



Testeinsatz der Methodik «Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten» an- hand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels

**Test de la méthode «Prédiction indirecte de zones de
venue d'eau au moyen de données thermiques» à l'aide
des données du tunnel de base du Lötschberg**

**Test of the method «indirect prediction ahead of water
bearing zones with temperature data» with the measured
data from the Lötschberg-Basistunnel**

**GEOWATT AG
Th. Mégel
R. Wagner
S. Signorelli
Th. Kohl
L. Rybach**

**Forschungsauftrag FGU 2005/001 auf Antrag der
Fachgruppe für Untertagebau (FGU)**

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	1
BEZEICHNUNGEN	3
ZUSAMMENFASSUNG	4
RÉSUMÉ	4
SUMMARY	5
1 ZIELSETZUNGEN DES PROJEKTS	7
2 EINFÜHRUNG	7
2.1 Bestimmende Faktoren der Felstemperatur	7
2.2 Die Felstemperatur als Parameter der Vorauserkundung	8
3 METHODIK GDT	9
3.1 Allgemeines Konzept GDT	9
3.2 Anwendung der Methodik GDT	11
3.3 Das Programm GDT	12
4 DATENGRUNDLAGE VORERKUNDUNG	13
4.1 Allgemeines	13
4.2 Thermische Datengrundlage	13
4.3 Hydraulische Datengrundlage	13
5 EINGABEDATEN FÜR GDT	14
5.1 Konduktives 3D-FE-Gebirgsmodell	14
I Verwendete Strukturelemente	14
II Thermische Randbedingungen	17
III Thermische Gesteinseigenschaften	18
IV Bewertung des konduktiven 3D-FE-Gebirgsmodells	18
5.2 Hydraulische Parameterbereiche für GDT	21
5.3 In GDT verwendeter Satz von Störzonen-Modellen	22
6 PROGNOSE DER WAHRSCHEINLICHKEIT DES WASSERZUFLUSSES MIT GDT UND VERGLEICH MIT BEFUND	24
6.1 Allgemeines Vorgehen	24
6.2 Thermische Befunddaten LBT	27
6.3 Hydraulische Befunddaten LBT	28

I	Wasserführung im Abschnitt Mitholz Nord (TM-Bereich 125 bis 7'495)	28
II	Wasserführung im Abschnitt Mitholz Süd (TM-Bereich 7'495 bis 17'195)	29
III	Wasserführung im Abschnitt Ferden Nord (TM-Bereich 17'195 bis 23'230)	31
IV	Wasserführung im Abschnitt Ferden Süd und Ferden Nothaltestelle (TM-Bereich 23'230 bis 24'320)	32
V	Wasserführung im Abschnitt Raron (TM-Bereich 24'320 bis 34'565)	32
6.4	Prognose der Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses mit GDT für LBT	33
I	Ergebnisse von GDT	33
II	Bewertung der Ergebnisse	35
<hr/>		
7	SCHLUSSFOLGERUNGEN	42
<hr/>		
	REFERENZEN	43

Bezeichnungen

T_K °C Konduktive Gebirgstemperatur:
Rein konduktiv berechnete Temperatur im 3D-FE-Gebirgsmodell

TM Tunnelmeter

Effektive, in der Praxis teils messbare Grössen:

T_{eff} °C Effektive Tunneltemperatur:
Im vorgetriebenen Tunnel gemessene Felstemperatur bis zur Ortsbrust

q W/m² Vertikaler Wärmefluss

T_S °C Bodenoberflächentemperatur

Im automatischen Lokalmodell-Generator berechnete Prognosewerte für die verschiedenen Variationen von angenommenen Störzonen:

T_P °C Prognosetemperatur:
Prognostizierte Tunneltemperatur auf Grund einer angenommenen Störzone

Q_P l/s Prognostizierte initiale Schüttungsrate nach Durchörterung einer angenommenen Störzone, nach Abklingen des Speichereffektes, aber bei noch unverändertem Bergwasserspiegel

P_P bar Prognostizierter initialer Wasserdruck:
Berechneter Initialdruck in einer angenommenen Störzonen auf Tunnelniveau

V_P m³ Prognostiziertes Volumen einer angenommenen Störzone oberhalb des Tunnelniveaus

N_{fit} Anzahl der selektierten Störzonenmodelle (d.h. die berechnete Temperatur T_P entlang des Tunnelabschnitts ist ausreichend ähnlich der gemessenen Temperatur T_{eff}).

Q50% l/s Medianwert der prognostizierten Schüttungsraten

P50% bar Medianwert der prognostizierten Drücke

V50% m³ Medianwert der Volumen der angenommenen Störzonen oberhalb des Tunnelniveaus

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes FGU2003-003 (Mégel et al, 2005) wurde auf theoretischer Basis gezeigt, dass durch eine geeignete Methodik mit gemessenen Felstemperaturen entlang eines vorgetriebenen Tunnelabschnittes theoretisch die Grössenordnung eines möglichen Wasserzuzfluss vor der Ortsbrust bestimmt werden kann. Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes war es anhand der Daten des Lötschberg-Basistunnels diese Methodik, genannt "Geothermal Diagnosis for Tunnelling" (GDT), zu evaluieren.

Die GDT-Methodik berechnet für eine bestimmte Vortriebsposition den wahrscheinlichsten Zufluss einer perfekt an den gesamten Tunnelquerschnitt angekoppelten Störzone vor der Ortsbrust.

Die GDT-Methodik ist ein statistisches Verfahren. An jeder Vortriebsposition wird eine grosse Anzahl von Störzonenmodellen evaluiert, deren hydraulische Eigenschaften innerhalb definierbarer Bandbreiten automatisch variiert werden. Für jedes Störzonenmodell wird das dreidimensionale, advektiv gestörte Temperaturfeld berechnet und daraus diejenigen Modelle selektiert, deren berechnete Tunneltemperatur mit den Messwerten im ausgebrochenen Tunnel übereinstimmen. Von diesen ausgewählten Störzonenmodellen werden die jeweiligen Schüttungsraten bei einer Durchörterung berechnet. Von all diesen Schüttungsraten wird der Median als der wahrscheinlichste Zuflusswert bezeichnet.

Entlang des Lötschberg-Basistunnels wurden 63 Vortriebspositionen definiert, an denen jeweils 150 verschiedene Störzonenmodelle evaluiert wurden. Für jede Position wurde die Wahrscheinlichkeit des lokalen Wasserzuzflusses berechnet.

Es hat sich gezeigt, dass mit der GDT-Methodik Abschnitte mit hoher und tiefer Wasserzuzflussgefährdung identifiziert werden konnten. Allerdings ergaben sich auch Abweichungen von bis zu 2 km zwischen der gemessenen und der prognostizierten Position von Störzonen. Möglicherweise liegt die Ursache davon in ungenügenden Parametersätzen für die GDT-Evaluationen an den entsprechenden Positionen (v.a. Bandbreite von Streichen und Fallen von Störzonen).

Für die vorliegende Evaluation der GDT-Methodik wurden als Eingabedaten ausschliesslich die Daten aus der Vorerkundung, vor Beginn des Vortriebs, verwendet. Bei einer Anwendung der GDT-Methodik in der Praxis würden hingegen laufend neue Erkenntnisse (bspw. Streichen und Fallen von Störzonen, Herkunft von Wässern, etc.) in die Festlegung der GDT-Parameter berücksichtigt. Dabei würden auch wesentlich mehr als 150 Störzonenmodelle pro Vortriebsposition ausgewertet, wodurch eine Verbesserung der Prognose zu erwarten ist.

