



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 Belchentunnel

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

Influence of groundwater flow on swelling in the Gipskeuper of the Belchentunnel

**Angewandte & Umweltgeologie, Departement Umweltwissenschaften,
Universität Basel
Prof. Dr. Peter Huggenberger
Dr. Eric Zechner
Dr. Horst Dresmann**

**Forschungsauftrag FGU 2008/004 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 Belchentunnel

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

Influence of groundwater flow on swelling in the Gipskeuper of the Belchentunnel

**Angewandte & Umweltgeologie, Departement Umweltwissenschaften,
Universität Basel
Prof. Dr. Peter Huggenberger
Dr. Eric Zechner
Dr. Horst Dresmann**

**Forschungsauftrag FGU 2008/004 auf Antrag der
Fachgruppe Untertagbau (FGU)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Peter Huggenberger

Mitglieder

Eric Zechner

Horst Dresmann

Roland Vogt

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	11
2	Forschungsansatz	13
2.3	Charakterisierung Quellen und Tunnelwässer nach Herkunft	15
3	Geologisches Modell (Profilbilanzierung)	17
3.4.1	„fault-parallel-flow“	20
3.4.2	„trishear“	21
3.4.3	„flexural slip unfold“	22
3.6.1	Bilanziertes Profil	24
3.6.2	Diskussion des bilanzierten Profils	28
4	2D Grundwassermodell	30
5	Messprogramme zur Hydrologie im nördlichen Belchen	32
5.1.1	Wassertemperatur	32
5.1.2	Spezifische elektrische Leitfähigkeit	33
5.1.3	Zusammensetzung der Anionen	33
5.1.4	Stabile Isotopen Sauerstoff 18 und Deuterium	34
5.2.1	Eingesetzte Methoden	36
5.2.2	Einrichtungen	36
5.2.3	Ergebnisse	38
6	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	44
	Anhänge	46
	Abkürzungen	51
	Literaturverzeichnis	53
	Projektabschluss	55
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	58

Zusammenfassung

Mittels geologischer Profilbilanzierung konnte im Bereich des Belchentunnels ein 2D geologisches Modell erstellt werden, welches gegenüber der Tunnelachse einige km weiter nach Norden und Süden reicht, und mit einer Gesamtverkürzung von ca. 9.5km über die bilanzierte Profillänge mit den bestehenden Arbeiten kompatibel ist.

Das geologische Modell diente als Grundlage für ein numerisches 2D Grundwassermodell, welches jeweils mit den hydraulischen Randbedingungen des bestehenden Zustands sowie des Ausgangszustands vor dem Tunnelbau aufgebaut wurde. Die Ergebnisse zeigen die Änderung der Grundwasserfließverhältnisse durch den Bau des Tunnels sehr deutlich. Da aber das 2D Modell die seitliche Umströmung nicht erfassen kann, führt der Drainageeffekt des Tunnels zu einer scheinbaren hydraulischen Entkopplung des Gebirges oberhalb der Tunnelachse, welche als unrealistisch angesehen wird. Es ist anzunehmen, dass die seitlichen Zu- und Abflüsse im Profil von der Lage der unterirdischen Zustromgebiete abhängen, welche wiederum von der geologischen 3D Struktur der Grundwasserstauer bestimmt werden. Mit einem Messprogramm wurden mittels der Bestimmung der einzelnen Komponenten des hydrologischen Kreislaufs die Menge und die physikalisch-hydrochemische Signatur des unterirdisch zu- oder abströmenden Grundwassers abgeschätzt. Mit dem Verlauf der Temperatur und der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit konnten die Quellen in Gruppen mit tiefer, mittlerer und langer Aufenthaltszeit unterteilt werden. Da die hydraulischen Leitfähigkeiten und Porositäten im Untergrund sehr unterschiedlich sind, haben Tiefenwässer aus Karstaquiferen wie aus dem Oberen Muschelkalk bei hohen Fließgeschwindigkeiten Schwankungen der Parameter verursacht. Diese Karstwässer wurden aufgrund ihrer hydrochemischen Zusammensetzung mit erhöhten Hydrogenkarbonat- und Sulfatkonzentrationen identifiziert. Die gemessene Zusammensetzung der stabilen Isotope δO^{18} und Deuterium der Quell- und Tunnelwässer zeigte die typische Niederschlagssignatur des Einzugsgebiets des Leisibachs, und damit auch dass der Anteil von Grundwässern aus weiter entfernten Einzugsgebieten wie z. B dem Jurasüdfuss minimal ist. Da aber im Tunnelbereich keine Grundwassermessstellen vorhanden sind, sondern nur Drainagewasser aus nicht klar definierten Tunnelabschnitten entnommen werden kann, ist eine differenzierte Interpretation der Herkunft der Wässer schwierig. Mit der Installation von zwei Meteostationen und einer Abflussmessung im Leisibach konnte die Evapotranspiration („Verdunstung“), der Niederschlag, der oberirdische Abfluss, sowie die Quellaustritte im oberirdischen Einzugsgebiet über dem nördlichen Bereich des Tunnels gemessen werden. Dadurch konnte der Anteil Tiefengrundwasser berechnet werden, welcher aus den tieferen Aquiferen im Gebirge in der Größenordnung von gegen 80 mm pro Jahr zugeführt wird. Es wird angenommen, dass die Anreicherung über das unterirdische Einzugsgebiet erfolgt.

Résumé

Un modèle géologique dans la région du Tunnel du Belchen a été réalisé à partir d'une coupe géologique équilibrée. Le modèle géologique prolonge l'axe du tunnel de quelques kilomètres vers le Nord et le Sud. Le raccourcissement de 9,5 km nécessaire à l'équilibrage de la coupe est compatible avec les travaux existants.

Le modèle géologique a été utilisé pour la construction d'un modèle numérique en 2D d'écoulement d'eau souterraine. Les conditions hydrauliques aux bords actuelles ainsi que celles d'avant la construction du tunnel ont été imposées au modèle numérique. Les résultats démontrent que la construction du tunnel a significativement influencé le champ d'écoulement de l'eau souterraine. Le caractère 2D du modèle ne permet pas d'intégrer les flux latéraux et verticaux qui contournent l'axe du tunnel, ce qui conduit à un découplage hydraulique complet entre le dessus et le dessous du tunnel. Cet artefact ne peut être considéré comme réaliste. Il serait judicieux d'intégrer le caractère 3D des flux d'écoulement latéraux provenant de zones de recharges souterraines, elles-mêmes contrôlées par les structures tridimensionnelles d'aquitards. Un programme de mesure basé sur l'analyse physico-chimique d'échantillons d'eau a permis d'estimer quantitativement les composants du cycle hydrologique et de calculer la recharge d'eau souterraine. Suite à l'analyse des variations temporelles de la température et de la conductivité électrique spécifique dans les sources, les sources ont été classifiées en trois catégories par rapport à leur temps de résidence dans l'aquifère : court, moyen et long. Comme les conductivités hydrauliques ainsi que les porosités peuvent être très différentes dans le sous-sol, les eaux profondes des aquifères karstique et du Muschelkalk Supérieur ont causé de grandes variations des paramètres mesurés par grande vitesse d'écoulement. Ces eaux karstiques ont été identifiées par leurs compositions hydro-chimiques, elles-mêmes caractérisées par des concentrations élevées en hydrogénocarbonate et sulfate. L'analyse de la composition en isotopes stables (δO^{18} et deuterium) des eaux des sources et des eaux de drainages dans le Tunnel du Belchen a révélé une composition identique à celle des eaux de précipitation échantillonnées dans le bassin versant du Leisibach au-dessus de la partie nord du tunnel. Vu qu'il n'existe aucun point de mesure d'eau souterraine dans le tunnel et qu'il n'est pas possible de déterminer précisément de quelles sections du tunnel les eaux de drainage proviennent, une interprétation nuancée quant à la provenance des eaux du tunnel est difficile à donner. Les précipitations, l'évapotranspiration, le débit du Leisibach ainsi que celui des sources ont été quantifiés à l'aide de deux stations météorologiques et d'une station de mesure de débit dans le Leisibach. Ainsi, la recharge en eau souterraine profonde a été estimée à 80 mm par an. Il est supposé que cette recharge s'effectue par via le bassin versant souterrain.

Summary

A 2D balanced cross-section model has been developed in the area of the Belchentunnel. The geological model extends up to a few km N and S of the existing tunnel axis. The resulting shortening of 9.5 km for the cross-section construction is consistent with previous studies in same area of the folded Jura.

The geological model was used for the construction of a 2D groundwater model corresponding to hydraulic boundary conditions with or without tunnel. Results show that the tunnel has a significant effect on the groundwater flow field of the Belchen area. Due to the fact that a 2D model does not account for lateral or vertical fluxes around the horizontal tunnel axis, an almost complete, and, in that case largely unrealistic, hydraulic decoupling of the areas above and below the tunnel were observed. It is considered more realistic that 3D fluxes from lateral subsurface recharge areas are affecting the flow field in the Belchen area. These 3D fluxes are mainly controlled by the 3D geological structure of aquitards. A subsequent physical and hydrochemical sampling program focused on the quantification of the different components of the hydrological cycle in order to derive the subsurface recharge fluxes. Temporal variations in springwater temperature and specific electrical conductivity allowed characterizing groundwater samples for short, middle and long aquifer residence times. Karstwaters from the Upper Muschelkalk aquifer with typically short residence times due to high flow velocities were characterized with increased hydrogencarbonate and sulfate concentration. The measured stable isotope composition ($\delta^{18}\text{O}$ and deuterium) of springwater and drainage water from the tunnel showed values similar to rainwater samples from the Leisibach catchment above the northern part of the tunnel. However, due to lack of groundwater sampling facilities within the tunnel a detailed interpretation of the origin of groundwater in the tunnel area was not possible. Components of rainfall, evapotranspiration, river discharge, and spring discharge were measured with the installation of two meteorological stations and a discharge weir in the Leisibach. As a consequence, an annual resulting recharge flux of 80mm could be estimated from the measured components of the hydrological cycle. The positive flux likely results from recharge of a subsurface catchment area.

1 Ausgangslage

Das Phänomen der Hebung der Tunnelröhre und Oberfläche infolge von Quellerscheinungen in anhydritführenden Tongesteinen ist eine im Tunnelbau bekannte Gefährdung (z. B. Kovári, 1987; Wittke, 2004). Im Falle des Belchentunnels der N2 soll neben den seit den 60er Jahren bestehenden zwei Tunnels mit dem Bau eines zusätzlichen „Sanierungstunnels“ gewährleistet werden, dass bei fälligen Sanierungen in den bestehenden Tunnels jeweils zwei Tunnels dem Verkehr zur Verfügung stehen. Verlässliche Vorausagen über zu erwartende Quellhebungen und Quelldrücke bei einem konkreten Bauprojekt sind äusserst schwierig. Grund für die Unsicherheiten ist der Umstand, dass die Umwandlung von Anhydrit in Gips meist nicht direkt, sondern indirekt über den Umweg Anhydritlösung, Transport der Lösung mit der Grundwasserströmung und Ausfällung an einem anderen Ort stattfindet. Eine Vielzahl von Prozessen muss dabei berücksichtigt werden, jedoch spielt für das Verständnis und die Lokalisierung der Quellerscheinungen die Dynamik der Grundwasserzirkulation eine bedeutende Rolle (Anagnostou, 1995).

Das regionale Grundwasserfliessfeld im Tafel- oder Faltenjura wird bestimmt durch die topographischen Verhältnisse, die strukturelle Anordnung der geologischen Formationen mit ihren unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften, der Lage von tektonischen Linien und Störungszonen, sowie hydraulischen Randbedingungen wie der Wechselwirkung mit Oberflächengewässern und der Grundwasserneubildung.

Das Projekt „Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel – Meteostation (FGU 2008/004_OBF)“ hatte sich zum Ziel gesetzt, die Grundwasserverhältnisse aufgrund guter Kenntnisse der geologischen Verhältnisse im Gebirge darzustellen. Im 2008 wurden dazu drei Projektteile vorgeschlagen, welche vollständig umgesetzt wurden (Geologisches Modell), oder aufgrund ungenügender Datenerhebung und Ergebnisse (Teile der Datenerhebung, sowie des Geohydraulischen Modells) erweitert wurden. Insbesondere beim Geohydraulischen Modell hat sich gezeigt, dass eine 2D Betrachtung allein in der Ebene des Tunnels den lateralen Grundwasserflüssen nicht gerecht wird. Es wurde daher im 2010 vorgeschlagen, eine Grundwasserbilanzierung im Einzugsgebiet des nördlichen Belchens mittels erhobener hydrologischer Daten zu erarbeiten (Punkte 4 bis 6). Die einzelnen beantragten Projektteile stellen sich wie folgt dar (in *kursiv* die beantragten Projektteile, welche aus den genannten Gründen nicht Teil des Berichts sind):

1. Datenerhebung (bis Oktober 2009)
 - Hydrochemische Beprobung an ausgewählten Standorten.
 - *Auswertung der bestehenden geohydraulischer Daten von der „P-Q“-Beziehung zwischen Porendruckmessungen und Pumpmengen zur Bestimmung der geohydraulischen Kennwerte war aufgrund fehlender Pumpmengen nicht möglich.*
2. Geologisches Modell (bis September 2009)
 - Erstellung geologisches 2D Modells bis auf eine Tiefe des Abscherhorizonts des Juragebirges.
 - Übertragung des geologischen ins hydrogeologische Modell (Verteilung der geohydraulischen Eigenschaften).
3. Geohydraulisches Modell (bis Dezember 2010)
 - Erstellung eines geohydraulischen 2D Modells der Grundwasserströmung vor und nach dem Tunnelbau.
 - *Überprüfung des simulierten Fliessfelds mit advektivem 3D Transportmodell der mittels Isotopendaten zur Abschätzung der Grundwasseraufhaltszeit nicht möglich aufgrund fehlender Grundwassermessstellen um Tunnelbereich, sowie Aussagekraft eines 2D Grundwassermodells parallel des Tunnels.*

- *Erstellung eines möglichen Zusammenhangs zwischen Änderung der Grundwasserströmung durch den Tunnelbau und Bereichen, welche vermehrt dem Quellen des Gipskeupers unterworfen sind (Synthese).*
4. Datenerhebung des Niederschlags, der Verdunstung, sowie Probenahme des Niederschlags (läuft weiter bis September 2012)
 5. Berechnung der Grundwasserneubildung, bzw. des unterirdischen Zu-/Abflusses im Einzugsgebiet des nördlichen Belchens (läuft weiter bis September 2012)
 6. Abgleich mit regionalem 2D Geohydraulischem Modell (ab Juli 2010 bis Projektende)

Die aus dem parallelen Projekt im Chienbergtunnel gewonnenen Daten und Erkenntnisse (Schlussbericht FGU 2008/5; Butscher et al., 2011a, b) haben die Bedeutung der Grundwasserneubildung für das regionale Grundwasserfliessfeld im Gebirge hervorgehoben. Da die hydrogeologischen Kennwerte im Gebirge, welche mittels Modell-Kalibrierung an vergleichsweise wenigen Potentialmessungen bestimmt wurden selten zu eindeutigen Ergebnissen führt, sind Kenntnisse der Randflüsse wie Grundwasserneubildung, Austausch mit Oberflächengewässern, Quellaustritte, sowie regionale seitliche Zu- und Abflüsse über das Modellgebiet von Bedeutung. Zur Modell-Überprüfung können Analysen der physikalischen und hydrochemischen Komponenten der Niederschlags-, Oberflächen-, und Grundwässer beigezogen werden (Roth, 2011).

Im folgenden Bericht sind die gewonnenen Daten und Erkenntnisse nach 2D Geologisch-Hydraulischem Modell, Messprogramme zur Hydrologie im nördlichen Belchengebiet, sowie den daraus gewonnenen Schlussfolgerungen und Empfehlungen geordnet.

2 Forschungsansatz

2.1 Geologisches Modell

Die Erstellung eines für die komplexen Fragestellungen verwendbaren geohydraulischen Modells erfordert umfangreiche geologische, hydrologische, hydraulische und hydrochemische Datensätze. Zu einem bedeutenden Teil sind diese Datensätze erhoben und dokumentiert worden (STB, 2007). In verschiedenen Bereichen herrschen aber noch teilweise, oder vollständige Datenlücken, welche durch Interpretation bestehender Datensätze ergänzt werden können.

Zur Rekonstruktion des Einflusses des Tunnelbaus auf die Grundwasserströmung wird folgender Ansatz verfolgt:

- die Rekonstruktion der ursprünglichen, d.h. vom Tunnelbau unbeeinflussten Grundwasserflussverhältnisse,
- Darstellung des Potentialfeldes bis in Bereiche unterhalb der Tunnelsohle,
- die Abbildung des aktuellen Grundwasserflussfeldes, und davon abgeleitet, die Ausscheidung der Zonen mit den grössten Änderungen.

Grundlage für die Darstellung der Grundwasserverhältnisse sind gute Kenntnisse der geologischen Verhältnisse im Gebirge. Die verschiedenen Typen der vorliegenden Daten, wie zum Beispiel geologische Karten, Bohrungen und geologische Aufnahmen in den bestehenden Tunnelröhren, sind in einem geologischen 2D-Profil zusammengefasst (STB, 2007). Das 2D-Profil reicht aber nur wenig tiefer als den Bereich der Tunnelachse. Da das Grundwasserflussfeld aber auch bis in tiefere Bereiche unter dem Tunnel vom Bauwerk beeinflusst wird, sind detaillierte geologische Kenntnisse bis etwa in den Bereich des Abscherhorizonts des Juragebirges notwendig. Indirekte Konstruktionsmethoden wie die Profilbilanzierungsmethode (Dahlstrom 1969, Elliot 1983) können helfen die Qualität einer Profilkonstruktionen bzw. eines 2D-Profilschnittes zu prüfen und zu verbessern.

2.2 Grundwasserneubildung

Das Grundwasser, welches die tieferen Grundwasserträger erreicht oder verlässt, kann indirekt über die Bestimmung der im hydrologischen Kreislauf beteiligten Komponenten, bzw. Flüsse bestimmt werden:

$$N = E + A + S \quad (1)$$

$$S = Q + GW_{\text{tief}} \quad (2)$$

wobei E der Evapotranspiration („Verdunstung“), N dem Niederschlag, A dem oberirdischen Abfluss, sowie S der Speicheränderung entspricht. Die Speicheränderung setzt sich wiederum aus den Quellaustritten Q , bzw. –fassungen und dem Tiefengrundwasser GW_{tief} zusammen. Es wird dabei davon ausgegangen, dass das Tiefengrundwasser dem Wasser entspricht, welches den tieferen Aquiferen im Gebirge zugeführt, oder entzogen wird. Da dieser Anteil wesentlich von der Struktur des unterirdischen Einzugsgebiet geprägt wird, kann er räumlich differenziert nur über ein 3D Grundwassermodell, welches die 3D Geologie integriert, bestimmt werden. Wenn das hydrologische Einzugsgebiet hingegen als geschlossenes 0-dimensionales System betrachtet wird („black-box model“), kann die Änderung der Menge Tiefengrundwasser durch Messung der oberirdischen hydrologischen Komponenten zeitlich differenziert ermittelt werden. Die für das unterirdische Einzugsgebiet ermittelte Mengenänderung an Grundwasser kann anschliessend in einem Folgeprojekt als wichtige Gesamtgrösse zur Kalibrierung eines regionalen 3-dimensionalen Grundwassermodells des Belchens dienen.

