnet, indem die Modellgleichungen für stationären, gesättigten Grundwasserfluss numerisch gelöst werden (Diersch, 2005). Abb. 10 zeigt den Modellaufbau exemplarisch für das Querprofil A.

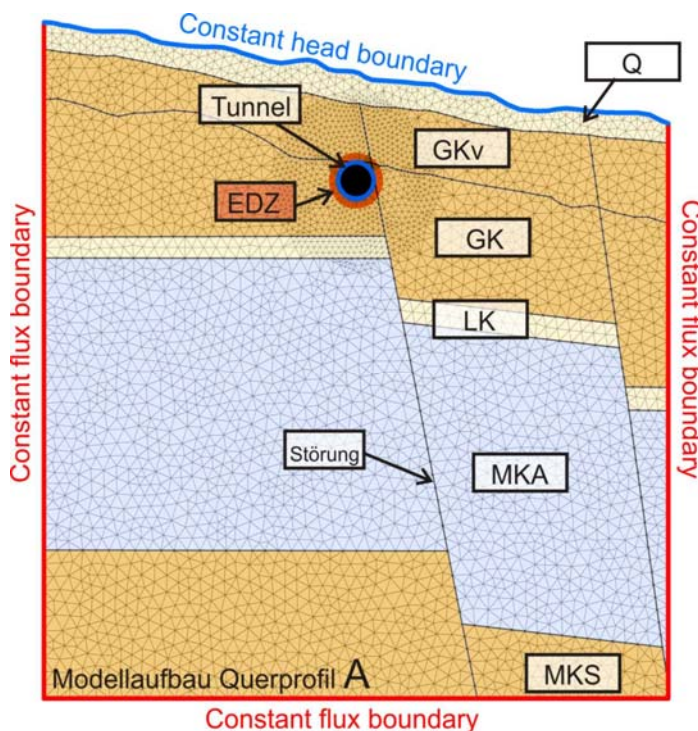


Abb. 10: Aufbau der lokalen Grundwassermodelle exemplarisch für das Querprofil A (Abkürzungen der geologischen Einheiten sind in Tab. 4 erläutert).

Die Kalibrierung des Längsprofils erfolgte über das Angleichen des Potenzials an die in den Erkundungsbohrungen vor dem Tunnelbau gemessenen Porenwasserdrücke (Abb. 11). Dazu wurden die K-Werte (hydraulische Leitfähigkeit) und die Anisotropie (Verhältnis vertikaler/horizontaler K-Wert) der geologischen Einheiten mit Hilfe des Algorithmus PEST (Doherty, 2005) angepasst. Die so abgeschätzten K-Werte (Tab. 4) variieren innerhalb der Bandbreite, die für die geologischen Einheiten und ihre Lithologien in der Literatur angegeben werden (NAGRA, 2002; Delleur, 1999). Die Unterschiede der K-Werte

zwischen den Einheiten waren jedoch unerwartet klein. Um die Plausibilität der Kalibrierung zu überprüfen, wurde der Zufluss ins Modellgebiet über die Erdoberfläche berechnet und mit der Grundwasserneubildung des Gebiets verglichen. Der Zufluss ins Modell entspricht einer Grundwasserneubildung von 620 mm/Jahr. Die Grundwasserneubildung im Bereich des Chienbergtunnels ist entsprechend des Hydrologischen Atlases der Schweiz (BAFU, 2010) ca. 600 mm/Jahr. Die für das Längsprofil abgeschätzten K-Werte wurden für die geologischen Einheiten in den Querprofilen übernommen.

Tab. 4: Bezeichnung und die in den Modellen verwendeten hydraulischen Eigenschaften der geologischen Einheiten und Strukturen.

Geologische Einheit	Symbol	Mächtigkeit (m)	K-Wert (m/s)	Anisotropie (vert./horiz.)
Quartär	Q	-	5.00E-07	0.2
Quartäre Rutschmasse	QR	-	5.00E-07	0.2
Passwang-Formation	PW	80	1.00E-06	0.1
Opalinuston	Opa	95	1.00E-09	1
Oberer Lias	OL	5	1.00E-06	0.1
Obtususton	OT	20	1.00E-07	1
Arietenkalk	AK	5	1.00E-06	1
Obere Bunte Mergel	OBM	25	1.00E-07	1
Obere Bunte Mergel verwittert	OBMv	-	1.00E-07	1
Gansinger Dolomit	GD	5	1.00E-06	0.1
Gansinger Dolomit verwittert	GDv	-	1.00E-07	1
Bunte Mergel	BM	25	1.00E-07	1
Bunte Mergel verwittert	BMv	-	1.00E-07	1
Gipskeuper	GK	80	1.00E-07	1
Gipskeuper verwittert	GKv	-	1.00E-07	1
Lettenkeuper	LK	5	1.00E-06	0.1
Muschelkalk Aquifer	MKA	90	1.00E-06	1
Muschelkalk Stauer	MKS	90	1.00E-07	1
Buntsandstein	BS	30	1.00E-06	0.1
Permo-Karbon	PK	-	1.00E-07	1
Störung	-	1	1.00E-05	(parallel Strg.)
Tunnel (Längsprofil)	-	-	wie geol. Einheit	1
Tunnel (Querprofile)	-	-	-	-
Auflockerungszone (ohne Sprengung)	-	-	wie geol. Einheit	1
Auflockerungszone (Sprengung zum Lösen)	-	-	geol. Einheit x10	1
Auflockerungszone (Sprengung)	-	-	geol. Einheit x100	1

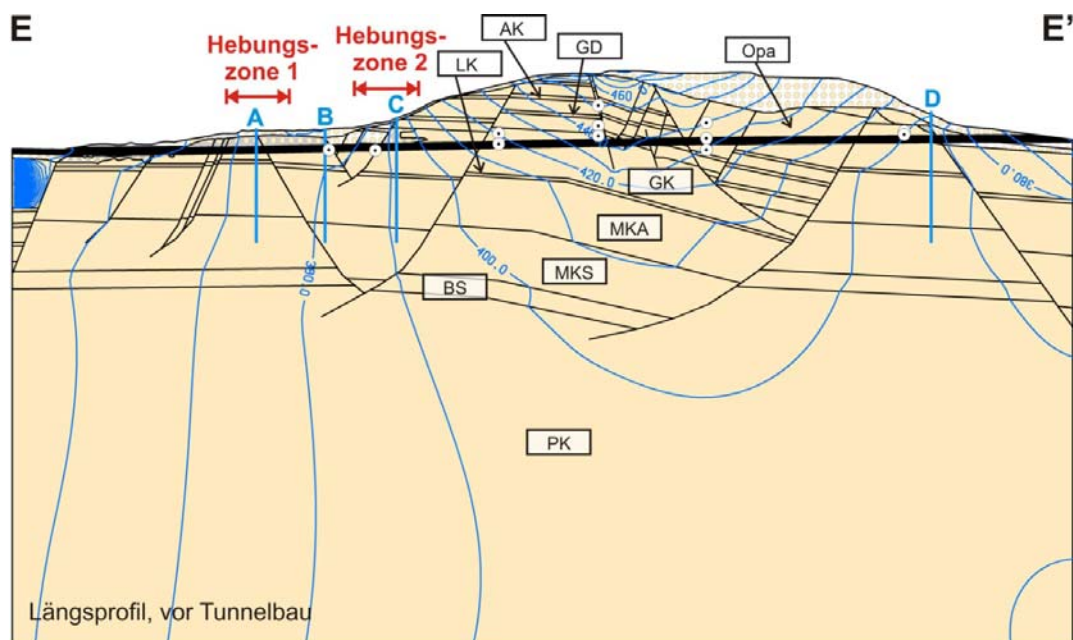


Abb. 11: Potenzialverteilung im Längsprofil vor dem Tunnelbau (Abkürzungen der geologischen Einheiten sind in Tab. 4 erläutert).

Randbedingungen

Die Geländeoberfläche ist als Modellrand 1. Art (constant head) definiert. Dazu wurden für das Längsprofil aus den Porenwasserdruckmessungen in den Erkundungsbohrungen Isohypsen konstruiert. Die so gewonnenen Potenzialwerte an der Geländeoberfläche wurden auf den oberen Modellrand interpoliert. Für die Querprofile wurden im Längsprofil die hydraulischen Potenziale an der Erdoberfläche an den Stellen abgelesen, die von den Querprofilen geschnitten werden. Dann wurde ein konstanter Grundwasserflurabstand über die Querprofile angenommen, d. h. die Differenz zwischen der Höhe der Erdoberfläche und dem Potenzial an der Erdoberfläche ist konstant.

Die übrigen Modellränder sind als Modellrand 2. Art (constant flux) definiert. Die Randzuflüsse wurden aus den regionalen Grundwassermodellen abgeleitet (siehe Kapitel 4.1; eine detaillierte Beschreibung der Übertragung der Flüsse aus den regionalen Grundwassermodellen in die lokalen Grundwassermodelle als Randbedingungen ist im Zwischenbericht lokale Grundwassermodellierung vom 26.08.2010 angegeben).

In den Modellsimulationen mit Tunnel ist am Ort der Tunnelsohle (Längsprofil) bzw. des Umfangs der Tunnelröhre (Querprofile) das hydraulische Potenzial entsprechend der topographischen Höhe der Tunnelsohle/-röhre vorgegeben (Randbedingung 1. Art, constant head boundary). Dabei wird angenommen, dass innerhalb des Tunnels keine Wasserdrücke herrschen.

Modelleigenschaften

Die hydraulischen Eigenschaften der geologischen Einheiten wurden durch die Modellkalibrierung ermittelt (siehe oben). Der Tunnel ist im Längsprofil als eine Zone mit einer erhöhten hydraulischen Leitfähigkeit berücksichtigt. Diese Zone soll die Auflockerungszone repräsentieren, die sich um Ausbrüche im Untergrund bildet („excavation damaged zone“ (EDZ), Tsang et al. 2005). In den Querprofilen wurde die Zone als wenige Meter breite Zone um die Tunnelröhre eingeführt.

Störungen können Auflockerungszonen enthalten, in denen präferentielles Fließen stattfindet (Caine et al., 1996). In den Explorationsbohrungen gab es Hinweise auf das Vorhandensein solcher Zonen (Spülverluste, Ergebnisse von Lugeon-Tests). In den Model-

len werden deshalb Störungen als eindimensionale Strukturen mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit ($1e-5$ m/s) parallel zur Orientierung der Störungen berücksichtigt.

Particle Tracking

Ähnlich wie bei der regionalen Grundwassermodellierung wurden auch bei der lokalen Grundwassermodellierung Fließwege mit Hilfe der Particle-Tracking-Methode ermittelt (vgl. Kapitel 4.1.2). Dazu wurden 200 Wasserpartikel vom Anhydritspiegel im Bereich des Tunnels entsprechend des berechneten Potenzials im Untergrund zurückverfolgt. Der Anhydritspiegel im Bereich des Tunnels wird als horizontale Linie mit einer Erstreckung von 10 m beidseitig der Tunnelachse angenommen. Die Grundidee dieser Vorgehensweise ist, das Einzugsgebiet des Anhydritspiegels im Tunnelbereich vor und nach dem Tunnelbau zu ermitteln. Sie basiert auf der Annahme, dass das Gebirgsquellen ausgelöst wird, wenn die hydraulischen Veränderungen durch den Tunnelbau einen Wasserzufluss zu anhydritführenden Schichten bewirken (siehe Kapitel 2). Deshalb ist die Herkunft des Wassers am Anhydritspiegel von besonderem Interesse.

4.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Zwischenbericht der lokalen Grundwassermodellierung vom 26.08.2010 wurden verschiedene Modellversionen getestet. Diese enthielten Simulationen mit und ohne Störungen, sowie mit und ohne Auflockerungszone im Tunnelbereich. Ausserdem wurden Fließraten (Volumenströme) durch den Tunnelquerschnitt vor und nach dem Tunnelbau berechnet. Im vorliegenden Bericht werden die geologisch-strukturelle Situation und die damit verbundenen Fließverhältnisse immer mit Störungen und Auflockerungszone um den Tunnel für die einzelnen Profile analysiert. Auf den potenziellen Einfluss von Störungen und der Auflockerungszone wird im nachfolgenden Kapitel anhand einer Parameterstudie näher eingegangen. Dort werden auch Fließraten für verschiedene Szenarien ermittelt. Ausserdem wurden in der Parameterstudie nicht Fließraten durch den Tunnelquerschnitt, sondern durch den Anhydritspiegel im Tunnelbereich berechnet. Damit sollten die Volumenströme an den Orten ermittelt werden, an denen Gebirgsquellen tatsächlich stattfinden kann.

Im Folgenden werden die geologisch-strukturelle Situation und die damit verbundenen Fließverhältnisse für die Querprofile A bis D vorgestellt. In den Beilagen 6 und 7 sind die verschiedenen Abbildungen übersichtlich zusammengefasst. Die Interpretation der Ergebnisse stützt sich dabei massgeblich auf die Analyse der

- geometrischen Beziehung zwischen dem Tunnel und der Geologie des Untergrunds (Lage des Tunnels relativ zum Gipsspiegel und Anhydritspiegel);
- Fließpfade zum Anhydritspiegel vor und nach dem Tunnelbau;
- geologischen Einheiten, die vom Grundwasser auf dem Weg zum Anhydritspiegel durchströmt werden.

Querprofil A (Hebungszone 1)

Im Querprofil A (vgl. Beilage 5 oben links und Tab. 3) befindet sich der Gipsspiegel im Bereich des Tunnelfirsts. Der Anhydritspiegel liegt ca. 2 m über der Tunnelsohle. In geometrischer Hinsicht verbindet der Tunnel den Gipsspiegel mit dem Anhydritspiegel, und somit den verwitterten Gipskeuper mit anhydritführenden Schichten des Gipskeupers. Vor dem Tunnelbau wird der Anhydritspiegel von unten angeströmt (Abb. 12 links). Das Wasser, das den Anhydritspiegel erreicht, stammt aus dem Muschelkalkaquifer und muss die relativ undurchlässigen Gesteine des unverwitterten Gipskeupers queren. Die K-Werte sind dort sehr klein. Nach dem Tunnelbau ändert sich die Grundwasserfließrichtung und ist generell von oben auf den Anhydritspiegel hin gerichtet (Abb. 12 rechts). Das Wasser stammt aus den relativ durchlässigen Schichten des verwitterten Gipskeupers (Gipskarst) und des Quartärs. Die Fließpfade konzentrieren sich im Bereiche der Auflockerungszone um die Tunnelröhre.

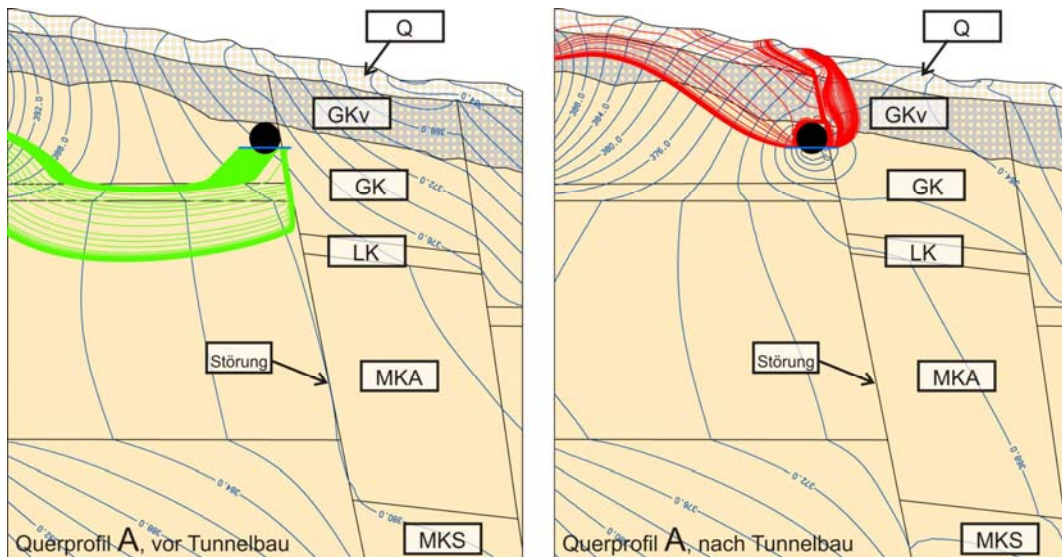


Abb. 12: Potenzialverteilung und Fließspfade zum Anhydritspiegel vor (links) und nach dem Tunnelbau (rechts), berechnet mit dem lokalen Grundwassermodell Querprofil A (Hebungszone 1). Der verwitterte Gipskeuper ist nach dem Tunnelbau hydraulisch mit dem Anhydritspiegel verbunden. Es kommt am Anhydritspiegel zu Wasserzufluss aus dem verwitterten Gipskeuper. Grau gepunktete Signatur: verwitterter Gipskeuper. Weiss gepunktete Signatur: Quartär.

Querprofil B (Bereich ohne Gebirgsquellen zwischen Hebungszone 1 und 2)

Im Querprofil B (vgl. Beilage 5 oben rechts und Tab. 3) befindet sich der Gipsspiegel ca. 4,5 m unterhalb des Tunnelfirsts. Der Anhydritspiegel liegt ca. 1,5 m unter der Tunnelsohle. Der Tunnel schafft keine Verbindung zwischen Gips- und Anhydritspiegel. Sowohl vor, als auch nach dem Tunnelbau wird der Anhydritspiegel von unten angeströmt (Abb. 13). Das Wasser, das den Anhydritspiegel erreicht, stammt aus dem Muschelkalkaquifer und muss die relativ undurchlässigen Gesteine des unverwitterten Gipskeupers queren. Auch nach dem Tunnelbau gelangt kein Grundwasser aus dem verwitterten Gipskeuper zum Anhydritspiegel.

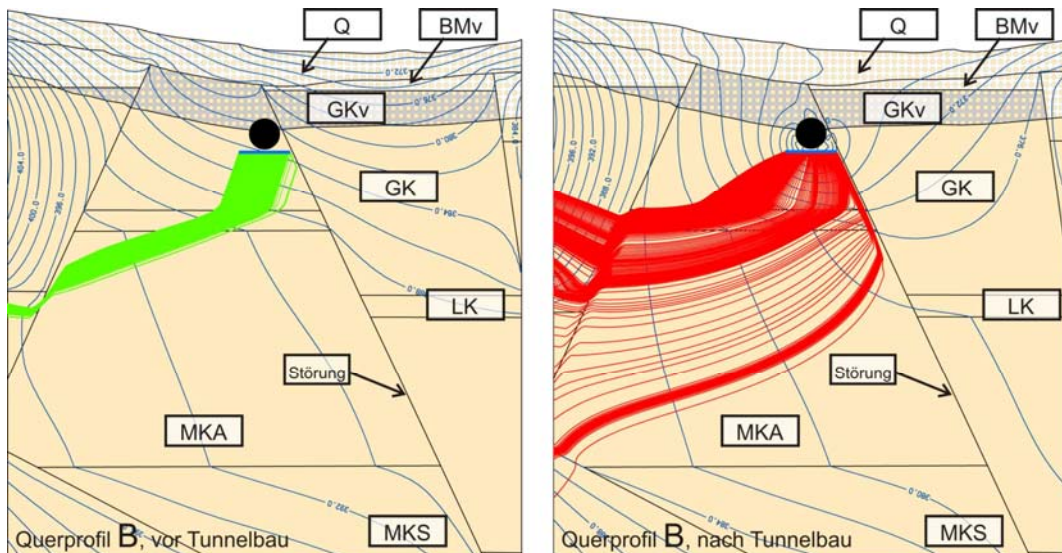


Abb. 13: Potenzialverteilung und Fließspfade zum Anhydritspiegel vor (links) und nach dem Tunnelbau (rechts), berechnet mit dem lokalen Grundwassermodell Querprofil B (Bereich ohne Gebirgsquellen zwischen Hebungszone 1 und 2). Der verwitterte Gipskeuper ist auch nach dem Tunnelbau hydraulisch nicht mit dem Anhydritspiegel verbunden. Wasserzufluss aus dem verwitterten Gipskeuper zum Anhydritspiegel findet nicht statt. Grau gepunktete Signatur: verwitterter Gipskeuper. Weiss gepunktete Signatur: Quartär.

Querprofil C (Hebungszone 2)

Im Querprofil C (vgl. Beilage 5 unten links und Tab. 3) befindet sich der Gipsspiegel ca. 1,5 m unterhalb des Tunnelfirsts. Der Anhydritspiegel liegt ca. 5,5 m über der Tunnelsohle. Der Tunnel schafft eine Verbindung zwischen Gips- und Anhydritspiegel. Vor dem Tunnelbau wird der Anhydritspiegel von unten angeströmt (Abb. 14 links). Das Wasser, das den Anhydritspiegel erreicht, stammt aus dem Muschelkalkaquifer und muss die relativ undurchlässigen Gesteine des unverwitterten Gipskeupers queren. Nach dem Tunnelbau ist die Grundwasserfließrichtung generell von oben auf den Anhydritspiegel hin gerichtet (Abb. 12 rechts). Das Wasser stammt aus den relativ durchlässigen Schichten des verwitterten Gipskeupers (Gipskarst), der verwitterten Bunten Mergel und des Quartärs. Die Fließpfade verlaufen auch im Bereich des Tagbruchs oberhalb des Tunnels, und werden in der Auflockerungszone um die Tunnelröhre konzentriert.

Querprofil D (Bereich ohne Gebirgsquellen nahe dem Ostportal)

Im Querprofil D (vgl. Beilage 5 unten rechts und Tab. 3) befindet sich der Gipsspiegel ca. 5 m über dem Tunnelfirst. Der Anhydritspiegel liegt ca. 3 m unter der Tunnelsohle. Der Tunnel schafft keine Verbindung zwischen Gips- und Anhydritspiegel. Ähnlich wie im Querprofil B wird der Anhydritspiegel sowohl vor, als auch nach dem Tunnelbau von unten angeströmt (Abb. 15). Das Wasser, das den Anhydritspiegel erreicht, stammt aus dem Muschelkalkaquifer und muss die relativ undurchlässigen Gesteine des unverwitterten Gipskeupers queren.