Es hat sich gezeigt, dass die GDT-Methodik die Identifikation von hydrogeologisch kritischen Tunnelabschnitten unterstützen kann. Sie kann komplementär zu anderen geophysikalischen Vorerkundungsmethoden im Tunnelbau eingesetzt werden. Es wird geschätzt, dass die GDT-Methodik mindestens eine Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Tunneltrasse von 5 - 10 K benötigt. Die Methodik ist somit für Tunnel ab 200 - 300 m Tiefenlage einsetzbar.

Résumé

Dans le cadre du projet de recherche FGU2003-003 (Mégel et al, 2005), il est montré, sur des bases théoriques, qu'il est possible avec à une méthode appropriée et des mesures de température de la roche le long d'une section de tunnel déjà excavée, de déterminer l'ordre de grandeur du débit le plus probable d'une zone de circulation d'eau située à l'avant du front de taille. Le but du présent projet de recherche est, à l'aide des données du tunnel de base du Lötschberg, d'évaluer cette méthode, nommée "Geothermal Diagnosis for Tunnelling" (GDT)

La méthode GDT calcule pour une position d'avancement donnée le débit le plus vraisemblable pour une section de tunnel totale précisément couplée à une zone de fracture à l'avant du front de taille.

La méthode GDT est un processus statistique. A chaque position d'avancement, un grand nombre de modèles de zones de failles est évalué, dont les propriétés hydrauliques varient automatiquement dans un intervalle défini. Pour chaque modèle de zones de failles, le champ de températures tridimensionnel advectif modifié est calculé et les modèles pour lesquels la température calculée dans le tunnel correspond le mieux aux mesures effectuées dans le tunnel déjà excavé sont sélectionnés. A partir de ces modèles choisis, la valeur médiane des débits est considérée comme la valeur du débit d'infiltration la plus probable.

Le long du tunnel de base du Lötschberg, 63 positions d'avancement ont été définies, pour chacune desquelles 150 différents modèles de failles ont été évalués. Pour chaque position, la probabilité d'infiltration a été calculée. Ceci a montré que la méthode GDT pouvait identifier les tronçons présentant des menaces d'infiltration hautes ou faibles. Cependant l'écart entre les positions calculées et observées peut atteindre jusqu'à deux kilomètres. Il est très probable que cet écart soit dû à l'utilisation de paramètres insuffisamment contraints lors de l'évaluation à une position donnée (plus particulièrement l'orientation et le pendage des failles).

Pour la présente évaluation de la méthode GDT, les données d'entrée utilisées sont exclusivement les données de reconnaissance, avant le creusement du tunnel. Il est recommandé pour une application de la méthode GDT dans la pratique, d'intégrer les données de nouvelles reconnaissances aux modèles (par exemple pendage et azimuth des failles, origine des eaux d'infiltration...), afin d'autoriser une détermination plus précise des paramètres GDT. Ainsi plus de 150 modèles de failles par position d'avancement peuvent être évalués, afin d'améliorer le processus.

Il a été montré que la méthode GDT permet d'aider à l'identification des sections de tunnel critiques d'un point de vue hydrogéologique. Cette méthode peut être utilisée de manière complémentaire aux méthodes classiques de prospection géophysiques lors du creusement d'un tunnel. On peut estimer que la méthode GDT nécessite une différence de température entre la surface et le tunnel de 5 – 10 K. La méthode est ainsi valable pour des tunnels d'une profondeur minimale de 200 – 300 m.

Summary

In the frame of the research project FGU2003-003 (Mégel et al, 2005) it has been demonstrated on a purely theoretical base that by using an appropriate method the order of magnitude of the inflow from a possible water bearing zone ahead of the advancing face can be determined with measured rock temperatures recorded subsequently along the advancing tunnel excavation. The objective of the present research project was to evaluate this method, named "Geothermal Diagnosis for Tunnelling" (GDT), with the data of the new Lötschberg Base Tunnel.

The method GDT calculates for a given position of the advancing face the most likely inflow from a water bearing zone ahead which is assumed to be perfectly coupled at the tunnel.

GDT is a statistical method. At each advancing position numerous models of water bearing zones are evaluated, for which the hydraulic properties are varied automatically within defined ranges. For each model the three-dimensional, advectively influenced temperature field is calculated and compared with the measured temperature values from the excavated tunnel. The models with a sufficient fit between calculated and measured temperatures are se-

lected and the water inflow after a crossing is calculated. The median of the inflow rates of the selected zones is identified as the most likely value.

Along the Lötschberg Base Tunnel 63 positions of the advancing face have been defined and for each position 150 models of a water bearing zone have been evaluated. This resulted in a value for the probability of inflow for each position.

It has been demonstrated that the GDT method can identify sections in the tunnel with high and low probability of inflow. However, variations of up to 2 km between measured and calculated positions of water bearing zones occur. This discrepancy can be explained by application of not well-constrained parameters, in particular the orientation of water bearing zones in the model.

For this evaluation of the method GDT only information from the surveys carried out before the start of the advancing work has been used. In practice, new data collected during the advancing work (e.g. strike and fall of structures, origin of the water, etc.) will continuously be incorporated in the definition of the GDT-parameters. Also, more than 150 models for a specific advancing position will then be evaluated.

The method GDT can support the identification of critical section within a tunnel. The method can be used complementary with other geophysical methods for prediction ahead during tunneling. It is estimated that a minimum temperature difference between surface and tunnel of 5 – 10 K is needed for the method GDT. This means that the method is applicable for tunnels with depths more than 200 - 300 m.

1 Zielsetzungen des Projekts

Im Rahmen des Forschungsprojektes FGU2003-003 (Mégel et al, 2005) wurde anhand eines Finite-Elemente-Modells (FE-Modell) eines fiktiven Gebirges gezeigt, dass durch eine geeignete Interpretation von gemessenen Felstemperaturen entlang eines vorgetriebenen Tunnelabschnittes theoretisch die Grössenordnung eines möglichen Wasserzuflusses vor der Ortsbrust bestimmt werden kann. Mit abnehmendem Abstand zu einer im FE-Modell eingebauten wasserführenden Zone zeigte das Verfahren eine Annäherung der prognostizierten Schüttung an den bevorstehenden, effektiven Wert. Die Methodik wird "Geothermal Diagnosis for Tunnelling" (GDT) bezeichnet.

Die Methodik GDT hat im Forschungsprojekt FGU2003-003 anhand eines rein synthetischen Gebirgsmodells mit einer idealisierten Topographie sowie weitgehend homogenen Parametern gute Resultate gezeigt. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes soll nun GDT anhand eines realen Tunnelprojektes evaluiert werden. Dazu werden die Daten des erst kürzlich ausgebrochenen Lötschberg-Basistunnel verwendet.

Mit GDT wird ein wahrscheinlichster Wert für die Schüttungsrate im Beharrungszustand beim Durchfahren einer möglichen Störzone berechnet. Da durch den Tunnelvortrieb diese Störzone nicht zwingend angefahren werden muss, stellt diese prognostizierte Schüttung ein Wahrscheinlichkeitswert dar. Wir bezeichnen im folgenden diesen Wert als **Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses**.

Eingabeparameter in GDT sind die geologischen Vorerkundungswerte vor Beginn der Ausbruchsarbeiten sowie die laufend während des Vortriebs gemessenen Felstemperaturen. In Vortriebsschritten von 500 m wird mit GDT jeweils die Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses berechnet. Diese Positionen bezeichnen jeweils den aktuellen Stand des Vortriebs. Das Profil der Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses entlang der Tunnelspur wird schliesslich mit den effektiv aufgetretenen Wasserzuflüssen verglichen.