Im 2010 wurden im nördlichen Gebiet des Belchens, welche im Gebirge den Tunnelabschnitten mit Quellphänomenen im Gipskeuper und oberflächlich dem Einzugsgebiet des

Leisibaches (Abb. 2.1) entsprechen, die folgenden hydrologischen Messinstallationen aufgebaut:

- Zwei meteorologische Messstationen jeweils im Tal und am Berg zur Ermittlung des Niederschlags N (gemeinsam mit dem Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung MCR der Universität Basel);
- Mikrometeorologische Messungen an den genannten Stationen zur Ermittlung der Energiebilanz, welche für eine Abschätzung der Verdunstung (E) verwendet werden kann;
- Eine Abflussmessstation im Leisibach zur Bestimmung des Oberflächen-Abflusses A ;
- Schüttungsmessungen an den bedeutenden Quelfassungen im Einzugsgebiet des Leisibaches zur Ermittlung der Quellaustrittsmenge Q ;

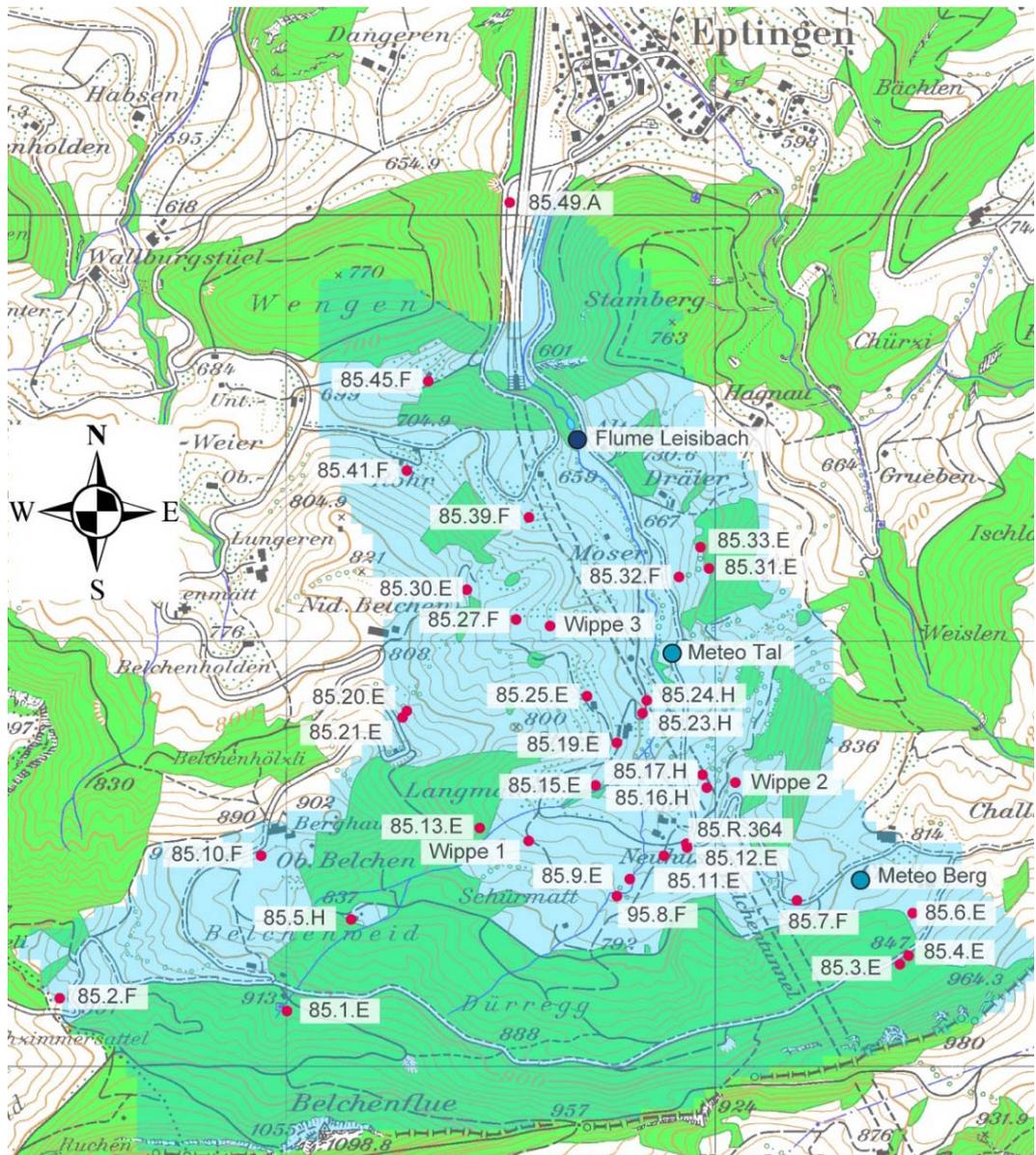


Abb. 2.1 Einzugsgebiet des Leisibaches (transparent-blau) südlich Eptingen, mit Lage der Quellen, Meteostationen Berg und Tal, und Abflussmessung „Flume Leisibach“ (Roth, 2011).

2.3 Charakterisierung Quellen und Tunnelwässer nach Herkunft

Da keine Grundwassermessstellen im Belchengebiet wie im Tunnelbereich vorhanden sind, mussten zur Charakterisierung der Grundwässer nach Herkunft und Aufenthaltsdauer im Gestein Proben aus Quellen, dem Leisibach, dem Niederschlag, sowie aus offenen Drainagen in der Oströhre des Tunnels, sowie dem Drainagestollen entnommen werden (Abb. 2.2). Dabei wurden die folgenden physikalischen und hydrochemischen Parameter an Niederschlags-, Oberflächen-, und Grundwässer im Einzugsgebiet bestimmt:

- Temperatur und spezifische elektrische Leitfähigkeiten des Niederschlags-, Oberflächen-, Quell-, und Grundwässer in Abschnitten des Belchentunnels;
- Zusammensetzung der Hauptionen (An- und Kationen) des Niederschlags-, Oberflächen-, Quell-, und Grundwässer in Tunnelabschnitten;
- Isotopenzusammensetzung (^{18}O , ^2H , ^3H) des Niederschlags-, Oberflächen-, Quell-, und Grundwässer in Tunnelabschnitten;

Die hydrologischen Datensätze wurden grösstenteils ab Mitte 2010 bis Herbst 2011 aufgezeichnet, die physikalischen und hydrochemischen Parameter in der Regel ab Mitte bis 2010 bis Jan. 2011 alle 2 Wochen, danach in Stichproben.

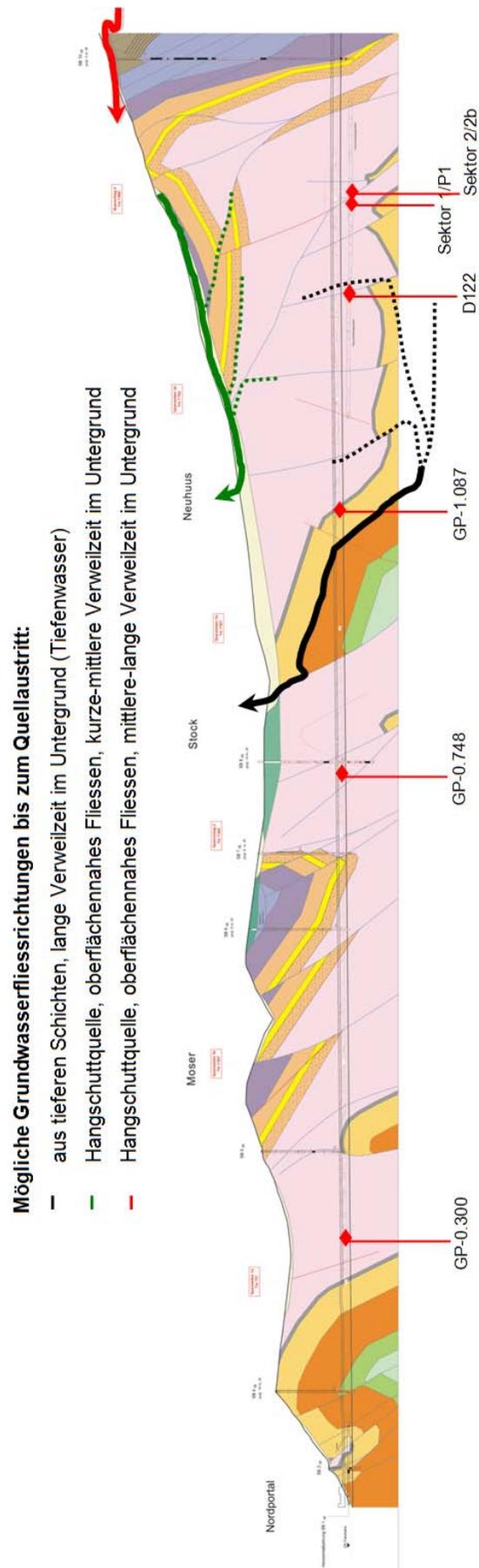


Abb. 2.2 Charakterisierung der Quell- und Tunnelwässer nach Herkunft und Aufenthaltsdauer im Gestein.

Die Basisdaten für die Profilkonstruktion und die anschließende Retro-Deformation stammen vom STB Bericht (2007). Zusätzliche Informationen liefern die geologischen Tunnelaufnahmen insbesondere der westlichen Tunnelröhre. Ausserdem wurde diverses geologisches Kartenmaterial genutzt.

- STB Bericht (2007):
- Geologisches Profil entlang der Achse STB
- Horizontalschnitt auf Fahrbahnniveau von STB, West- und Oströhre
- Geologische Karte des Belchengebietes
- Bohrprofile
- Sonstige Daten:
- Geol. Tunnelaufnahme Belchen West (BGA/BL¹: Eptingen 44 und 65)
- Geol. Aufnahme in den Lüftungsschächten (BGA/BL: Eptingen 88)
- Geol. Karte (Goldschmidt, 1965)
- Geol. Karte (Herold, 1992)
- Geol. Karte (Laubscher, 2008 unveröffentlicht)
- Zusätzliche Bohrprofile: (Liste siehe Beilage 1)

Widersprüche in den geologischen Daten, wurden anhand von eigenen Feldbeobachtungen beurteilt.

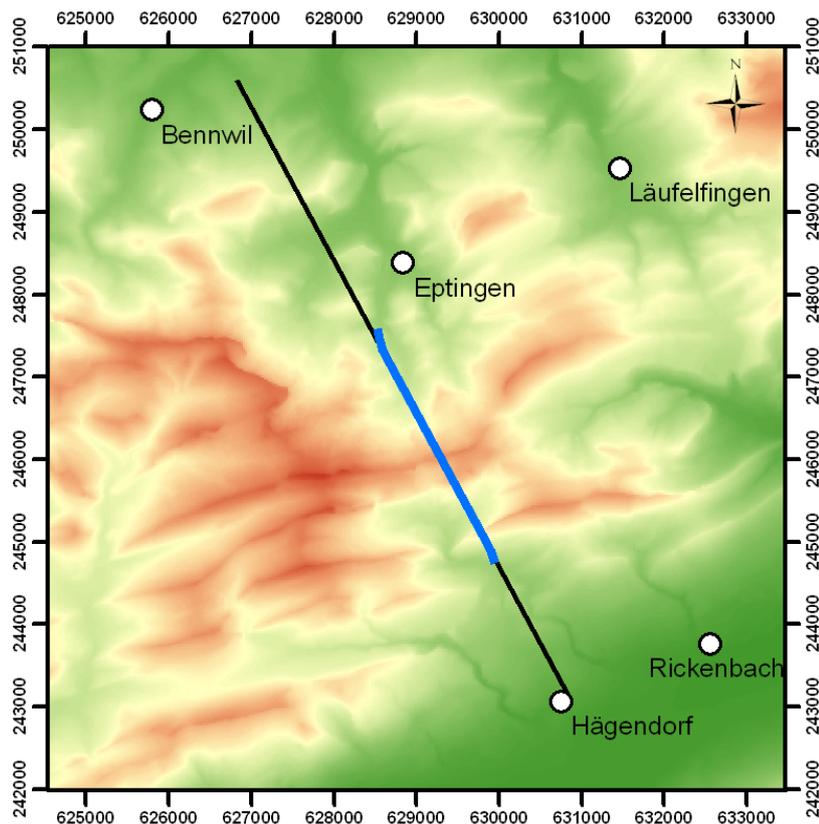


Abb. 3.2 Topographische Karte des Belchengebietes, Profilsur des zu bilanzierenden Profils (schwarz), Belchentunnel (blau)

3.3 Methode der Profilbilanzierung (oder auch Retro-Deformation)

Ziel des Bilanzierungsprozesses ist es geologische Deformationen zurück zu konstruieren, um so den ursprünglichen, ungestörten Schichtverband wieder herzustellen. Materialbilanzen, welche vor und nach der Rückformung erstellt werden, dienen dazu, Materialverluste oder -zugewinne zu erkennen. Auf diese Weise soll ein geometrischer und mechanischer Weg vom aktuellen deformierten in den ursprünglich undeformierten Zustand gefunden werden. Hierbei sollte die Materialbilanzierung im Idealfall dem Gesetz der Volumenerhaltung (Goguel 1952) entsprechen. Im Falle einer unausgeglichene Materialbilanz ist eine Profilkonstruktion nicht plausibel und somit fehlerhaft.

In einem iterativen Prozess von Konstruktion und Bilanzierung dient diese Methode der Beseitigung von fehlerhaften Profilkonstruktionen. Ein bilanziertes Profil stellt somit eine mögliche Profilvariante dar. Grundsätzlich ist es möglich, dass es mehrere bilanzierte Profilvarianten gibt.

Ausgehend von einem Startprofil kommt es während des Bilanzierungsprozesses zu Neukonstruktionen in Teilbereichen des Profils und somit zu einer ständigen Verbesserung des Gesamtprofils. Zusätzlich bietet eine anschließende Vorwärtsmodellierung (Rekonstruktion der Jurafaltung, beginnend aus einem undeformierten Zustand) die Möglichkeit, die Profilkonstruktion zu überprüfen. Dabei sollte als Ergebnis die geologische Situation weitgehend wiedergeben.

Um eine Profilbilanzierung erfolgreich durchführen zu können müssen einige grundlegende Bedingungen erfüllt sein:

- Die ursprünglichen Lagerungsverhältnisse sollten bekannt sein. Dies entspricht dem strukturellen Zustand der Region vor der Jurafaltung.
- Der Deformationsstil ist "thin-skinned", d.h. die Deformation fand über einem Abscherhorizont statt.
- Die gewählte Profilebene liegt parallel zur Deformationsrichtung, d.h. es wurde kein Material schräg zur Profilebene transportiert.

Während die ersten beiden Punkte entlang des Belchenprofils nahezu vollständig erfüllt sind, ist der letzte Punkt im Bereich des Belchentunnels nur schwer zu beurteilen. Sowohl Tunnelaufnahmen wie auch Oberflächenkartierungen weisen auf zahlreiche Querbrüche (Nord bis Nordost) hin. Abschätzungen zu Versatzweiten entlang der Querbrüche sind nur schwer quantifizierbar. In 2D Profilbilanzierungen können solche Strukturen nicht berücksichtigt werden. Vereinfachend wird angenommen, dass die Materialmenge, welche durch die Profilebenen bewegt wurde, konstant war und es somit weder zu Verlust noch zu einem Zugewinn innerhalb der jeweiligen geologischen Einheit kam.

Ein weiteres Problem stellt die Unsicherheit bezüglich Erosion dar. Im Allgemeinen ist nicht bekannt wie viel Material an einer Störung zur Erdoberfläche geführt und durch Erosion abgetragen wurde. Diese Unsicherheit hat einen Einfluss auf die Abschätzung des Versatzbetrages entlang der einzelnen Verwerfungen. Es gilt die Faustregel, sämtliche Versatzbeträge entlang von Verwerfungen möglichst gering zu halten, demzufolge ist es in einem ersten Ansatz das Ziel, von der minimal möglichen erodierten Materialmenge auszugehen.

Um das Problem der erodierten Materialmenge möglichst klein zu halten, wird eine heute noch möglichst komplett erhaltene Schichtgrenze als Referenzhorizont gewählt. Entlang dieses Horizontes wird die Rekonstruktion der Schichtlängen ausgerichtet. Am Belchen wurde hierfür die Grenze zwischen Muschelkalk und Keuper (Basis Lettenkohle) ausgewählt.

Eine Vorwärtsmodellierung im Anschluss an die Retro-Deformation dient zur Überprüfung der Plausibilität einer Profilkonstruktion und liefert zusätzliche Erkenntnisse über die Größenordnung der Erosion.

3.4 Software (2D Move)

Zur Realisation der 2-dimensionalen Profilbilanzierung wurde die geologische Modellierungssoftware Move™ (2009.1) von Midland Valley genutzt, sie erlaubt die Interpretation verschiedenartiger Geodatenformate Neben den notwendigen Retro-Deformations Modulen verfügt Move™ auch über eine breite Palette von Hilfswerkzeugen zur Profilkonstruktion. Darüber hinaus können sämtliche Eingangsdaten im 3D-Raum abgespeichert werden, d.h. in Profildbereichen mit schlechter Datenlage ist es möglich aus benachbarten Bereichen, Daten in die Profilebene zu projizieren

Zur Retro-Deformation werden mehrere Module zur Bearbeitung unterschiedlichster kinematischer Szenarien (u.a. Überschiebungen, Abschiebungen, Faltung, „Blinde Verwerfungen“) bereitgestellt. Die verschiedenen implementierten Algorithmen ermöglichen die Flächeninhalte und/oder die Schichtlängen deformierter Segmente während eines Arbeitsschrittes konstant zu halten.

Für die vorliegenden tektonischen Gegebenheiten im Belchengebiet, wo Faltungen und Überschiebungen die dominanten kinematischen Prozesse waren, werden die Module „fault-parallel-flow“, „trishear“ und „flexural slip unfold“ (Move 2009.1 Online Help) genutzt. Sie wurden speziell für Gegebenheiten wie der Juratektonik entwickelt.

3.4.1 „fault-parallel-flow“

Dieses, in der vorliegenden Arbeit am häufigsten genutzte Modul („fault-parallel-flow“; e.g. Kane et. al, 1997 and Egan et. al, 1997), kann die hangenden Einheiten (oberhalb einer Störung) parallel über eine Störung bewegen. Es berechnet Pfade, welche parallel zur aktiven Störung liegen. Die einzelnen Datenpunkte einer geologischen Schichtgrenze können nun entlang dieser Pfade vor- bzw. rückwärts bewegt werden. Man kann auch zusätzlich „Einfache Scherung“ durchführen. Einfache Scherung ermöglicht die Simulation von Schicht interner Deformation bzw. das übereinander gleiten von Schichtpaketen entlang von Schichtgrenzen. Das Modul hält sowohl die Schichtlängen als auch den Flächeninhalt im deformierten Bereich konstant (Abb. 3.3).