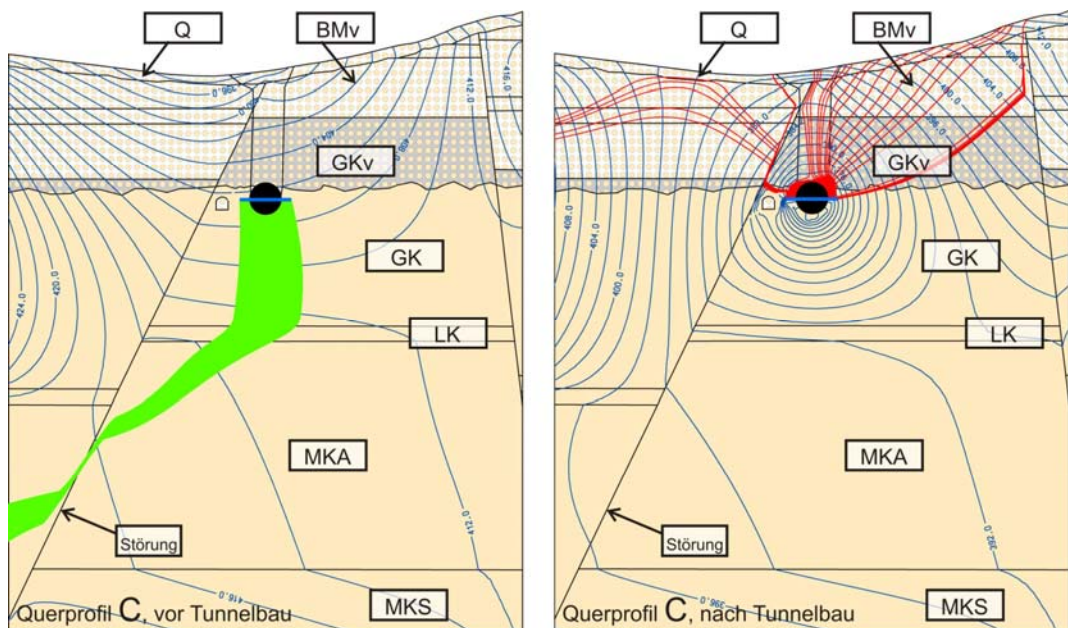


Abb. 14: Potenzialverteilung und Fließpfade zum Anhydritspiegel vor (links) und nach dem Tunnelbau (rechts), berechnet mit dem lokalen Grundwassermodell Querprofil C (Hebungszone 2). Der verwitterte Gipskeuper ist nach dem Tunnelbau hydraulisch mit dem Anhydritspiegel verbunden. Es kommt am Anhydritspiegel zu Wasserzufluss aus dem verwitterten Gipskeuper. Grau gepunktete Signatur: verwitterter Gipskeuper. Weisse gepunktete Signatur: Quartär.

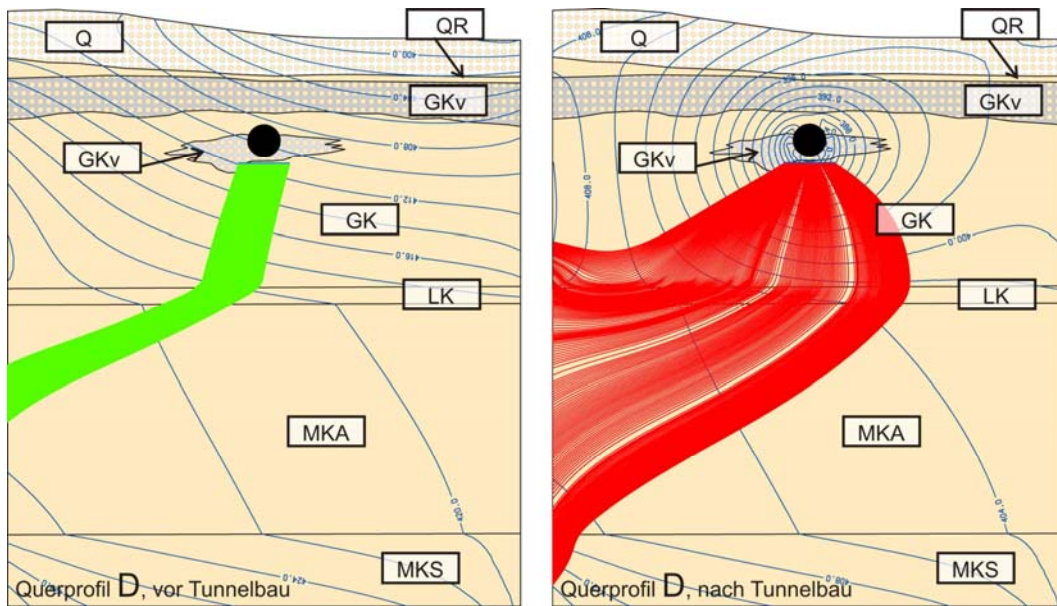


Abb. 15: Potenzialverteilung und Fließpfade zum Anhydritspiegel vor (links) und nach dem Tunnelbau (rechts), berechnet mit dem lokalen Grundwassermodell Querprofil D (Bereich ohne Gebirgsquellen nahe dem Ostportal). Der verwitterte Gipskeuper ist auch nach dem Tunnelbau hydraulisch nicht mit dem Anhydritspiegel verbunden. Wasserzufluss aus dem verwitterten Gipskeuper zum Anhydritspiegel findet nicht statt. Grau gepunktete Signatur: verwitterter Gipskeuper. Weisse gepunktete Signatur: Quartär.

Interpretation

Vor dem Tunnelbau wird der Anhydritspiegel in allen untersuchten Querschnitten von unten angeströmt. Das Wasser, das den Anhydritspiegel erreicht, muss durch die relativ undurchlässigen Schichten des unverwitterten Gipskeupers fließen. Dies lässt nur sehr geringe Fließraten zu, grössere Wasserzutritte zu den anhydritführenden Schichten werden im Tunnelbereich verhindert. Vor dem Tunnelbau ist kein Gebirgsquellen zu erwarten.

Nach dem Tunnelbau haben sich die hydraulischen Verhältnisse im Untergrund verändert. Unter bestimmten geologischen Bedingungen erfolgt ein Wasserzutritt aus dem verwitterten Gipskeuper zum Anhydritspiegel. Der verwitterte Gipskeuper und der Anhydritspiegel werden vom Tunnel und der ihn umgebenden Auflockerungszone „hydraulisch kurzgeschlossen“, d. h., Wasser wird vom verwitterten Gipskeuper (Gipskarst) dem Anhydritspiegel zugeführt. Dies kann in den Profilen A und C beobachtet werden, die in den Hebungszonen liegen. In den Profilen B und D, wo kein Gebirgsquellen stattfindet, ist dies nicht der Fall. Dort findet keine Änderung der Grundwasserfließrichtung nach dem Tunnelbau statt und das Wasser stammt aus den relativ undurchlässigen Schichten des unverwitterten Gipskeupers. Deshalb sind dort nur geringe Fließraten und kein Gebirgsquellen zu erwarten.

4.3 Parameterstudie

Durch eine Parameterstudie können sensitive Parameter ermittelt werden. Als sensitive Parameter gelten solche, die einen grossen Einfluss auf die Modellergebnisse ausüben. Diese Parameter sollten wenn möglich experimentell ermittelt werden. Ist dies nicht möglich, zeigt die Parameterstudie, wie gross die Modellunsicherheiten ohne eine exakte Kenntnis der sensitiven Parameter sind. In der vorliegenden Studie wurde eine Auswahl von Parametern getroffen, deren Einfluss modelliert wurde. Die Studie zeigt, welche der gewählten Massnahmen potenziell am effektivsten das Risiko des Gesteinsquellens verringern oder bei einer Sanierung die Prozesse des Gesteinsquellens reduzieren, herauszögern oder verlangsamen können, indem sie sensitive Parameter (z. B. Eigenschaften der Auflockerungszone oder der Tunnelröhre) beeinflussen.

In Kapitel 4.2.2 wurden lokale Grundwassermodelle vorgestellt, die anhand vorhandener Porenwasserdruckmessungen und der abgeschätzten Grundwasserneubildung kalibriert wurden. Trotz einer guten Übereinstimmung zwischen der modellierten und gemessenen Potenzialverteilung und einer modellierten Grundwasserneubildung, die mit der Grundwasserneubildung im Gebiet übereinstimmt, bestehen weiterhin Unsicherheiten bezüglich der hydraulischen Eigenschaften der geologischen Einheiten, des Tunnelbauwerks und der Randbedingungen. Die K-Werte (hydraulische Leitfähigkeiten) der geologischen Einheiten stammen nicht aus Feldexperimenten. Die Porenwasserdruckmessungen beschränken sich auf wenige Messungen im Bereich des Tunnelniveaus. Die bei der Kalibrierung bestimmten K-Werte liegen zwar im Bereich der Bandbreite der in der Literatur für entsprechende Einheiten angegebenen Werte, insgesamt sind die Unterschiede der K-Werte der einzelnen Einheiten jedoch unerwartet gering (vgl. Tab. 4). Aus diesem Grund wurde eine Parameterstudie durchgeführt.

In der Parameterstudie wurde zunächst ein Referenzmodell definiert, in dem typische Werte für die hydraulischen Parameter angenommen wurden. Anschliessend wurden die Parameter in Szenarien systematisch einzeln variiert. Dies ermöglicht, den Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Modellergebnisse zu quantifizieren (Sensitivität der Parameter). Ausserdem lässt sich dadurch der Einfluss verschiedener Grössen auf das Fliessgeschehen abschätzen. Damit sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Sind die Modellergebnisse und Schlussfolgerungen zuverlässig (wären sie auch für andere Szenarien gültig)?
- Welche Daten sollten im Feld experimentell bestimmt werden, um genauere Ergebnisse zu erhalten?
- Welche Massnahmen beim Bau oder der Sanierung haben den grössten Einfluss auf das Fliessgeschehen und sind deshalb potenziell am effektivsten?
- Welche geologischen oder hydraulischen Situationen sind besonders kritisch in Bezug auf das Quellrisiko?

Der Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Modellergebnisse wurde ermittelt, indem für die einzelnen Szenarien die Fliessrate (Volumenstrom) durch den Anhydritspiegel im Tunnelbereich berechnet und mit anderen Szenarien verglichen wurde. Dadurch wird ein direkter Bezug zum Quellrisiko hergestellt: Ist die Fliessrate am Anhydritspiegel nach dem Tunnelbau hoch, ist auch das Quellrisiko hoch.

4.3.1 Referenzmodelle und Szenarien

Für die hydraulischen Eigenschaften der Referenzmodelle werden typischen Werte verwendet, die in den Szenarien systematisch und einzeln variiert werden. Abb. 16 zeigt den Aufbau der Referenzmodelle exemplarisch für Querprofil A. In den Szenariensimulationen wurde jeweils 1 Parameter gegenüber dem Referenzmodell geändert. Insgesamt umfasst die Parameterstudie 10 Parameter-Sets, die jeweils 5 verschiedene Parameter beinhalten (vgl. Tab. 5).

Bemerkung zum Umfang der Parameterstudie: Insgesamt wurden 430 Szenarien gerechnet (inklusive Referenzmodell), und 670 Fliessraten ausgewertet [10 Parameter-Sets x 5 Parameter x 5 Profile (4 Querprofile, Längsprofil) x 2 (vor/nach dem Tunnelbau) ergibt 500 Szenarien. Jedoch ist der Tagbruch in den Querprofilen A, B und D nicht enthalten, und Querprofil D enthält keine Störungen. Dadurch ist die Zahl der Szenarien kleiner als 500. Es gibt mehr berechneten Fliessraten als Szenarien, da mit dem Längsprofil je Szenario 4 Fliessraten (Abschnitte A bis D) berechnet werden].

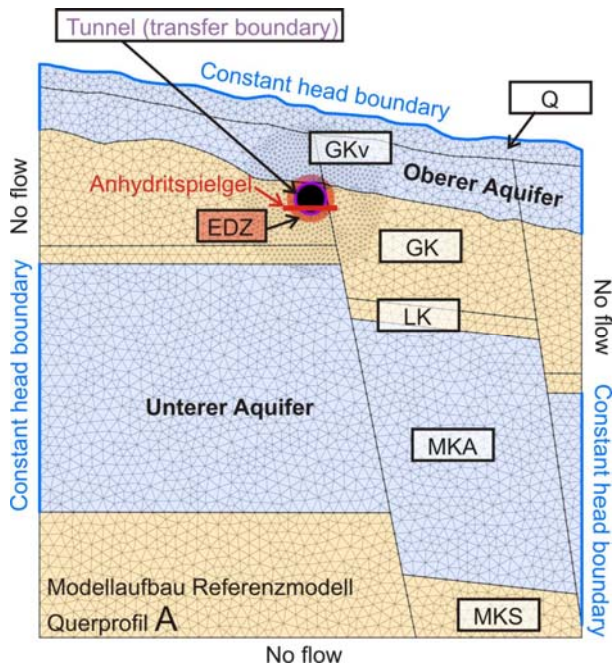


Abb. 16: Aufbau des Referenzmodells Querprofil A.

Mit den Referenzmodellen und den Szenarienmodellen wurden die Fließraten am Anhydritspiegel im Tunnelbereich für die Querprofile A bis D und die entsprechenden Abschnitte im Längsprofil berechnet. Der Anhydritspiegel wird (wie in den kalibrierten Modellen) als horizontale Linie berücksichtigt, die sich in den Querprofilen je 10 m beidseitig der Tunnelachse (vgl. Abb. 12 bis 15) und im Längsprofil je 10 m beidseitig der Position der Querprofile (vgl. Abb. 11) erstreckt. Die Fließraten wurden vor und nach dem Tunnelbau berechnet.

Die hydraulischen Modelleigenschaften und die variierten Parameter werden im Folgenden vorgestellt. Tab. 5 fasst die hydraulischen Eigenschaften des Referenzmodells und der Szenarien zusammen.

K-Wert des Oberen Aquifers und K-Wert des Gipskeupers

Generell wird in der Parameterstudie zwischen Aquiferen (Quartär, Arietenkalk, Gansinger Dolomit, Muschelkalkaquifer, Buntsandstein, alle verwitterte Einheiten) und Aquitarden (Passwang-Formation, Opalinuston, Obere Lias, Obtususton, Obere Bunten Mergel, Bunte Mergel, Gipskeuper, Lettenkeuper, Muschelkalkstauer, Permokarbon) unterschieden. Das Referenzmodell sieht einen K-Wert von $1e-6$ m/s für die Aquifere und $1e-12$ m/s für die Aquitarde vor. In den Szenarien wird der K-Wert des „Oberen Aquifers“ oberhalb des Tunnels (Quartär und verwitterte Einheiten darunter) sowie des Gipskeupers (unverwitterter Gipskeuper inkl. Lettenkeuper) schrittweise um 2 Größenordnungen nach oben und unten variiert.

K-Wert und Mächtigkeit der Auflockerungszone um den Tunnel

Wir gebrauchen in diesem Bericht den Begriff „Auflockerungszone“, um sowohl Volumenveränderung wie auch Auflockerungen durch den Ausbruchvorgang und damit zusammenhängende Veränderung der Gebirgsparameter zu beschreiben. Die vor allem durch Spannungsumlagerungen verursachte Volumenänderung und die Auflockerung führen zur Veränderung der Gesteins- und Gebirgsporosität und damit zu Veränderungen der Durchlässigkeit. In den vorgestellten 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 (z. B. Tsang et al. 2005).

Untersuchungen in den Felslaboren Mont Terri (Schweiz) und Tournemire (Frankreich) (Tsang et al., 2005) haben gezeigt, dass die hydraulische Leitfähigkeit der EDZ in Ton-

steinen bis zu 6 Grössenordnungen gegenüber dem unbeeinflussten Gestein erhöht sein kann, und bis zu einen Tunnelradius in die Umgebung des Tunnels hineinreicht. Die hydraulische Leitfähigkeit in der EDZ war in den Felslabors am grössten ca. 0.6 m hinter der Tunnelöffnung und nahm dann in zunehmender Distanz vom Tunnelquerschnitt ab. 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).

In unserer Studie wurde für das Referenzmodell für die hydraulische Leitfähigkeit der Auflockerungszone ein Wert von $1e-6$ m/s gewählt, der in den Szenarien schrittweise um je eine Grössenordnung verringert wurde. Die Auflockerungszone ist im Referenzmodell 2 m mächtig, die Szenarien sehen Mächtigkeiten zwischen 0 m (keine Auflockerungszone) und 6 m (maximale Ausdehnung, ca. 1 Tunnelradius) vor.

K-Wert Störungen

Störungen können Zonen mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit enthalten (Caine et al., 1996). In den Erkundungsbohrungen am Chienberg wurden erhöhte hydraulische Leitfähigkeiten in Bereich von Störungen durch Spülverluste und Lugeon-Test erkannt (Hauber et al., Geologisch-geotechnischer Bericht vom 13.03.1998). Die hydraulischen Eigenschaften von Störungzonen sind in tonigen Gesteinen jedoch schwer zu quantifizieren. Ausserdem werden nicht alle Störungen in Bohrungen und bei der Tunnelaufnahme erfasst. Das Referenzmodell berücksichtigt deshalb keine Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit in den dokumentierten Störungen. Die Szenarien hingegen sehen erhöhte hydraulische Leitfähigkeiten zwischen $1e-6$ und $1e-9$ m/s vor.

Wasseraustrittsraten im Tunnel

Der Tunnel ist als Randbedingung 3. Art (Transfer Randbedingung) eingeführt, wobei das Potenzial wie in den kalibrierten Modellen (vgl. Kapitel 4.2.2) der topographischen Höhe entspricht. Die Betonhülle des Tunnels reduziert Wasserzutritte in den Tunnel und somit die Drainagewirkung des Tunnels stark. Dies hat auch Einfluss auf die Hydraulik im Tunnelbereich (Butscher et al., 2011). Mit der Ausflussrate wird der hydraulische Widerstand berücksichtigt, den die Betonhülle des Tunnels dem Wasserfluss in den Tunnel hinein entgegengesetzt. Der Wert berechnet sich aus dem Verhältnis der hydraulischen Leitfähigkeit der Betonhülle zur Dicke der Betonhülle (je grösser der Wert, desto geringer der Widerstand). Der Referenzwert von $2e-4$ 1/Tag entspricht einer angenommenen hydraulischen Leitfähigkeit des Betons von $2.3e-9$ m/s bei einer Dicke von 1 m. Die Durchlässigkeit der Betonhülle, und somit die Drainagewirkung des Tunnels, kann durch das Verwenden von Geomembranen (Caputo and Huez, 1987) oder Injektionen hinter der Betonhülle (Butrón et al., 2010) verringert werden. Weniger mächtige Verschalungen oder Risse und undichte Fugen können die Durchlässigkeit hingegen erhöhen. Dies wurde in den Szenarien berücksichtigt, indem die Ausflussrate schrittweise um 2 Grössenordnungen nach oben und unten variiert wurde.

K-Wert Tagbruch

Im Bereich des Querprofils C kam es während des Tunnelbaus zu einem Tagbruch (vgl. Abb. 9). Der Bereich des Tagbruchs wurde mit Bruchmaterial des Gipskeupers, der Buntmergel und mit Quartären Lockergesteinen verfüllt. Es ist wahrscheinlich, dass sich dadurch die hydraulische Leitfähigkeit dieses Bereiches erhöht hat. Es ist jedoch auch möglich, dass präferentielle Fliesswege des Gipskarstes im verwitterten Gipskeuper durch den Tagbruch zerstört wurden. Das Referenzmodell geht von einem gleichen K-Wert im Tagbruchbereich wie im Oberen Aquifer aus (entspricht einer Situation ohne Tagbruch). In den Szenarien wird der K-Wert im Tagbruchbereich schrittweise um 2 Grössenordnungen nach oben und unten variiert. Die Szenarien sehen zwei verschiedene Typen des Tagbruchs vor (Abb. 18). Der Tagbruch Typ I reicht von der Erdoberfläche bis zum First des Tunnels und endet dort. Der Tagbruch Typ II beinhaltet auch Bereiche neben dem Tunnel.

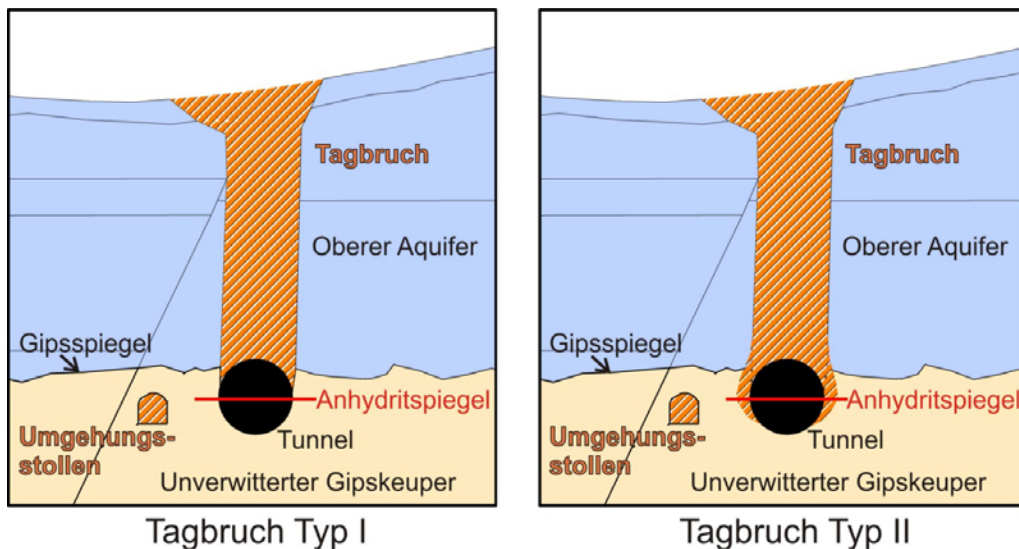


Abb. 17: Tagbruch Typ 1 oberhalb des Tunnels (links) und Typ II oberhalb und seitlich des Tunnels (rechts).