2 Einführung

Stark wasserführende Zonen im Festgestein bergen die Gefahr eines unvorhergesehenen Wasserzuflusses in sich und gehen zudem oft mit schwachen felsmechanischen Eigenschaften einher (Bsp. Piorazone beim Gotthardbasistunnel). Es wäre wünschenswert, Hinweise auf die Lage und die Eigenschaften solcher wasserführender Störzonen bereits vor der Ortsbrust indirekt, möglichst ohne Unterbrechung des Vortriebs, erhalten zu können. Dies könnte beispielsweise die Optimierung von Vorerkundungsbohrungen unterstützen. Indirekte Vorauserkundung heisst, mit Hilfe eines meist im Tunnel messbaren physikalischen Parameters Rückschlüsse auf bestimmte Gebirgseigenschaften vor der Ortsbrust machen zu können. Die Felstemperatur ist ein solcher Parameter, der insbesondere auf Wasserzirkulation stark reagieren kann (Busslinger A. und Rybach L., 1999).

2.1 Bestimmende Faktoren der Felstemperatur

Das natürliche, räumliche Temperaturfeld im Gebirge wird durch verschiedene Grössen bestimmt, wie

- Wärmefluss aus dem Erdinnern
- Topographie

- Bodenoberflächentemperatur
- Wärmeleitung (Konduktion) entsprechend der Wärmeleitfähigkeit der Gesteine
- Natürliche Wärmeproduktion der Gesteine
- Advektiver Wärmetransport durch Wasserzirkulation aufgrund von hydraulischen Potenzialunterschieden (forcierte Konvektion), kontrolliert durch die Verteilung der hydraulischen Leitfähigkeiten im Gebirge
- Klimageschichte und Verteilung der spezifischen Wärmekapazitäten
- Hebung/Erosion

Insbesondere die natürliche Zirkulation von Gebirgswasser hat in aller Regel einen erheblichen Einfluss auf das räumliche Temperaturfeld des Gebirges (advektiver Wärmetransport). Erfahrungen im Festgestein zeigen, dass strömendes Wasser in gut durchlässigen Zonen bereits ab natürlichen Fließgeschwindigkeiten von 10^{-8} m/s (~ 1 m/Jahr) das Temperaturfeld beeinflusst. Diese Beeinflussung hat eine beträchtliche Tiefenausdehnung (Kohl et al., 2001).

Die Wärmeleitung im Gestein ist ein äusserst träger Prozess. Daher sind im Temperaturfeld des Gebirges - und damit in den gemessenen Felstemperaturen im Tunnel - die natürlichen, ursprünglichen Wasserbewegungen im Fels abgebildet, auch wenn durch den aktuellen Tunnelvortrieb der Wasserhaushalt des durchfahrenen Gebirges nachhaltig verändert sein kann.

2.2 Die Felstemperatur als Parameter der Vorauserkundung

Die Felstemperatur ist ein Parameter, der sich relativ einfach und hinter der Ortsbrust seitlich in der Tunnelwand messen lässt. Für die Messung der Felstemperatur werden spezielle, kleinkalibrige Bohrlöcher im intakten Fels benötigt. Ideal sind Bohrlöcher im Parament mit einer Länge von 6 m, einem Durchmesser von mindestens 2“ und einer Höhe über Boden von ca. 1.5 m. Da die Bohrlöcher für eine Temperaturmessung mit Wasser gefüllt werden, müssen sie leicht (ca. 15°) nach unten geneigt sein. Der Abstand zwischen den Bohrlöchern sollte 50 - 100 m betragen.

Der Wärmetransport im Untergrund ist immer ein dreidimensionaler Prozess. Allerdings stellen die entlang des bereits ausgebrochenen Tunnels gemessenen Felstemperaturen nur einen eindimensionalen Datensatz dar. Daher sind durch die Tunneltemperaturen die räumliche Ausdehnung, die hydraulische Leitfähigkeit und die Randbedingungen von hydrologischen Einheiten grundsätzlich nicht eindeutig bestimmt, d.h. unterschiedliche wasserführende Zonen im Gebirge können dieselben Felstemperaturen im Tunnel erzeugen. Im Hinblick auf eine **Wahrscheinlichkeitsabschätzung des Wasserzuflusses vor der Ortsbrust** werden daher nur diejenigen Szenarien von wasserführenden Störzonen betrachtet, die einerseits die Tunnelachse vor der Ortsbrust queren und die andererseits Felstemperaturen in ausgebrochenen Tunnel erzeugen, die mit den bis dahin gemessenen Felstemperaturen übereinstimmen. Voraussetzung für die Verwendung der Felstemperatur als Parameter zur Vorerkundung ist, dass das Wasser in Störzonen eine hydraulische Verbindung zur Oberfläche aufweist, wodurch durch hydraulische Potenzialunterschiede ein advektiver Wärmetransportprozess in Gang gehalten wird. Die dazu angewandte Methodik wird in nachfolgendem Kapitel 2 "Methodik GDT" kurz erläutert; ausführlicher ist die Methodik in Mégel et al. (2005) behandelt.

3 Methodik GDT

Die Methodik GDT basiert auf der worst-case-Annahme, dass alle advektiven Wärmetransportprozesse im Gebirge (d.h. infolge Wasserzirkulation) durch eine wasserführende Störzzone vor der Ortsbrust verursacht werden. Es werden diejenigen wasserführenden Störzonen bestimmt, die zusammen mit dem umgebenden Gebirge im Tunnelabschnitt möglichst dieselben Felstemperaturen erzeugen wie die gemessenen Werte. Die Zuflussraten bei einer Durchörterung dieser ausgewählten Störzonen werden statistisch ausgewertet, wodurch sich eine Wahrscheinlichkeit einer bestimmten, zu erwartenden Schüttung im Beharrungszustand ergibt. Der häufigste Wert wird als der **wahrscheinlichste Wasserzufluss** für eine ausgewählte Position vor der Ortsbrust bezeichnet, das auf den gemessenen Felstemperaturen basiert.

3.1 Allgemeines Konzept GDT

Grundsätzlich kann die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses Q_P für unterschiedliche Positionen Pos x vor der Ortsbrust durchgeführt werden (vgl. Fig. 1). Pos x wird im Folgenden auch als Evaluationspunkt bezeichnet. Für jeden Evaluationspunkt wird eine Vielzahl von Störzonenmodelle mit unterschiedlicher Geometrie, Orientierung und Durchlässigkeit berechnet, wobei alle Störzonenmodelle den Tunnel immer in diesem Evaluationspunkt schneiden. Für jedes Störzonenmodell wird die dreidimensionale Temperaturverteilung berechnet.