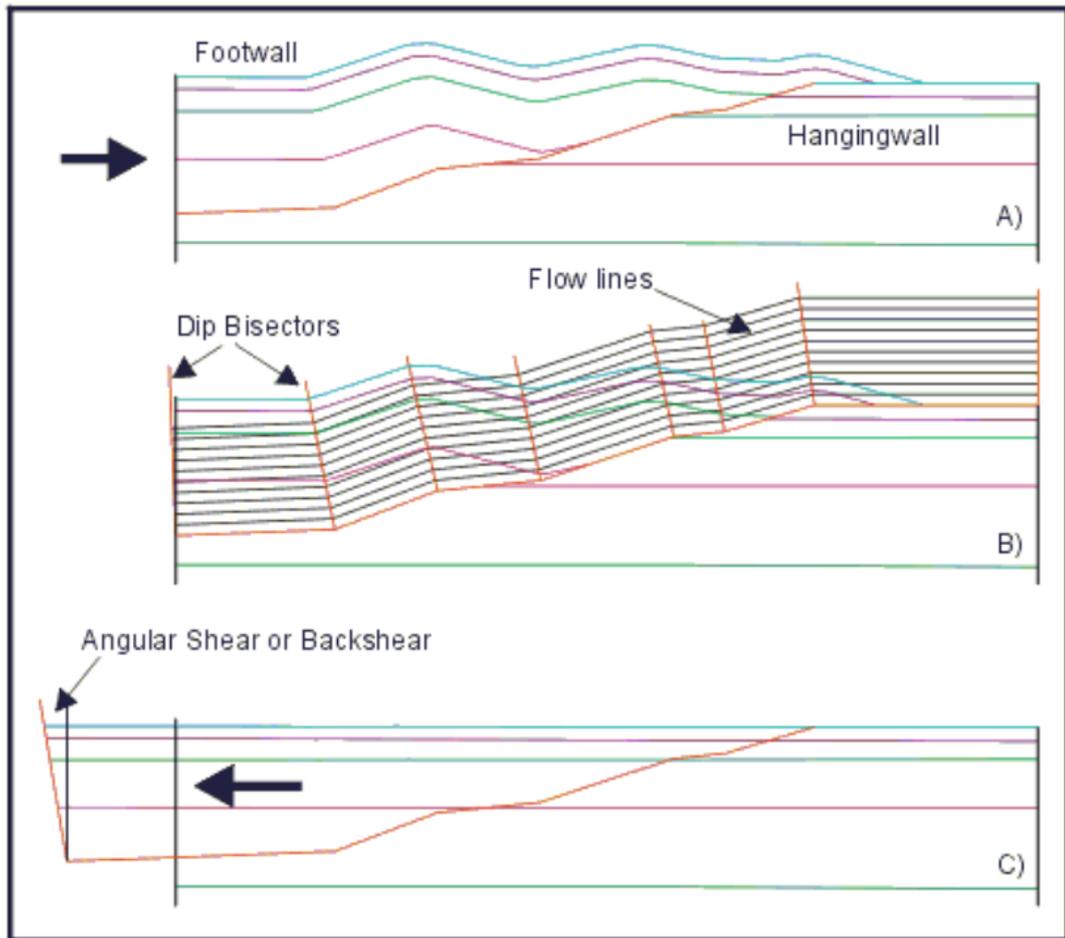


Abb. 3.3 Retro-Deformation bei Anwendung des „fault parallel flow“ Moduls

3.4.2 „trishear“

Das „trishear“ Modul wurde entwickelt um in Bezug auf „Blinde Störungen“ die Deformation zu simulieren („fault-propagation folds“; e.g. Erslev, 1991, Erslev and Rogers, 1993, Withjack, et al., 1990). Bei dieser Art der Deformation nukleiert eine Störung (z.B. Überschiebung) am basalen Abscherhorizont und pflanzt sich sukzessive (propagiert) durch den darüber liegenden Schichtstapel fort. Sofern die Stärke der Deformation ausreicht, durchbricht die Störung den Schichtstapel, andern falls bleibt sie stecken und wird, da oberflächlich nicht sichtbar, als „blind“ bezeichnet. Die resultierende Deformation ist eine Kombination von diffuser Scherung, und damit Faltung innerhalb einer Dreiecksfläche (bezogen auf 2D; zwischen roten Pfeilen in Abb. 3.4) an der Störungsfront, und diskreter Deformation entlang der neu entstandenen Störungsfläche (Abb. 3.4).

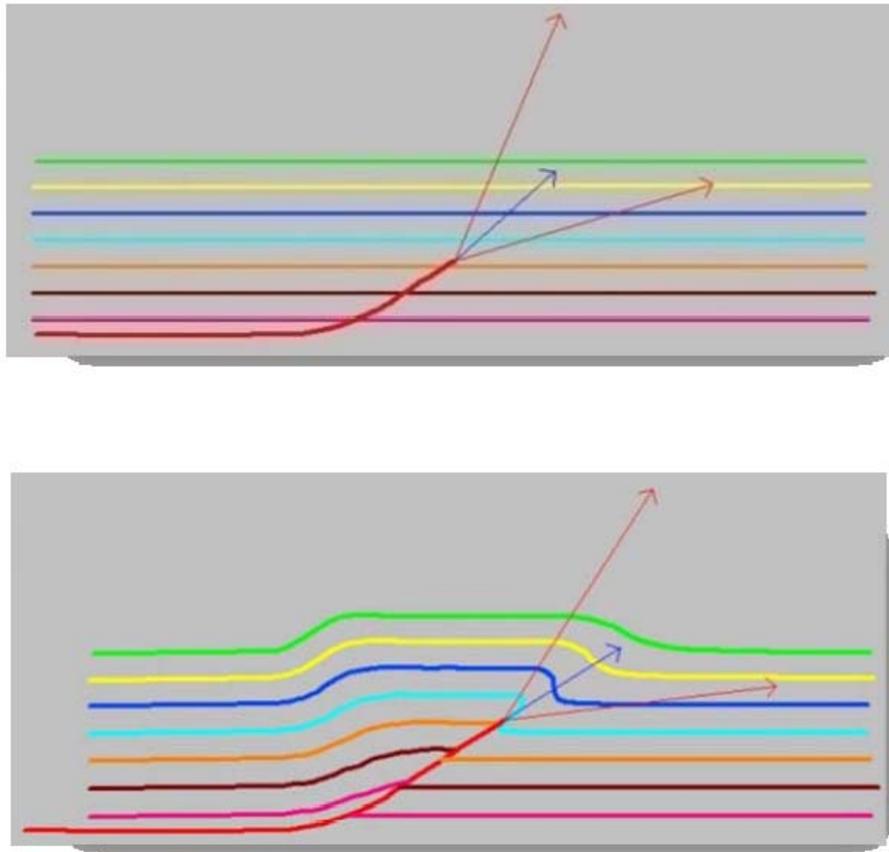


Abb. 3.4 Deformation bei Anwendung des trishear Moduls

3.4.3 „flexural slip unfold“

Das „flexural slip unfold“ Modul (Griffiths et al, 2002) erlaubt die Anpassung eines geologischen Horizontes (A) auf einen ebenen Referenzniveau oder auf einen Referenzhorizont. Hierbei können weitere parallel liegende Horizonte (B, C, D, ...) mitbewegt werden ohne dass es zu einer Änderung der Horizontlängen kommt. Auch der Flächeninhalt innerhalb eines bewegten Segmentes wird konstant gehalten, allerdings können sich die Schichtlängen nicht paralleler Horizonte verändern (Abb. 3.5). Im Unterschied zu „fault-parallel-flow“ und „trishear“ arbeitet das „flexural slip unfold“ Modul unabhängig von einer Störung. Das ermöglicht innerhalb eines extrem komplex deformierten Bereiches mit grossen Unsicherheiten (kinematisches Verhalten unbekannt) eine Retro-Deformation. Der Referenzhorizont muss gut bekannt sein und eine Anpassung auf diesen Horizont sollte höchst plausiblen Kriterien unterliegen. In anderen Worten, die Voraussetzung für die Anwendung dieses Moduls ist, dass der Endzustand dieses Retro-Deformationsschrittes gut bekannt ist. Hingegen ist der natürliche Weg dorthin (das geologisch-kinematische Szenario) im Detail unbekannt.

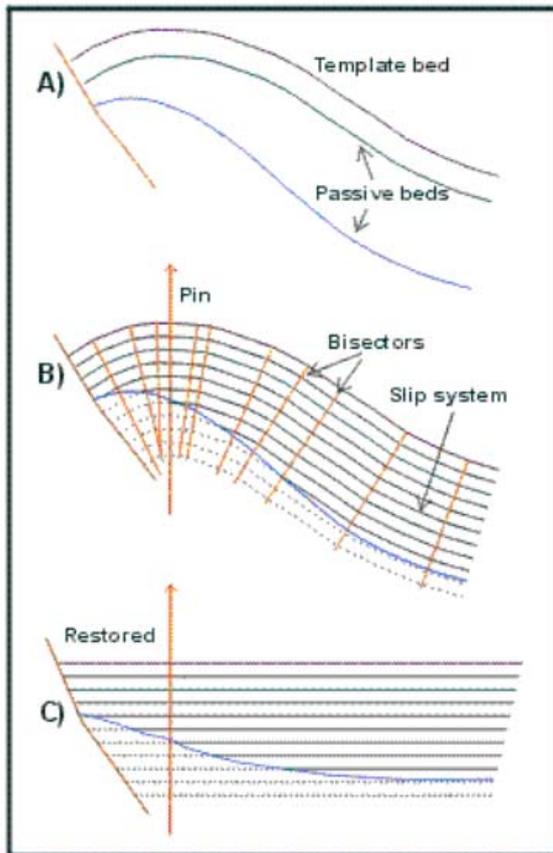


Abb. 3.5 Retro-Deformation bei Anwendung des flexural slip unfold Moduls

3.5 Ausgangsprofil und Festlegung der Abfolge der Retro-Deformationsschritte

In einer ersten Phase wurde das bestehende Prognoseprofil (STB 2007), welches zum Projektstart (Frühjahr 2009) das qualitativ hochwertigste Profil am Belchen darstellt, nach Osten in die Tunnelachse der West Röhre projiziert, mit den Tunnelaufnahmen abgeglichen und zur Tiefe hin erweitert. Mittels konventionellen Konstruktionsmethoden wurde so ein Ausgangsprofil erstellt, welches bis zum basalen Abscherhorizont hinunter reicht. Dieser liegt im Norden etwa bei -100müM (unterhalb Bez. 25, Abb. 3.6) und sinkt nach Süden auf etwa -800müM (unterhalb Bez. 1, Abb. 3.6) ab. Aufgrund der westlicheren Lage des Prognoseprofils ergaben sich im Tunnelbereich einige Abweichungen in der Lage von Störungen oder Schichtgrenzen. Im Allgemeinen kam es gegenüber dem Prognoseprofil zu einer Verschiebung nach Süden von wenigen Metern bis maximal 11m. Dies ist auch aus dem geologischen Horizontalschnitt durch die Tunnelröhren (STB 2007) ersichtlich.

Nach dem ein vorläufiges komplettes Profil konstruiert ist, muss die Reihenfolge der Retro-Deformationsschritte festgelegt werden. Sie entspricht im Allgemeinen (aber nicht zwingend) der umgekehrten Reihenfolge der Deformationsvorgänge während der Jurafaltung, d.h. das Segment, welches während der Jurafaltung zuletzt deformiert wurde, sollte als erstes retro-deformiert werden. Generell ist es möglich, dass Bewegungen an verschiedenen Störungen gleichzeitig stattfanden und es zu einer mehrfach Aktivierung entlang einer Störung (Reaktivierung) oder einem „Springen“ der Aktivität kam. Letzteres bedeutet zum Beispiel, dass nach dem sich die Deformation nach Norden fortgepflanzt hatte, es zu einer neuerlichen Aktivität im Süden kam (z.B. Laubscher 1986). Oft kann eine sorgfältige Profilkonstruktion solche relativen Altersbeziehungen widerspiegeln.

Die in Abb. 3.6 dargestellte Nummerierung ist nicht als durchgängige Interpretation der realen Deformationsreihenfolge zu betrachten. Es sind mehrere „Sprünge“ möglich, wel-

che sich im Bilanzierungsprozess nicht gegenseitig beeinflussen. Darüber hinaus hat das Ausgangsprofil noch einen sehr vorläufigen Charakter. Viele Profildetails (z.B. Chambersberg) klärten sich erst während des Bilanzierungsprozesses.

Zwingend zu berücksichtigen waren relative Altersbeziehungen der realen Störungsaktivität im Bereich zwischen TM ~400 und TM 1000 (TM=Tunnelmeter bezogen auf die Weströhre Belchen). Hier kam es zwischen den Retro-Deformationsschritten 9 und 15 zu einem wiederholten Springen der Störungsaktivität.

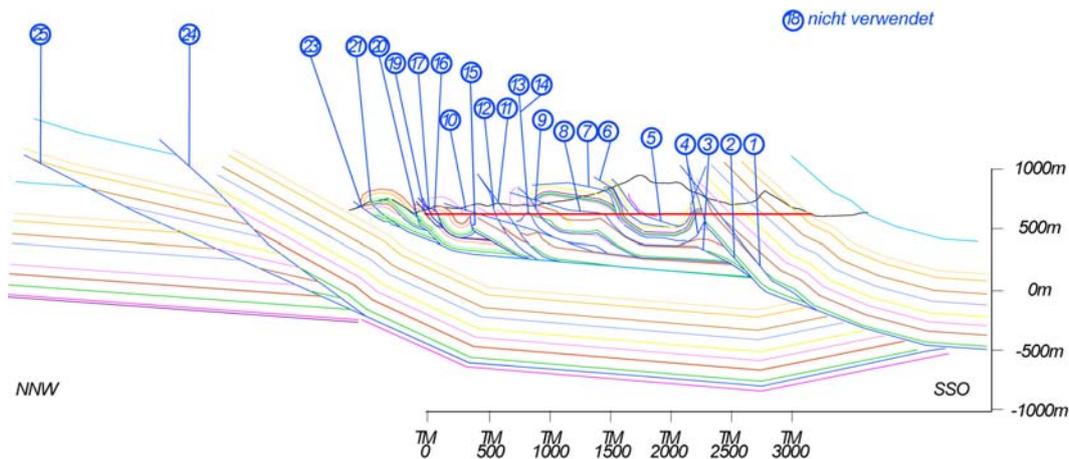


Abb. 3.6 Ausgangsprofil Reihenfolge der Retro-Deformation: Die Nummerierung zeigt an in welcher Reihenfolge die Aktivität an den Störungen rückgängig gemacht wurde. Es ist zu bemerken, dass die reale Deformationsreihenfolge durch die Nummerierung nicht zwingend wiedergegeben wird. Für Legende siehe Abb. 3.1.

3.6 Ergebnisse

3.6.1 Bilanziertes Profil

Die bilanzierte geologische Profilkonstruktion des Belchenprofils ist in Abb. 3.7 dargestellt. Aus der Profilkonstruktion ergibt sich eine Gesamtverkürzung von 9504m, welche durch die Jurafaltung im Bereich des Belchentunnels aufgenommen wurde (Abb. 3.8). Abb. 3.8 zeigt das endgültige bilanzierte Profil, das entzerrte Profil exklusive der erodierten Bereiche und das entzerrte Profil incl. der erodierten Bereiche. Die Auffüllung der erodierten Bereiche im entzerrten Profil beruht auf der Annahme dass die Schichtmächtigkeiten über die gesamte Profillänge konstant waren. Es diene somit als Ausgangsprofil für die abschliessende Vorwärtsmodellierung.

In Abb. 3.9 sind alle Arbeitsschritte der abschliessenden Vorwärtsmodellierung mit den verwendeten Modulen aufgeführt. Sämtliche Versatzbeträge ergeben sich aus einer von Süden nach Norden gerichteten Deformation. D.h. die geologischen Einheiten oberhalb einer Störung wurden immer nach Norden bewegt. Abb. 3.10 zeigt die abschliessende Nummerierung der Störungen an denen ein Arbeitsschritt stattfand.

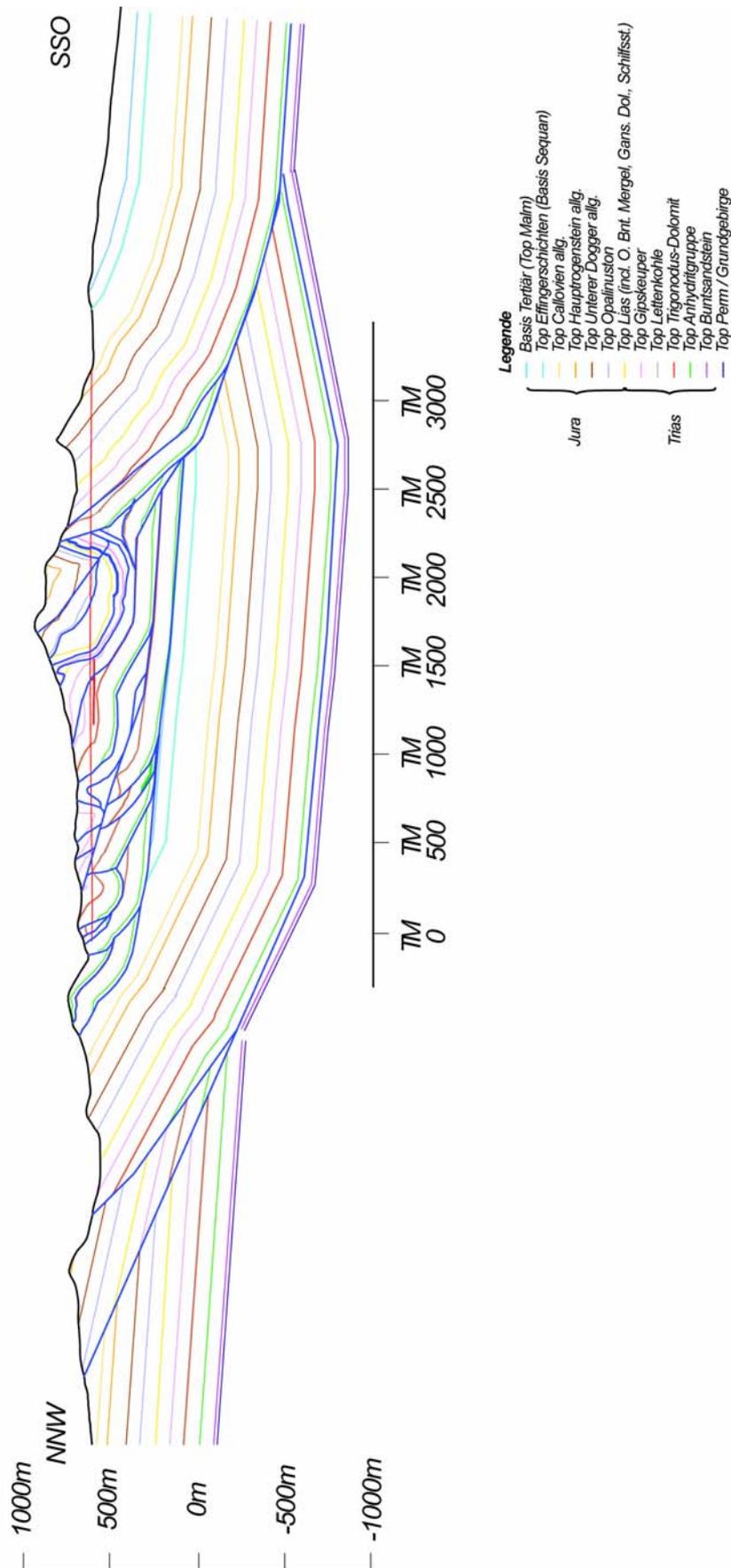


Abb. 3.7 Finalisierte geologische Profilkonstruktion, Belchentunnel und Drainagegallen=rot, TM=Tunnelmeter bezogen auf die Weströhre des Belchentunnels.