Hydraulisches Potenzial Oberer Aquifer

Das hydraulische Potenzial am oberen Modellrand (Erdoberfläche) wurde wie in den kalibrierten Modellen als Randbedingung 1. Art gesetzt. Für das Referenzmodell wurde die Potenzialhöhe an der Erdoberfläche direkt über dem Tunnel aus dem Längsprofil übernommen, wo Porenwasserdruckmessungen eine Interpolation der Potenzialverteilung an die Erdoberfläche erlaubten (vgl. Kapitel 4.2.2). Seitlich des Tunnels an der Erdoberfläche wurde das Potenzial so gesetzt, dass der sich daraus ergebende Grundwasserflurabstand (topographische Höhe minus hydraulisches Potenzial) über das ganze Profil konstant ist. Das hydraulische Potenzial im Oberen Aquifer (Quartär, verwitterter Gipskeuper) an den seitlichen Modellrändern entspricht dem Wert an der Erdoberfläche darüber (hydrostatische Bedingungen). In Aquitarden wurde an den Modellrändern kein Fluss zugelassen (no flow boundary). Die Szenarien sehen im Oberen Aquifer sowohl eine Potenzialerhöhung, als auch eine Potenzialerniedrigung um 10 und 20 m vor.

Hydraulisches Potenzial Untere Aquifere

An den Modellrändern unterhalb des Tunnels wurde das Potenzial der Aquifere aus dem regionalem Grundwassermodell (hydrostratigraphisches Modell vor Tunnelbau, vgl. Kapitel 4.1) entnommen. Das Potenzial entspricht 425 m im Muschelkalkaquifer und 435 m im Buntsandstein. In Aquitarden wurde an den Modellrändern kein Grundwasserfluss zugelassen (no flow boundary). Die Szenarien sehen in den Unteren Aquifere sowohl eine Potenzialerhöhung, als auch eine Potenzialerniedrigung um 10 und 20 m vor.

Tab. 5: Parameter-Sets und Parameter der Szenarien. Fettdruck: Referenzmodell; *: entspricht ohne Tagbruch; **: siehe Text.

Parameter-Set	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3	Parameter 4	Parameter 5
K-Wert Oberer Aquifer (m/s)	1e-4	1e-5	1e-6	1e-7	1e-8
K-Wert Gipskeuper (m/s)	1e-10	1e-11	1e-12	1e-13	1e-14
K-Wert Auflocke- rungszone (m/s)	1e-6	1e-7	1e-8	1e-9	1e-10
Mächtigkeit Auflo- ckerungszone (m)	0	1	2	4	6
K-Wert Störungen (m/s)	1e-6	1e-7	1e-8	1e-9	Keine Störung
Ausflussrate am Tunnel (1e-4 m/Tag)	0,02	0,2	2	20	200
K-Wert Tagbruch (m/s)	1e-4	1e-5	1e-6*	1e-7	1e-8
Potenzial Oberer Aquifer (m)	Referenzmodell -20	Referenzmodell -10	Referenzmodell**	Referenzmodell +10	Referenzmodell +20
Potenzial Untere Aquifere (m)	445 (MKA) 455 (BS)	435 (MKA) 445 (BS)	425 (MKA) 435 (BS)	415 (MKA) 425 (BS)	405 (MKA) 415 (BS)

4.3.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Referenzmodell

Die Berechnungen mit dem Referenzmodell zeigen, dass die Fliessraten am Anhydritspiegel nach dem Tunnelbau in den Querprofilen A und C und den entsprechenden Abschnitten des Längsprofils stark erhöht sind (Abb. 18). Die Erhöhung der Fliessraten fällt für die Querprofile B und D und den entsprechenden Abschnitten des Längsprofils sehr viel geringer aus. Dies stützt die Hypothesen, dass

- der Tunnelbau hydraulische Veränderungen im Untergrund bewirkt, die in bestimmten geologischen Situationen zu erhöhtem Wasserzufluss zu anhydritführenden Gesteinsschichten führen, und dass
- Gebirgsquellen (nur) dann stattfindet, wenn nach dem Tunnelbau der Wasserzufluss zum Anhydritspiegel grösser als ein kritischer Schwellenwert ist, und vor dem Tunnelbau kleiner als dieser Schwellenwert war. Der Schwellenwert muss grösser sein als die Fliessraten nach dem Tunnelbau in den Zonen ohne Gebirgsquellen, und kleiner als die Fliessraten nach dem Tunnelbau in den Zonen mit Gebirgsquellen. Dieser Schwellenwert liegt im Referenzmodell in einem Bereich zwischen 2,1e-3 und 2,7e-2 m³/Tag pro Tunnelmeter (Querprofile) bzw. 2,8e-2 und 9,4e-2 m³/Tag pro Tunnelmeter (Längsprofil) (Abb. 18).

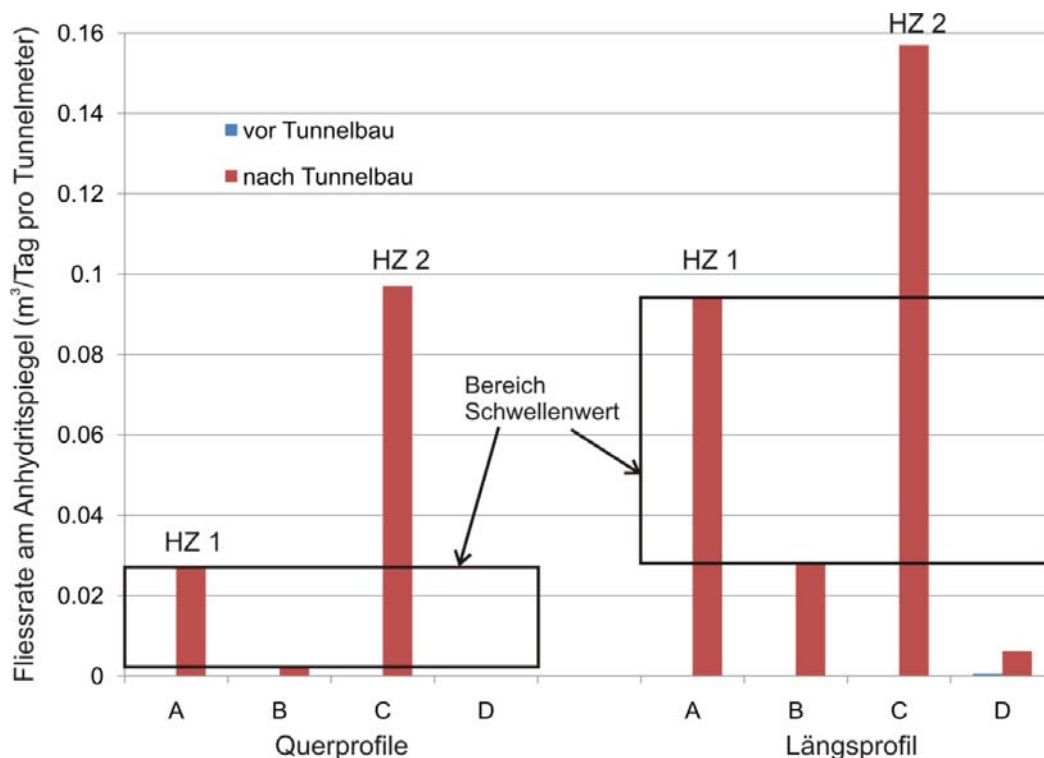


Abb. 18: Fließraten am Anhydritspiegel im Tunnelbereich, vor und nach dem Tunnelbau, berechnet mit den Referenzmodellen (die Fließrate vor dem Tunnelbau ist nur für den Abschnitt D des Längsprofil erkennbar, in den übrigen Profilen/Abschnitten sind die Fließraten kleiner $3e-6$ m³/Tag und können deshalb nicht dargestellt werden). Nach dem Tunnelbau sind die Fließraten insbesondere in den Profilen/Abschnitten A und C stark erhöht. Dies sind die Tunnelbereiche mit Gebirgsquellen (Hebungszonen (HZ) 1 und 2). Die berechneten Fließraten stützen die Hypothese, dass es nach dem Tunnelbau zum Gebirgsquellen kommt, wenn die Fließrate am Anhydritspiegel im Tunnelbereich einen Schwellenwert übersteigt.

K-Wert Oberer Aquifer

Die Fließraten am Anhydritspiegel nach dem Tunnelbau nehmen deutlich ab, wenn geringere K-Werte des Oberen Aquifers angenommen werden (Beilage 8 oben). Eine Ermittlung des K-Werts durch Feldexperimente (Pumpversuche, Lugeon-Tests) würde es erlauben, die Fließraten sehr viel genauer zu berechnen als ohne solche Experimente. Generell sind Abschnitte, in denen der Tunnel und die Auflockerungszone um den Tunnel den Oberen Aquifer anschneiden, besonders riskant in Hinblick auf die Gefährdungen des Gebirgsquellens, wenn die hydraulische Leitfähigkeit des Oberen Aquifers hoch ist.

K-Wert unverwitterter Gipskeuper

Die Fließraten sind unabhängig von den K-Werten des Gipskeupers (Beilage 8 unten). Eine Ermittlung des K-Werts des (unveränderten) Gipskeupers durch Feldexperimente (Pumpversuche, Lugeon-Tests) ist nicht erforderlich. Die Unabhängigkeit der Fließraten vom K-Wert ergibt sich daraus, dass die hydraulischen Eigenschaften des Gipskeupers in diesem Bereich von den Eigenschaften der EDZ bestimmt sind (siehe unten).

K-Wert Auflockerungszone um den Tunnel

Die Fließraten am Anhydritspiegel nach dem Tunnelbau reagieren sehr sensitiv auf den K-Wert der Auflockerungszone um den Tunnel (Beilage 9 oben). Hohe Fließraten in den Abschnitten A und C ergeben sich nur in Szenarien mit hohen K-Werten der Auflockerungszone. Ist die hydraulische Leitfähigkeit der Auflockerungszone gering, sind die Fließraten auch nach dem Tunnelbau gering. Das Vorhandensein einer Auflockerungszone mit einer hohen hydraulischen Leitfähigkeit ist in den von uns untersuchten Situationen also eine Voraussetzung für das Gebirgsquellen. Sollen Fließraten genau ermittelt werden, müssen die hydraulischen Eigenschaften der Auflockerungszone experimentell ermittelt werden. Das Risiko des Gebirgsquellens könnte potenziell entschärft werden, wenn Massnahmen ergriffen werden, die die Ausbildung der Auflockerungszone gering

halten. In den von uns untersuchten Situationen würde dies die Fließraten am Anhydritspiegel verringern, was zu einem Herausögern oder Verlangsamten der Quellphänomene führen könnte. 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 Auflockerungszone, sowie potenzielle weitere (auch negative) Auswirkungen solcher Massnahmen auf das Gebirgsquellen, sind jedoch noch wenig untersucht.

Mächtigkeit Auflockerungszone um den Tunnel

Hohe Fließraten am Anhydritspiegel nach dem Tunnelbau ergeben sich nur in Szenarien, in denen der Anhydritspiegel im Bereich der Auflockerungszone um den Tunnel liegt, und die Auflockerungszone gleichzeitig in den Oberen Aquifer über dem Tunnel hineinreicht (d. h. auch den Gipsspiegel beinhaltet) (Beilage 9 unten). Liegen Anhydritspiegel und Gipsspiegel beide im Bereich der Auflockerungszone, spielt ihre Mächtigkeit für die berechneten Fließraten nur noch eine geringe Rolle. In diesen Fällen ergibt sich ein „hydraulischer Kurzschluss“ zwischen dem Oberen Aquifer und dem Anhydritspiegel, der zu hohen Fließraten am Anhydritspiegel führt (vgl. Simulationen mit den kalibrierten Modellen, Kapitel 4.2). Eine Auflockerungszone von nur 1 m Mächtigkeit reicht im Querprofil B beispielsweise nicht aus, Wasser zum Anhydritspiegel zu bringen. Ohne Auflockerungszone sind die Fließraten am Anhydritspiegel in allen Abschnitten auch nach dem Tunnelbau sehr klein. Dies unterstreicht, dass die Mächtigkeit der Auflockerungszone für zuverlässige Berechnungen der Fließraten bekannt sein sollte. Situationen, in denen die Auflockerungszone einen Aquifer mit anhydritführenden Schichten geometrisch verbindet, bergen ein hohes Quellrisiko und sollten schon bei der Planung der Tunnelstrecke vermieden werden. Dazu ist es nötig, neben der Ausdehnung der Auflockerungszone auch die Lage des Anhydritspiegels und die Lage von Aquiferen (z. B. die Verwitterungstiefe des Gipskeupers) bei der Erkundung zu ermitteln.

K-Wert Störungen

Einen Einfluss des K-Werts von Störungen kann nur im Querprofil A beobachtet werden (Beilage 10 oben). Dort schneidet eine Störung den Anhydritspiegel im Tunnelbereich. Ein grösserer Einfluss auf die Fließrate ergibt sich nur für das Szenario mit einer angenommenen hydraulischen Leitfähigkeit von $1e-6$ m/s entlang der Störung. Ist die Leitfähigkeit geringer, wird in den Simulationen der Wasserzufluss zum Anhydritspiegel vom Oberen Aquifer über die Auflockerungszone bestimmt. Wenn die Leitfähigkeit in der Störung genauso gross (oder grösser; hier nicht gezeigt) wie im Oberen Aquifer und der Auflockerungszone ist, kommt es zusätzlich zu Wasserzufluss von unten aus dem Muschelkalkaquifer über die Störung. Störungszonen können das Quellrisiko erhöhen, wenn sie eine hohe hydraulische Leitfähigkeit aufweisen und nahe dem Tunnel anhydritführende Schichten queren.

Ausflussrate am Tunnel

Die Ausflussrate am Tunnel hat in den untersuchten Situationen einen grossen Einfluss auf die Fließraten am Anhydritspiegel (Beilage 10 unten). Bei Ausflussraten, die kleiner sind als diejenigen, die im Referenzmodell gewählt wurden, sind die Fließraten am Anhydritspiegel sehr gering. Dies ist ein Hinweis darauf, dass Quellerscheinungen herausgezögert oder verlangsamt werden könnten, wenn Wasserflüsse in den Tunnel (oder seine Drainage) reduziert werden würden. Dazu sind potenziell verschiedene Massnahmen geeignet:

- Möglichst dichte Tunnelhülle (dicke Betonwände, Vermeidung von Fugen, Injektionen hinter die Tunnelwände),
- keine Drainage hinter den Tunnelwänden,
- Installation der Betonhülle direkt nach dem Auffahren des Tunnels (das Auffahren eines Pilotstollens mit einer späteren Ausweitung des Pilotstollens könnte ungünstig sein, weil dies während der Bauphase über längere Zeiträume zu einem „offenen Tunnel“ mit grossem Drainageeffekt und somit potenziell zu grossen Fließraten am Anhydritspiegel führt).

Die konkreten Auswirkungen solcher Massnahmen auf das Gebirgsquellen sind jedoch noch wenig untersucht. Es kann bei heutigem Kenntnisstand nicht ausgeschlossen werden, dass solche Massnahmen weitere (auch negative) Auswirkungen auf das Gebirgsquellen haben.

K-Wert Tagbruch

Der K-Wert des Tagbruchs hat in den durchgeführten Simulationen einen deutlichen Einfluss auf die Fliessraten am Anhydritspiegel im Tunnelbereich (Beilage 11). Am ausgeprägtesten ist dieser Einfluss im Längsprofil. Ausser in den Szenarien, wo für den Tagbruch sehr kleine hydraulische Leitfähigkeiten angenommen werden (2 Grössenordnungen kleiner als im Aquifer über dem Tunnel), sind die Fliessraten am Anhydritspiegel nach dem Tunnelbau jedoch in allen Szenarien gross. Dies lässt vermuten, dass der Tagbruch nicht ursächlich für das Auftreten der Hebungerscheinungen ist. Es ist jedoch möglich, dass Wasserzutritte, und somit die Quellhebungen, durch den Tagbruch verstärkt wurden.

Hydraulisches Potenzial Oberer Aquifer

Die Fliessraten am Anhydritspiegel im Tunnelbereich nehmen stark zu, wenn das Potenzial im Oberen Aquifer erhöht wird (Beilage 12 oben). Für genaue Berechnungen der Fliessraten am Anhydritspiegel muss der Grundwasserspiegel im Oberen Aquifer im Feld gemessen werden. Geometrische Situationen, in denen der Tunnel und die Auflockerungszone um den Tunnel den Gipsspiegel mit dem Anhydritspiegel verbinden, sind in Bezug auf das Quellrisiko besonders kritisch, wenn der Tunnel tief unter dem Grundwasserspiegel liegt. Wenn möglich, sollte dies bei der Planung der Tunnelstrecke berücksichtigt werden. Die Simulationen deuten darauf hin, dass das Quellrisiko durch eine Absenkung des Grundwasserspiegels verringert werden kann. Insbesondere während des Tunnelbaus, wenn der Tunnel offen (ohne Betonhülle) und seine Drainagewirkung deshalb gross ist, könnte eine Grundwasserhaltung mit Absenkungsbrunnen im Oberen Aquifer eine effektive begleitende Massnahme sein.

Hydraulisches Potenzial Unterer Aquifere

Die Fliessraten am Anhydritspiegel im Tunnelbereich sind unabhängig vom Potenzial im Muschelkalkaquifer (Beilage 12 unten). Eine Messung des Potenzials im Muschelkalkaquifer ist zur Beurteilung des Quellrisikos in den hier untersuchten geologischen Situationen nicht erforderlich. Dies muss nicht für andere geologische Situation gelten. In Situationen, in denen der Tunnel und die Auflockerungszone um den Tunnel den Anhydritspiegel mit dem Muschelkalkaquifer hydraulisch verbinden, ist ein Einfluss des Potenzials im Muschelkalkaquifer auf die Fliessraten am Anhydritspiegel zu erwarten. Eine solche Situation ist beispielsweise bei steilstehenden Schichten im Faltenjura denkbar.

Synthese der Szenarien

Das Referenzmodell kann die beobachteten Quellhebungen dadurch erklären, dass vor dem Tunnelbau die Fliessraten am Anhydritspiegel im Tunnelbereich klein waren, diese jedoch nach dem Tunnelbau in den Abschnitten mit Quellhebungen stark erhöht sind (siehe oben und Abb. 18). Die einzelnen Szenarien zeigen fast ausnahmslos das gleiche Muster wie das Referenzmodell (Beilagen 8 bis 12): Nach dem Tunnelbau sind die Fliessraten am Anhydritspiegel im Tunnelbereich in den Abschnitten mit Hebungerscheinungen (Querprofile A und C und entsprechende Abschnitte im Längsprofil) deutlich höher als in den Abschnitten ohne Hebungerscheinungen (Querprofile B und D und entsprechende Abschnitte im Längsprofil). Dies untermauert die Hypothese, dass das Gebirgsquellen durch hohe Fliessraten am Anhydritspiegel nach dem Tunnelbau ausgelöst wird, und zeigt gleichzeitig, dass die Grundwassermodelle trotz ihrer Unsicherheiten in der Lage sind, die Prozesse, die zum Gebirgsquellen führen, zu identifizieren.

Eine quantitative Angabe eines kritischen Schwellenwerts für die Fliessrate am Anhydritspiegel im Tunnelbereich, der bei Überschreitung nach dem Tunnelbau zum Gebirgsquellen führt, ist wegen der Modellunsicherheiten nicht möglich. Ein solcher kann nur ermittelt werden, wenn alle sensitiven Parameter experimentell bestimmt werden. Die sensitiven Parameter in dieser Studie sind der K-Wert des Oberen Aquifers, der Auflockerungszone um den Tunnel und des Tagbruchbereichs, die Mächtigkeit der Auflockerungszone, die Ausflussrate (K-Wert und Dicke) der Tunnelhülle und der Grundwasserspiegel im oberen

Aquifer. Ausserdem können mit den Modellen Fließraten nur dann zuverlässig quantifiziert werden, wenn der geologisch-strukturelle Aufbau des Gebiets nicht nur im Tunnelprofil, sondern auch in anderen, für die spezifischen hydrogeologischen Verhältnisse relevanten Profilschnitten (z. B. senkrecht zum Tunnelverlauf) bekannt ist. Für den Aufbau der Grundwassermodelle ist die Kenntnis der geometrischen Anordnung der Aquifere und Aquitarde sowie der Lage des Gips- und Anhydritspiegel eine wichtige Voraussetzung.

5 Bewertung

5.1 Ursachen für das Gesteinsquellen

Im verwitterten Gipskeuper, d. h. oberhalb des Gipsspiegels, ist Gips herausgelöst. Es entstehen Lösungshohlräume, in denen Wasser zirkulieren kann (Gipskarst). Der verwitterte Gipskeuper ist deshalb häufig wasserführend. Die Simulationen mit den lokalen Grundwassermodellen haben für den Chienbergtunnel gezeigt, dass Wasserzutritte zu anhydritführenden Schichten nach dem Tunnelbau dann stattfinden, wenn der Tunnel und die umgebende Auflockerungszone den verwitterten Gipskeuper (oberhalb des Gipsspiegels) mit anhydritführenden Schichten (unterhalb des Anhydritspiegels) hydraulisch verbindet („hydraulischer Kurzschluss“). Dies ist in den Hebungszone (Querprofile A und C) gegeben: der Tunnel und die umgebende Auflockerungszone reichen im Firstbereich über den Gipsspiegel in den verwitterten Gipskeuper und gleichzeitig im Sohlbereich unter den Anhydritspiegel in anhydritführende Schichten des unverwitterten Gipskeupers hinein. Im Bereich zwischen den Hebungszone (Querprofil B) ist dies nicht der Fall, denn der Anhydritspiegel liegt etwas tiefer als der Tunnel. Auch im Gipskeuper nahe dem Ostportal ist diese Situation nicht gegeben. Dort liegt der Gipsspiegel deutlich über und der Anhydritspiegel deutlich unter dem Tunnel.