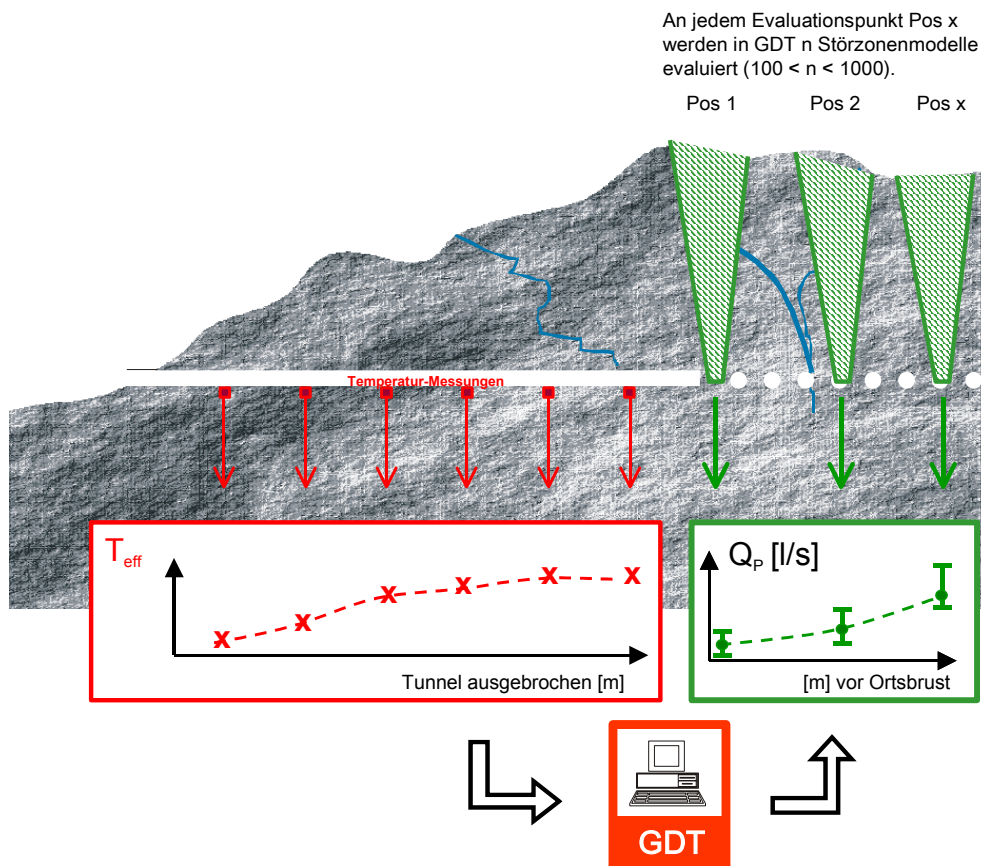


Fig. 1: Konzept GDT: An unterschiedlichen Positionen Pos x vor der Ortsbrust werden Störzonenmodelle berechnet, welche einen Temperatureffekt im Tunnel verursachen. Von denjenigen Störzonenmodellen, deren berechnete Tunneltemperatur mit den gemessenen Werten T_{eff} eine Übereinstimmung zeigen, werden die Schüttungen Q_P in Falle einer Durchörterung bestimmt und statistisch ausgewertet.

Im Allgemeinen kann erwartet werden, dass die Bandbreite der möglichen Schüttungen und der wahrscheinlichste Wert mit zunehmendem Abstand der Evaluationspunkte von der Ortsbrust grösser werden (Fig. 1), da die advektiven Prozesse mit zunehmendem Abstand geringere Temperaturvariationen verursachen. Dadurch können sehr unterschiedliche Störzonen ab einer gewissen Entfernung eine Übereinstimmung mit den gemessenen Felstemperaturen im Tunnel zeigen. Das heisst, dass sich die Unsicherheit in der Bestimmung der Schüttungsrate mit kleiner werdendem Abstand verringert. Dieser Zusammenhang ist im Vorläuferprojekt FGU2003-003 (Mégel et al, 2005) dargestellt.

Im vorliegenden Projekt wird die Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses an den Evaluationspunkten in Schritten von jeweils 500 m bestimmt. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Ortsbrust jeweils unmittelbar vor diesen Evaluationspunkten befindet. Bei Annäherung der Evaluationspunkte an eine effektive Störzone erhöht sich die berechnete Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses (Fig. 2).

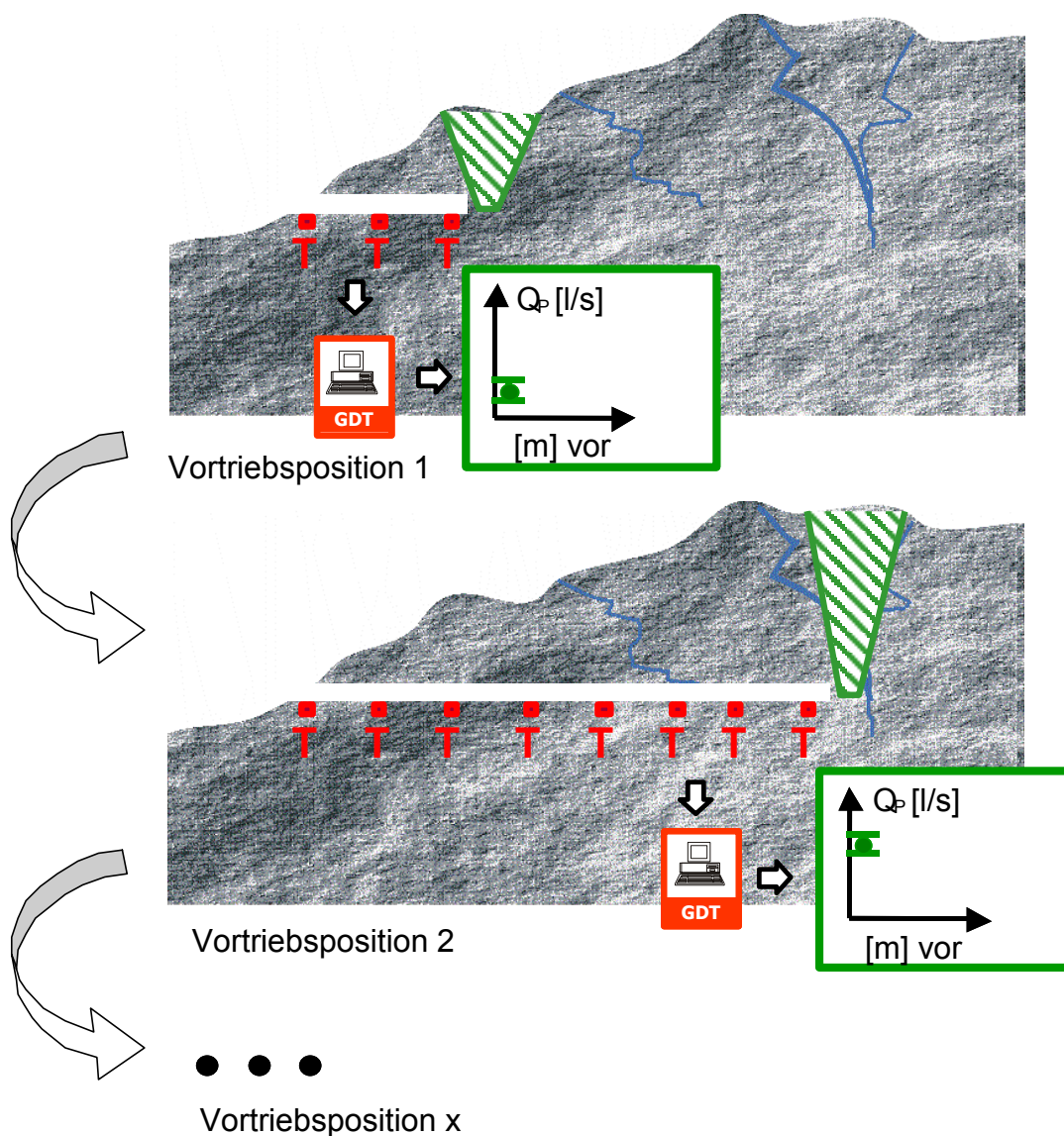


Fig. 2: Anwendung von GDT für Lötschberg-Basistunnel: Für verschiedene Vortriebspositionen wird die Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses Q_p berechnet. Bei Annäherung der Evaluationspunkte an eine effektive Störzone erhöht sich die berechnete Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses.