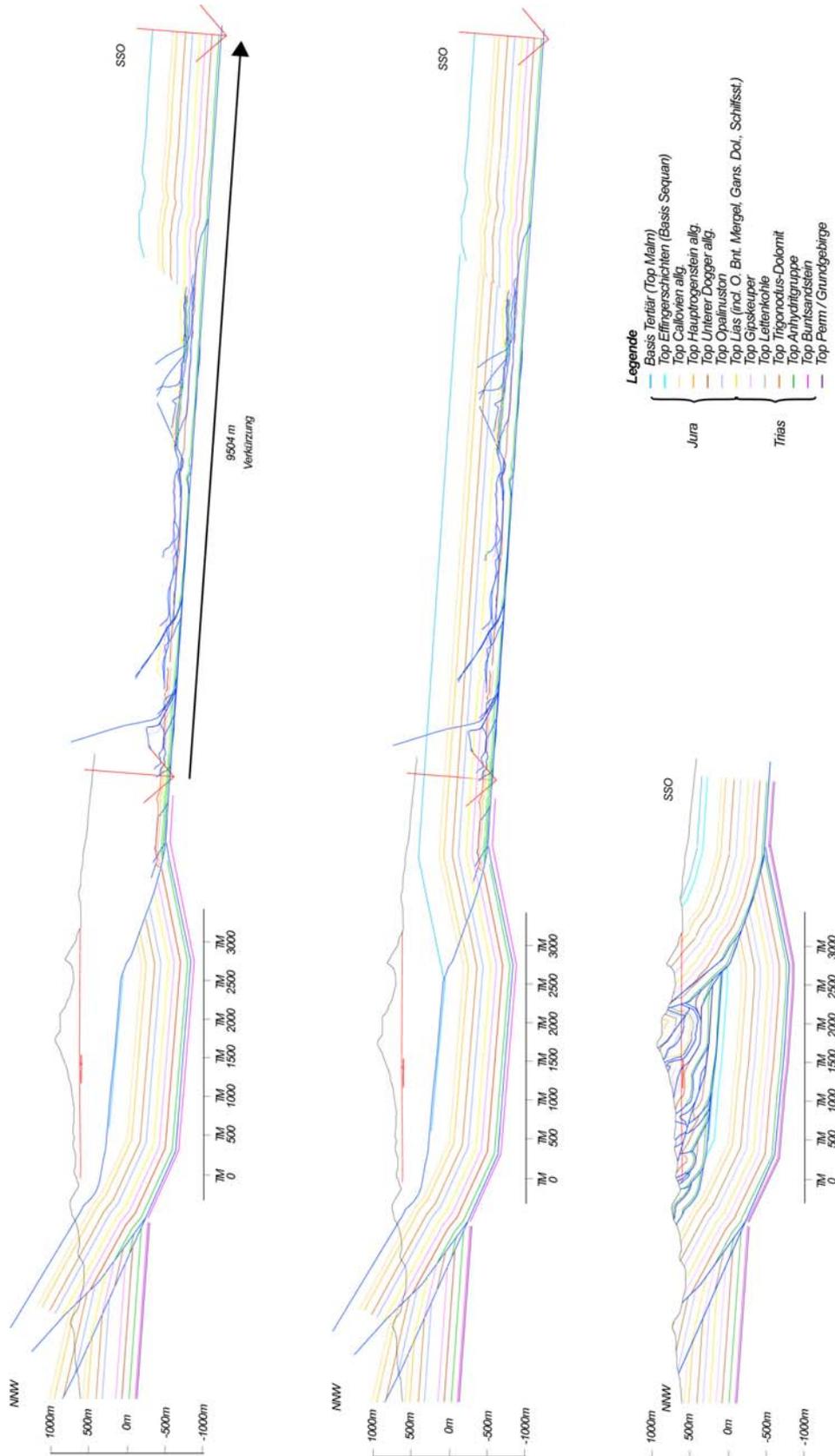


Abb. 3.8 Geologische Profile: Profil nach der Retro-Deformation (entzerrt), Profil nach der Retro-Deformation (entzerrt) mit aufgefüllten heute erodierten Bereichen und das finalisierte bilanzierte Profil nach der abschliessenden Vorwärtsmodellierung.

Abb. 3.9 Arbeitsschritte der abschliessenden Vorwärtsmodellierung; Module: FPF = fault parallel flow, FSU = flexural slip unfold, TRI = trishear. Der Versatz bezeichnet die Versatzweite entlang der entsprechenden Störung

Schritt	Modul	Versatz	Bemerkung
1	FPF	400m	
2	FPF	530m	
3	FPF	180m	
4	FSU	0	Referenzhorizont ist Top Lettenkohle im Bereich bei TM2200 - TM2500
5	TRI	25m	
6b	FPF	150m	neu eingeführt gegenüber dem Ausgangsprofil
6a	FPF	210m	
7	FPF	350m	
8	FPF	300m	
9	FPF	1830m	
10	FPF	110m	
11	FPF	110m	
12	FPF	85m	
13	FSU	0	Referenzhorizont ist Top Lettenkohle aus dem Ausgangsprofil im Bereich bei TM800 - TM1000
14	FPF	800m	südlich von 14süd ist die Störung während Deformationsschritt 8 abgeschnitten und erodiert worden
15	FPF	10m	
16	FPF	46m	
17	FPF	25m	
18			Nicht verwendet
19	FPF	720m	
20	FPF	68m	
21	FPF	720m	
22			entfallen, da dieser Bereich gegenüber dem Ausgangsprofil neu konstruiert wurde
23	FPF	4700m	

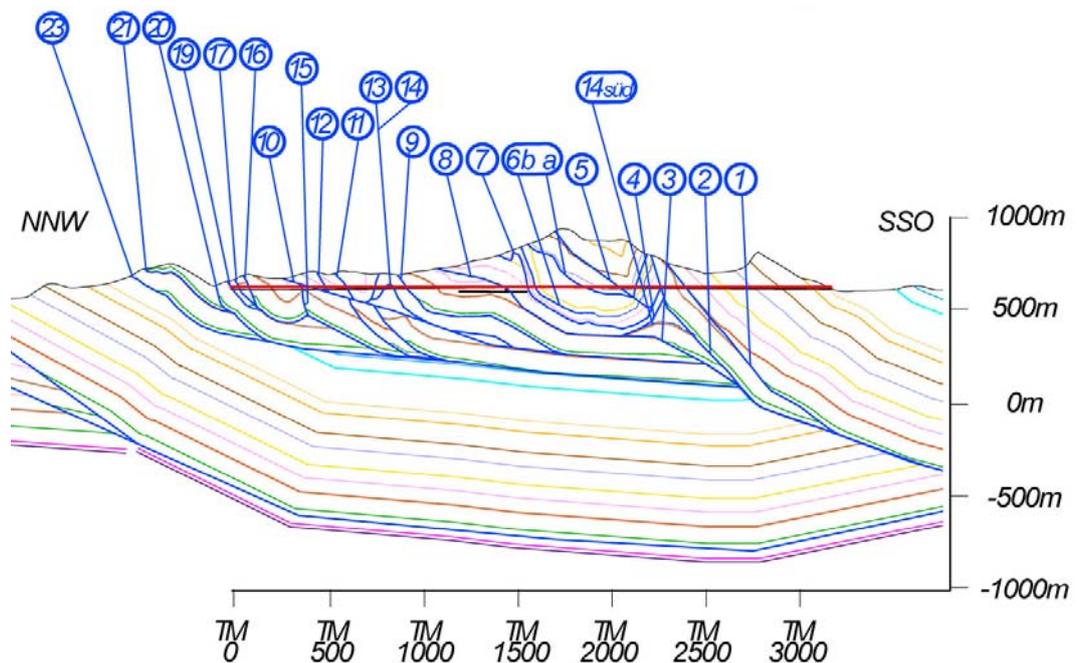


Abb. 3.10 Nummerierung der Störungen und damit die Arbeitsschritte des Bilanzierungsprozesses. Für Legende siehe Abb. 4.1.

3.6.2 Diskussion des bilanzierten Profils

Die festgestellte Gesamtverkürzung von ca. 9.5km über die bilanzierte Profillänge, passt sehr gut zu den Resultaten früherer Arbeiten, deren Verkürzungsbeträge zwischen 6km (Noack 1989) östlich des Belchentunnels und bis zu 12km (Bitterli 1992) westlich des Belchentunnels variieren. Grundsätzlich teilt sich das geologische Profil in 2 Stockwerke, welche basal jeweils durch eine mehr oder weniger flach liegende Überschiebung begrenzt werden. Das untere Stockwerk ist durch einfache Strukturen geprägt, welche eine Deformation im nördlichsten Bereich des Profils zur Folge hatte (Störungen 24 und 25 in Abb. 3.6). Die Störung 25 wird auch als der basale Abscherhorizont der Jurafaltung angesehen. Nach einer Deformationsphase entlang dieses Abscherhorizontes scheint dieses untere Stockwerk abgesackt zu sein, was mit einer Aktivität im Grundgebirge in Zusammenhang gebracht wird. Danach kam es zur Deformation im oberen Stockwerk, oberhalb der Störung 23 (Abb. 3.10), welche den oberen Überschiebungshorizont darstellt. Dieser Bereich, in dem es zur intensiven Stapelung und Faltung der Gesteinseinheiten kam, wird von den Tunnelröhren durchschlagen.

Das Profil zeigt im Tunnelbereich grösstenteils deckungsgleiche Strukturen verglichen mit dem Prognoseprofil (STB 2007). Abweichungen liegen insbesondere im mittleren Profildbereich. Zwischen Tunnelkilometer 300 und 800 (TM; bezogen auf die Weströhre) wurde eine flache Überschiebung eingeführt, welche die Ausdünnung des Gipskeupers etwa bei TM370 erklärt. Ein „ausquetschen“ des sich oft plastisch verhaltenden Gipskeupers ist auch denkbar.

Oberhalb des Tunnels im Bereich des Drainagestollens zwischen TM1100 und TM1450 reicht die normale Mächtigkeit der Gipskeuperformation, auch bei einer verwerfungsbedingten Verdoppelung, nicht aus, um den ganzen Raum zwischen Drainagestollen und Erdoberfläche zu füllen. Um dieses Problem zu lösen, wurden zusätzliche Hangendeinheiten des Gipskeupers eingefügt. Demzufolge kommt es bei TM1300 zu einer räumlich begrenzten „Linse“ bestehend aus Schilfsandstein bis Lias etwa 30 m oberhalb des Strassentunnels.

Wie eingangs erwähnt wird das Gebiet von zahlreichen Querbrüchen durchsetzt, welche in 2D nicht berücksichtigt werden können. Solche Strukturen oder auch abtauchende oder aufsteigende Faltenstrukturen können in 3D-Modellen besser erfasst und retro-

deformiert werden. Eine 3D-Bilanzierung sollte eventuelle Problembereiche besser ausscheiden und die Kinematik besser erfassen können.

Es hat sich in der folgenden 2D Grundwassermodellierung gezeigt, dass das Grundwasserfließfeld bis in tiefere Bereiche unter dem Tunnel vom Bauwerk beeinflusst wird, und daher die durch Bilanzierung gewonnenen geologischen Kenntnisse sinnvoll erscheinen.

4 2D Grundwassermodell

Das balancierte geologische Modell diente als Grundlage für 2D geohydraulische Modelle. Dabei wird als erstes das geologische ins hydrogeologische Modell übertragen (Verteilung der geohydraulischen Eigenschaften; Abb. 4.1, bzw. Abb. 4.2; siehe auch Schlussbericht FGU 2008/5). Das 2D Modell der Grundwasserströmung wird jeweils mit den hydraulischen Randbedingungen des bestehenden Zustands sowie des Ausgangszustands vor dem Tunnelbau aufgebaut und beinhaltet knapp 15'000 Finite Elemente. Der Tunnel wird als 1D Element mit einer hydraulischen Leitfähigkeit von 10^{-1} m/s angenommen. Als obere Randbedingung wurde das hydraulische Festpotential der Topographie der Oberfläche gleichgesetzt. Über den seitlichen Rändern und dem unteren Rand wurde kein Austausch angenommen.

Die Ergebnisse der stationären Simulation mit FEFLOW (Diersch, 2005) zeigen die Änderung der Grundwasserfließverhältnisse, bzw. des hydraulischen Potentials durch den Bau des Tunnels sehr deutlich (Abb. 4.2). Während im Modell ohne Tunnel ein vertikaler Austausch möglich ist, tritt im Modell mit Tunnel eine verstärkte horizontale Schichtung ein. Dass aber der Tunnel, bedingt durch die 2D Profillage den oberen Teil des Gebirges in dieser Masse hydraulisch „abtrennt“, ist als nicht realistisch anzusehen. Viel eher anzunehmen ist, dass ab einer gewissen seitlichen Distanz von der Tunnelachse durch Umströmung der hydraulische Drainageeffekt des Tunnels nicht in der Masse zum Tragen kommt. Diese anzunehmende seitliche Umströmung ist aber durch die sich lateral ändernde Geologie in der tektonischen Transferzone des Belchens mit einem 2D Geologischen Modell in der Tunnelachse kaum darzustellen. Des Weiteren ist anzunehmen, dass die seitlichen Zu- und Abflüsse im Profil räumlich heterogen verteilt sind, und von der Lage der ebenfalls 3D unterirdischen Zustromgebiete abhängen. Im folgenden Messprogramm wurde mittels der Bestimmung der einzelnen Komponenten des hydrologischen Kreislaufs die Menge und die physikalisch-hydrochemische Signatur des unterirdisch zu- oder abströmenden Grundwassers näher zu bestimmen.

Abb. 4.1 Stratigraphische Zuordnung der hydraulischen Leitfähigkeit im 2D Grundwassermodell.

Stratigraphische Zuordnung	K-Wert [m/s]
Quartär	1.00E-05
Tertiär (Obere Meeresmolasse)	1.00E-10
Oxford-Mergel (Effinger Schichten)	1.00E-10
Oberer Dogger allgemein ("Callovien")	1.00E-08
Hauptrogenstein allgemein	2.00E-06
Unterer Dogger allgemein (Passwang Formation)	1.00E-08
Opalinuston	1.00E-12
Lias allgemein	1.00E-10
"Oberer Keuper" (Bunte Mergel, Gansinger Dolomit, Schilfsandstein)	1.00E-10
Gipskeuper, Lettenkohle	1.00E-10
Muschelkalk-Aquifer (Trigonodusdolomit, Hauptmuschelkalk)	2.00E-06
Muschelkalk-Aquitard (Anhydritgruppe)	1.00E-10

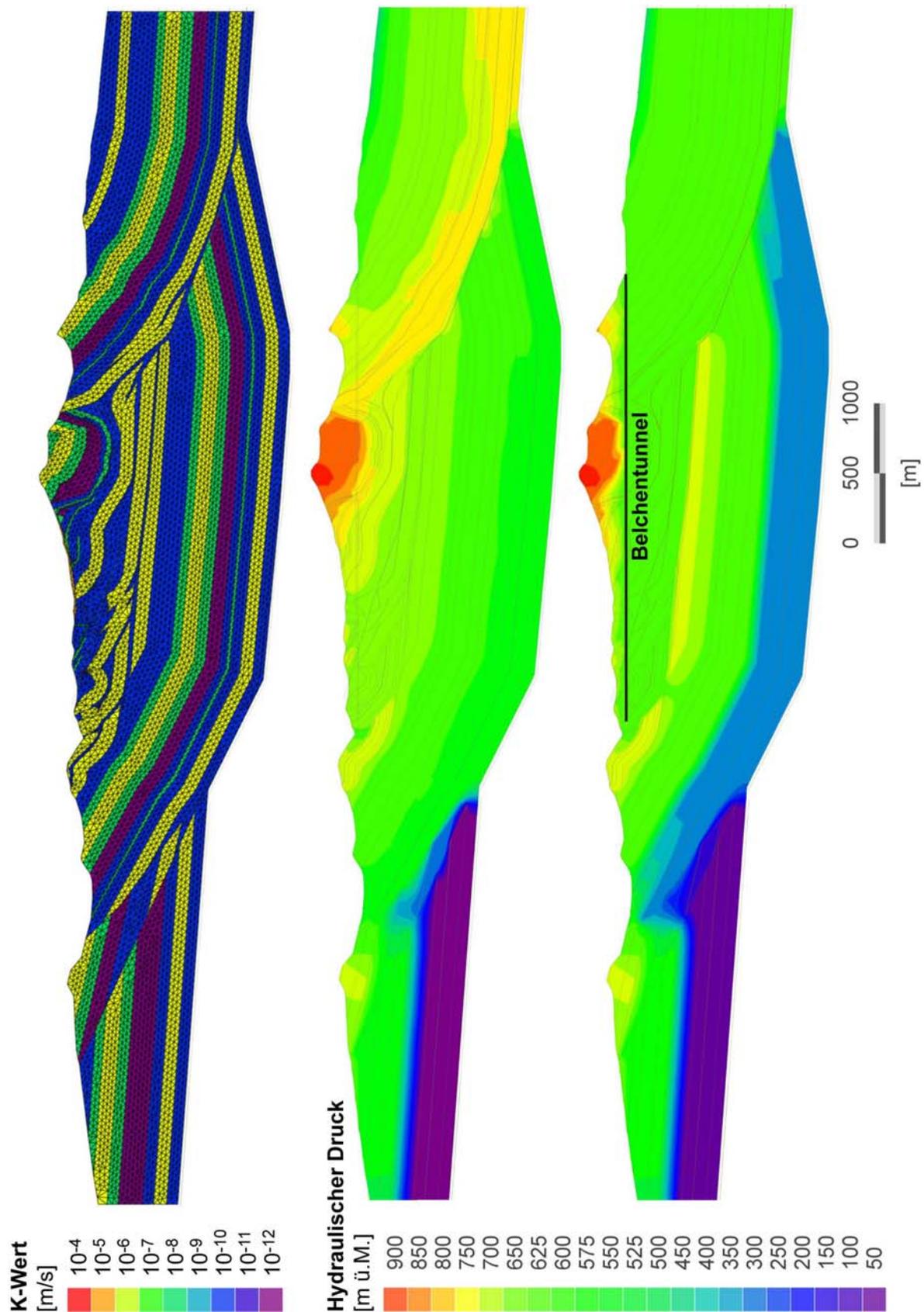


Abb. 4.2 Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeit im regionalen 2D Grundwassermodell des Belchens (K-Wert; in m/s, links), sowie mit regionalen 2D Grundwassermodell berechneter stationärer Grundwasserspiegel mit (rechts) und ohne (mitte) hydraulische Ausbruchszone des Belchentunnels in m ü.M.).

5 Messprogramme zur Hydrologie im nördlichen Belchen

5.1 Physikalische und hydrochemische Parameter des Quellwassers

Bei den gemessenen Zeitreihen der physikalischen und hydrochemischen Parameter in den Quellen wurde mittels der Variabilität, bzw. der Standardabweichung qualitativ bestimmt, wie gross die mittlere Aufenthaltszeit des Quellwassers ist. Es wird davon ausgegangen, dass je kleiner die Standardabweichung ist, desto grösser der Anteil von Wasser mit längerer Aufenthaltszeit im Untergrund. Da die hydraulischen Leitfähigkeiten und Porositäten im Untergrund sehr unterschiedlich, können aber auch Tiefenwässer aus Karstaquiferen wie aus dem Oberen Muschelkalk bei hohen Fließgeschwindigkeiten Schwankungen der Parameter verursachen. Diese Karstwässer wurden aufgrund ihrer hydrochemischen Zusammensetzung mit erhöhten Hydrogenkarbonat- und Sulfatkonzentrationen identifiziert.