Mit den Grundwassermodellen wurden die Fließraten am Anhydritspiegel im Tunnelbereich berechnet. Die hydraulische Verbindung des verwitterten Gipskeupers mit dem Anhydritspiegel führt nach dem Tunnelbau in den Hebungszone zu hohen Fließraten am Anhydritspiegel. Diese Wasserzutritte sind geeignet, das Gebirgsquellen auszulösen. Die Fließraten in den Zonen ohne Quellerscheinungen sind auch nach dem Tunnelbau verhältnismässig klein. Dort stammt das Wasser im Bereich des Anhydritspiegels aus dem unverwitterten Gipskeuper, und die Fließraten bleiben aufgrund der geringen Durchlässigkeit des unverwitterten Gipskeupers klein. Die relativ hohen Fließraten am Anhydritspiegel in den Hebungszone nach dem Tunnelbau und die sehr viel kleineren Fließraten in den Zonen ohne Gebirgsquellen wurden in fast allen Szenarien der Parameterstudie beobachtet.

Die geologischen und numerischen Untersuchungen geben eine Erklärung, warum es im Chienbergtunnel an gewissen, begrenzten Tunnelabschnitten zum Gebirgsquellen kommt. In anderen geologischen Situationen, z. B. bei steilstehender Schichtlagerung wie im Belchentunnel (Faltenjura), tritt das Gebirgsquellen in anderen geologisch-hydrologischen Situationen auf. Es ist dort z. B. möglich, dass der Tunnel und die umgebende Auflockerungszone einen hydraulischen Kurzschluss zwischen dem Muschelkalkaquifer (oder anderen Aquiferen) und anhydritführenden Schichten bewirkt. Die Kombination von geologisch-strukturellen Analysen und einer Grundwassermodellierung, wie sie hier gezeigt wurde, kann auch in anderen geologischen Situationen angewendet werden und eine Erklärung für die Quellerscheinungen liefern.

5.2 Anforderungen an die Daten und Unsicherheiten

Eine Grundvoraussetzung, das Fließgeschehen im Bereich des Chienbergtunnels zu rekonstruieren, ist die Kenntnis des geologischen Aufbaus des Untergrunds. Dies schliesst auch Bereiche unter der Tunnelsohle und seitlich des Tunnels mit ein. In der vorliegenden Studie wurde für die lokale Grundwassermodellierung der geologische Aufbau 100 m beidseitig der Tunnelachse mit einbezogen. Ausserdem beinhalten die Modelle den Muschelkalkaquifer unter dem Tunnel. Um den Einfluss regionaler Zirkulationssysteme berücksichtigen zu können, wurde ein geologisches Profil erstellt, das die regionalen Vorfluter (Rhein und Aare) und die Höhenlagen des Juras enthält. Damit lassen sich Grundwassermodelle konstruieren, die es erlauben, Randbedingungen für die lokalen Modelle abzuschätzen. Die hier vorgestellte Erklärung, warum es in gewissen, begrenzten Zonen im Chienbergtunnel zu Hebungserscheinungen kommt (siehe oben), erfordert auf lokaler Ebene eine genaue Kenntnis der räumlichen Anordnung des Gipsspiegels und des Anhydritspiegels. Diese müssen durch mineralogische Analysen von Bohrkernproben bei der Erkundung ermittelt werden.

Die anhydritführenden Schichten des Gipskeupers haben geringe hydraulische Leitfähigkeiten. Um grössere Wassermengen zu diesen Schichten zu bringen und das Gebirgsquellen auszulösen, müssen Wasserwegsamkeiten geschaffen werden. Die Auflockerungszone um den Tunnel zeichnet sich durch erhöhte Klufthäufigkeit und Risse im Gestein aus, die diese Wegsamkeiten schaffen können. Um beurteilen zu können, ob Grundwasser von einem Aquifer über die Auflockerungszone zu anhydritführenden Schichten gelangen kann, muss die Ausdehnung der Auflockerungszone bekannt sein. Die Ausdehnung der Auflockerungszone im unverwitterten Gipskeuper hängt von den mechanischen Eigenschaften des Gesteins und ihrer Anisotropie, aber auch von den Spannungszuständen im Gebirge und der Abbaumethode ab. Im Gipskeuper gibt es dazu bisher keine Untersuchungen. Für eine bessere Beurteilung des Quellrisikos wäre eine Erkundung der Ausdehnung der Auflockerungszone vor Ort erforderlich.

In diesem Projekt wird davon ausgegangen, dass hohe Fliessraten am Anhydritspiegel im Tunnelbereich nach dem Tunnelbau ursächlich für die Hebungserscheinungen sind. Sollen die Fliessraten genauer quantifiziert werden, sind die hydraulischen Eigenschaften der geologischen Einheiten, der Auflockerungszone und des Tunnelbauwerks, sowie eine Kenntnis der hydraulischen Randbedingungen erforderlich (Piezometrie). Die hier durchgeführte Parameterstudie hat gezeigt, dass sich folgende Parameter besonders stark auf die berechneten Fliessraten auswirken (sensitive Parameter):

- K-Wert des Oberen Aquifers (inkl. Tagbruch),
- K-Wert und Mächtigkeit der Auflockerungszone,
- Störungen, sofern nahe des Tunnels,
- Hydraulische Eigenschaften der Betonhülle und des Drainagesystem des Tunnels (in den Studien als Ausflussrate am Tunnel berücksichtigt),
- Grundwasserspiegel oberhalb des Tunnels.

Diese Parameter sollten in einer frühen Phase der Planung und vertieft bei der Erkundung vor Ort experimentell ermittelt werden. Dies kann z. B. mittels Pumpversuchen, Lu-geontests und Porenwasserdruckmessungen geschehen. In der vorliegenden Studie haben sich als Parameter, die die Fliessraten am Anhydritspiegel im Tunnelbereich weniger beeinflussen, der K-Wert des unverwitterten Gipskeupers und das hydraulische Potenzial im Muschelkalkaquifer unter dem Tunnel gezeigt. Ohne eine Messung der sensitiven Parameter bestehen quantitative Unsicherheiten bezüglich der berechneten Fliessraten. Qualitativ zeigen jedoch die Modelle der verschiedenen Szenarien ein gleiches Verhalten: Die Fliessraten am Anhydritspiegel im Tunnelbereich sind nach dem Tunnelbau am stärksten in den Hebungszone. Der Prozess, dass es nach dem Tunnelbau zu erhöhten Fliessraten am Anhydritspiegel in den Hebungszone aufgrund eines „hydraulischer Kurzschlusses“ (Verbindung der Basis des Oberen Aquifers (Gipsspiegel) mit anhydritführenden Schichten (Anhydritspiegel)) kommt, wird in den verschiedenen Szenarien übereinstimmend erkannt. Die Modelle lassen also kritische Situation bezüglich des Risikos des Gebirgsquellen trotz der quantitativen Unsicherheiten erkennen.

5.3 Vorläufige Vorschläge für mögliche Massnahmen

Die durchgeführten Modellberechnungen und Szenariensimulationen geben Hinweise auf mögliche Massnahmen, die potenziell dazu beitragen können, das Quellrisiko zu entschärfen und das Gebirgsquellen hinauszuzögern oder zu verlangsamen. Die hier gemachten Vorschläge zielen dabei darauf ab, Fliessraten am Anhydritspiegel zu reduzieren. Die Vorschläge sind als vorläufig zu betrachten, da sie nur auf ihre hydraulischen Auswirkungen und in Hinblick auf Fliessraten am Anhydritspiegel untersucht wurden. Mögliche andere Auswirkungen (geochemische, mechanische) wurden hier nicht untersucht, deshalb bestehen bezüglich der Wirksamkeit der Massnahmen noch grosse Unsicherheiten. Es ist eine Fragestellung für zukünftige Forschung, die Auswirkungen hydraulischer Massnahmen auf das Gebirgsquellen unter kontrollierten Bedingungen experimentell zu untersuchen (z. B. in einem Felslabor). Die hier vorgestellten Vorschläge beziehen sich ausserdem nur auf die hier untersuchten Situationen. In anderen geologischen Situationen (d. h. Tunnels) sind die gemachten Vorschläge neu zu bewerten.

Massnahmen während der Planung

„Kritische Situationen“ können während der Erkundung erkannt und möglicherweise durch eine geeignete Streckenführung vermieden werden. Als kritisch wurden hier Situationen erkannt, in denen ein Aquifer (hier der unverwitterte Gipskeuper) durch den Tunnel und die Auflockerungszone mit anhydritführenden Schichten verbunden wurde. Bei der Erkundung muss der geologische Aufbau des Gebiets (auch seitlich und unter dem Tunnel), sowie die Lage des Gips- und Anhydritspiegels ermittelt werden.

Durch Grundwassermodelle, basierend auf lokalen geologischen Profilen, können Fliesspfade zu anhydritführenden Schichten im Tunnelbereich und die dort vorhandenen Fliessraten vor und nach dem Tunnelbau berechnet werden. Hohe Fliessraten zeigen Situationen an, in denen das Quellrisiko hoch ist. Die Fliessraten können qualitativ, d. h. durch Vergleich verschiedener Situationen, oder quantitativ ermittelt werden. Letzteres erfordert einen grösseren Aufwand bei der Erkundung durch hydrologische Feldexperimente (siehe Datenerfordernisse).

Massnahmen während der Bauausführung

Die Auflockerungszone um den Tunnel liefert Wasserwegsamkeiten und ist in bestimmten geologischen Situationen eine wichtige Voraussetzung, grössere Wassermengen zu anhydritführenden Schichten zu bringen. Die Auflockerungszone entsteht beim Tunnelbau durch eine Umverteilung der Spannungen im Gestein durch die Einführung eines Hohlraums im Untergrund, aber auch durch mechanisches Einwirken auf das Gestein beim Abbau. Die Entstehung einer Auflockerungszone beim Tunnelbau kann nicht verhindert werden. Jedoch besteht die Möglichkeit, dass die hydraulische Leitfähigkeit und Mächtigkeit der Auflockerungszone, und dadurch das Quellrisiko, beeinflussbar sind. Auch wenn es wenige Untersuchungen zu den Eigenschaften der Auflockerungszone in tonigen Gesteinen gibt, ist es möglich, dass bei Verwendung einer Tunnelbohrmaschine die hydraulische Wirksamkeit der Auflockerungszone geringer ausfällt als bei einem Sprengvortrieb. Möglich wäre auch die Verwendung eines hydraulischen Hammers über kürzere Strecken, in denen das Quellrisiko hoch ist. In Abschnitten mit hohem Quellrisiko könnten Injektionen (Silikon, Spezialbeton) eine sinnvolle Ergänzung sein, um die hydraulische Wirksamkeit der Auflockerungszone zu verringern (siehe auch unten mögliche Massnahmen beim Ausbau).

Die Modellsimulationen haben gezeigt, dass die Fliessraten am Anhydritspiegel im Tunnelbereich besonders hoch sind, wenn auch der Zufluss des Grundwassers in den Tunnel hoch ist. Dabei spielt es keine Rolle, ob das Wasser tatsächlich in den Tunnel, oder in ein Drainagesystem des Tunnels fliesst. Die Drainagewirkung des Tunnels bewirkt generell eine Erhöhung der Fliessraten im Umfeld des Tunnels durch eine Erhöhung der hydraulischen Gradienten. Mögliche Massnahmen, die Drainagewirkung des Tunnels zu reduzieren, sind der rasche Einbau einer möglichst dichten Betonhülle (grosse Dicke, Betonzusammensetzung, Abdichtung der Fugen, Verwenden von Geomembranen oder Injektionen hinter die Betonhülle). Die Installation der Betonhülle sollte möglichst rasch nach dem Auffahren des Tunnels geschehen. Wird zuerst ein Pilotstollen aufgefahren, der erst viel später erweitert und dann verschalt wird, ist der Tunnel über lange Zeiträume offen und als Drainage wirksam. In dieser Zeit können hohe Fliessraten am Anhydritspiegel wirksam sein.

Ein Drainagesystem hinter den Tunnelwänden erhöht in den hier untersuchten Situationen die Drainagewirkung des Tunnels und somit auch die Fliessraten am Anhydritspiegel im Tunnelbereich. Dies erhöht das Quellrisiko. Ein Drainagesystem kann jedoch auch sinnvoll sein, indem es Wasserzutritte zu anhydritführenden Schichten reduziert oder verhindert. In den hier untersuchten Situation ist es denkbar, dass eine Drainage im verwitterten Gipskeuper oberhalb des Tunnels Fliessraten am Anhydritspiegel im Tunnelbereich reduzieren kann, während eine Drainage um den Tunnel oder unter dem Tunnel die Fliessraten dort erhöht. Eine optimale Position des Drainagesystems bezüglich einer Reduktion der Fliessraten am Anhydritspiegel könnte durch Modellsimulationen unter Berücksichtigung verschiedener Geometrien (Lage Drainage, Tunnel, Anhydritspiegel, usw.) ermittelt werden.

Die Wirksamkeit von Massnahmen müsste durch gezielte Experimente untersucht wer-

den. Es ist denkbar, dass gewisse Massnahmen auch andere (negative) Auswirkungen auf das Gebirgsquellen haben. Beispielsweise könnten eine dichte Tunnelverkleidung und der Verzicht auf eine Drainage hinter der Tunnelverkleidung die Längszirkulation zwischen Tunnelverkleidung und anstehendem Fels fördern und dadurch Wasser zu quellfähigen Gesteinen führen.

Die Szenarien mit verschiedenen Potenzialen im Oberen Aquifer haben gezeigt, dass ein hohes hydraulisches Potenzial im Oberen Aquifer die Fliessraten am Anhydritspiegel im Tunnelbereich deutlich erhöht. Je höher der Grundwasserspiegel über dem Tunnel ist, desto höher sind auch die Fliessraten am Anhydritspiegel. Eine Absenkung des Grundwasserspiegels (Grundwasserhaltung durch Entnahmebrunnen im Oberen Aquifer) kann deshalb das Quellrisiko reduzieren. Zumindest während der Bauphase, wenn der Tunnel noch unverschalt und seine Drainagewirkung gross ist, kann eine Grundwasserhaltung eine sinnvolle Begleitmassnahme darstellen. Es ist möglich, dass dadurch die Quellerscheinungen zumindest hinausgezögert und verlangsamt werden könnten. Dabei muss beachtet werden, dass eine Absenkung des Grundwasserspiegels einen unerwünschten Einfluss auf Quellschüttungen an der Oberfläche haben kann.

Massnahmen bei der Sanierung

Mögliche Massnahmen zur Reduzierung der Quellhebungen bei der Sanierung decken sich mit den Massnahmen zur Reduzierung des Quellrisikos beim Bau:

- Verringerung der hydraulischen Wirksamkeit der Auflockerungszone durch Injektionen.
- Verringerung der Drainagewirkung des Tunnels durch verbesserte Abdichtung der Betonhülle (dickerer und dichter Beton, Geomembrane, Injektionen).
- Geeignete Drainagesysteme (Drainagen können Fliessraten am Anhydritspiegel sowohl erhöhen als auch erniedrigen. Deshalb sollten ortsspezifische Verhältnisse durch gezielte Simulationen gerechnet werden).
- Grundwasserabsenkung im Aquifer über dem Tunnel (eine Reduzierung des Potentials im Muschelkalkaquifer unter dem Tunnel hatte in den hier durchgeführten Simulationen keinen Einfluss auf die Fliessraten am Anhydritspiegel im Tunnelbereich und somit auf das Gebirgsquellen. Dies kann in anderen geologischen Situationen aber durchaus einen Einfluss haben).

Generell muss die Wirksamkeit von Sanierungsmassnahmen durch gezielte Experimente und unter Berücksichtigung der ortsspezifischen Bedingungen evaluiert werden.

5.4 Forschungsbedarf

Die Rekonstruktion des Grundwasserfliessregimes im Untergrund ist ein dreidimensionales (3D) Problem. In diesem Projekt wurde dem *3D Fliessgeschehen* durch die Verwendung verschieden orientierter 2D Schnitte Rechnung getragen. Die Verwendung von 3D Modellen könnte das Verständnis der hydrologischen Prozesse weiter verbessern. Dies würde eine 3D Erkundung des geologischen Untergrunds voraussetzen (z. B. Ergänzung der Erkundungsbohrungen durch geophysikalische Methoden wie Seismik). Es kann erwartet werden, dass der dadurch erhöhte Erkundungsaufwand durch besser angepasste Strategien, dem Quellproblem zu begegnen, kompensiert werden würde.

Im geologischen Kontext des Chienbergtunnels wurde Wasserzutritt aus dem verwitterten Gipskeuper oberhalb des Tunnels zu anhydritführenden Schichten auf Tunnelhöhe oder darunter als Mechanismus identifiziert, der das Gebirgsquellen auslöst. In *anderen geologischen Situationen* kann ein erhöhter Wasserzutritt zu anhydritführenden Schichten auch auf andere Weise erzeugt werden. Es ist beispielsweise möglich, dass Wasser aus dem Muschelkalkaquifer durch Störungen oder entlang der Tunnelachse in der Auflockerungszone um den Tunnel den quellfähigen Schichten zufließt. Aus der vorliegenden Studie allein kann nicht geschlossen werden, dass nur der hier erkannte Mechanismus zum Gebirgsquellen führt.

Durch den Tunnelbau werden die hydraulischen Druckverhältnisse an den Tunnelwänden

abrupt verändert. In Grundwasserleitern finden solche Veränderungen in der weiteren Umgebung des Tunnels ebenfalls schnell statt. In Geringleitern (tonigen Gesteinen) pausen sich Druckänderungen nur verzögert in die Umgebung des Tunnels durch. Die vorliegende Studie hat stationäre Grundwassermodelle verwendet, in denen *zeitliche Aspekte* nicht berücksichtigt werden können. Dies wäre mit instationären Modellen möglich. Es liessen sich genauere Aussagen machen, welche Rolle der zeitliche Ablauf des Bauprojekts für den Quellprozess spielt. Es könnte beispielsweise das Wasservolumen, das dem Anhydritspiegel nach Auffahren eines Pilotstollens und späterer Ausweitung und Verschalung zufließt, verglichen werden mit dem Wasservolumen, das dem Anhydritspiegel in der gleichen Zeit bei Auffahren des vollen Tunnelprofils und sofortige Verschalung zufließt. Ausserdem könnten die Wassermengen, die dem Anhydritspiegel während der vorgesehenen Betriebsdauer des Tunnels zuströmen, quantifiziert werden. Dies würde genauere Aussagen über das Langzeitverhalten der Quellphänomene zulassen.

Drainagen können Wasserzuflüsse zu anhydritführende Schichten reduzieren, aber auch erhöhen. Simulationen zu verschiedenen Drainagesystemen (z. B. räumliche Anordnung in Bezug auf Aquifere und anhydritführende Schichten) würden zeigen, wie Drainagesysteme ortsspezifisch optimal dimensioniert werden könnten, um Gebirgsquellen beim Tunnelbau oder der Sanierung zu verhindern oder zumindest zu reduzieren.

Die *Auflockerungszone* spielt in den hier untersuchten Situationen eine wichtige Rolle für das Gebirgsquellen. Die Beziehungen zwischen Tunnelgeometrien, Abbaumethoden und den Spannungszuständen im Gebirge und ihre Auswirkungen auf die Auflockerungszone um den Tunnel sind in Zusammenhang mit der Gefährdung des Gebirgsquellens im Gipskeuper noch nie untersucht worden.

Das vorliegende Projekt basiert auf der Annahme, dass die Umwandlung von Anhydrit in Gips als Ursache des Gebirgsquellens Wasserzufluss zum Anhydrit erfordert. Die Umwandlung wird jedoch nicht allein von den zufließenden Wassermengen bestimmt. Anhydritlösung und Gipsausfällung werden von der Sulfatkonzentration im Porenwasser, sowie dem Druck und der Temperatur kontrolliert. Die Beziehungen zwischen Grundwasserfließen, den *geochemischen Bedingungen* im Untergrund und den Quellphänomenen im Gipskeuper beim Tunnelbau wurden im Feldmassstab noch nie untersucht.

Im Felslabor Mont Terri (St. Ursanne, Jura) ist der Gipskeuper in einer Nische des Rettungstunnels aufgeschlossen. Es wäre dort möglich, ein Monitoringsystem aufzubauen, mit dem hydraulische Parameter im Gipskeuper kontinuierlich gemessen werden. Zur Datenübertragung- und -speicherung könnte die bestehende Infrastruktur des Feldlabors genutzt werden. In einem Felslabor könnte einerseits eine optimale Monitoringstrategie entwickelt werden, um kritische Zonen im Tunnelbau zu überwachen oder Sanierungsmassnahmen zu begleiten. Andererseits könnten die in diesem Bericht vorgeschlagenen Strategien, dem Quellrisiko beim Tunnelbau zu begegnen, durch geeignete Experimente getestet werden. Beispielsweise liessen sich der Einfluss der Auflockerungszone um den Tunnel, des Ausbruchverfahrens, der Ausbautechnik usw. auf das Gebirgsquellen im Gipskeupers unter Feldbedingungen untersuchen. *Experimente in einem Felslabor* würden zukünftig die Planungssicherheit in der Projektierungs- und Durchführungsphase von Tunnelprojekten im Gipskeuper und bei der Sanierung bestehender Tunnel mit Quellproblematik erhöhen.