3.2 Anwendung der Methodik GDT

Die Anwendung der Methodik GDT besteht aus mehreren Schritten. Es kann zwischen einem numerischen und einem messtechnischen Teil unterschieden werden (Fig. 3). Der messtechnische Teil beinhaltet die Bestimmung der durch den Tunnelvortrieb ungestörten Felstemperatur. Das notwendige Vorgehen dazu ist in Kapitel 2.2 grob erläutert und wird hier nicht weiter behandelt.

Der numerische Teil besteht aus einer Kombination von hydraulischen und thermischen Fragestellungen. Deren Bearbeitung kann teils vor dem eigentlichen Vortrieb erfolgen; die eigentliche Analyse der Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses erfolgt dann laufend während des Vortriebs. Ein zentraler Teil dieser Analyse ist das Programm GDT, das in nachfolgendem Kapitel kurz erläutert wird.

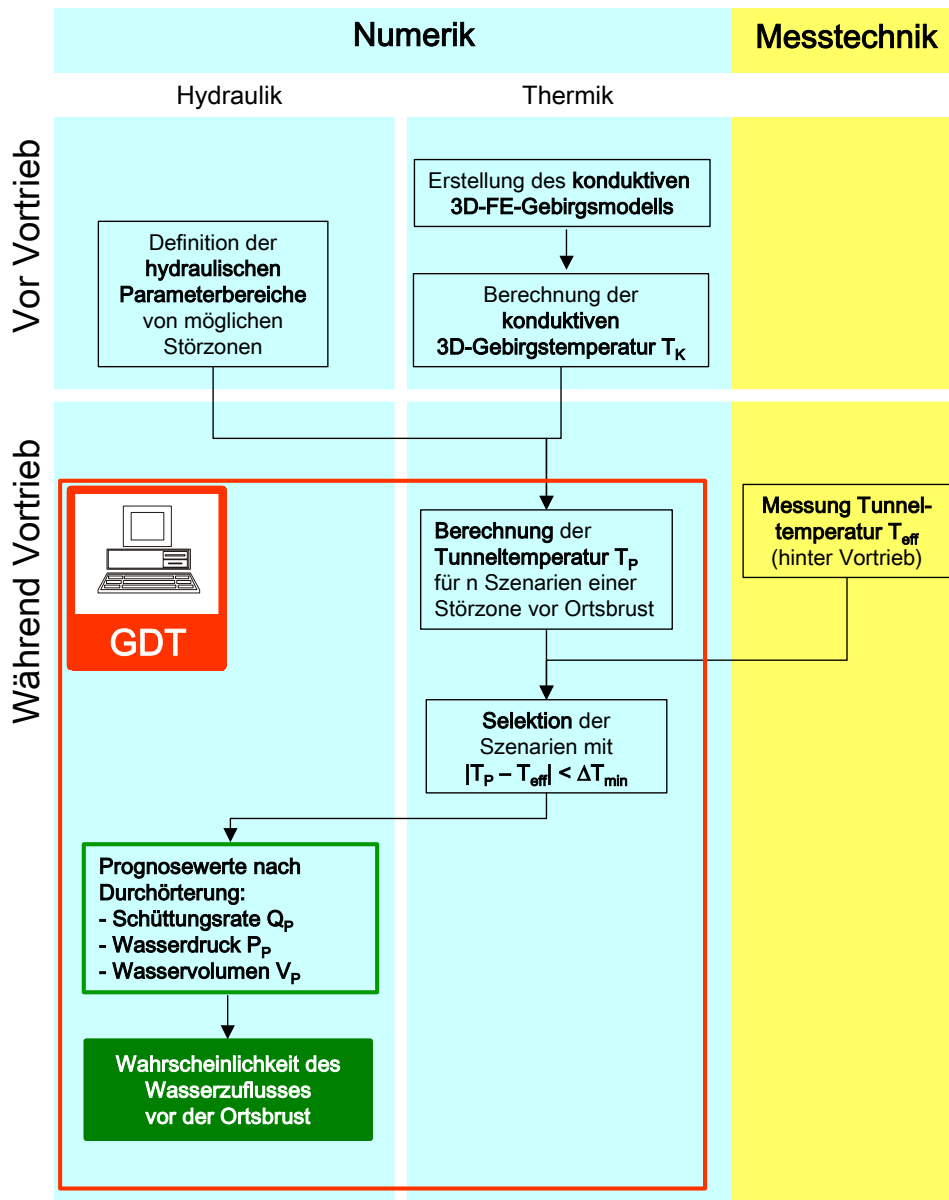


Fig. 3: Anwendungsschema der Methodik GDT.

3.3 Das Programm GDT

Der Wärmetransport im Untergrund – insbesondere der advective Anteil - ist grundsätzlich ein dreidimensionaler Prozess. Daher muss die von wasserführenden Störzonen vor der Ortsbrust beeinflusste Tunneltemperatur dreidimensional berechnet werden. Die Berechnung dieser dreidimensionalen, hydraulisch-thermisch gekoppelten Prozesse wird mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) durchgeführt. Dazu wird die Software FRACTure der GEO-WATT AG eingesetzt (Kohl und Hopkirk, 1995).

Zunächst wird ein 3D-FE-Gebirgsmodell erstellt und das konduktive 3D-Temperaturfeld berechnet. Danach werden die hydraulische Parameterbereiche für die wasserführenden Störzonen sowie die einzelnen Evaluationspunkte definiert. Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses läuft gemäss Fig. 4 vollautomatisch ab. Insbesondere die Generierung der verschiedenen dreidimensionalen FE-Lokalmodelle (Bsp. vgl Fig. 12) mit wasserführenden Störzonen ist automatisiert. Mit heutigen PC-Prozessoren können zukünftig über 1000 Störzonenmodelle an einer bestimmten Vortriebsposition innerhalb von 24 Stunden ausgewertet werden.