5.1.1 Wassertemperatur

Anhand der Variabilität des Temperaturverlaufs von Juli 2010 bis Februar 2011 können die beprobten Quellen in drei Gruppen gegliedert werden (Abb. 5.1, Abb. 5.2): Die erste auffällige Gruppe beinhaltet Quellen mit einer Standardabweichung der Temperatur von $>2^{\circ}\text{C}$ während der gesamten Messzeit (85.1.E, 85.25.E, 85.27.Fund 85.32.F). Im Einzelfall können Quellen sogar von 14°C bis auf 1.5°C absinken (85.1.E). Eine zweite Gruppe weist Quellen mit einer maximalen Standardabweichung der Temperatur von 1.0°C bis 1.9°C auf (85.4.E, 85.9.E, 85.12.E und 85.19.E). Als dritte Gruppe sind die Quellen zu bezeichnen, die einen konstanten Temperaturverlauf aufweisen, deren Schwankungsbereich zwischen 0°C bis 0.9°C während der Messzeit liegt (85.3.E, 85.15.E, 85.16.H, 85.17.H, 85.23.H und 85.R.364).

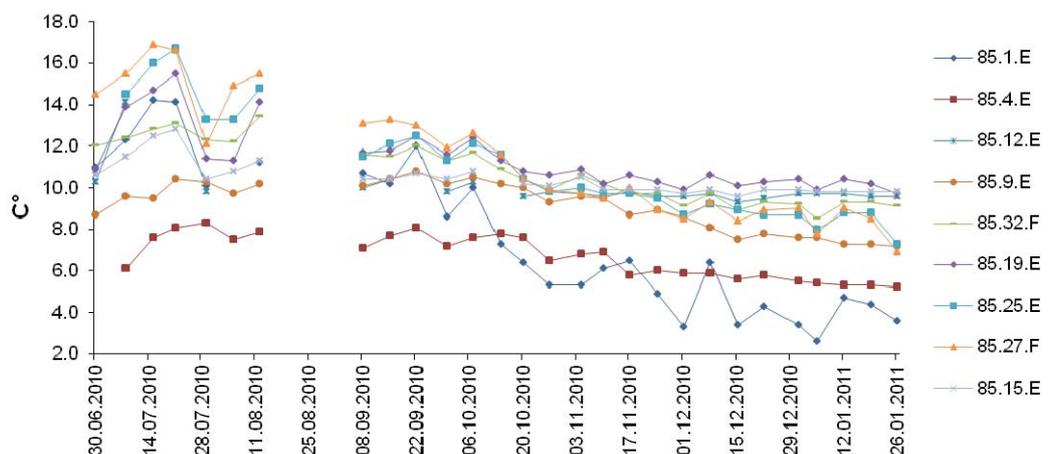


Abb. 5.1 Gemessene Temperaturen in $^{\circ}\text{C}$ in Quellen mit mittlerer und grosser zeitlicher Variabilität.

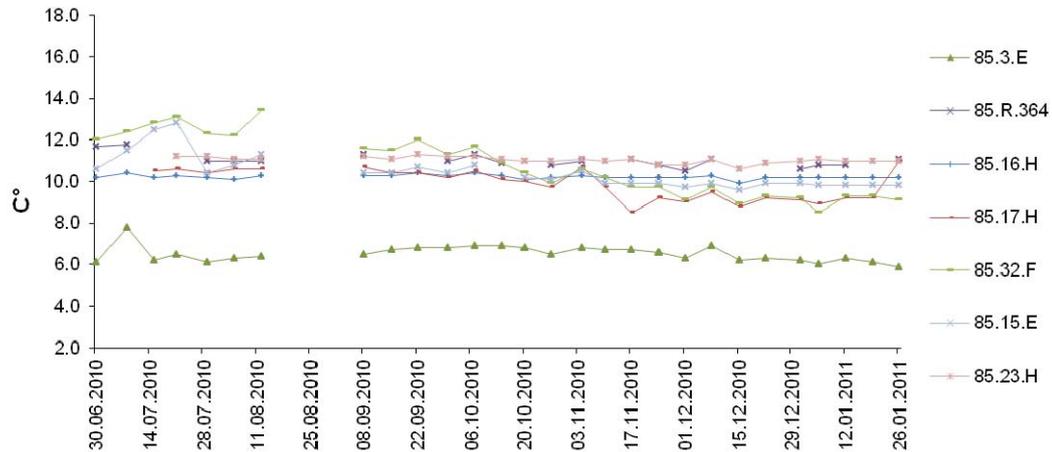


Abb. 5.2 Gemessene Temperaturen in °C in Quellen mit kleiner zeitlicher Variabilität.

5.1.2 Spezifische elektrische Leitfähigkeit

Aus den Resultaten lässt sich erkennen, dass die Quellen auch mittels ihrer spezifischen elektrischen Leitfähigkeit Lf in drei Gruppen eingeteilt werden können (Abb. 5.3). Die Einteilung erfolgt in eine erste Gruppe mit hoher ($>300 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), einer zweiten mit mittlerer ($400 \text{ bis } 900 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) und einer dritten mit niedriger ($0 \text{ bis } 399 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) Leitfähigkeit. Durch die im Labor durchgeführten Analysen wurde ersichtlich, dass die Leitfähigkeitswerte durch den Anteil an Sulfationen zustande kommen. Ein kleiner Sulfationenanteil resultiert in Leitfähigkeitswerte zwischen $300\text{-}600 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, wo hingegen ein hoher Anteil im Bereich $<2000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ resultiert.

Die Quellen 85.3.E, 85.4.E, 85.9.E und 85.12.E weisen eine geringe Lf auf. In die Kategorie der mittleren Lf gehören die Quellen 85.1.E, 85.15.E, 85.19.E, 85.27.F, 85.32.F und 85.R.364. Zur Gruppe der hohen Lf können die Quellen 85.1.E, 85.25.E und 85.27.E sowie der Leisibach gezählt werden.

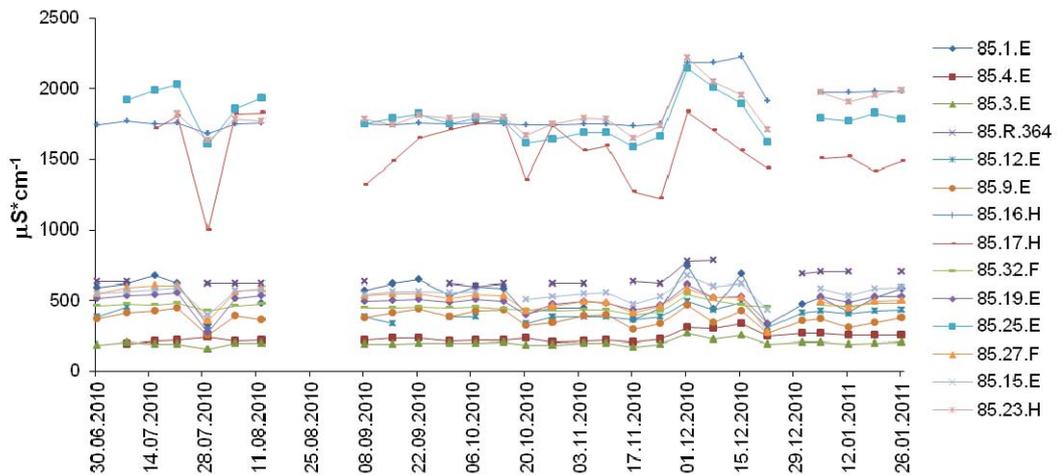


Abb. 5.3 Gemessene spezifische elektrische Leitfähigkeiten in $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ in Quellen.

5.1.3 Zusammensetzung der Anionen

Die beprobten Standorte können in karbonat- und sulfat- dominierte Wässer eingeteilt werden (Abb. 5.4) Als karbonat-, bzw. sulfatdominierte Quellen werden solche bezeichnet, die deutlich mehr als 50 % Karbonat-/Sulfatgehalt aufweisen. Von den 17 beprobten

Standorten werden die Quellen 85.16.H, 85.17.H, 85.23.H und 85.25.E sowie der Leisibach in die Gruppe der sulfatdominierten Wässer eingeteilt. Die restlichen Quellen und Standorte sind karbonatdominiert, mit Ausnahme der Quelle 85.1.E, welche etwa gleiche Anteile von Karbonat und Sulfat enthält.

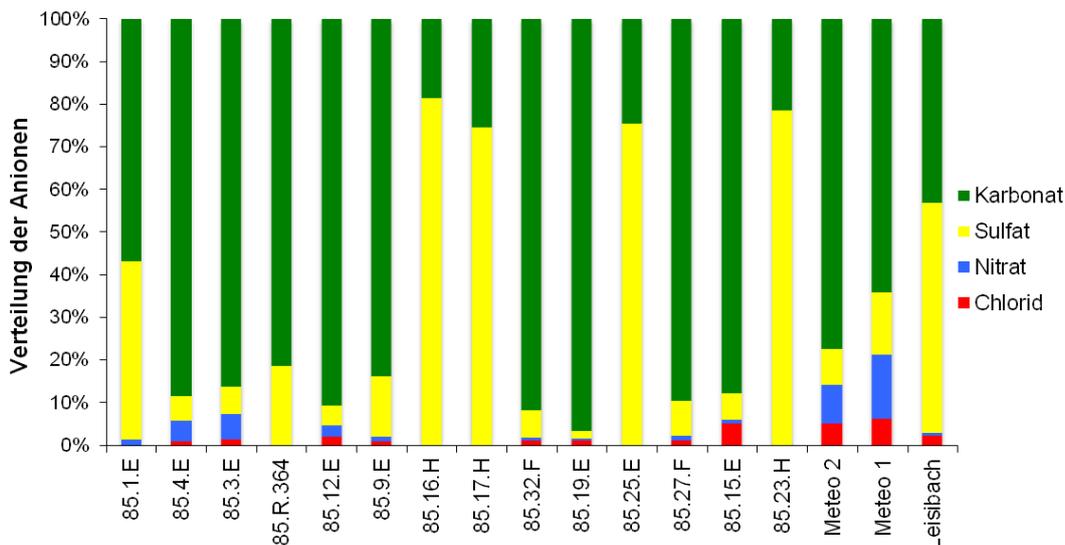


Abb. 5.4 Gemessene Verteilung der Anionen in Quellen.

In allen Quellen konnte Chlorid nachgewiesen werden, aber nur in den Quellen 85.12.E, 85.15.E und dem Leisibach heben sich die Anteile signifikant. Weiter sind in den Quellen 85.3.E, 85.4.E, 85.12.E erhöhte Nitratanteile zu erkennen. Als Ausnahme sticht Quelle 85.R.364 hervor, welche als einzige Quelle kein Nitrat im Wasser aufweist.

5.1.4 Stabile Isotopen Sauerstoff 18 und Deuterium

Die stabilen Isotope unterliegen im hydrologischen Kreislauf typischen Fraktionierungseffekten wie Temperatur-, Breiten-, Kontinental-, Höhen- und Mengeneffekten, welche zu charakteristischen Werten für einzelne hydrologische Einzugsgebiete führt.

Die lokale „Meteoric Water Line“ („local MWL“), welche die Abweichungen der $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^2\text{H}$ -Werte gegenüber einem Referenzwert abbildet, wurde aus den Daten der gemessenen Niederschlagsproben der Meteostationen Tal (Meteo 1) und Berg (Meteo 2) erstellt. Damit konnte festgestellt werden, dass die gemessenen Werte der Quell- und Tunnelwässer die typische Niederschlagssignatur des Einzugsgebiets des Leisibachs aufweisen (Abb. 5.5, Abb. 5.6; Lage der Tunnelproben in Abb. 2.2), und der Anteil von Grundwässern aus weiter entfernten Einzugsgebieten wie z. B. der Bereich des südlichen Belchens, bzw. Jurasüdfusses minimal ist.

Des Weiteren konnten die Wasserproben analog den Temperatur- und Leitfähigkeitswerten anhand der Variation der $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ Isotopenwerte in drei Gruppen eingeteilt werden. Die erste Gruppe wird aus Quellen gebildet, die eine Streuung der $\delta^{18}\text{O}$ Werte im Bereich von 0 bis 0,39 ‰ aufweist. In die zweite Gruppe fallen Quellen, deren Streuung der $\delta^{18}\text{O}$ Werte im Bereich von 0,4 bis 0,79 ‰ liegt. Die dritte Gruppe beinhaltet Quellen, die eine Streuung der $\delta^{18}\text{O}$ Werte im Bereich $\geq 0,8$ ‰ aufweist.

Gestützt auf diese Einteilung, sind die Quellen 85.12.E und 85.16.H in Gruppe 1, Quelle 85.17.H in Gruppe 2 und Quelle 85.9.E in Gruppe 3 einzuordnen.

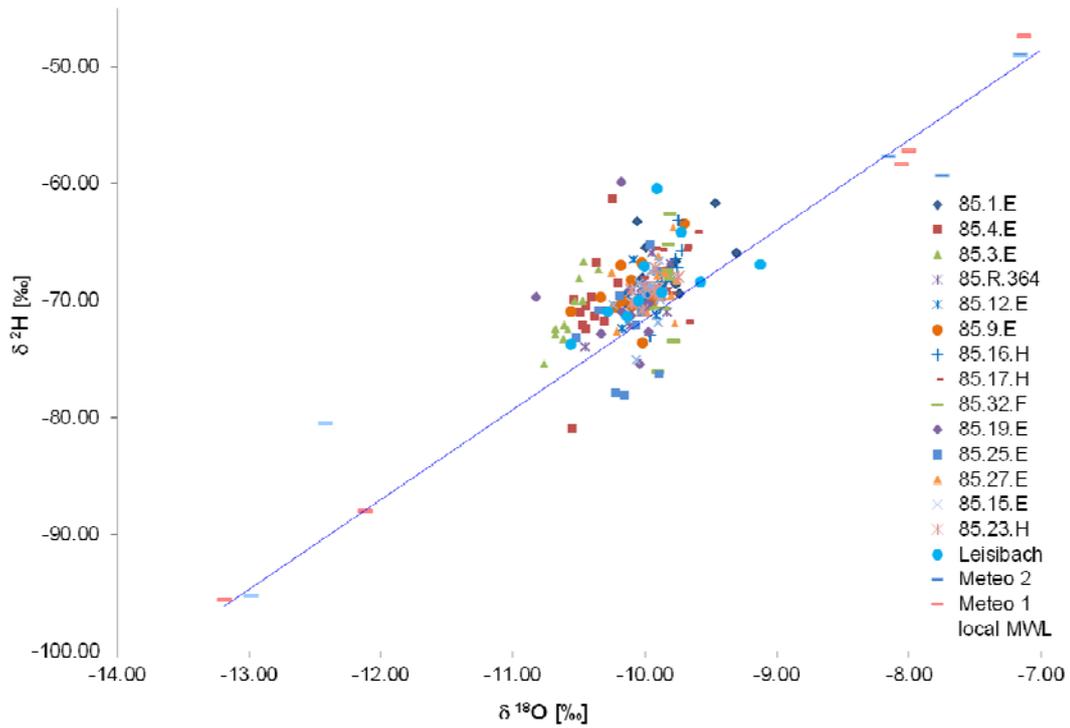


Abb. 5.5 Gemessene Anteile von $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ Isotopen in ‰ in Quellen, Niederschlag (Meteo 1 und 2) und Leisibach mit lokaler „Meteoric Water Line“ („local MWL“) als Trendlinie der Werte „Meteo 1“.

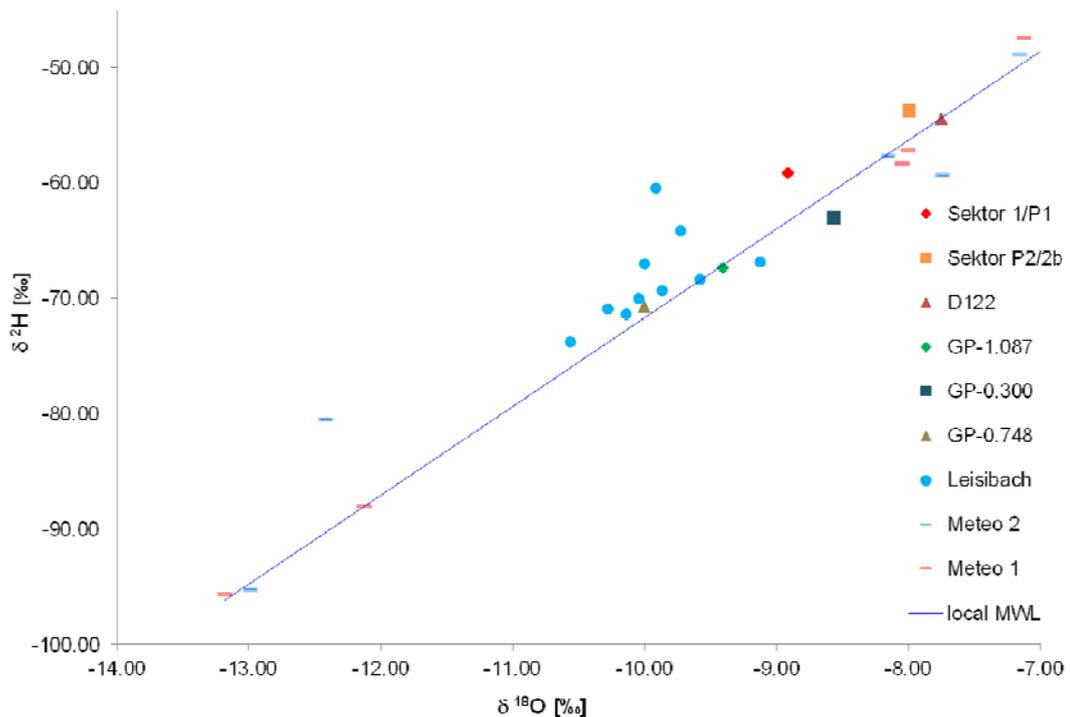


Abb. 5.6 Gemessene Anteile von $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ Isotopen in ‰ im Belchentunnel, Niederschlag (Meteo 1 und 2) und Leisibach mit lokaler „Meteoric Water Line“ („local MWL“) als Trendlinie der Werte „Meteo 1“.

5.2 Meteorologie und Mikrometeorologie

Ziele der vom Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung der Universität Basel (MCR) durchgeführten meteorologischen Messungen sind:

- Erfassung des Niederschlags im Leisibach-Tal oberhalb des Belchentunnels an zwei Standorten
- Abschätzung der Verdunstung basierend auf mikrometeorologischen Messungen.

5.2.1 Eingesetzte Methoden

Für die Anwendung mikrometeorologische Methoden ist eigentlich horizontale Homogenität des Umfelds der Messungen eine Voraussetzung, d.h. ebenes Gelände und homogene Landnutzung. In der Realität sind diese Verhältnisse zwar selten anzutreffen, trotzdem kann aber durch die Anwendung der Energiebilanzgleichung die Verdunstung bestimmt werden, vor allem wenn die verfügbare Energie und ein turbulenter Wärmestrom direkt gemessen wird.

Die Energiebilanzgleichung lautet in vereinfachter Form (alle Grössen in W m^{-2}):

$$Q_{*} = Q_E + Q_H + Q_B. \quad (1)$$

Dabei bedeutet Q_{*} die Strahlungsbilanz und Q_B der Bodenwärmestrom. Gemeinsam stellen sie die verfügbare Energie dar, die sich auf die beiden turbulenten Wärmeströme Q_H den fühlbaren Wärmestrom und Q_E den latenten Wärmestrom aufteilt. Aufgrund der Annahme horizontaler Homogenität werden hier nur die vertikalen Flüsse betrachtet und horizontale Transporte können vernachlässigt werden. Der latente Wärmestrom der Energiebilanz ist auch gleichzeitig die Verdunstung E der hydrologischen Wasserbilanz (1), wobei alle Grössen sind in mm angegeben werden.