6 Schlussfolgerungen

Durch die Kombination einer geologisch-strukturellen Analyse mit einer Simulation des Fließregimes konnten Erklärungen gefunden werden, weshalb in zwei begrenzten Abschnitten des Chienbergtunnels Quellhebungen erfolgten, in anderen, geologisch ähnlichen Abschnitten jedoch nicht. In den Hebungszonen kommt es nach dem Tunnelbau zu deutlich höheren Wasserzutritten zu anhydritführenden Schichten als in den Zonen ohne Quellerscheinungen. Diese Wasserzutritte stehen in Beziehung zu den lokalen geologisch-hydrogeologischen Bedingungen und der Veränderung der jeweiligen hydraulischen Verhältnisse durch den Tunnelbau. In den Hebungszonen verbindet der Tunnel und die umgebende Auflockerungszone den wasserführenden verwitterten Gipskeuper (oberhalb des Gipsspiegels) mit anhydritführenden Schichten (unterhalb des Anhydritspiegels) („hydraulischer Kurzschluss“). Modellunsicherheiten bestehen in Bezug auf die Grösse der berechneten Fließraten am Anhydritspiegel. Jedoch haben Szenariensimulationen übereinstimmend gezeigt, dass nach dem Tunnelbau die Fließraten vor allem in den Hebungszonen stark erhöht sind.

Um möglichst genaue Voraussagen über das Quellrisiko machen zu können, sollten der geologische Aufbau des Untergrunds auch seitlich und unter der Tunnelachse, die Lage des Gips- und Anhydritspiegels und das Auftreten von Störungen erkundet werden. Ideal wäre eine 3D Erkundung der geologischen Strukturen. Ausserdem sollte der K-Wert des Aquifers oberhalb des Tunnels, der Grundwasserspiegel, und die hydraulischen Eigenschaften der Auflockerungszone um den Tunnel experimentell im Feld durch entsprechende Instrumentierung ermittelt werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse erlauben es, vorläufige Vorschläge für mögliche Massnahmen zu machen, wie dem Quellrisiko bei der Planung, dem Bau und während der Sanierung besser begegnet werden kann (Kapitel 5.3). Als wichtigste Massnahme wurde die Vermeidung von geologischen Situationen mit hohem Quellrisiko erkannt. Solche Situationen sind gegeben, wenn der Tunnel und die ihn umgebende Auflockerungszone wasserführende Schichten (hier der verwitterte, ausgelaugte Gipskeuper) mit anhydritführenden Schichten hydraulisch verbinden. Weitere mögliche Massnahmen könnten eine Verringerung der hydraulischen Wirksamkeit der Auflockerungszone durch eine geeignete Abbaumethode und Injektionen, eine Verringerung der Drainagewirkung des Tunnels durch verbesserte Abdichtung der Betonhülle, geeignete Drainagesysteme, und eine Grundwasserabsenkung im Aquifer über dem Tunnel sein. Solche Massnahmen müssten jedoch zunächst durch geeignete Experimente (z. B. in einem Felslabor) getestet werden.

Anhänge

I	Beilagen.....	49
---	---------------	----

I Beilagen

- Beilage 1: Regionales geologisches Profil.
- Beilage 2: Geologische Schichtfolge des regionalen Profils und hydrostratigraphische Einheiten der regionalen Grundwassermodellierung.
- Beilage 3: Hydraulisches Potenzial und Fließwege zum Chienbergtunnel berechnet mit regionalen Grundwassermodellen.
- Beilage 4: Geologisches Längsprofil des Chienbergtunnels.
- Beilage 5: Geologische Querprofile durch den Chienbergtunnel.
- Beilage 6: Lokale Grundwassermodelle Querprofile A und B.
- Beilage 7: Lokale Grundwassermodelle Querprofile C und D.
- Beilage 8: Parameterstudie, Fließraten nach dem Tunnelbau am Anhydritspiegel in den untersuchten Abschnitten bei verschiedenen K-Werten des Oberen Aquifers und des Gipskeupers.
- Beilage 9: Parameterstudie, Fließraten nach dem Tunnelbau am Anhydritspiegel in den untersuchten Abschnitten bei verschiedenen K-Werten und Mächtigkeiten der Auflockerungszone (EDZ).
- Beilage 10: Parameterstudie, Fließraten nach dem Tunnelbau am Anhydritspiegel in den untersuchten Abschnitten bei verschiedenen K-Werten der Störungen und verschiedenen Ausflussraten am Tunnel.
- Beilage 11: Parameterstudie, Fließraten nach dem Tunnelbau am Anhydritspiegel in den untersuchten Abschnitten bei verschiedenen K-Werten des Tagbruchs.
- Beilage 12: Parameterstudie, Fließraten nach dem Tunnelbau am Anhydritspiegel in den untersuchten Abschnitten bei verschiedenen hydraulischen Potenzialen in den Aquiferen.

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
Aa	Aquifer-Aquitard Modell ohne Tunnel
Aa-t	Aquifer-Aquitard Modell mit Tunnel
ASTRA	Bundesamt für Strassen
AK	Arietenkalk
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BM	Bunge Mergel
BMv	Bunte Mergel verwittert
BS	Buntsandstein
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
F	First
FEFLOW	Finite Element subsurface FLOW system (Computerprogramm)
FGU	Fachgruppe Untertagbau
GD	Gansinger Dolomit
GDv	Gansinger Dolomit verwittert
GK	Gipskeuper
GKv	Gipskeuper verwittert
GO	Geländeoberfläche
Ho	Homogenes Modell ohne Tunnel
Ho-s	Homogenes Modell mit Störungen ohne Tunnel
Ho-st	Homogenes Modell mit Störungen mit Tunnel
Ho-t	Homogenes Modell mit Tunnel
Hs	Hydrostratigraphisches Modell ohne Tunnel
Hs-t	Hydrostratigraphisches Modell mit Tunnel
HZ	Hebungszone
LK	Lettenkeuper
MKA	Muschelkalk Aquifer
MKS	Muschelkalk Stauer
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NNE	Nornordost
NNW	Nordnordwest
NRP	National Research Programmes
OBM	Obere Bunte Mergel
OBMv	Obere Bunte Mergel verwittert
OL	Oberer Lias
Opa	Opalinuston
OT	Obtususton
PK	Permo-Karbon
PW	Passwang-Formation
Q	Quartär
QR	Quartäre Rutschmasse
S	Sohle
SGK	Schweizerische Gesellschaft der Kernfachleute
TDS	Total Dissolved Solids

Begriff	Bedeutung
Tm	Tunnelmeter
SSE	Südsüdost
SSW	Südsüdwest
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute

Literaturverzeichnis

- BAFU (Hrsg.), 2010. Hydrologischer Atlas der Schweiz. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- Bartholet, H., 1964. Geologie des Tafel- und Faltenjuras zwischen Eptingen und Oltingen (BL) 1:25'000. Tätigkeitsberichte der Naturforschenden Gesellschaft Baselland, Band 23, Liestal.
- Bear, J., 1972. Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier, New York.
- Bitterli-Brunner, P., Fischer, H., 1988. Erläuterungen zur geologischen Karte Blatt Arlesheim 1067. Geologischer Atlas der Schweiz, Bern.
- 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.
- 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.
- Butscher, C., Einstein, H.H., Huggenberger, P., 2011. Effects of tunneling on groundwater flow and swelling of clay-sulfate rocks. *Water Resources Research* 47, W11520.
- Caine, J.S., Evans, J.P., Forster, C.B., 1996. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology* 24 (11), 1025–1028.
- Caputo, M., Huez, H.-P., 1987. Tunnel Waterproofing Using Polymeric Membranes. *Tunnelling and Underground Space Technology* 2 (1), 83–88.
- Delleur, J.W. (Hrsg.), 1999. The handbook of groundwater engineering. CRC Press, Boca Raton (FL), Springer, Heidelberg.
- Diersch, H.-J.G. (Hrsg.), 2005. FEFLOW Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System – Reference manual. WASY Institute for Water Resources Planning and Systems Research, Berlin.
- Doherty, J., 2005. PEST – Model-Independent Parameter Estimation, User Manual: 5th Edition. Watermark Numerical Computing, Brisbane.
- Einstein, H.H., 1996. Tunneling in difficult ground – Swelling behaviour and identification of swelling rocks. *Rock mechanics and rock engineering* 29 (3), 113–124.
- Freeze, R.A., Witherspoon, P.A., 1967. Theoretical analysis of regional groundwater flow. 2. Effect of water-table configuration and subsurface permeability variation. *Water Resources Research* 3 (2), 623–634.
- Goldschmid, H.O., 1965. Die Geologie des Faltenjura zwischen Olten und Unterem Hausenstein 1:25'000. Tätigkeitsberichte der Naturforschenden Gesellschaft Baselland, Band 24, Liestal.
- Hubbert, M.K., 1940. The theory of ground-water motion. *Journal of Geology* 48 (8), 785–944.
- Nagra (2002), Project Opalinuston: Synthesis of geoscientific investigation results (in German), *Nagra Technical Report (NTB) 02-03*, Nagra, Baden, Switzerland.
- NAGRA/SGK (Hrsg.), 1984. Geologische Karte der zentralen Nordschweiz 1:100'000 mit angrenzenden Gebieten von Baden-Württemberg. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Wettingen, and Schweizerische Geologische Kommission (SGK), Bern.
- Nüesch, R., Steiner, W., Madsen, F.T., 1995. Long time swelling of anhydritic rocks: mineralogical and microstructural evaluation. 8th Internat. Congress on Rock Mechanics, 25–30 September 1995, Tokyo, 285–288.
- Pearson, F.J., Balderer, W., Loosli, H.H., Lehmann, B.E., Matter, A., Peters, T., Schmassmann, H., Gautschi, A., 1991. Applied Isotope Hydrogeology – a case study in northern Switzerland. Elsevier, Amsterdam.
- Tóth, J., 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research* 68 (16), 4795–4812.
- Tóth, J., 1999. Groundwater as a geologic agent. An overview of causes, processes and manifestations. *Hydrogeology Journal* 7 (1), 1–14.
- Tsang, C.F., Bernier, F., Davies, C., 2005. Geohydrational processes in the Exca-

vation 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.

Zijl W., 1999. Scale aspects of groundwater flow and transport systems. *Hydrogeology Journal* 7 (1), 139—150.

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

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 20.09.2012

Grunddaten

Projekt-Nr.: FGU 2008/005

Projekttitel: Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel

Enddatum: 31.10.2011

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

In diesem Projekt wurde durch die Kombination einer geologisch-strukturellen Analyse mit einer Simulation des Grundwasserfließregimes eine Erklärung gefunden, weshalb in zwei begrenzten Abschnitten des Chienbergtunnels Quellhebungen stattfinden, in anderen, geologisch ähnlichen Abschnitten jedoch nicht. In den Hebungszonen kommt es nach dem Tunnelbau zu deutlich höheren Wasserzutritten zu anhydritführenden Schichten als in den Zonen ohne Quellerscheinungen. Diese Wasserzutritte finden dort statt, wo der Tunnel und die umgebende Auflockerungszone (excavation damaged zone, EDZ) den wasserführenden verwitterten Gipskeuper (oberhalb des Gipsspiegels) mit anhydritführenden Schichten (unterhalb des Anhydritspiegels) hydraulisch verbindet („hydraulischer Kurzschluss“). Verschiedene Szenariensimulationen haben übereinstimmend gezeigt, dass nach dem Tunnelbau die Fließraten vor allem in den Hebungszonen stark erhöht sind. Es bestehen jedoch Unsicherheiten in Bezug auf die Grösse der berechneten Fließraten am Anhydritspiegel.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Ziel des Projekts war eine Erklärung zu finden, weshalb in einzelnen Abschnitten im Gipskeuper des Chienbergtunnels Hebungen der Tunnelröhre und der Oberfläche auftraten, in anderen, geologisch vergleichbaren Abschnitten jedoch nicht. Das gestellte Projektziel wurde erreicht indem die Grundwasserzirkulation im Bereich des Chienberg nachvollzogen und bezüglich ihres Einflusses auf die Quellerscheinungen im Gipskeuper bewertet werden konnte.

Folgerungen und Empfehlungen:

Empfehlungen für die Planungsphase: (1) Erkundung des geologische Aufbaus des Untergrunds auch seitlich und unter der Tunnelachse; (2) Ermittlung der Lage des Gips- und Anhydritspiegels und des Auftreten von Störungen; (3) Experimentelle Bestimmung des K-Werts des Aquifers oberhalb des Tunnels, des Grundwasserspiegel, und der hydraulischen Eigenschaften der Auflockerungszone um den Tunnel im Feld durch entsprechende Experimente.

Empfehlungen für die Bauphase und während Sanierung: (1) Vermeidung von geologischen Situationen mit hohem Quellrisiko; (2) Verringerung der hydraulischen Wirksamkeit der Auflockerungszone um den Tunnel (z. B. durch geeignete Abbaumethode oder Injektionen); (3) Verringerung der Drainagewirkung des Tunnels durch verbesserte Abdichtung der Betonhülle; (4) geeignete Drainagesysteme; (5) Grundwasserabsenkung im Aquifer über dem Tunnel. Solche Massnahmen sind als vorläufig zu betrachten und müssten durch geeignete Experimente (z. B. in einem Felslabor) getestet werden.

Empfehlungen für weitere Untersuchungen: (1) Anwendung des Forschungsansatzes auf weitere Tunnel mit Quellerscheinungen im Gipskeuper (z. B. Belchentunnel); (2) Erweiterung des Forschungsansatzes auf 3D und instationäre Modelle (zeitliche Entwicklung); (3) Simulationen zum Einsatz von Drainagesystemen, um den Wasserzufluss zu anhydritführenden Gipskeuper zu reduzieren; (4) Hydrologische Feldexperimente zum Quellen im Gipskeuper in einem Felslabor.

Publikationen:

Butscher, C., Einstein, H. H., Huggenberger, P (2011): Effects of tunneling on groundwater flow and swelling of clay-sulfate rocks. Water Resources Research 47, W11520.

Butscher, C., Huggenberger, P., Zechner, E., Einstein, H. H. (2011): Relation between hydrogeological setting and swelling potential of clay-sulfate rocks in tunneling. Engineering Geology 122, 204-214.

Butscher, C., Huggenberger, P., Zechner, E. (2011): Impact of tunneling on regional groundwater flow and implications for swelling of clay-sulfate rocks. Engineering Geology 117, 198-206.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Huggenberger

Vorname: Peter

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

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

Basel, 20.09.2012



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 Beurteilung der BK bzgl. Zielerreichung des Projekts FGU 2008/005 stimmt mit jener der Forschungsstelle überein. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die beobachtete Variabilität der Quellerscheinungen längs des Chienbergtunnels (bei vergleichbarer Quellfähigkeit der Gesteine) auf die Besonderheiten des grossräumigen Strömungsfeldes im Projektgebiet Chienberg zurückgeführt werden kann.

Umsetzung:

Gemäss Empfehlungen der Forschungsstelle.

weitergehender Forschungsbedarf:

Methode auch bei anderen Tunnels, insbesondere dem Belchentunnel, anwenden und prüfen.

Einfluss auf Normenwerk:

Keiner. (Projektergebnisse sind jedoch wertvoll für die Projektierung.)

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Anagnostou Vorname: Georgios

Amt, Firma, Institut: ETH Zürich Institut für Geotechnik

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Zürich, 27.10.12

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

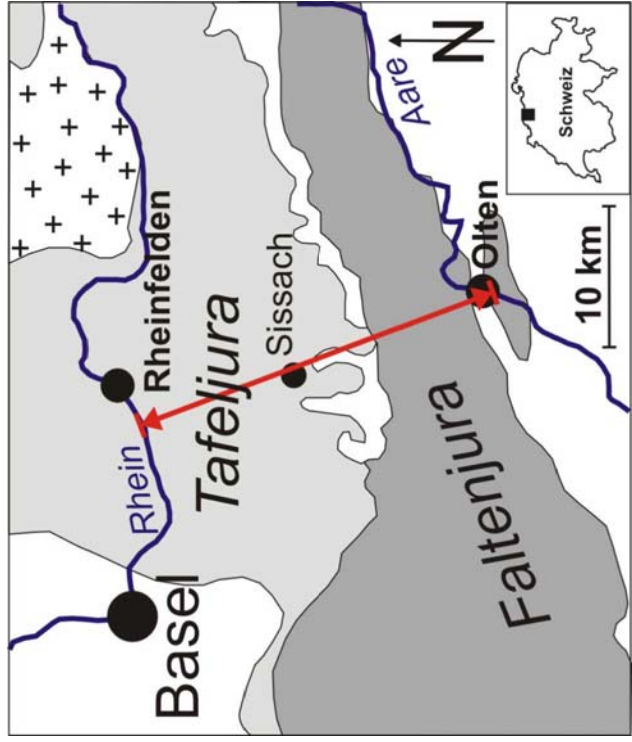
Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an ? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen <i>Transports de l'avenir ?</i> <i>Moteurs et carburants pour la mobilité de demain</i> <i>What drives us on ?</i> <i>Drives and fuels for the mobility of tomorrow</i>	2011
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im labormasstab <i>Désenrobage des enrobés peu bruyants des couches de roulement sous sollicitation de roulement en laboratoire</i> <i>Stripping of Low Noise Surface Courses during Laboratory Scaled Wheel Tracking</i>	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors <i>SPIN-ALP: Abschätzung des Potentials des Intermodalen Verkehrs auf Alpenkorridoren</i> <i>SPIN-ALP: Estimation du potentiel du transport intermodal sur les axes transalpins</i>	2010
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts- Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten <i>Fonctions de résistance pour des tronçons routiers urbains en dehors de la zone d'influence de carrefours</i> <i>Capacity restraint functions for urban road sections not affected by intersection delays</i>	2010

1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-Vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes. <i>Die charakteristischen Indikatoren einer Velostadt. Evaluationsmethode der Velopolitiken anhand von 8 Indikatorgruppen für kleine und mittlere Gemeinden</i> <i>Characteristic indices of a Bike City. Method of evaluation of cycling policies in 8 indices for small and medium-sized communes</i>	2010
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology <i>Temps de parcours en réseau urbain</i> <i>Methodologie für Fahrzeitbewertung in städtischen Strassennetz</i>	2011
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit <i>Modèles d'impact d'équipements de véhicules pour améliorer la sécurité routière</i> <i>Modelling of the impact of in-vehicle equipment for the enhancement of traffic safety</i>	2009
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground <i>Entscheidungsgrundlagen und Hilfsmittel für die Planung von TBM-Vortrieben in druckhaftem Gebirge</i> <i>Critères de décision et outils pour la planification de l'avancement au tunnelier dans des conditions de roches poussantes</i>	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr <i>Basic technologies for detecting intermodal traveling passengers</i> <i>Les technologies de base pour l'enregistrement automatique des usagers de moyens de transports</i>	2011

1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr <i>L'aggressivité au volant</i> <i>Aggressive Driving</i>	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS" <i>Projet initial pour le paquet de recherche</i> <i>"Augmentation de l'utilité pour les usagers du système d'information de la route"</i> <i>Initial project for the research package "Increasing benefits for the users of the road and transport information system"</i>	2011
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen <i>Application areas of various means of transportation in agglomerations</i> <i>Domaine d'application de different moyen de transport dans les agglomérations</i>	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren <i>Investigations of the ice-wall grow and frost heave in artificial ground freezing</i> <i>Recherches sur la formation corps gelés et du soulèvement au gel pendant la procédure de congélation</i>	2010
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges <i>Qualitätsprüfung und Überwachung elektrisch isolierter Spannglieder in Brücken</i> <i>Contrôle de la qualité et surveillance des câbles de précontrainte isolés électriquement dans les ponts</i>	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene <i>Sécurité en cas de tracés rail-route parallèles ou rapprochés</i> <i>Safety measures to manage risk of roads meeting or running close to railways</i>	2011