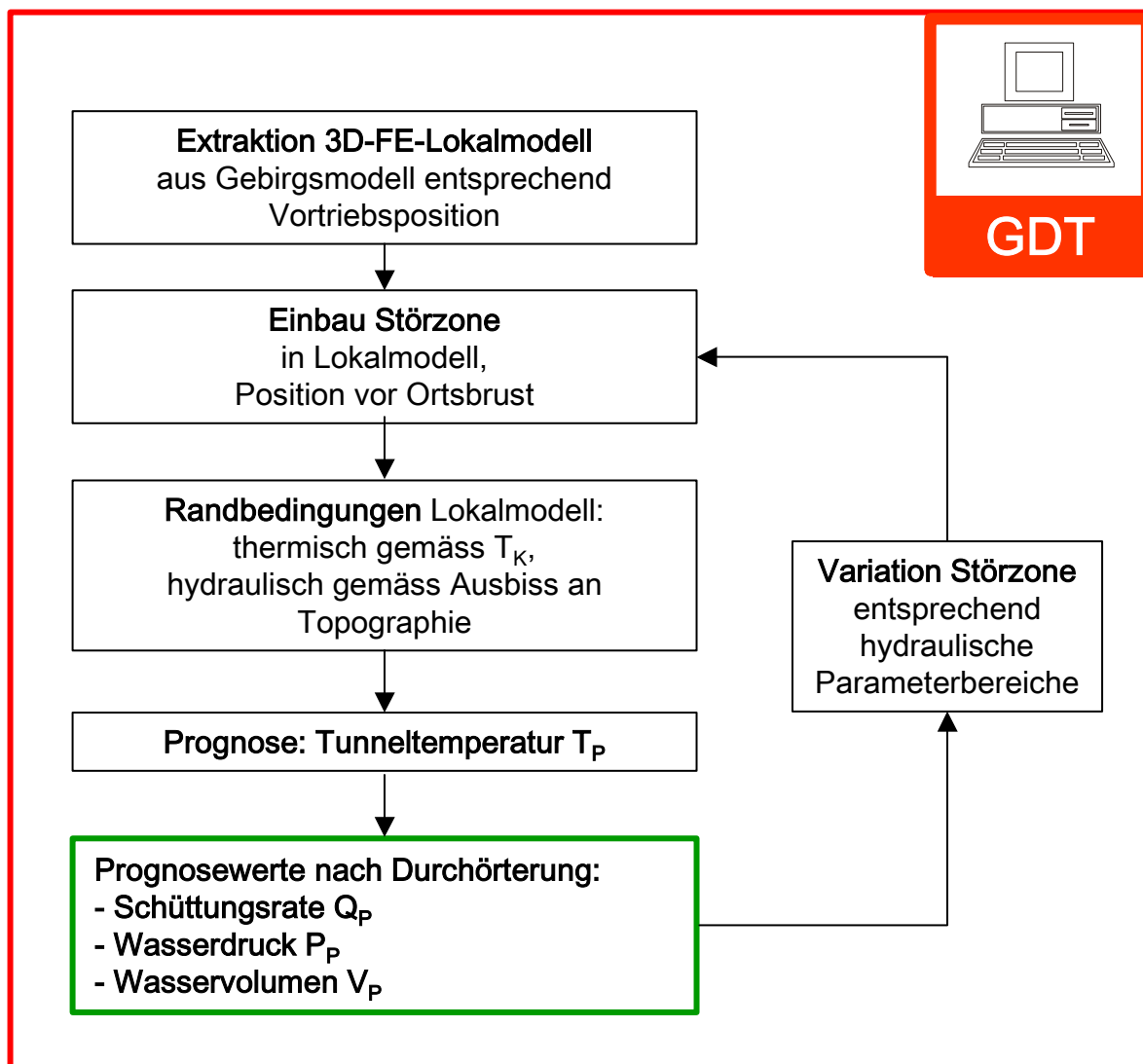


Fig. 4: Programm GDT: Flussdiagramm des automatischen Lokalmodellgenerators mit FEM-Solver für dreidimensionale, hydraulisch-thermisch gekoppelte Prozesse

4 Datengrundlage Vorerkundung

4.1 Allgemeines

Als Grundlage für den Testeinsatz von GDT anhand des Lötschberg-Basistunnels dienen ausschliesslich Daten und Messwerte, die aus Erkundungsmassnahmen vor Beginn des Vortriebes des Tunnels zur Verfügung standen. Auf die Berücksichtigung von zusätzlichen oder neuen Daten, welche während des Tunnelvortriebs gewonnen wurden, wird hier zur Beschränkung des Aufwandes verzichtet. Bei einem effektiven Einsatz von GDT würden neue Erkenntnisse selbstverständlich laufend mitberücksichtigt.

Die wichtigste Datengrundlage für die vorliegende Untersuchung ist der Bericht zur geologischen Vorerkundung von Kellerhals und Isler (1998). Darin ist die Geologie des Untersuchungsgebietes sowie ein geologisches Prognosemodell als vertikaler Längsschnitt entlang der Tunnelachse beschrieben. Mit Hilfe dieser geologischen Informationen wird ein 3D FE-Modell (= konduktives 3D-FE-Gebirgsmodell) erstellt, das die räumliche Verteilung der verschiedenen geologischen Einheiten des Untersuchungsgebietes möglichst genau wiedergibt.

Auf Grundlage dieses Gebirgsmodells wird die räumliche Gebirgstemperatur im gesamten Untersuchungsgebiet berechnet. Dabei wird ausschliesslich mit konduktivem Wärmetransport gerechnet, da das Konzept von GDT darin besteht, dass alle advektiven Wärmetransportprozesse explizit von einer wasserführenden Störzone vor der Ortsbrust herkommen. Die rein konduktiv berechnete Gebirgstemperatur wird an den Rändern der jeweiligen Lokalmodele mit Störzone als Temperaturrandbedingung gesetzt.

4.2 Thermische Datengrundlage

Für die Simulation von Gebirgstemperaturen ist eine möglichst genaue Kenntnis der thermischen Gesteinseigenschaften und Randbedingungen erforderlich. Die thermischen Gesteinseigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Wärmeproduktionsrate) wurden im Untersuchungsgebiet nicht gemessen, konnten aber anhand der Werte des Gotthard-Basistunnels abgeschätzt werden (vgl. Kapitel 5.1III). Wären keine Wärmeleitfähigkeitswerte vorhanden, so könnte diese an repräsentativen, unverwitterten Handstücken im Labor gemessen werden. Da alle Temperaturverhältnisse immer als stationäre Endzustände betrachtet werden, ist die spezifische Wärmekapazität des Gesteins nicht relevant.

Die Bodenoberflächentemperatur als Funktion der Höhe sowie der basale Wärmefluss im Lötschberggebiet sind für die Anwendung von GDT ausreichend bekannt (vgl. Kapitel 5.1II).

Generell empfiehlt es sich, das dreidimensionale Gebirgsmodell mit Temperaturmessungen aus Erkundungsbohrungen zu kalibrieren, insbesondere wenn die thermischen Verhältnisse (Wärmeleitfähigkeit, Wärmeproduktion, Wärmefluss) in einem Projektgebiet nur schlecht bekannt sind.

4.3 Hydraulische Datengrundlage

Für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit der Wasserführung vor der Ortsbrust ist die Kenntnis der räumlichen Orientierung (Streichen und Fallen) von Störzonen und Kluftsystemen erforderlich. Diese werden für die Definition der hydraulischen Parameterbereiche von GDT, innerhalb derer die Störzonenmodelle variiert werden, gebraucht. Hierüber liegen für diverse geologische Einheiten entsprechende Daten vor (Kellerhals und Isler, 1998).

5 Eingabedaten für GDT

5.1 Konduktives 3D-FE-Gebirgsmodell

Das konduktive 3D-FE-Gebirgsmodell ist so diskretisiert, dass die dreidimensionalen geologischen Strukturen der Vorerkundung in unmittelbarer Umgebung der Tunneltrasse so genau wie möglich wiedergegeben werden. Den unterschiedlichen geologischen Einheiten sind eine spezifische Wärmeleitfähigkeit und Wärmeproduktionsraten zugeordnet. An der Modelltopografie ist eine höhenabhängige Bodenoberflächentemperatur nach Signorelli (2004) definiert, an der Modellbasis ein basaler Wärmefluss.