Wird Q_E bestimmt kann mit

$$\frac{E}{\Lambda} = \Delta t \cdot Q_E$$

die Verdunstung in mm umgerechnet werden. Dabei ist Δt die Mittelungszeit und Λ die spezifische Verdampfungswärme von Wasser.

Im vorliegenden Projekt wird folgendermassen vorgegangen: die verfügbare Energie $Q_{*} - Q_B$ wird durch direkte Messungen bestimmt und zur Bestimmung von Q_E kommen zwei Methoden zum Einsatz. Einerseits wird die Bowen-Ratio-Energiebilanz-Methode (BREB) angewendet und andererseits wird Q_H mittels der Eddykovarianzmethode direkt gemessen und Q_E als Restglied bestimmt (siehe Anhang I.1).

5.2.2 Einrichtungen

Im Leisibach-Tal wurden zwei Energiebilanzstation installiert, eine Bergstation ($47^{\circ}22'5.05''\text{N}$, $7^{\circ}49'37.32''\text{E}$) und eine Talstation ($47^{\circ}22'22.63''\text{N}$, $7^{\circ}49'16.23''\text{E}$; Abb. 5.7). Die Instrumentierung ist so ausgerichtet, dass an beiden Stationen die BREB Methode angewendet werden kann, und dass an der Talstation der fühlbare Wärmestrom durch direkte Messung bestimmt werden kann. In Abb. 5.8 sind die instrumentellen Details beider Stationen aufgeführt. Start der Messungen war am 24.6.2010. Alle Messgrössen werden als 10-min Mittelwerte abgespeichert. Die Strahlungsbilanzgeber und die Temperatur- und Feuchte-sensoren wurden zu Beginn der Messungen am MCR kalibriert.



Abb. 5.7 Instrumente der Talstation Leisibach-Tal (Photo A. Roth, 2011).

Abb. 5.8 Instrumentierung an der Berg- und Talstation im Leisibach-Tal.

		Bergstation	Talstation
Messgröße	Typ, Hersteller	Messhöhen	
Strahlungsbilanz	NRLite, Kipp&Zonen	1.49 m	1.45 m
Temperatur, Rel. Feuchte	CS215, Campbell, strahlungsgeschützt	0.70 m	0.55 m
Temperatur, Rel. Feuchte	CS215, Campbell, natürlich ventiliert	1.95 m	1.76 m
Bodenwärmestrom	Rimco, Bodenwärmestromplatte	-0.05 m	-0.05 m
Bodentemperatur	CS107, Thermistor	-0.03 m	-0.03 m
Windgeschwindigkeit	Tal: WXT510, Vaisala Wettermesswertgeber		2.00 m
	Berg: Young, Propeller-Fahne	2.50 m	
Windrichtung	Tal: WXT510, Vaisala		2.00 m
	Berg: Young, Propeller-Fahne	2.50 m	
Niederschlag	Regenwippe, Ketterer	1.42 m	1.47 m
	Totalisator	1.42 m	1.47 m
	Tal: WXT510, Vaisala		2.00 m
Globalstrahlung	CM11, Kipp&Zonen	1.60 m	
Reflexstrahlung	CM11, Kipp&Zonen	1.45 m	
Windvektor, fühlbarer Wärmestrom	81000V Young		2.00 m
	Ultraschall-Anemometer-Thermometer		
Datenerfassung	Berg: CR850, Campbell		
	Tal: CR1000, Campbell		

5.2.3 Ergebnisse

Die anfallenden Daten werden regelmässig am MCR kontrolliert. Das erfolgt in der Hauptsache durch eine graphische Kontrolle der Verläufe der einzelnen Messgrössen, wie als Beispiel in der Abb. A1 und A2 dargestellt. Die Verdunstung wird auf Basis von 30min Mittelwerten berechnet und setzt sich aus den Werten beider oben genannten Methoden zusammen.

In der Abb. 5.9 sind die Verläufe des Niederschlags und der Verdunstung dargestellt für den Zeitraum bis Ende September. An der Talstation wird der Niederschlag mit zwei Messverfahren bestimmt, einmal mit einer Niederschlagswippe (N_Wippe Tal) und einmal mit einem Impulszähler (N_WXT Tal), an der Bergstation nur mit einer Wippe (N_Wippe Berg). Zur Kontrolle wurden auch die Mittelwerte aus den Sammelflaschen der beiden Stationen aufgetragen (N_Flaschen). Das Verdunstungsäquivalent der Strahlungsbilanz ist als potentielle Verdunstung zusätzlich zur berechneten Verdunstung dargestellt.

Die Energiebilanzgrössen und die Niederschlagswerte werden als Halbstundenwerte in Tabellenform geliefert. Die Niederschlagsdaten zeigen in ihrem bisherigen Verlauf, dass in der Talstation zwischen den Methoden Niederschlagswippe und Impulszähler keine Unterschiede sichtbar sind. Zwischen dem Niederschlag im Tal und am Berg sind Unterschiede im Verlauf ab November 2010 feststellbar, welche auf einen Defekt an der Wippe Berg zurückzuführen sind (Abb. 21). Mit einer nachträglichen Korrektur der Summe um 130mm anfangs Dezember 2010 wurde der Verlust auf die Endsumme kompensiert. Für die Wasserbilanzierung im Einzugsgebiet wurde für die Niederschlagskomponente jeweils die maximale Tagesmenge aus den Messungen an der Talstation entnommen.

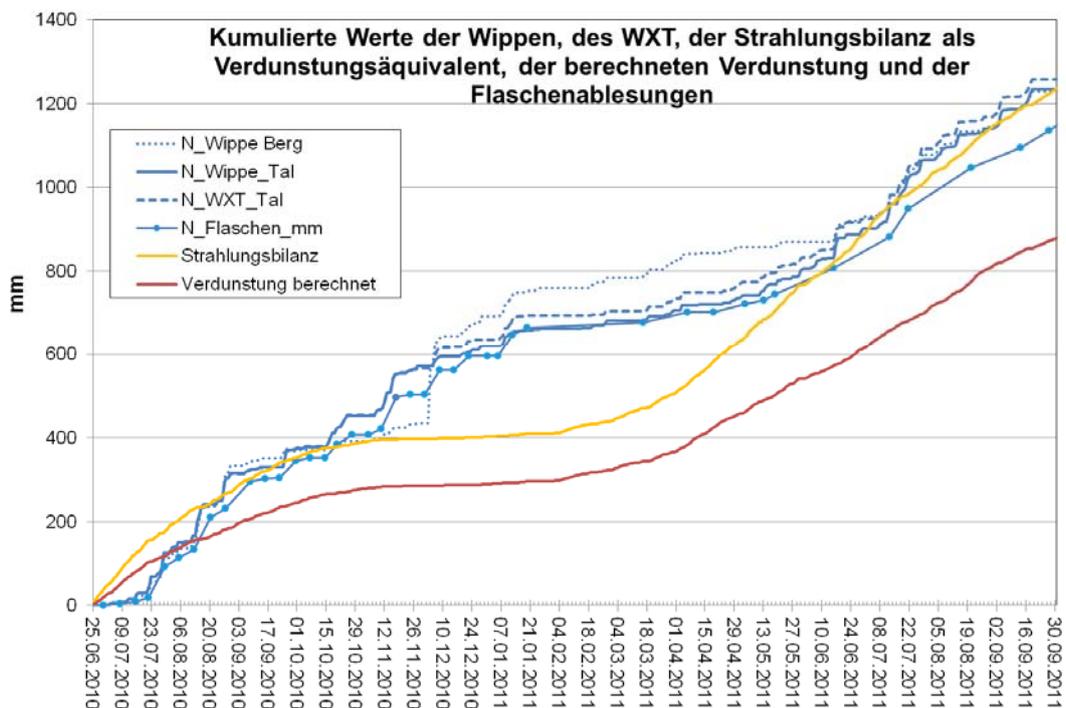


Abb. 5.9 Kumulierte Werte des Niederschlags (N_{Wippe_Tal} , N_{WXT_Tal} , N_{Wippe_Berg} korrigiert, $N_{Flaschen}$) und der potentiellen Verdunstung (Verdunstungsäquivalent der Strahlungsbilanz) und der berechneten Verdunstung in mm.

5.3 Niederschlag und Verdunstung

Die ähnlichen Niederschlagsmengen zwischen der Tal- und Bergstation erlaubt die Annahme, dass der gemessene Niederschlag N stellvertretend für das gesamte Einzugsgebiet des Leisibachs gilt. Die Werte werden jeweils für das hydrologische Jahr 2010/11 (1.10.2010-30.9.2011) aufgetragen (Abb. 5.12, Abb. 5.15). Mit knapp 1000 mm Nieder-

schlag liegt das Jahr 2010/11 verglichen mit den 20 vorangegangenen Jahren wahrscheinlich am untersten Bereich. Vor allem von Mitte Januar 2011 bis Mai 2011 wurde wenig Niederschlag registriert. Für den langjährigen Vergleich wurden die benachbarten Messwerte der Stationen Eptingen, Langenbruck und Rünenberg verwendet (Abb. 5.11). Alle 3 Stationen zeigen für 2010/11 deutlich zu tiefe Jahressummen an. Es ist daher anzunehmen, dass für das beobachtete Einzugsgebiet des Leisibaches analog zu den benachbarten Stationen im langjährigen Mittel mit etwa 1200 mm gut 200 mm mehr Niederschlag anfallen.

Abb. 5.10 Vergleichsstationen der MeteoSchweiz

Abkürzung	Name	Länge/Breite	Koordinaten [km]	Höhe ü. M. [m]
EPT	Eptingen	7°49'/47°23'	628720/248410	565
LAB	Langenbruck	7°46'/47°21'	624495/244345	736
RUE	Rünenberg	7°53'/47°26'	633246/253845	611

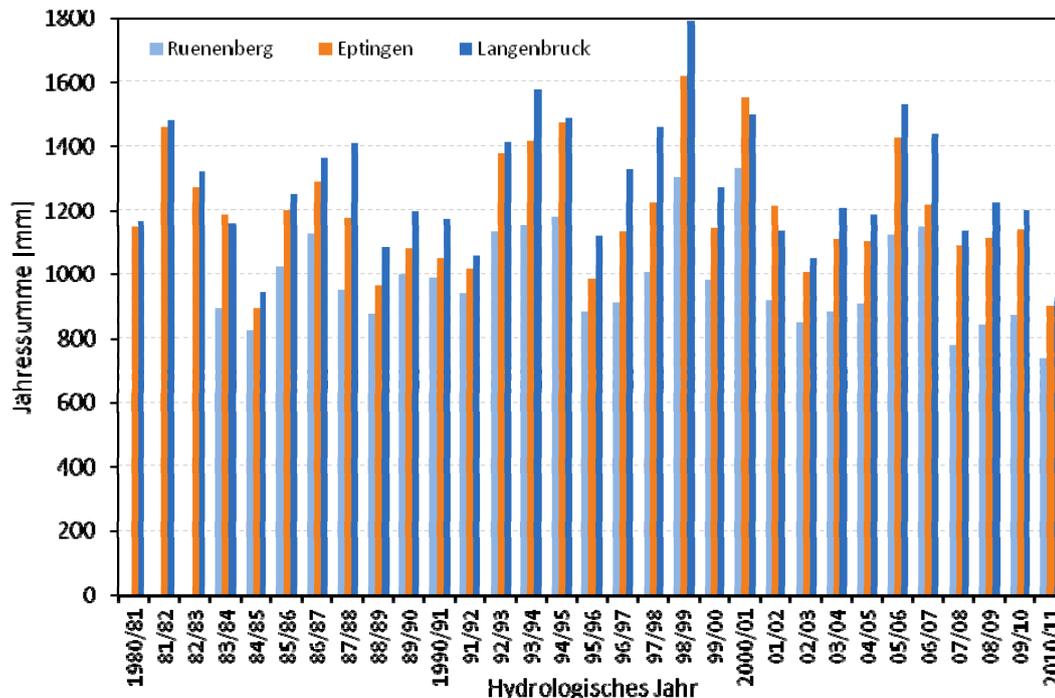


Abb. 5.11 Jahressummen des Niederschlags an drei Standorten in der Nähe des Leisibachtals für den Zeitraum 1981 bis 2011: Rünenberg (611m), Eptingen (564m) und Langenbruck (736m). Datenquelle: MeteoSchweiz.

Für die potentielle wie berechnete Verdunstung E wird auch aufgrund ihrer Exposition im Talgrund angenommen, dass diese einer mittleren Verdunstung für das Einzugsgebiet nahekommen. Die effektive mittlere Verdunstung liegt vermutlich näher an der berechneten Verdunstung und beträgt demnach etwa 2/3 des Niederschlags über das aufgezeichnete Jahr 2010/11 (Abb. 5.15). Wie zu erwarten, fällt ein grosser Anteil der Verdunstung im Sommerhalbjahr an (Abb. 5.9, Abb. 5.12, Abb. 5.15).

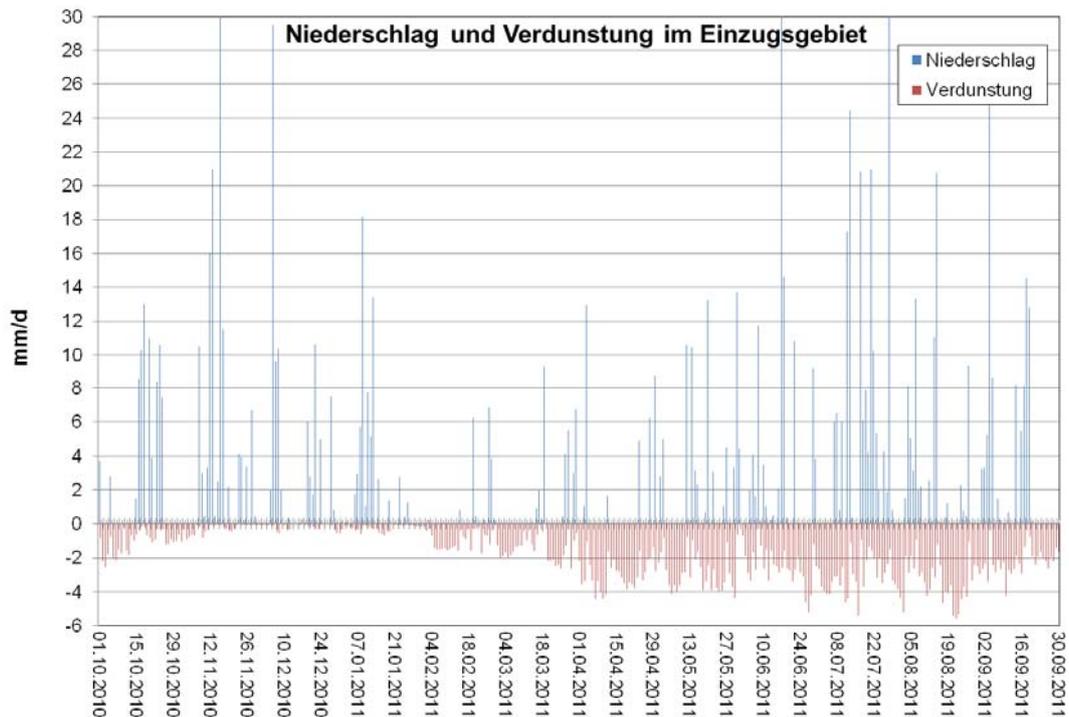


Abb. 5.12 Tägliche Summen des Niederschlags und der Verdunstung im Einzugsgebiet des Leisibaches in mm/d für das hydrologische Jahr 2010/11.

5.4 Abflussmessung

Im Leisibach wurde Ende Juli 2010 ein Überfallwehr („Flume“) zur Messung des oberirdischen Abflusses A eingerichtet (Abb. 2.1, Abb. 5.13). Der Standort der Flume entspricht in etwa dem tiefsten Abflusspunkt des Einzugsgebiets des Leisibaches. Mittels der eingebauten Druck- und Temperatursonde, sowie einer Kalibration der Druck-Abflussbeziehung bei unterschiedlichen Abflussmengen lässt sich die Abflussmenge A ableiten (Abb. 5.14). Für die Kalibration der Beziehung konnten wegen dem normierten Abflussprofil des Wehres publizierte Messreihen beigezogen werden, durch welche eine Polynomfunktion gelegt werden konnte. Zusätzlich wurde an Stichtagen der Abfluss mittels eines Auffanggefässes gemessen (möglich bis zu gut 15 l/s), und mit den bestehenden Messreihen verglichen.

Der berechnete Abfluss des Leisibaches schwankt zwischen unter 3 l/s, welcher v.a. im November 2011 längere Zeit bestand, und maximal gut 500 l/s anfangs Dezember 2010. Allerdings sind für die Abflussspitzen Fehler zu erwarten, da bei Pegeln von über 0.40 m, bzw. umgerechnet gut 100 l/s Abfluss, Umströmungen des Wehres beobachtet werden konnten. Die gemittelte Abflussmenge über das hydrologische Jahr 2010/11 beträgt 26.2 l/s. Die Temperatur stieg über den gleichen Zeitraum von knapp 1 Grad C im Dezember 2010 auf knapp 20 Grad im August 2011.



Abb. 5.13 Überfallwehr zur Messung der Abflussmenge im Leisibach (Roth, 2011).

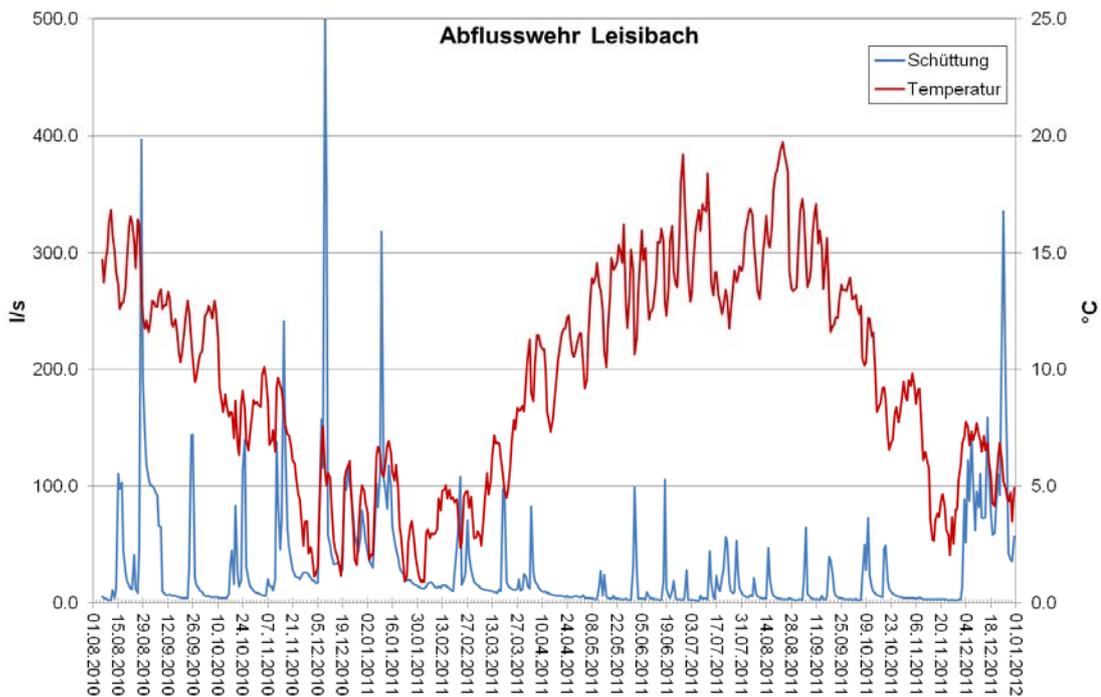


Abb. 5.14 Gemessene Temperaturen und Schüttungen im Leisibach.