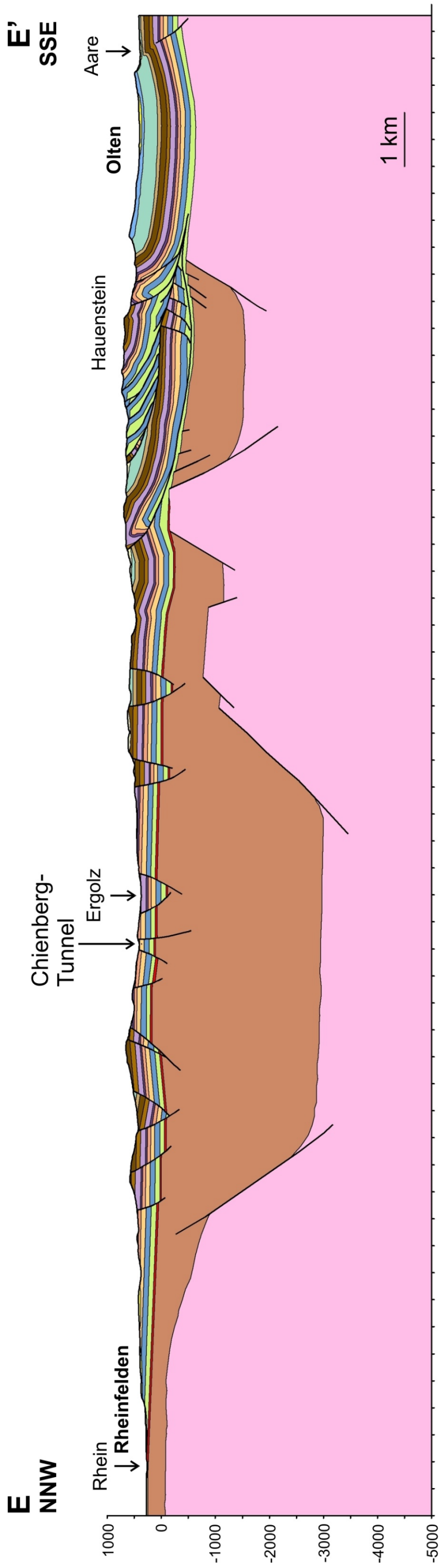
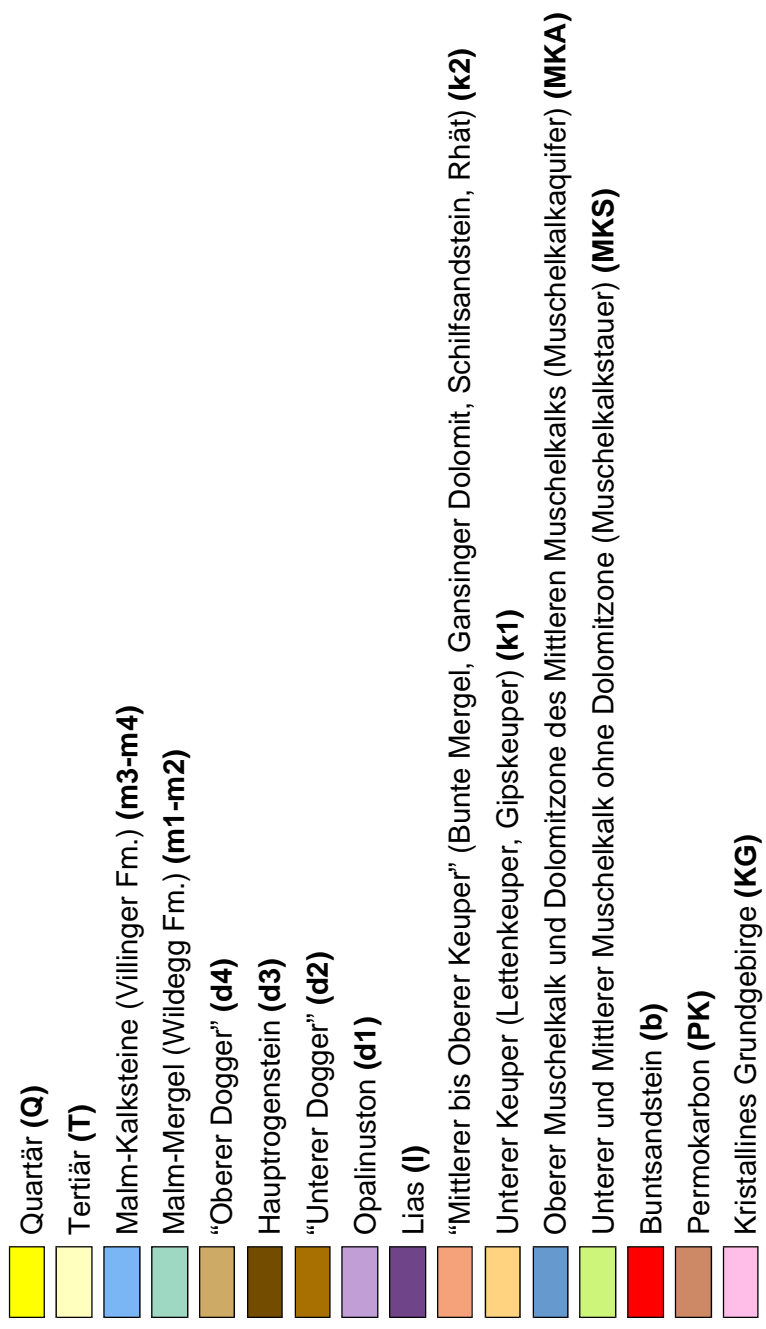
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen <i>On-site runoff experiments on roads</i> <i>Essai d'écoulements pour l'évacuation des eaux des autoroutes</i>	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik <i>IT-Security pour la télématique des transports</i> <i>IT-Security for Transport and Telematics</i>	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen) <i>Passage pour piétons (les bases)</i> <i>Pedestrian crossing (basics)</i>	2011
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung <i>Quantification of the leakages into exhaust ducts in road tunnels with concentrated exhaust systems</i> <i>Quantification des fuites des canaux d'extraction dans des tunnels routiers à extraction concentrée de fumée</i>	2010
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels <i>Entwicklung einer besten Praxis-Methode zur Risikomodellierung für Strassentunnelanlagen</i> <i>Développement d'une méthode de meilleures pratiques pour l'analyse des risques dans les tunnels routiers</i>	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhand D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis <i>Essai de résistance aux sulfates selon la norme SIA 262/1, Annexe D: Applicabilité et importance pour la pratique</i> <i>Testing sulfate resistance of concrete according to SIA 262/1, appendix D: applicability and relevance for use in practice</i>	2011

1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen <i>Coopération dans les gares et arrêts</i> <i>Coopération at railway stations and stops</i>	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neu- verkehrs Activity oriented analysis of induced travel demand Analyse orientée aux activités du trafic induit	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirt- schaftung Approches innovantes de la gesti- on du stationnement Innovative approaches to parking manage- ment	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer? Driver Inattention and Distraction as Cause of Accident: How do Drivers Behave in Cars? L'inattention et la distraction: comment se comportent les gens au volant?	2012



Lage des regionalen geologischen Profils.

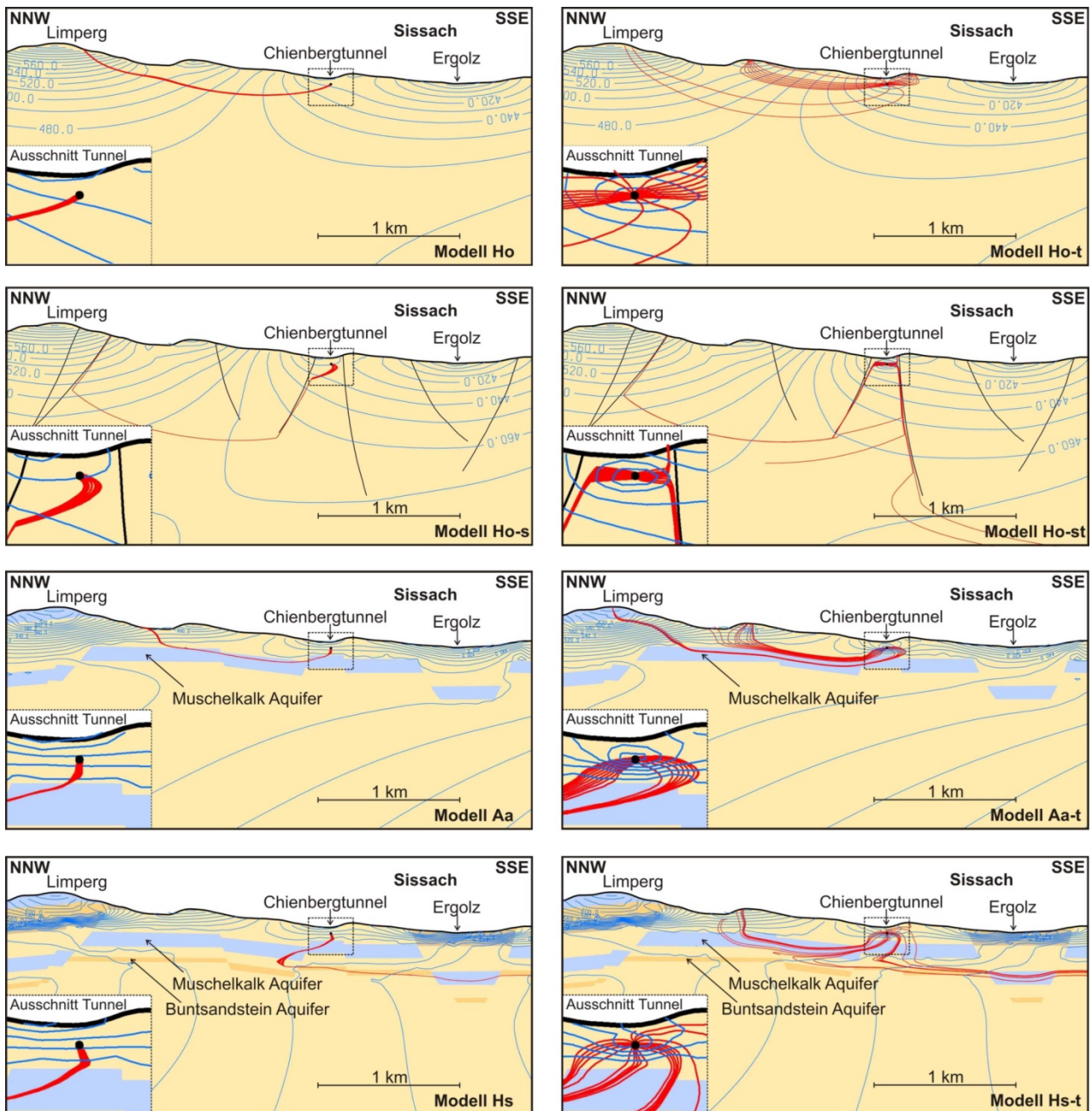
Legende zur Stratigraphie und stratigraphische Kurzbezeichnungen:



Regionales geologisches Profil.

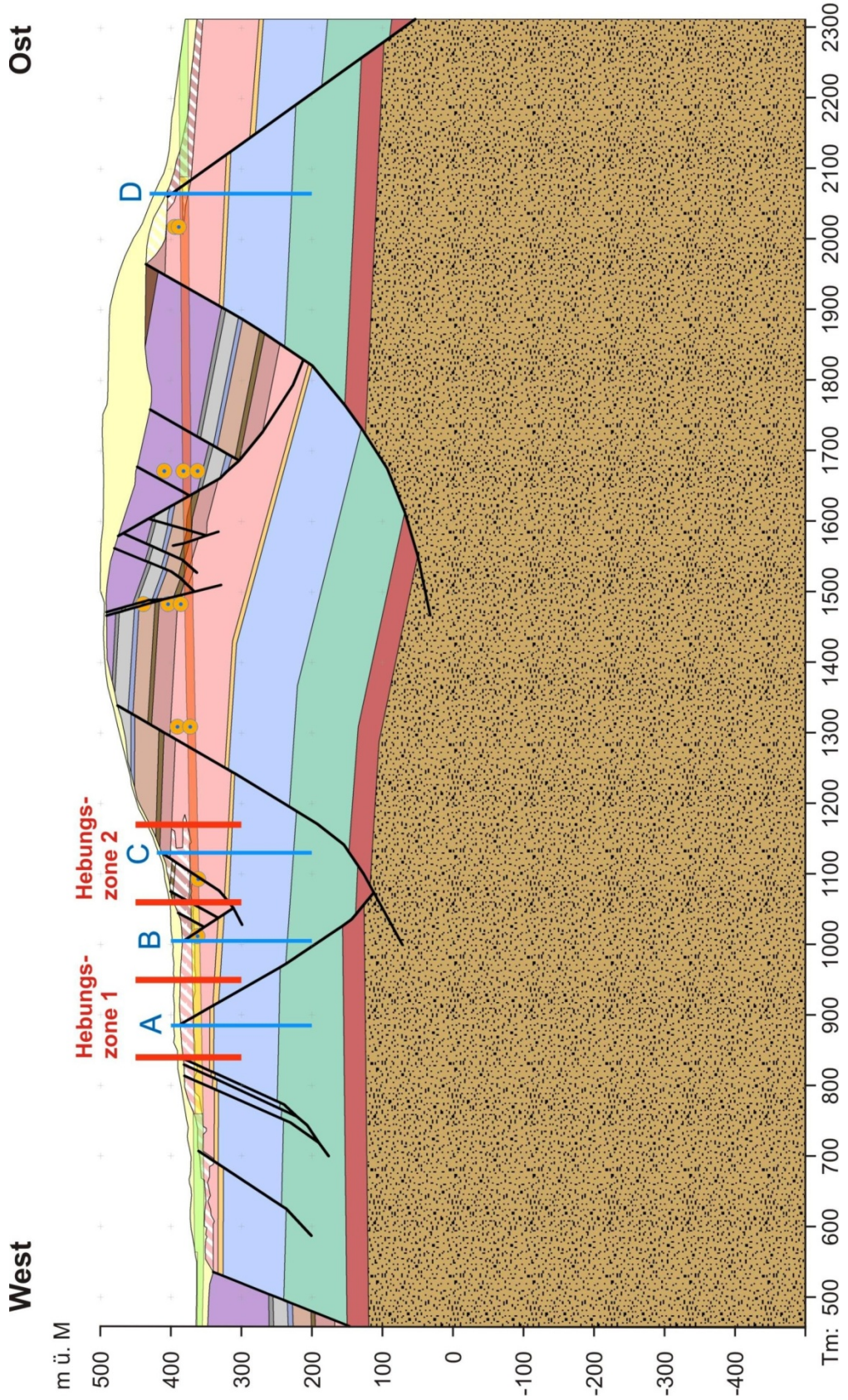
System	Hydrostratigraphische Einheit (nicht massstabsgetreu)	Lithologie	Mächtigkeit [m] (Tafeljura. / Fallenjura)	K-Wert [m/s] / Anisotropie homogene Modelle	K-Wert [m/s] / Anisotropie Aquifer-Aquitard Modelle	K-Wert [m/s] / Anisotropie Hydrostratigr. Modelle
Quartär	Quartär	Kies, Sand, Silt	Variabel	8e-7 / 0.1	2e-6 / 0.1	1e-5 / 0.1
Tertiär	Tertiär	Konglomerate, Sandsteine	Variabel	8e-7 / 0.1	1e-10 / 0.1	1e-10 / 0.1
Jura	Kalksteine des Oberjuras	Kalksteine	100 / 100	8e-7 / 0.1	2e-6 / 0.1	2e-6 / 0.1
	Mergel des Oberjuras	Mergelsteine	300 / 250	8e-7 / 0.1	1e-10 / 0.1	1e-10 / 0.1
	"Oberer" Mitteljura	Mergelsteine, Kalksteine	80 / 70	8e-7 / 0.1	1e-10 / 0.1	1e-8 / 0.01
	Hauptrogenstein	Kalksteine	90 / 100	8e-7 / 0.1	2e-6 / 0.1	2e-6 / 0.1
	"Unterer" Mitteljura	(Sandige) Mergelsteine, Kalksteine	80 / 70	8e-7 / 0.1	1e-10 / 0.1	1e-8 / 0.01
	Opalinuston	Tonsteine, Mergelsteine	95 / 100	8e-7 / 0.1	1e-10 / 0.1	1e-12 / 0.1
	Unterjura	(Tonige) Mergelsteine, Kalksteine	30 / 30	8e-7 / 0.1	1e-10 / 0.1	1e-10 / 0.1
	Trias	Oberer Keuper	Mergelsteine (Sandsteine)	55 / 50	8e-7 / 0.1	1e-10 / 0.1
Gipskeuper & Unterer Keuper		(Sulfatische) Mergelsteine	85 / 90	8e-7 / 0.1	1e-10 / 0.1	1e-10 / 0.1
Muschelkalk Aquifer		(Dolomitische) Kalksteine	90 / 90	8e-7 / 0.1	2e-6 / 0.1	2e-6 / 0.1
Muschelkalk Aquitard		(Dolomitische, sulfatische) Mergelsteine, Salz	90 / 90	8e-7 / 0.1	1e-10 / 0.1	1e-10 / 0.1
Buntsandstein		Sandsteine, Konglomerate, Mergelsteine	30 / 0	8e-7 / 0.1	1e-10 / 0.1	1e-8 / 0.01
Permo-Karbon		Permo-Karbon-Trog	(Tonige) Sand-/Siltsteine, Konglomerate	-	8e-7 / 0.1	1e-10 / 0.1
	Kristallines Grundgebirge	Granite, Gneisse	-	8e-7 / 0.1	1e-10 / 0.1	1e-12 / 0.1

Geologische Schichtfolge des regionalen Profils (modifiziert nach Bitterli-Brunner und Fischer, 1988) und hydrostratigraphische Einheiten der regionalen Grundwassermodellierung. Die drei Spalten rechts dokumentieren die hydraulischen Modelleigenschaften der entsprechenden Einheiten (hydraulische Leitfähigkeit, Anisotropie) für Grundwassermodelle mit verschiedener Komplexität des geologischen Aufbaus.



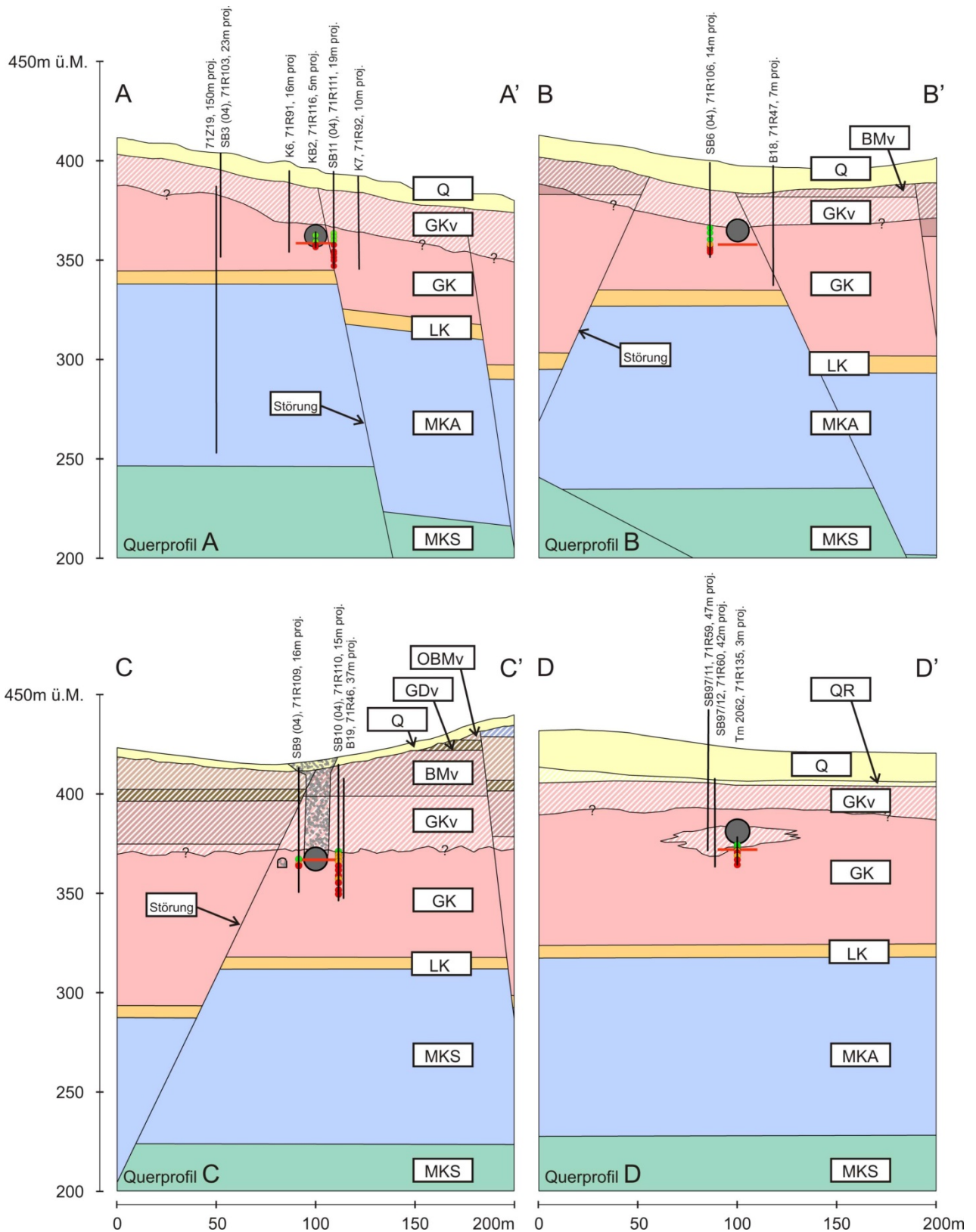
Modell	Modellbezeichnung	
	Ohne Tunnel	Mit Tunnel
Homogenes Modell	Ho	Ho-t
Homogenes Modell mit Störungen	Ho-s	Ho-st
Aquifer-Aquitard Modell	Aa	Aa-t
Hydrostratigraphisches Modell	Hs	Hs-t

Hydraulisches Potenzial und Fließwege zum Chienbergtunnel berechnet mit regionalen Grundwassermodellen. Links: ohne Tunnel; rechts: mit Tunnel. Tabelle zeigt Modellübersicht.