I Verwendete Strukturelemente

Die Ausdehnung des konduktiven 3D-FE-Gebirgsmodells entspricht derjenigen der geologischen Karte des Untersuchungsgebietes (Fig. 6). In dieser Abbildung sind die im Untersuchungsgebiet anstehenden geologischen Einheiten und die horizontale Diskretisierung des FE-Gitters zu erkennen. Für die Modellierung der Gebirgstemperatur sind alle in Fig. 6 dargestellten geologischen Einheiten mit Ausnahme der quartären Ablagerungen sowie der Tavayannaz-Serie und der Gellihorn-Decke berücksichtigt. Zuletzt genannte Einheiten sind entweder zu kleinräumig oder zu weit von der Tunnelachse entfernt, sodass eine Berücksichtigung dieser Elemente im konduktiven 3D-FE-Gebirgsmodell nicht erforderlich ist.

Der mittlere laterale Abstand der einzelnen Knotenpunkte des FE-Gitters beträgt etwa 350 m. Dieser Gitterabstand ist für die Nachbildung der Gebirgsoberfläche sowie der räumlichen Struktur der schräg einfallenden geologischen Strukturen im Bereich der Tunneltrasse ausreichend (Fig. 7). Kleinräumige Strukturen, wie z.B. der Jungfraukeil, wurden jedoch nicht aufgelöst.

Das 3D-FE-Gebirgsmodell ist in Fig. 5 dargestellt.

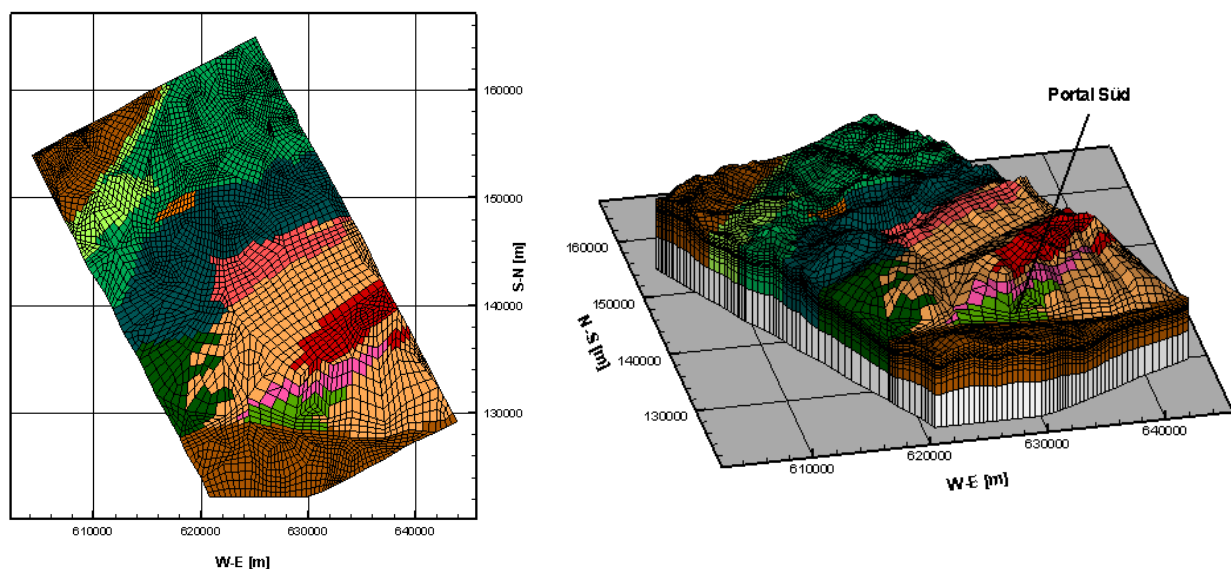


Fig. 5: Konduktives 3D-FE-Gebirgsmodell entlang der Tunneltrasse, links: Aufsicht, rechts: Blockansicht (Farbsignatur vgl Fig. 6)

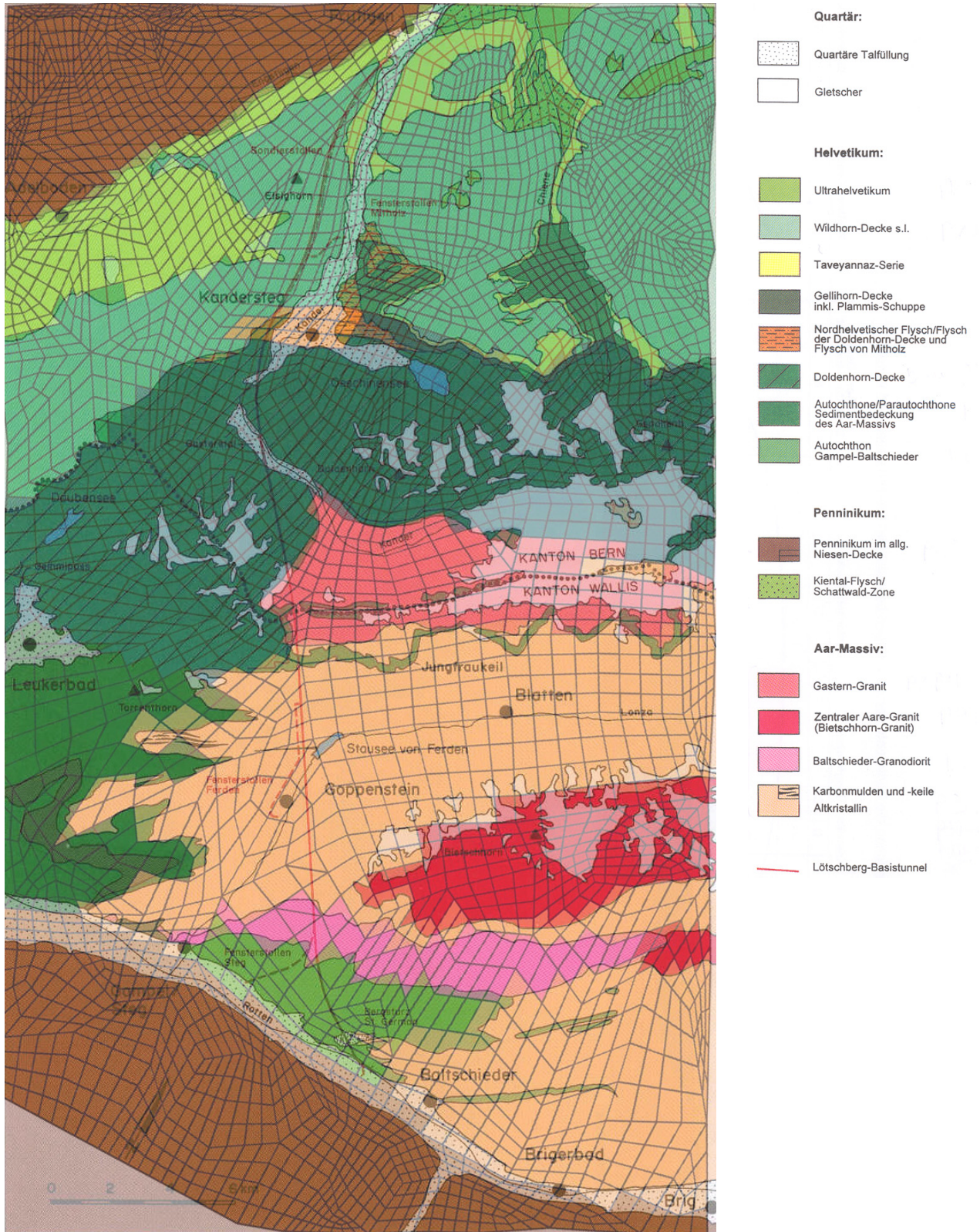


Fig. 6: FE Gitter des konduktiven 3D-FE-Gebirgsmodells und geologisch-tektonische Übersicht mit eingetragem Trasseverlauf des Lötschberg-Basistunnels (verändert nach Kellerhals und Isler, 1998)

II Thermische Randbedingungen

Der vertikale Wärmefluss q wurde aus der Geothermischen Karte der Schweiz (1995) entnommen. Dieser Wert beträgt für das Gebiet um den Lötschberg-Basistunnel $q = \sim 60 - 70 \text{ mW/m}^2$.