5.5 Schüttungsmessungen der Quellfassungen

Zwischen Juli 2010 und Januar 2011 wurde in allen als bedeutend bekannten Quellen im Einzugsgebiet die Quellschüttung wöchentlich gemessen. Die Summe der erfassten Schüttungen schwankte zwischen gut 1 l/s im September 2010 bis zu gut 16 l/s Mitte Dezember 2010. Für die Gesamtbilanz wurde die Stichtagsmessung jeweils für die gesamte folgende Woche als massgebend betrachtet. Für den Zeitraum nach Januar 2010 wurde konstant die ermittelte mittlere Gesamt-Quellschüttung von 4.7 l/s eingesetzt. Obwohl die Unsicherheit des Quellschüttungsterms Q durch die nicht erfassten Quellen im Einzugsgebiet, sowie den zeitlich nicht erfassten Schwankungen in den gemessenen Quellen si-

cher am höchsten ist, wirkt sich diese durch die vergleichbar kleine Menge mutmasslich nicht bedeutend aus auf die Gesamtbilanz (Abb. 26).

5.6 Ergebnisse der Berechnung Grundwasserneubildung und Anteil Tiefengrundwasser

Die Änderung des Tiefengrundwasseranteils GW_{tief} kann als Restglied aus den gemessenen Grössen des Niederschlags N , der Evapotranspiration E („Verdunstung“), dem oberirdischen Abfluss A , sowie den Quellaustritten Q , bzw. -Fassungen theoretisch bestimmt werden. Für das hydrologische Jahr 2010/11 ist aus dem Verlauf der Tiefengrundwasseranteils ersichtlich, dass dieses nach einem 1. Halbjahr mit gut 100 mm positiv, und einem 2. Halbjahr mit bis 100mm negativ mit -24mm knapp negativ endet (Abb. 5.15).

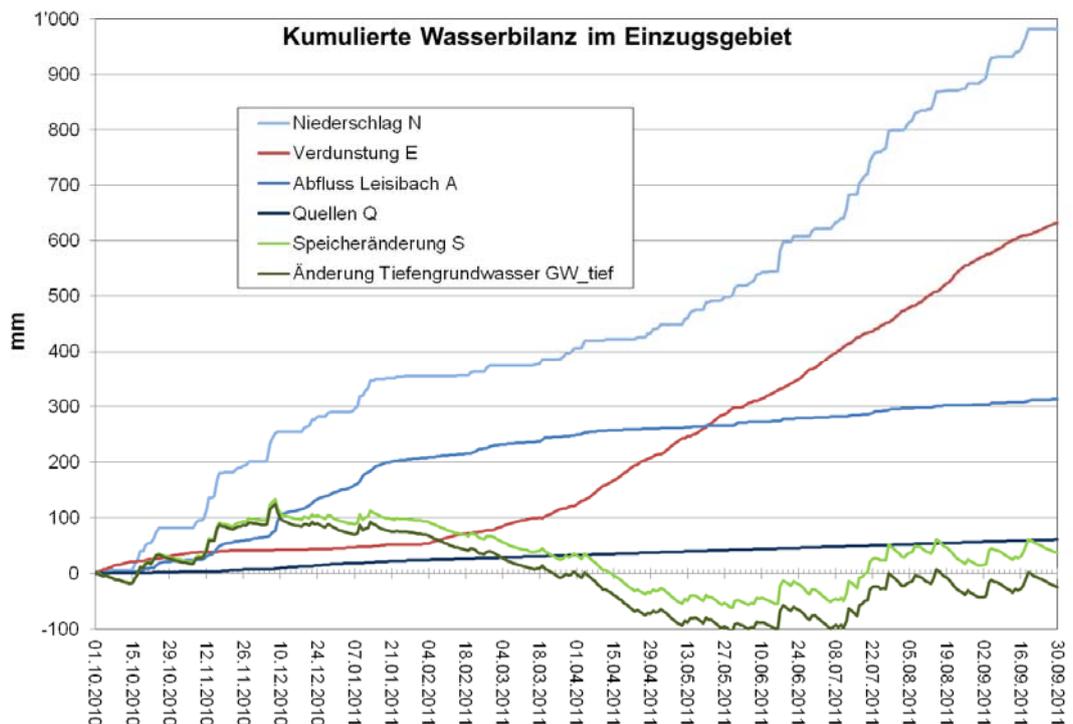


Abb. 5.15 Kumulierte Werte des Niederschlags, der Verdunstung, des Abflusses, der Quellschüttung, der Speicheränderung im Untergrund, sowie der Änderung des Tiefengrundwasseranteils im Einzugsgebiet des Leisibaches in mm für das hydrologische Jahr 2010/11.

Folgende Aussagen lassen sich daraus ableiten:

- Der Niederschlag N fiel mit 981 mm im 2010/11 etwa 200mm unter dem langjährigen Mittel aus. Es ist anzunehmen, dass bei höherem Niederschlag auch der Abfluss A (312 mm) höher ausfällt um schätzungsweise 20% (62 mm). Dies bedeutet, dass es bei einem durchschnittlichen Niederschlagsjahr zu einer leichten Zunahme von Tiefengrundwasser führen könnte;
- Ein überdurchschnittlich warmes 2010/11 führt ebenfalls zu erhöhter Verdunstung E (632 mm). Eine leicht reduzierte Verdunstung könnte die Änderung des Tiefengrundwassers weiter erhöhen. Dass die berechnete Verdunstung im 2010/11 etwa 2/3 des Niederschlags erreicht, kann aber als realistische Grössenordnung angesehen werden.
- Unsicherheiten betreffen auch den Abfluss A und die Quellaustritte Q (61 mm). Obwohl die Unsicherheit bei der Messung der Quellaustritte grösser ist, da diese zeitlich

nicht kontinuierlich aufgezeichnet und nicht alle Quellen erfasst sind, beträgt der Anteil der Quellaustritte nur gut 5 % im Vergleich zum Niederschlag. Da beim Abfluss A durch die Bauweise des Wehrs die höchsten Abflüsse eher unterschätzt werden, könnte die Summe der Abflüsse leicht höher ausfallen. Eine Unterschätzung beider Anteile A und Q um 10% würde 37 mm entsprechen.

Falls die oben aufgeführten möglichen Korrekturen eingefügt werden, könnte das Tiefengrundwasser effektiv um 77 mm pro Jahr angereichert werden. Die Anreicherung könnte über das unterirdische Einzugsgebiet erfolgen. Dessen 3D Struktur ist aber weitgehend unbekannt. Das Gebiet des nördlichen Belchens ist aber in einer tektonischen Transferzone angeordnet, in welcher das Leisibachtal als lokale topographische Depression, und möglicherweise auch als tektonische Depression eine potentielle unterirdische Drainage darstellt. Wenn die Häufung der Brüche in der Transferzone zusätzlich zu einer Erhöhung der hydraulischen Leitfähigkeit auch in schlechter durchlässigen Gesteinen wie dem Gipskeuper führt, ist mit einem erhöhten Grundwasserfluss im Bereich des nördlichen Belchens zu rechnen.

Insgesamt ist die Bilanzierung der Grundwasserneubildung über ein hydrologisches Jahr mit einigen Unsicherheiten behaftet. Da die Messungen und Berechnungen von N , E und A auch über 2011/12 weitergeführt werden, können sicherere Aussagen erwartet werden. Des Weiteren kann ein strukturelles 3D Modell der oberflächennahen Aquifere und Aquitarde aufzeigen, ob und wie unterirdischen Zu- oder Abflüsse zu erwarten sind.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Mittels Profilbilanzierung konnte im Bereich des Belchentunnels ein 2D geologisches Modell erstellt werden, welches gegenüber der Tunnelachse einige km weiter nach N und S reicht, sowie die Sedimente über dem Abscherhorizont des Juragebirges bis in eine Tiefe von knapp -1000m darstellt. Die festgestellte Gesamtverkürzung von ca. 9.5km über die bilanzierte Profillänge ist mit bestehenden Arbeiten kompatibel.

Das geologische Modell diene als Grundlage für ein numerisches 2D Grundwassermmodell, welches jeweils mit den hydraulischen Randbedingungen des bestehenden Zustands sowie des Ausgangszustands vor dem Tunnelbau aufgebaut wurde. Die Ergebnisse zeigen die Änderung der Grundwasserfließverhältnisse, bzw. des hydraulischen Potentials durch den Bau des Tunnels sehr deutlich. Da aber das 2D Modell die seitliche Umströmung nicht erfassen kann, führt der Drainageeffekt des Tunnels zu einer scheinbaren hydraulischen Entkopplung des Gebirges oberhalb der Tunnelachse, welche als unrealistisch angesehen wird. Es ist anzunehmen, dass die seitlichen Zu- und Abflüsse im Profil von der Lage der unterirdischen Zustromgebiete abhängen, welche wiederum von der geologischen 3D Struktur der Aquitarde bestimmt werden. Durch die simulierte hydraulische Homogenisierung im Tunnelbereich erschien die Kalibrierung mittels den ausschliesslich im Tunnelbereich vorhandenen Piezometerdaten (STB Bericht, 2007) nicht sinnvoll, da diese nicht sensitiv auf die hydraulischen Eigenschaften des unbeeinflussten Gesteins ausserhalb des Tunnelbereichs reagieren.

Im folgenden Messprogramm wurden mittels der Bestimmung der einzelnen Komponenten des hydrologischen Kreislaufs die Menge und die physikalisch-hydrochemische Signatur des unterirdisch zu- oder abströmenden Grundwassers gemessen. Bei den Zeitreihen der physikalischen und hydrochemischen Parameter in den Quellen wurde mit Hilfe der Variabilität, bzw. der Standardabweichung qualitativ bestimmt, wie gross die mittlere Aufenthaltszeit des Quellwassers ist. Es wird davon ausgegangen, dass je kleiner die Standardabweichung, desto grösser der Anteil von Wasser mit längerer Aufenthaltszeit im Untergrund ist. Mit dem Verlauf der Temperatur und der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit konnten die Quellen in 3 Gruppen mit tiefer, mittlerer und langer Aufenthaltszeit unterteilt werden. Da die Variabilitäten der gemessenen Parameter saisonal bedingt sind, kann davon ausgegangen werden dass keine oder geringe Variabilitäten Aufenthaltszeiten im Jahresbereich und länger entsprechen. Die Aufenthaltszeiten sind nicht unbedingt der Länge des Fliessweges gleichzusetzen. Da die hydraulischen Leitfähigkeiten und Porositäten im Untergrund sehr unterschiedlich sind, können Tiefenwässer aus Karstaquiferen wie aus dem Oberen Muschelkalk bei hohen Fliessgeschwindigkeiten Schwankungen der Parameter verursachen. Diese Karstwässer wurden aufgrund ihrer hydrochemischen Zusammensetzung mit erhöhten Hydrogenkarbonat- und Sulfatkonzentrationen identifiziert.

Die gemessene Zusammensetzung der stabilen Isotope unterliegt im hydrologischen Kreislauf typischen Fraktionierungseffekten, welche charakteristisch für einzelne hydrologische Einzugsgebiete ist. Es konnte festgestellt werden, dass die gemessenen Werte der dO_{18} und Deuterium-Werte der Quell- und Tunnelwässer die typische Niederschlagssignatur des Einzugsgebiets des Leisibachs aufweisen und der Anteil von Grundwässern aus weiter entfernten Einzugsgebieten wie z. B dem Jurasüdfuss minimal ist. Da aber im Tunnelbereich keine Grundwassermessstellen vorhanden sind, sondern nur Drainagewasser aus nicht klar definierten Tunnelabschnitten entnommen werden kann, ist eine differenzierte Interpretation der Herkunft der Wässer schwierig. Auf die Analytik von aufwendigeren Umwelttracern wie Tritium-Helium (Entgasung in Oberflächenwässern) zur Bestimmung der absoluten Verweilzeiten musste daher verzichtet werden.

Mit der Installation von zwei Meteostationen und einer Abflussmessung im Leisibach konnte die Evapotranspiration („Verdunstung“), der Niederschlag, der oberirdische Abfluss, sowie die Quellaustritte im oberirdischen Einzugsgebiet über dem nördlichen Bereich des Tunnels gemessen werden. Dadurch konnte der Anteil Tiefengrundwasser be-

rechnet werden, welcher aus den tieferen Aquiferen im Gebirge in der Grössenordnung von gegen 80 mm pro Jahr zugeführt wird. Die Anreicherung könnte über das unterirdische Einzugsgebiet erfolgen. Dessen 3D Struktur ist aber weitgehend unbekannt. Die für das unterirdische Einzugsgebiet ermittelte Mengenänderung an Grundwasser könnte aber in einem Folgeprojekt als wichtige Gesamtgrösse zur Kalibrierung eines regionalen 3-dimensionalen Grundwassermodells des Belchens im Massstab des unterirdischen Einzugsgebiets dienen.

Eine differenzierte Darstellung des Grundwasserfliessfelds in 3D würde ermöglichen, einen Zusammenhang aufzuzeigen zwischen Änderung der Grundwasserströmung durch den Tunnelbau und Bereiche, welche vermehrt dem Quellen des Gipskeupers unterliegen. Aus der Sicht der bestehenden hydrogeologischen Arbeiten können folgende Empfehlungen gegeben werden:

- Weiterführung der Wasserbilanzberechnungen für mindestens bis zum hydrologischen Jahr 2011/12. Der Aufwand für die Auswertung ist dazu noch nicht gesichert.
- Erstellung eines 3D Grundwassermodells des Belchens basierend auf 3D Modell der Geologie insbesondere der Aquitarde, welche die unterirdischen Einzugsgebiete des nördlichen Belchens, und damit der Bereiche mit vermehrter Gesteinsquellung im Gipskeuper erfasst.
- Bau und Instrumentierung von Piezometern, welche die Druckverhältnisse im Gebirge auch ausserhalb des Tunnelbereichs aufzeichnen, und dadurch die Kalibrierung der hydraulischen Eigenschaften der Gesteine ausserhalb des Einflussbereichs des Tunnels erlauben.
- Differenzierte Messungen der drainierten Wassermengen nach Tunnelabschnitten. Die gemessenen Mengen können in Beziehung zu den hydraulischen Eigenschaften in der Auflockerungszone des Tunnels, sowie zu den Zuflüssen aus den umgebenden unterirdischen Einzugsgebieten gesetzt werden. Die Kalibrierung von Modellen führt erfahrungsgemäss zu deutlich eindeutigeren Ergebnissen wenn diese an Flüssen erfolgt als allein an Piezometermessungen.
- Erstellung von Probenahmestellen für Gebirgswasser im nahen und fernen Tunnelbereich im Gipskeuper, in benachbarten Aquiferen und in Bruchzonen mit Wasserzutritt. Chemische und physikalische Analysen der Proben können Aufschlüsse geben über Wasserherkunft, Aufenthaltszeiten, sowie geochemische Prozesse im Zusammenhang mit der Quellung im Gipskeuper

Anhänge

I	Mikrometeorologische Bestimmungsmethode für die Verdunstung	47
I.1	Bowen-Verhältnis Methode.....	47
I.2	Eddykovarianz-Methode	47

I Mikrometeorologische Bestimmungsmethode für die Verdunstung

I.1 Bowen-Verhältnis Methode

Ausgehend von der Energiebilanzgleichung (alle Grössen in W m^{-2})

$Q_* = Q_E + Q_H + Q_B$ umgeformt zu $Q_* - Q_B = Q_E + Q_H$ lässt sich unter Verwendung des Bowen-Verhältnisses $\beta = \frac{Q_H}{Q_E}$ für den latenten Wärmestrom schreiben:

$$Q_E = \frac{Q_* - Q_B}{(1 + \beta)} \quad (\text{A1})$$

Die Fluss-Gradienten-Beziehungen für die turbulenten Wärmeströme lauten

$$Q_H = \rho c_p K_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad \text{und} \quad Q_E = \rho \lambda K_E \frac{\partial q}{\partial z}.$$

Dabei bedeuten ρ die Luftdichte, c_p die spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck, K_H und K_E die turbulenten Diffusionskoeffizienten für fühlbare Wärme und Wasserdampf und $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ und $\frac{\partial q}{\partial z}$ die bodennahen Gradienten der potentiellen Temperatur und der spezifischen Feuchte. Unter der Annahme, dass $K_H \approx K_E$ und dass die Gradienten durch Differenzen angenähert werden können, vereinfacht sich das Bowen-

Verhältnis zu $\beta = \frac{c_p \Delta \theta}{\lambda \Delta q}$. Werden also in zwei Höhen Temperatur und Luftfeuchte erfasst, kann aus der gemessenen verfügbaren Energie ($Q_* - Q_B$) der latente Wärmestrom bzw. die Verdunstung bestimmt werden. Dabei ist zu beachten, dass es bei den Übergängen zwischen Tag und Nacht und bei $\beta \approx -1$ zu messtechnisch und numerisch bedingten Unsicherheiten kommt, die entsprechend korrigiert werden müssen.

I.2 Eddykovarianz-Methode

Bei dieser Methode werden, vereinfacht gesagt, die „Wärmeinhalte“ der Luftpakete gezählt und gemittelt. Durch Turbulenz, die in der bodennahen Luftströmung praktisch immer vorhanden ist, werden Luftpakete nach oben und unten bewegt. Tagsüber, bei einer positiven Strahlungsbilanz, sind aufsteigende Luftpakete wärmer als absinkende. Werden nun schnell genug ($> \approx 10 \text{ Hz}$) die Fluktuationen des Vertikalwindes w' und der Lufttemperatur θ' gemessen, so kann mittels $Q_H = \rho c_p \overline{w' \theta'}$ der fühlbare Wärmestrom direkt bestimmt werden. Dabei bedeutet der Querbalken den Mittelwert über einen bestimmten Zeitraum (z.B. 30 min) und die Strichwerte sind die Abweichungen der Momentanwerte vom Mittelwert des Zeitraums ($w' = w - \bar{w}$ und $\theta' = \theta - \bar{\theta}$). Statistisch gesehen bedeutet $\overline{w' \theta'}$ eine Kovarianz und dementsprechend spricht man von der Kovarianzmethode. Bei gemessener verfügbarer Energie kann dann mit Q_H der latente Wärmestrom bzw. die Verdunstung als Restglied aus der Energiebilanzgleichung bestimmt werden.