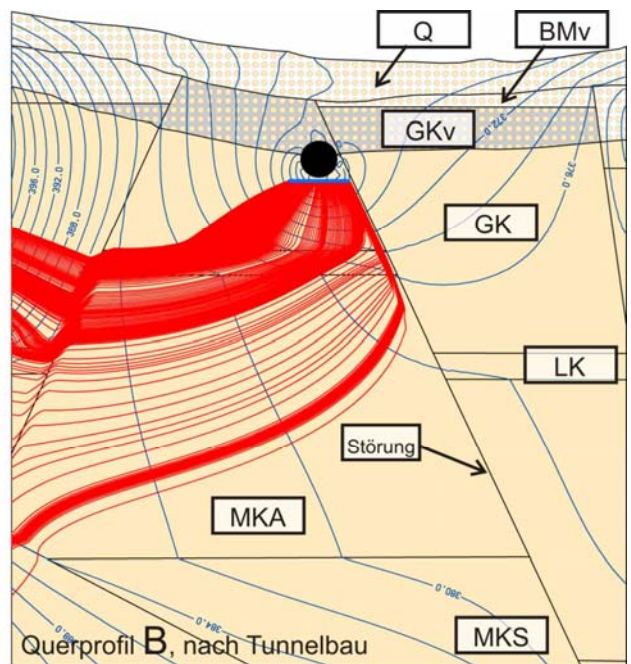
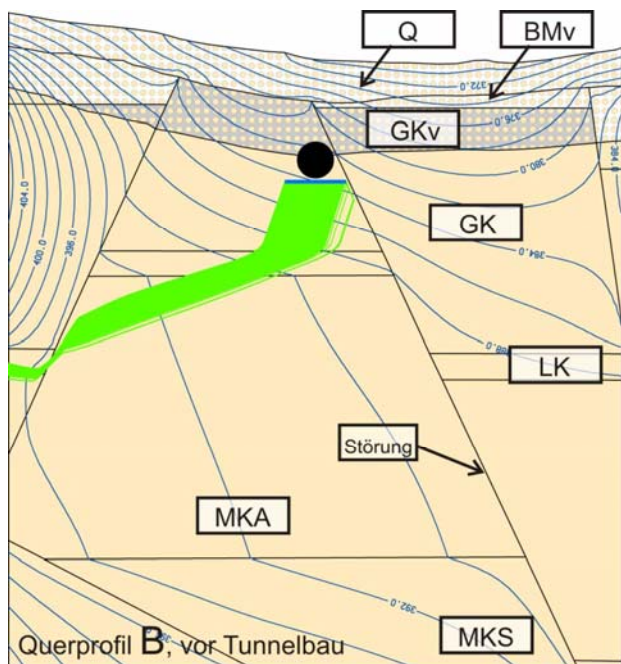
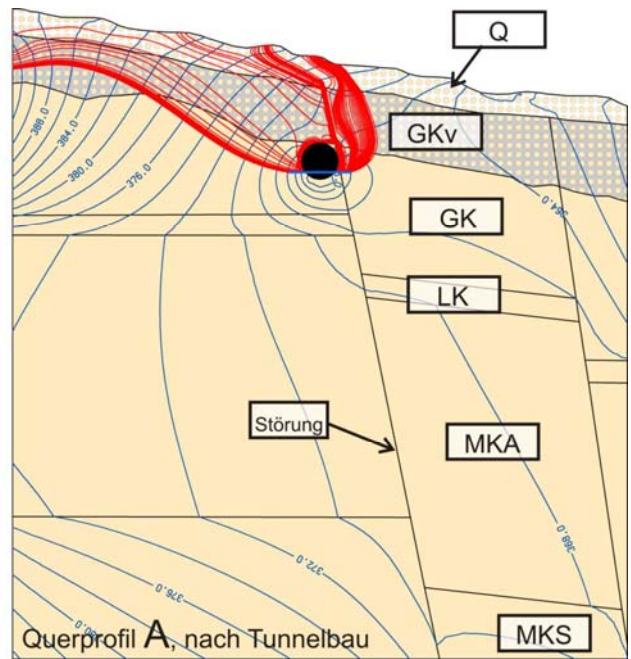
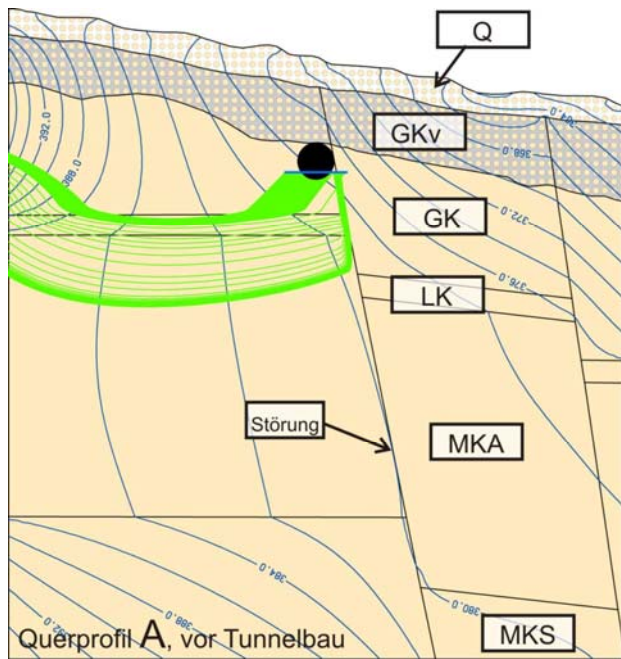
Geologisches Längsprofil des Chienbergtunnels.

Lage des Profilschnitts siehe Abbildung 6. Abkürzungen der geol. Einheiten siehe Tabelle 4. PWDG: Porenwasserdruckgeber. Tunnelvortrieb mit Sprengungen rot, mit Auflockerungssprengungen gelb, ohne Sprengungen grün.



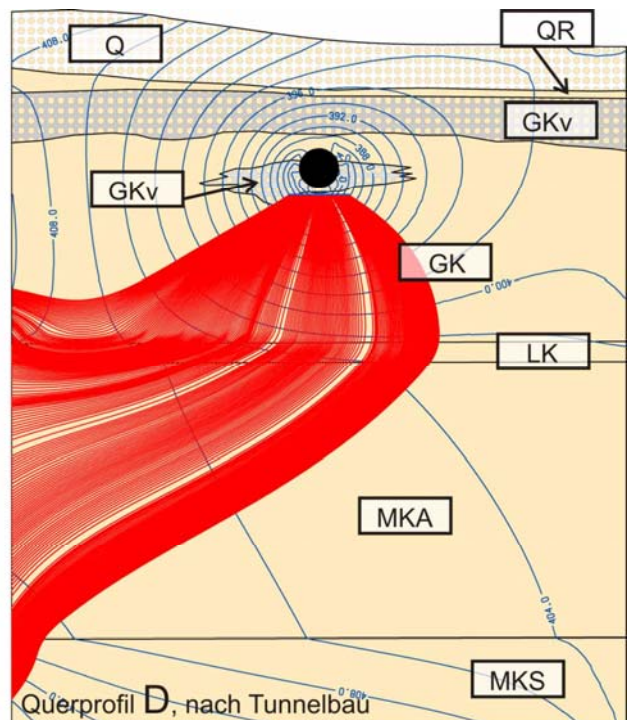
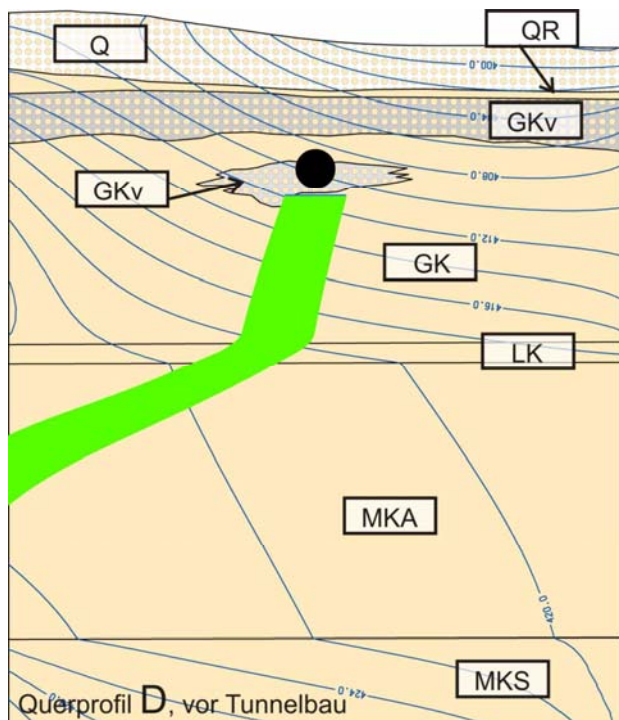
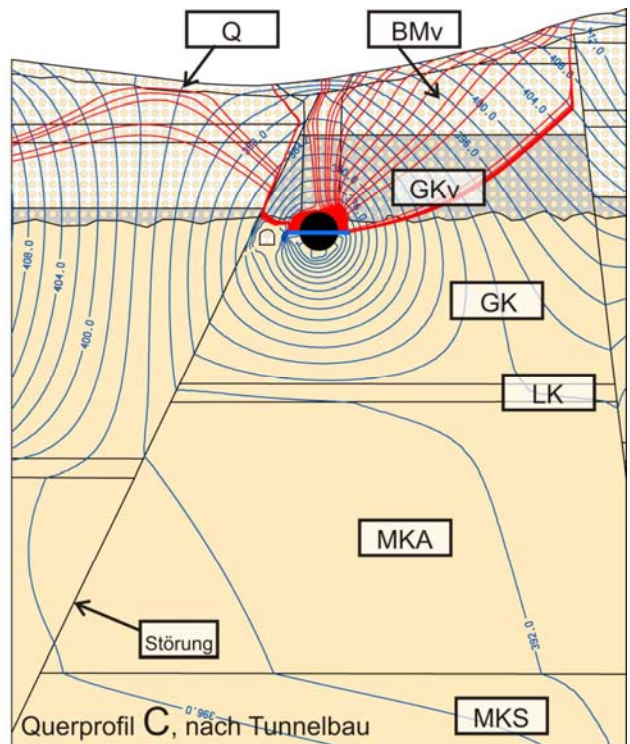
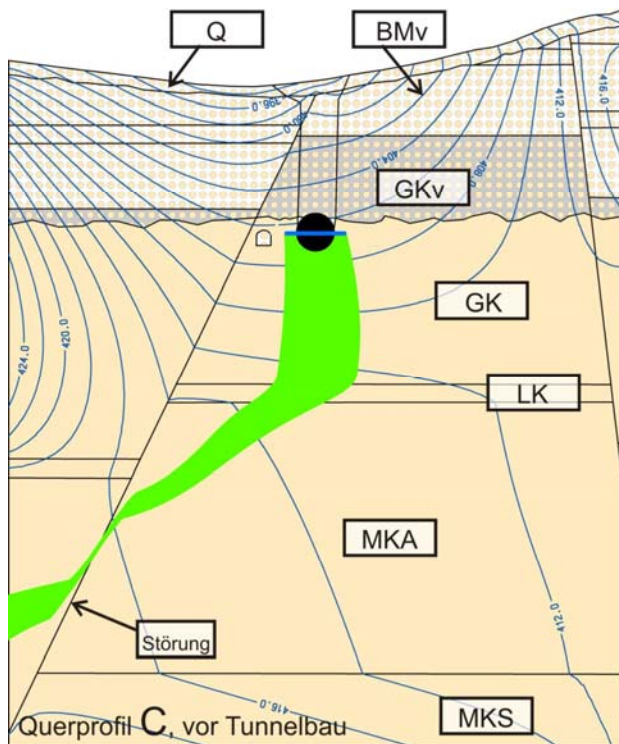
Geologische Querprofile durch den Chienbergtunnel.

Lage der Profile siehe Abbildung 6. Abkürzungen der geologischen Einheiten siehe Tabelle 4. Schwarze Linien: Erkundungsbohrungen. Punkte: Bohrkernproben mit Bestimmung der Sulfatminerale (grün: mit Gips; orange: mit Gips und Anhydrit; rot: mit Anhydrit). Rote Linien: Lage des Anhydritspiegels. Gepunkteter Bereich in Querprofil C: Tagbruch.



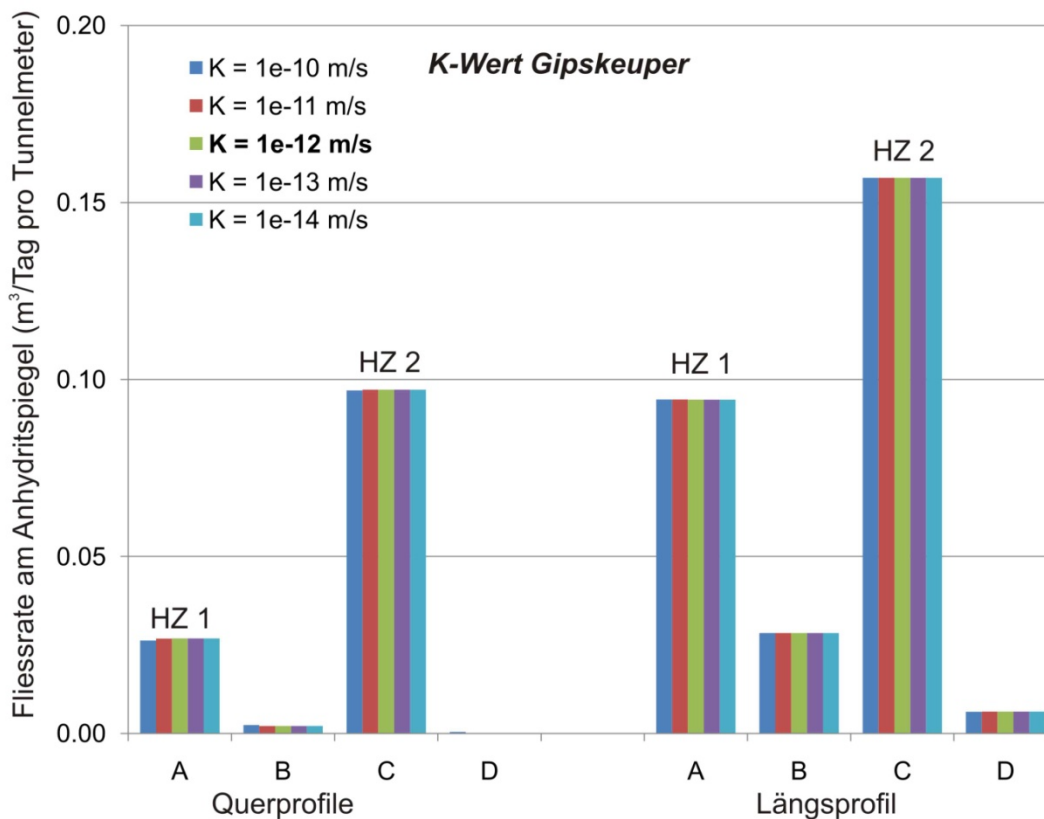
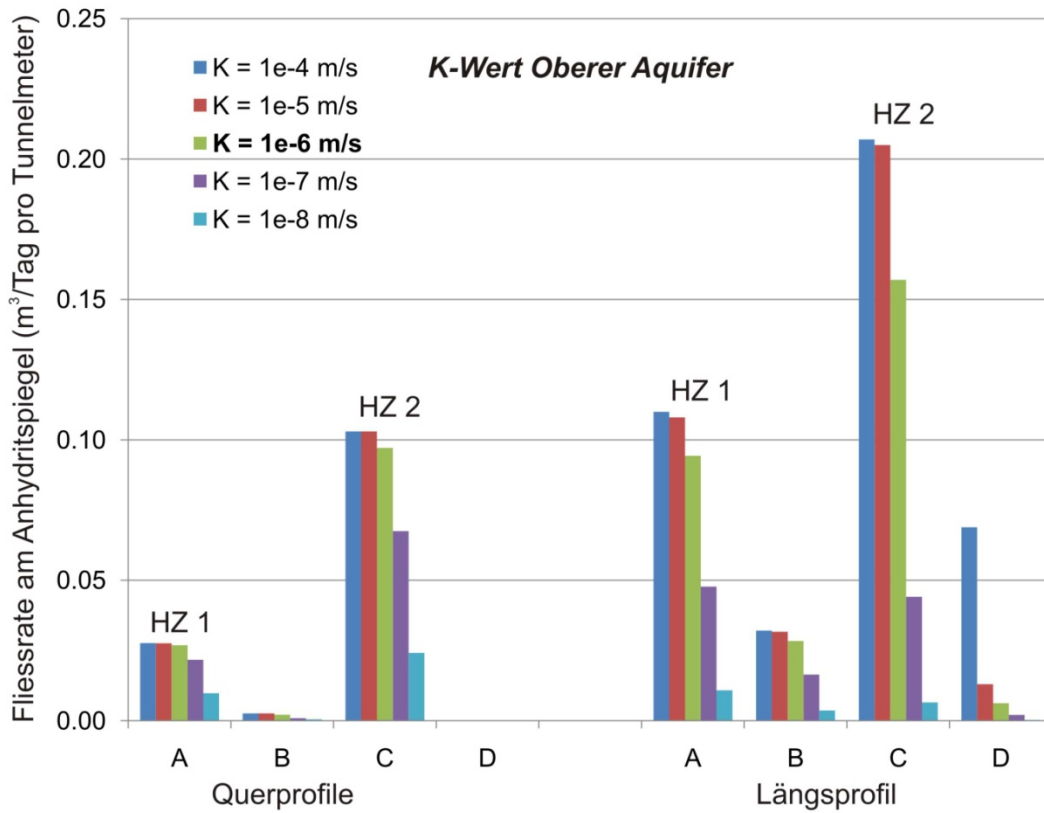
Lokale Grundwassermodelle Querprofile A und B.

Potenzialverteilung und Fließpfade zum Anhydritspiegel vor (links) und nach dem Tunnelbau (rechts). Grau gepunktete Signatur: verwitterter Gipskeuper. Weiss gepunktete Signatur: Quartär. Im Querprofil A (Hebungszone 1) ist der verwitterte Gipskeuper nach dem Tunnelbau hydraulisch mit dem Anhydritspiegel verbunden. Es kommt am Anhydritspiegel zu Wasserzufluss aus dem verwitterten Gipskeuper. Im Querprofil B (ohne Hebungserscheinungen) ist dies nicht der Fall.

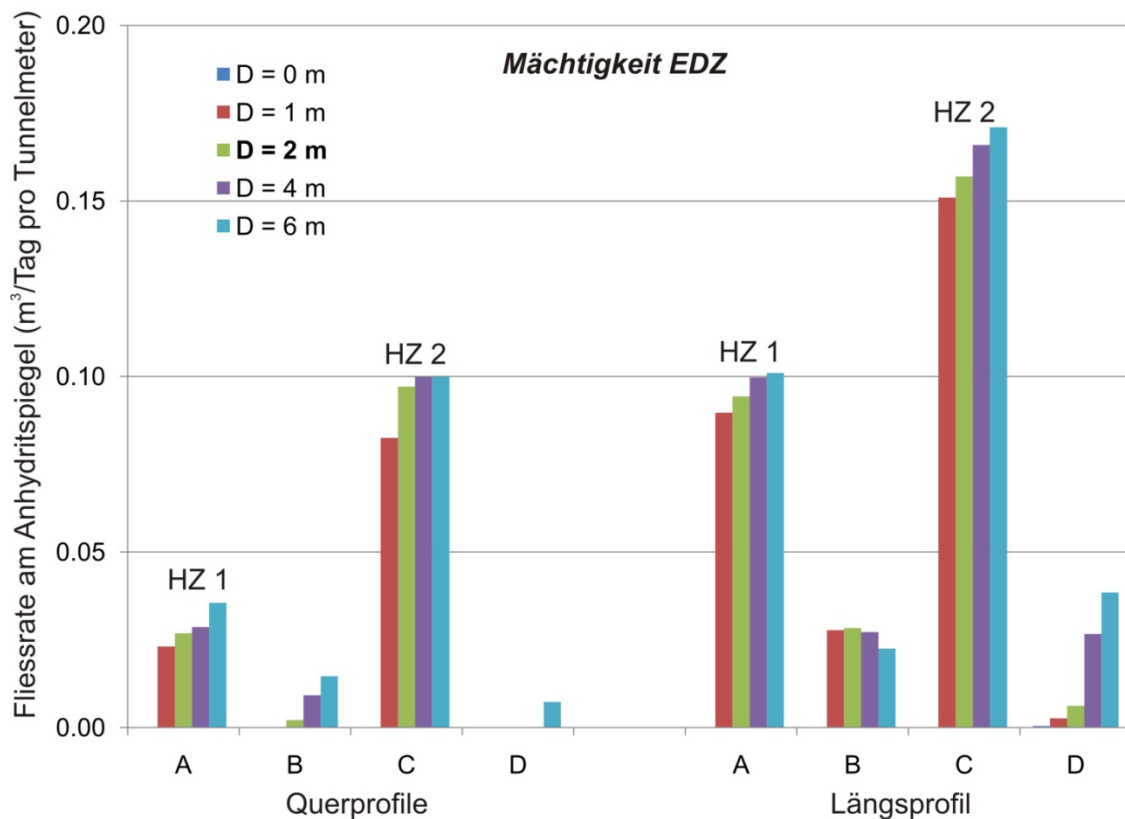
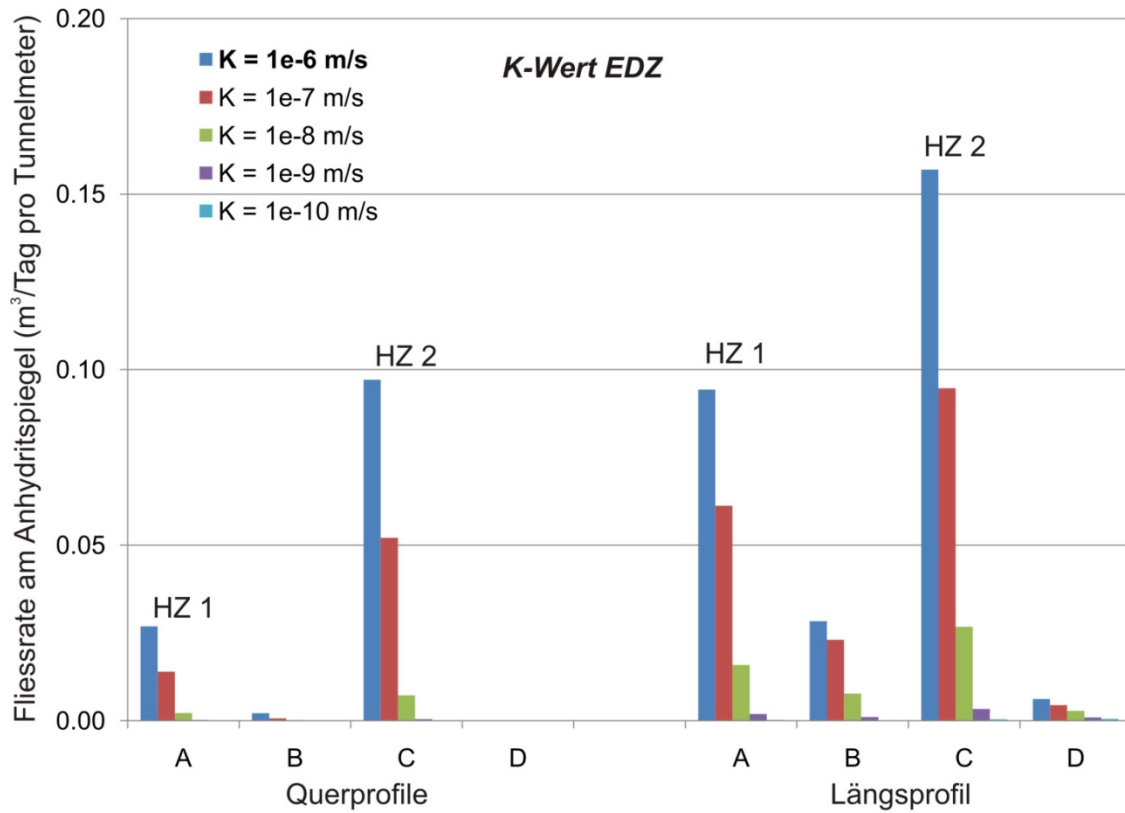


Lokale Grundwassermodelle Querprofile C und D.