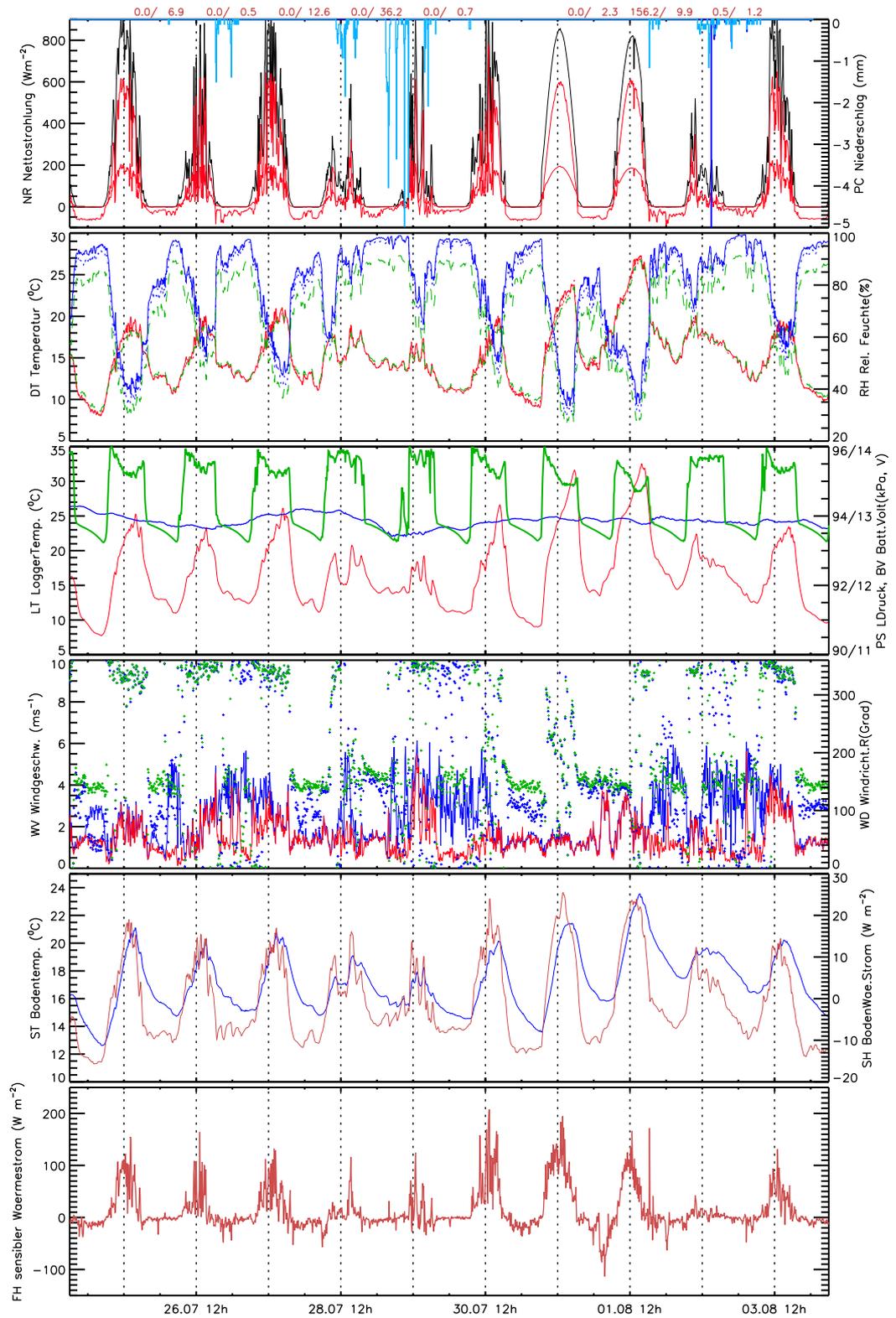


Abb. I.2 Beispiel für die Verläufe der Messgrößen an der Talstation Belchen

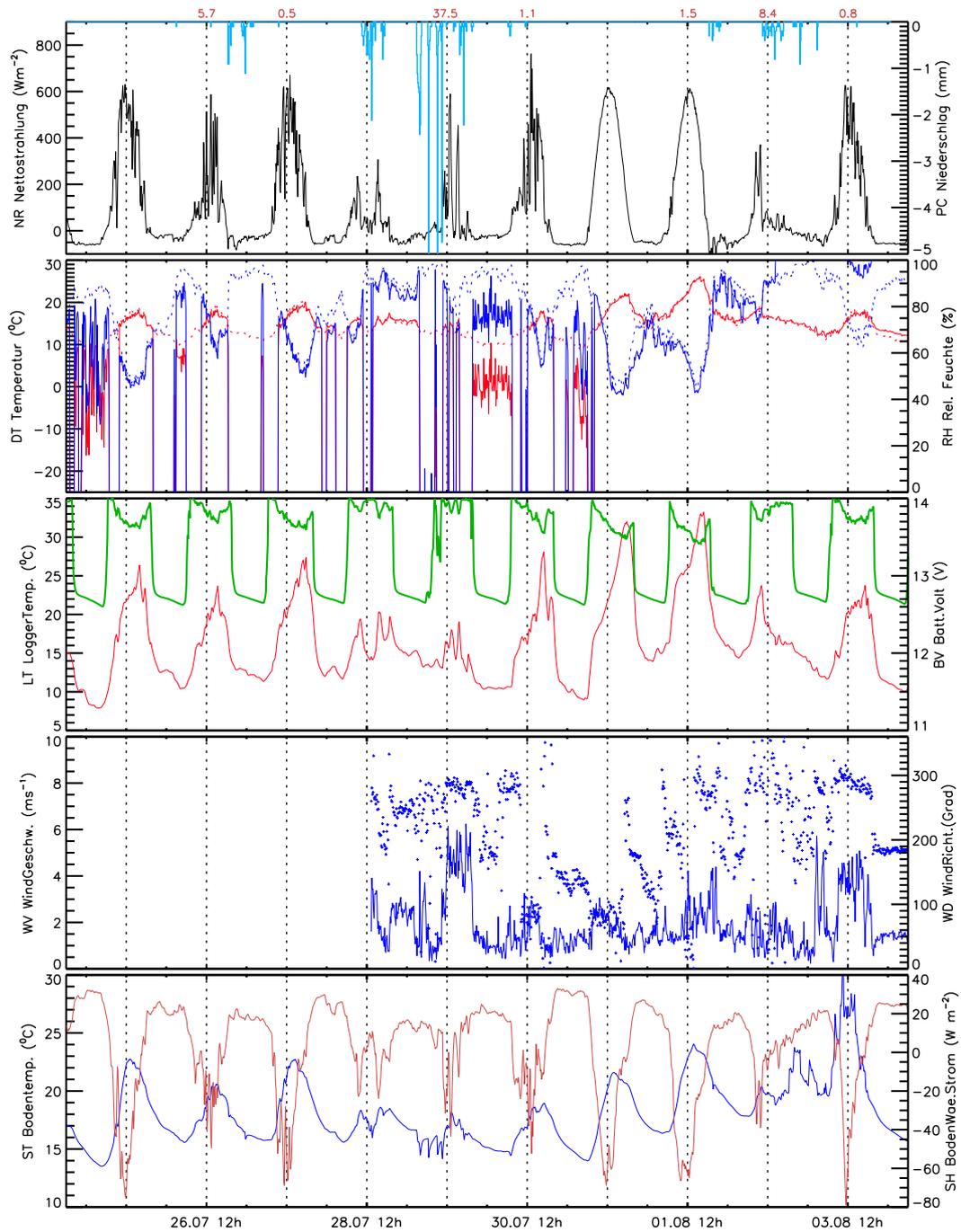


Abb. I.3 Beispiel für die Verläufe der Messgrößen an der Bergstation Belchen

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
A	Abfluss
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BGA	Baugrundarchiv
BREB	Bowen-Ratio-Energiebilanz-Methode
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
E	Evapotranspiration (Verdunstung)
EPT	Eptingen
FEFLOW	Finite Element subsurface FLOW system (Computerprogramm)
FGU	Fachgruppe Untertagbau
FPF	Fault parallel
FSU	Flexural slip unfold
Gans. Dol.	Gansinger Dolomit
GW _{tief}	Tiefen-Grundwasser
O. Bnt. Mergel	Obere Bunte Mergel
LAB	Lampenberg
Lf	Leitfähigkeit
MCR	Institut für Meteorologie, Klimatologie und Fernerkundung, Universität Basel
MWL	Meteoric Water Line
N	Niederschlag
NNW	Nordnordwest
Q	Quellaustritt
RUE	Rüneberg
S	Speicheränderung
Schilfsst.	Schilfsandstein
SSO	Südsüdost
STB	Sanierungstunnel Belchen
TM	Tunnelmeter
TRI	Trishear
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute

Literaturverzeichnis

- Anagnostou, G. (1995): Seepage flow around tunnels in swelling rock. *Int. Journal Num. and Analyt. Meth. in Geomechanics*, 19, 705-724.
- Bitterli T (1992) Zur Anwendung der tektonischen Materialbilanz im östlichen Faltenjura. Unpublished Ph.D. thesis, Geol.-Paläont. Inst. Univ. Basel.
- BGA/BL, Baugrundarchiv Basel-Landschaft, Eptingen 44.
- BGA/BL, Baugrundarchiv Basel-Landschaft, Eptingen 65.
- BGA/BL, Baugrundarchiv Basel-Landschaft, Eptingen 88.
- 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.
- Dahlstrom, C. D. A. (1969): Balanced cross sections.- *Journal Canadien des Sciences de la Terre*.6, 4, Teil 1,S. 743-757.
- Diersch, H.-J.G. (Hrsg.) (2005): FEFLOW Finte Element Subsurface Flow and Transport Simulation System – Reference manual. WASY Institute for Water Resources Planning and Systems Research, Berlin.
- Egan, S. S., Buddin, T. S., Kane, S. J., and Williams, G. D., 1997, Three-dimensional Modelling and Visualization in structural geology: New techniques for the restoration and balancing of volumes, In: *Proceedings of the 1996 Geoscience Information Group Conference on Geological Visualization, Electronic Geology*, V. 1, Paper 7, p. 67-82.
- Elliott, D. (1983): The construction of balanced cross-sections.- *Journal of Structural Geology*.5, 2, S. 101.
- Erslev, E. A., 1991. Trishear fault-propagation folding. *Geology*, 19, p. 617-620.
- Erslev, E.A. and Rogers, J.M., 1993, Basement-cover geometry of Laramide fault-propagation folds, in Schmidt, C.J., Chase, R.B., and Erslev, E.A., eds., *Laramide*.
- Goguel, J. (1952): *Traité de Tectonique*. –Masson et Cie, Paris.
- Goldschmidt, (1965) Die Geologie des Faltenjuras zwischen Olten und Unterem Hauenstein. Ph.D. thesis, Geol.-Paläont. Inst. Univ. Basel, Tätigkeiten der Naturforschenden Gesellschaft Baselland, Band 24.
- Griffiths, P.A., Jones, S., Salter, N., Schaefer, F., Osfield, R., and Reiser, H., 2002, A new technique for 3-D flexural slip restoration, *Journal of Structural Geology*, 24, 773-782.
- Herold T. (1992) Die Geologie der "Eptinger Bucht" unter besonderer Berücksichtigung der Sedimentologie des Hauptmuschelkalks. Diplomarbeit GPI, Universität Basel.
- Kane, S. J., Williams, G. D., Buddin, T. S., Egan, S. S., and Hodgetts, D., 1997, Flexural-slip based restoration in 3D, a new approach, 1997 AAPG Annual Convention Official

Program, p. A58.

Kovári, K., Amstad, Ch., Anagnostou, G. (1987): Tunnelbau in quellfähigem Gebirge. Mitteilungen der Schweiz. Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, 115, 19-26.

Laubscher, H. 1986: The eastern Jura: Relations between thin-skinned and basement tectonics,

local and regional. Geol. Rundschau 73, 3, 535-553.

Move 2009.1 Online Help (2009) Midland Valley Exploration Ltd, Glasgow, (www.mve.com).

Roth, A. (2011): Charakterisierung der Gersteins – Wasserinteraktion im Belchengebiet (Eptingen, Kt. Baselland), Mastersarbeit Departement Umweltwissenschaften, Universität Basel.

STB Bericht (2007) Nationalstrasse N2, Sanierungstunnel Belchen STB, Geologisch-geotechnischer Bericht. Pfirter, Nyfeler + Partner und Geotechnisches Institut.

Withjack, M.O., Olson, J. and Peterson, E., 1990. Experimental models of extensional forced folds. AAPG Bulletin, v. 74, no. 7, 1038-1054.

Wittke, W. (2004): Planung, Bau und Überwachung von Tunneln in quellfähigem Gipskeuper, Geotechnik 27(2), 104-111.

Wittke, M. & Wittke, W. (2004): "Begrenzung der Quelldrücke durch Selbstabdichtung beim Tunnelbau im anhydritführenden Gebirge", Taschenbuch für den Tunnelbau 2004, Verlag Glückauf GmbH, Essen.

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: 28. September 2012

Grunddaten

Projekt-Nr.: FGU2008/4

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

Enddatum: 31. August 2012

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Mittels geologischer Profilbilanzierung konnte im Bereich des Belchentunnels ein 2D geologisches Modell erstellt werden, welches gegenüber der Tunnelachse einige km weiter nach N und S reicht, und mit einer Gesamtverkürzung von ca. 9.5km über die bilanzierte Profillänge mit den bestehenden Arbeiten kompatibel ist. Das geologische Modell diente als Grundlage für ein numerisches 2D Grundwassermodell, welches jeweils mit den hydraulischen Randbedingungen des bestehenden Zustands sowie des Ausgangszustands vor dem Tunnelbau aufgebaut wurde. Die Ergebnisse zeigen die Änderung der Grundwasserflussverhältnisse durch den Bau des Tunnels sehr deutlich. Da aber das 2D Modell die seitliche Umströmung nicht erfassen kann, führt der Drainageeffekt des Tunnels zu einer scheinbaren hydraulischen Entkopplung des Gebirges oberhalb der Tunnelachse, welche als unrealistisch angesehen wird. Es ist anzunehmen, dass die seitlichen Zu- und Abflüsse im Profil von der Lage der unterirdischen Zustromgebiete abhängen, welche wiederum von der geologischen 3D Struktur der Grundwasserstauer bestimmt werden. Mit einem Messprogramm wurden mittels der Bestimmung der einzelnen Komponenten des hydrologischen Kreislaufs die Menge und die physikalisch-hydrochemische Signatur des unterirdisch zu- oder abströmenden Grundwassers abgeschätzt. Mit dem Verlauf der Temperatur und der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit konnten die Quellen in Gruppen mit tiefer, mittlerer und langer Aufenthaltszeit unterteilt werden. Da die hydraulischen Leitfähigkeiten und Porositäten im Untergrund sehr unterschiedlich sind, haben Tiefenwässer aus Karstaquiferen wie aus dem Oberen Muschelkalk bei hohen Fließgeschwindigkeiten Schwankungen der Parameter verursacht. Diese Karstwässer wurden aufgrund ihrer hydrochemischen Zusammensetzung mit erhöhten Hydrogenkarbonat- und Sulfatkonzentrationen identifiziert. Die gemessene Zusammensetzung der stabilen Isotope O18 und Deuterium der Quell- und Tunnelwässer zeigte die typische Niederschlagssignatur des Einzugsgebiets des Leisibachs, und damit auch dass der Anteil von Grundwässern aus weiter entfernten Einzugsgebieten wie z.B dem Jurasüdfuss minimal ist. Da aber im Tunnelbereich keine Grundwassermessstellen vorhanden sind, sondern nur Drainagewasser aus nicht klar definierten Tunnelabschnitten entnommen werden kann, ist eine differenzierte Interpretation der Herkunft der Wässer schwierig. Mit der Installation von zwei Meteostationen und einer Abflussmessung im Leisibach konnte die Evapotranspiration („Verdunstung“), der Niederschlag, der oberirdische Abfluss, sowie die Quellaustritte im oberirdischen Einzugsgebiet über dem nördlichen Bereich des Tunnels gemessen werden. Dadurch konnte der Anteil Tiefengrundwasser berechnet werden, welcher aus den tieferen Aquiferen im Gebirge in der Größenordnung von gegen 80 mm pro Jahr zugeführt wird. Es wird angenommen, dass die Anreicherung über das unterirdische Einzugsgebiet erfolgt.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Im Projekt wurde davon ausgegangen, dass das Grundwasserfliessfeld einen entscheidenden Einfluss auf das Gipsquellen im Gebirge hat. Das Projekt hatte sich daher zum Ziel gesetzt, die Grundwasserverhältnisse des Belchens im Bereich des Tunnels aufgrund guter Kenntnisse der geologischen Verhältnisse im Gebirge darzustellen. Es wurde dazu 3 Projektteile vorgeschlagen. Vollständig umgesetzt wurde der Aufbau des (1) Geologischen Modells. Aufgrund ungenügender Datenlage und nicht geeigneten Messinstrumenten konnten nur Teile der (2) Datenerhebung, sowie des (3) Geohydraulischen Modells erarbeitet werden. Es stellte sich heraus, dass eine 2D Betrachtung den 3D lateralen Flüssen nicht gerecht wird. Zudem fehlen geeignete Messinstrumente, die es erlauben die Grundwasserverhältnisse und -zusammensetzung zu beproben und damit die Flüsse zu quantifizieren. Es wurde daher im 2010 vorgeschlagen, eine Grundwasserbilanzierung im Einzugsgebiet des nördlichen Belchens mittels erhobener hydrologischer Daten zu erarbeiten, welche mit der Berechnung der Grundwasserneubildung, bzw. des unterirdischen Zu-/Abflusses im Einzugsgebiet des nördlichen Belchens vollständig umgesetzt wurde.

Folgerungen und Empfehlungen:

Eine differenzierte Darstellung des Grundwasserfliessfelds in 3D würde ermöglichen, einen Zusammenhang aufzuzeigen zwischen Änderung der Grundwasserströmung durch den Tunnelbau und Bereiche, welche vermehrt dem Quellen des Gipskeupers unterliegen. Folgende Empfehlungen können gegeben werden:

- Weiterführung der Wasserbilanzberechnungen für mindestens bis zum hydrologischen Jahr 2011/12. Der Aufwand für die Auswertung ist dazu noch nicht gesichert.
- Erstellung eines 3D Grundwassermodells des Belchens basierend auf 3D Modell der Geologie.
- Bau und Instrumentierung von Piezometern, welche die Druckverhältnisse im Gebirge auch ausserhalb des Tunnelbereichs aufzeichnen, und dadurch die Kalibrierung der hydraulischen Eigenschaften der Gesteine ausserhalb des Einflussbereichs des Tunnels erlauben.
- Differenzierte Messungen der drainierten Wassermengen nach Tunnelabschnitten. Die gemessenen Mengen können in Beziehung zu den hydraulischen Eigenschaften in der Auflockerungszone des Tunnels, sowie zu den Zuflüssen aus den umgebenden unterirdischen Einzugsgebieten gesetzt werden.
- Erstellung von Probenahmestellen für Gebirgswasser im nahen und fernen Tunnelbereich im Gipskeuper, in benachbarten Aquiferen und in Bruchzonen mit Wasserzutritt. Chemische und physikalische Analysen der Proben können Aufschlüsse geben über Wasserherkunft, Aufenthaltszeiten, sowie geochemische Prozesse im Zusammenhang mit der Quellung im Gipskeuper.

Publikationen:

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, Universität Basel

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

28.9.2012

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Beurteilung der BK bzgl. Zielerreichung und Belastbarkeit der Modellaussagen des Forschungsprojektes FGU 2008/004 stimmt mit jener der Forschungsstelle überein. Die Simulationsergebnisse unterstreichen die Bedeutung von weiterführenden Feldmessungen im Gebiet Belchen sowie die Notwendigkeit einer räumlichen Modellierung.

Umsetzung:

Das Forschungsprojekt hat zwar gezeigt, dass der Tunnelausbruch die geohydraulischen Verhältnisse erheblich verändert. Für die praktische Umsetzung wäre aber wichtig zu wissen, inwiefern diese Veränderung das verstärkte Auftreten von Quellererscheinungen in gewissen Streckenabschnitten (beim gleichzeitigen Fehlen derselben in anderen, scheinbar ähnlichen Abschnitten) erklären kann.

weitergehender Forschungsbedarf:

Ja, gemäss der Vorschläge der Forschungsstelle (s. Abschnitt "Folgerungen und Empfehlungen" des vorliegenden Formulars).

Einfluss auf Normenwerk:

Keiner

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 transalpines</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