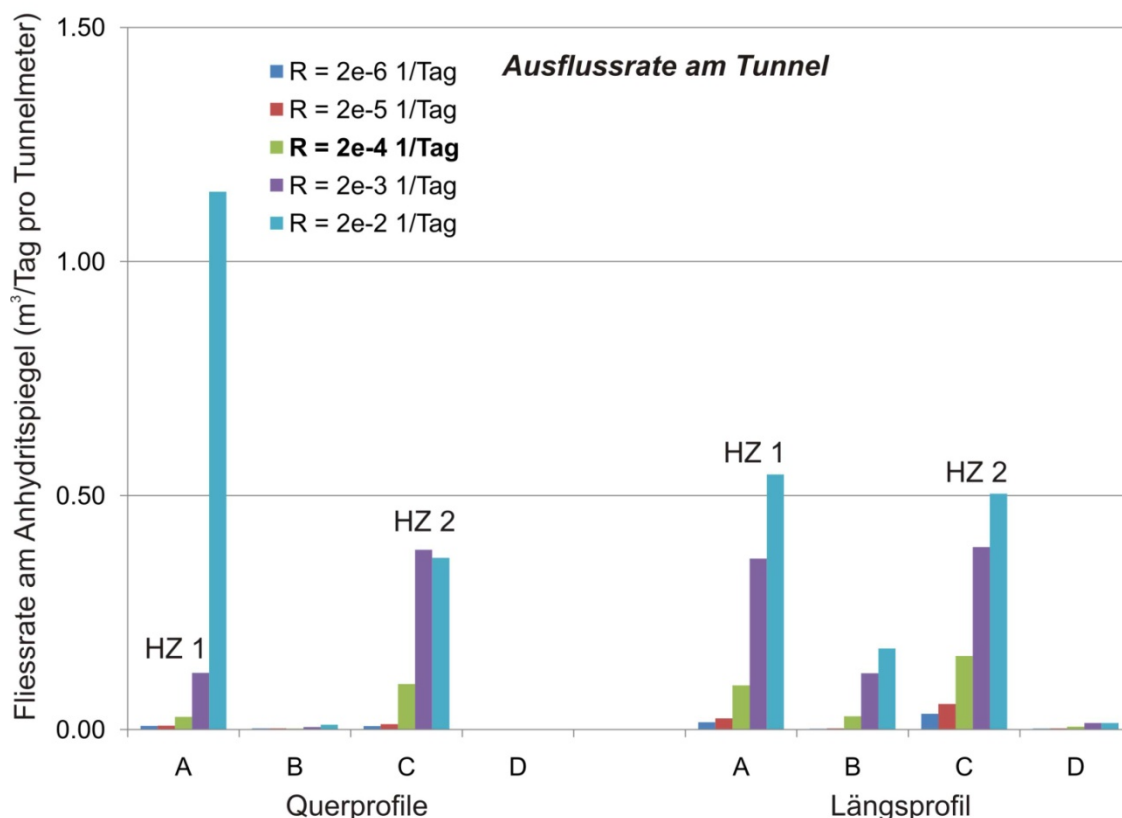
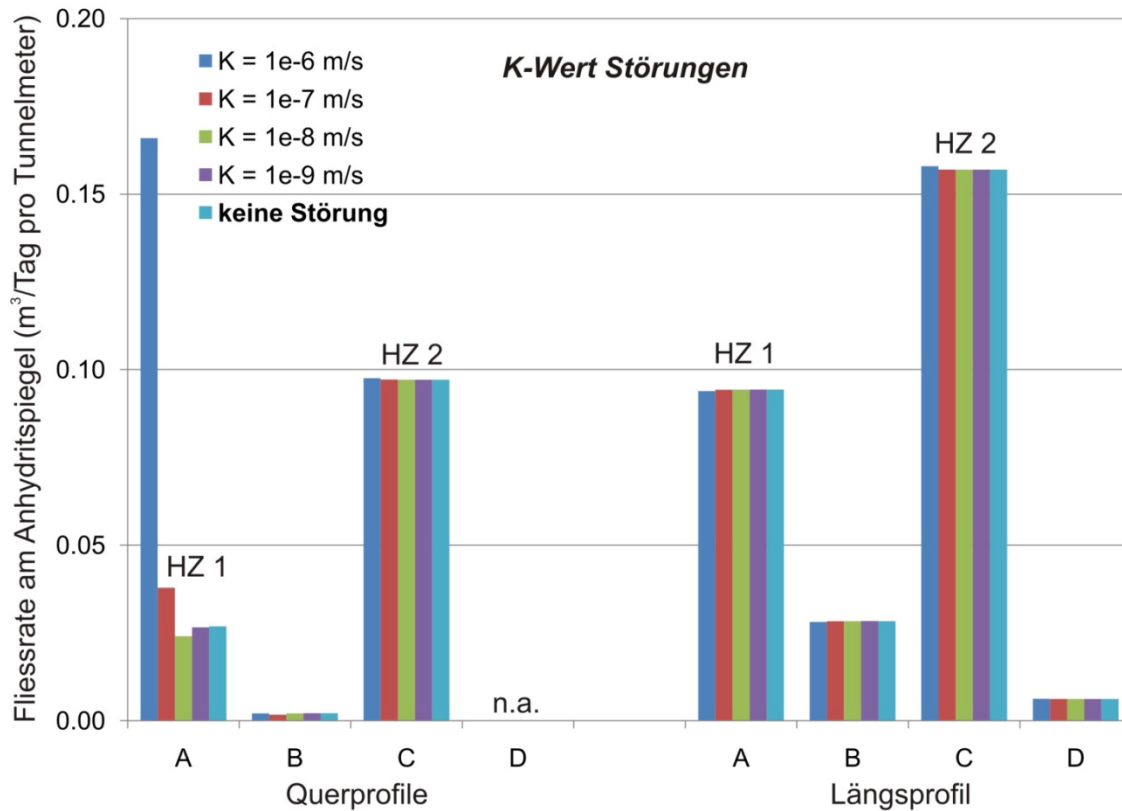
Potenzialverteilung und Fließpfade zum Anhydritspiegel vor (links) und nach dem Tunnelbau (rechts). Grau gepunktete Signatur: verwitterter Gipskeuper. Weiss gepunktete Signatur: Quartär. Im Querprofil C (Hebungszone 2) ist der verwitterte Gipskeuper nach dem Tunnelbau hydraulisch mit dem Anhydritspiegel verbunden. Es kommt am Anhydritspiegel zu Wasserzufluss aus dem verwitterten Gipskeuper. Im Querprofil D (ohne Hebungserscheinungen) ist dies nicht der Fall.



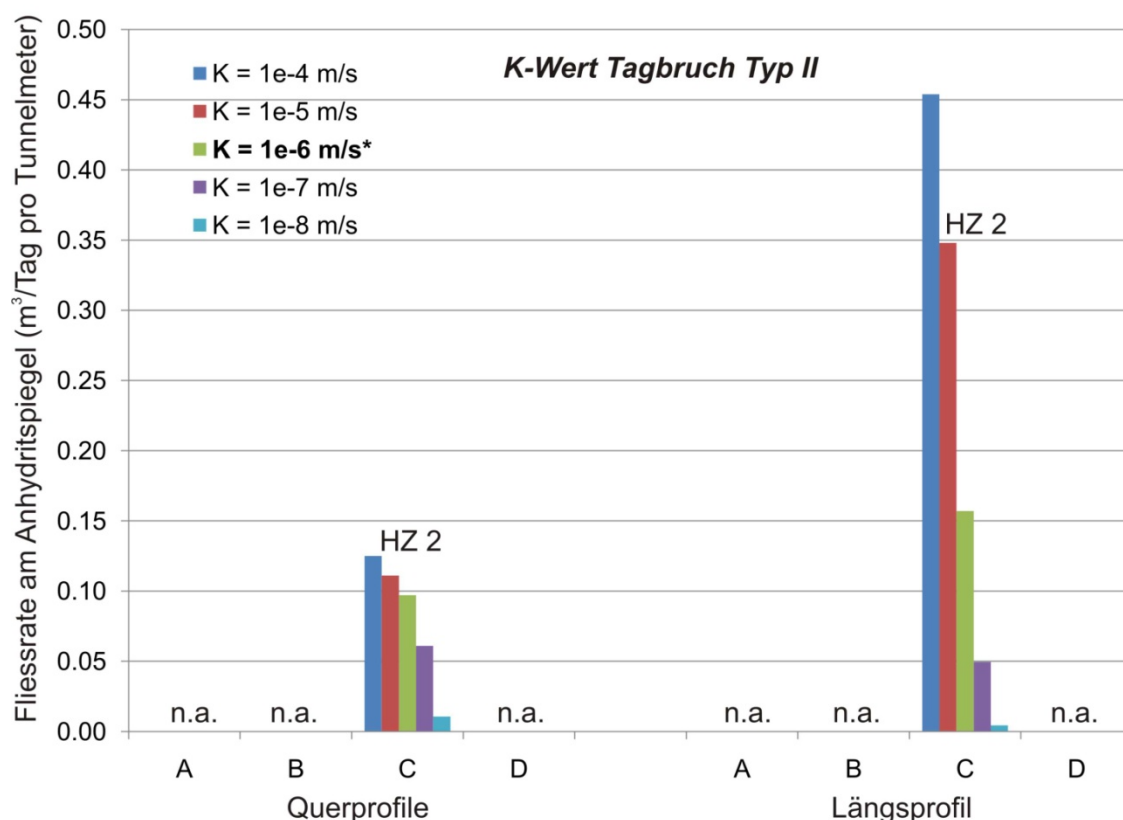
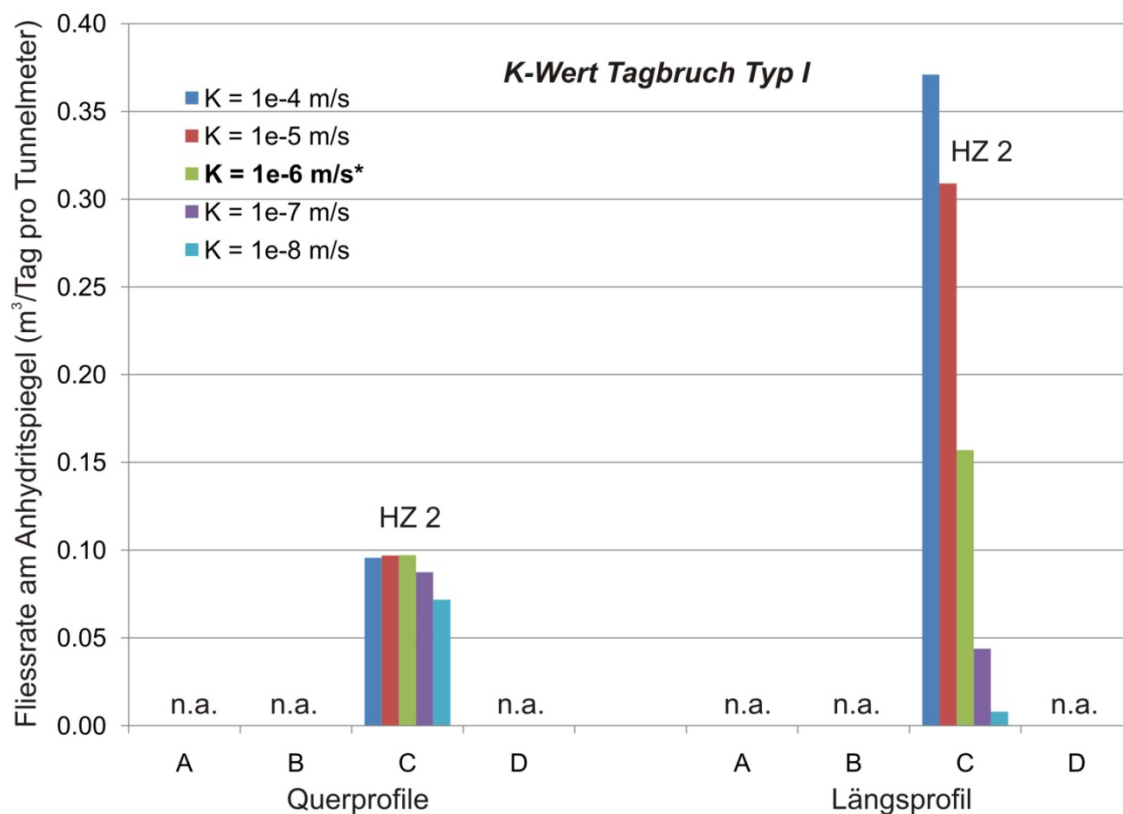
Parameterstudie, Fließraten nach dem Tunnelbau am Anhydritspiegel in den untersuchten Abschnitten bei verschiedenen K-Werten des Oberen Aquifers (oben) und des Gipskeupers (unten). Eine Änderung sensibler Parameter führt zu grossen Unterschieden zwischen den berechneten Fließraten am Anhydritspiegel. Der Parameter „K-Wert des Oberen Aquifers“ zeigt hier einen grossen Einfluss auf die Fließraten. Der Parameter „K-Wert des Gipskeupers“ hingegen hat keinen grossen Einfluss auf die Fließraten. Fettdruck in Legende: Referenzmodell.



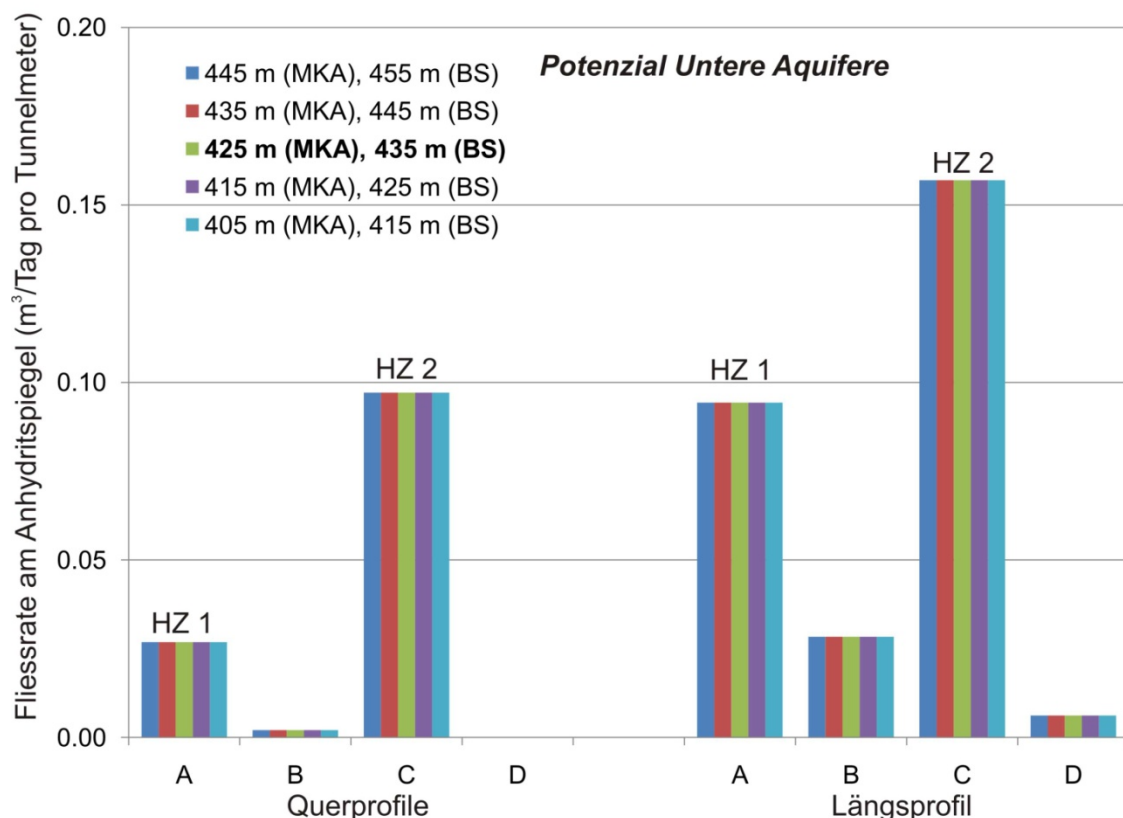
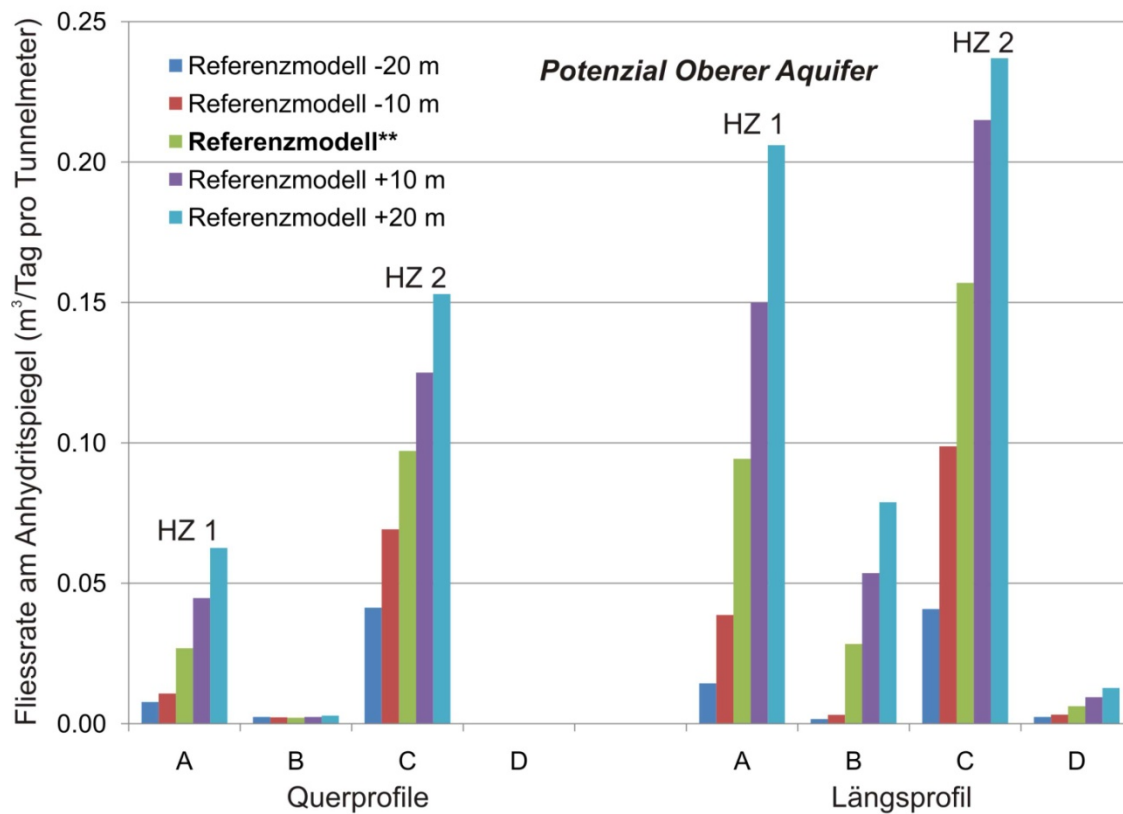
Parameterstudie, Fließraten nach dem Tunnelbau am Anhydritspiegel in den untersuchten Abschnitten bei verschiedenen K-Werten (oben) und Mächtigkeiten (unten) der Auflockerungszone (EDZ). Eine Änderung sensibler Parameter führt zu grossen Unterschieden zwischen den berechneten Fließraten am Anhydritspiegel. Insbesondere der Parameter „K-Wert der EDZ“, aber auch der Parameter „Mächtigkeit der EDZ“ hat einen grossen Einfluss auf die Fließraten. Fettdruck in Legende: Referenzmodell.



Parameterstudie, FlieBsrates nach dem Tunnelbau am Anhydritspiegel bei verschiedenen K-Werten der Störungen (oben) und Ausflussraten am Tunnel (unten). Eine Änderung sensibler Parameter führt zu grossen Unterschieden zwischen den berechneten FlieBsrates. Der Parameter „K-Wert Störungen“ hat nur einen grossen Einfluss auf die FlieBsrates, wenn eine Störung mit grossen K-Werten den Anhydritspiegel im Tunnelbereich schneidet (Querprofil A). Der Parameter „Ausflussrate am Tunnel“ hat einen grossen Einfluss auf die FlieBsrates. n.a.: nicht anwendbar. Fettdruck Legende: Referenzmodell.



Parameterstudie, Fließraten nach dem Tunnelbau am Anhydritspiegel in den untersuchten Abschnitten bei verschiedenen K-Werten des Tagbruchs (Typ 1 oben, Typ 2 unten). Eine Änderung sensibler Parameter führt zu grossen Unterschieden zwischen den berechneten Fließraten. Der Parameter „K-Wert des Tagbruchs“ hat einen grossen Einfluss auf die Fließraten. Die hohen Fließraten aller Szenarien zeigen, dass der Tagbruch nicht ursächlich für das Quellen im Abschnitt C ist (auch ohne Tagbruch werden dort hohe Fließraten erreicht). n.a.: nicht anwendbar. *: Entspricht ohne Tagbruch. Fettdruck Legende: Referenzmodell.



Parameterstudie, Fließraten nach dem Tunnelbau am Anhydritspiegel in den untersuchten Abschnitten bei verschiedenen hydraulischen Potenzialen im Oberen Aquifer (oben) und den unteren Aquiferen (unten). Eine Änderung sensibler Parameter führt zu grossen Unterschieden zwischen den berechneten Fließraten am Anhydritspiegel. Der Parameter „hydraulisches Potenzial“ hat nur im Oberen Aquifer einen grossen Einfluss auf die Fließraten, nicht jedoch in den Unteren Aquiferen. **: siehe Text. Fettdruck in Legende: Referenzmodell.