Die mittlere Bodenoberflächentemperatur T_S in Abhängigkeit von der Höhe z [m.ü.M.] beträgt (Signorelli, 2004):

$$T_S = 11.42 \text{ °C} - z \times 0.0032 \text{ °C/m}$$

Dieser Zusammenhang gilt für Höhenlagen von 1000 – 1700 m. Unterhalb dieses Bereiches werden die Temperaturrandbedingungen geringfügig überschätzt, oberhalb kann der Einfluss von Schneelagen zu einer Unterschätzung führen. Da jedoch nur ein sehr kleiner Teil des untersuchten Gebietes unterhalb 1000 m Höhe liegt, ist für tiefere Lagen der hierdurch entstehende Fehler vernachlässigbar. Aufgrund der grossen Distanz zur Oberfläche des Tunnels zu Bereichen oberhalb 1700 m (Überdeckung $> 900 \text{ m}$) ist für höhere Lagen von einem geringen Effekt auszugehen. Fig. 8 zeigt die Bodenoberflächentemperatur des konduktiven 3D-FE-Gebirgsmodells, die in den Berechnungen als Randbedingung an der Modelltopografie definiert ist.

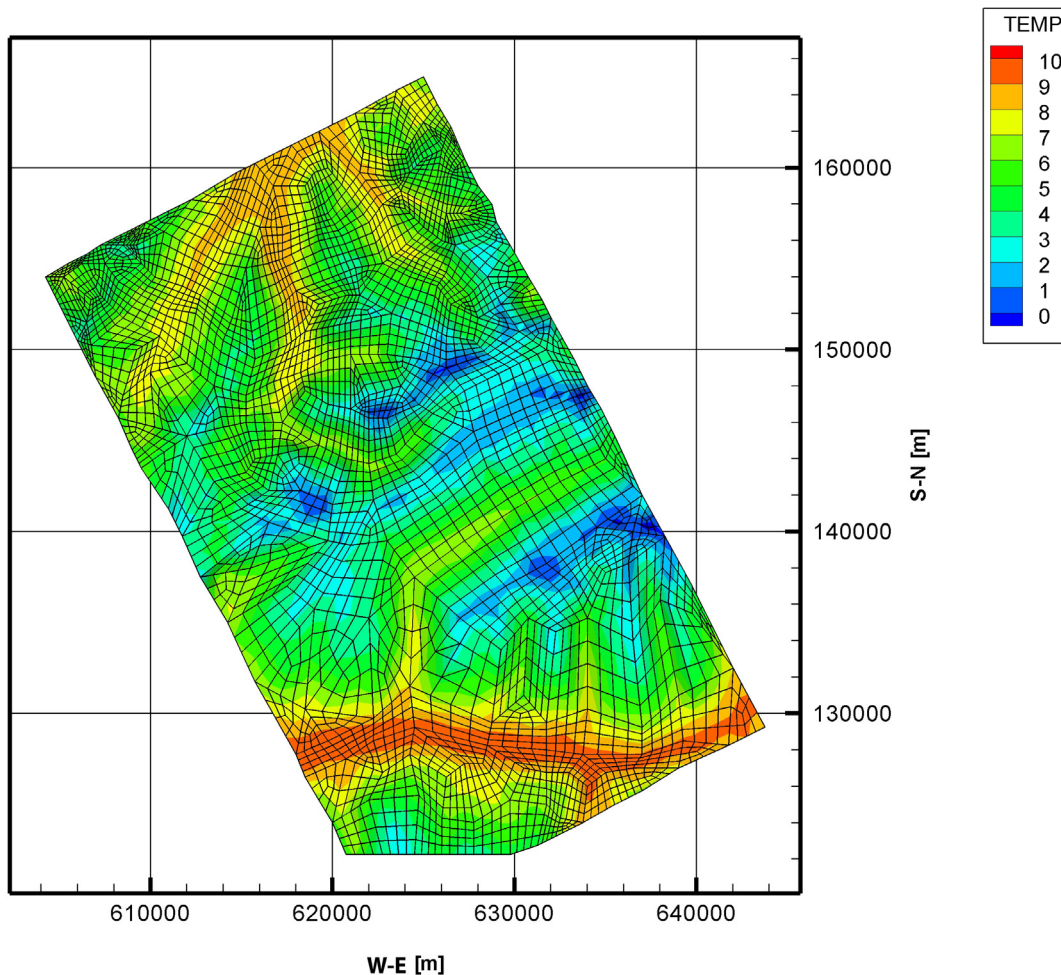


Fig. 8: Bodenoberflächentemperatur des konduktiven 3D-FE-Gebirgsmodells (Randbedingung an der Modelltopografie)

III Thermische Gesteinseigenschaften

Die thermischen Eigenschaften der Gesteine (Wärmeleitfähigkeit, Wärmeproduktion) wurden im Lötschbergtunnel-Gebiet nicht gemessen. Für eine Schätzung dieser Werte wurden die Resultate von den Untersuchungen der Gebirgstemperatur beim Gotthard-Basistunnel übernommen. In dem Bericht "Revidierte Felstemperaturprognose für den Gotthard-Basistunnel auf der Basis neuer Temperatur- und Geologiedaten" (Geowatt, 2005) sind die thermischen Eigenschaften von Gesteinen bestimmt, die auch im Lötschberg-Gebiet anstehen. Die massiven Gesteine des Aar-Massivs besitzen Wärmeleitfähigkeiten bis etwa $3.7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ und hohe Wärmeproduktionsraten von $4.5 \mu\text{W/m}^3$. Die thermischen Eigenschaften der übrigen Gesteine im Lötschberg-Gebiet, überwiegend Sedimente und Flysch, sind Schätzwerte basierend auf Schärli und Kohl (2002). Im Schnitt besitzen solche Gesteine geringere Wärmeleitfähigkeiten und Wärmeproduktionsraten als kristalline Gesteine. In Tab. 1 sind die thermischen Gesteinseigenschaften der geologischen Einheiten im konduktiven 3D-FE-Gebirgsmodell zusammengefasst.

Tab. 1: Wärmeleitfähigkeiten und Wärmeproduktion des konduktiven 3D-FE-Gebirgsmodells

Geologische Einheit	Wärmeleitfähigkeit [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$]	Wärmeproduktion [10^{-6} W/m^3]
Gastern-Granit	3.0	4.5
Gastern-Granit (H)	3.7	4.5
Karbon-Altkristallin	3.7	4.5
Zentraler Aare-Granit	3.7	4.5
Baltschieder-Granodiorit	3.0	4.5
Pennikum Niessen-Decke	3.0	4.0
Autochton Gampel-Baltschieder	2.5	2.0
Sedimente des Aar-Massivs	2.5	2.0
Doldenhorn-Decke	3.0	0.5
Wildhorn-Decke	3.0	2.0
Ultrahelvetikum	2.5	2.0
Doldenhorn-Flysch	2.5	0.5
Karbon-Altkristallin (H)	3.0	4.5
Zentraler Aare-Granit (H)	3.0	4.5
Sedimente des Aar-Massivs (H)	2.0	2.0
Doldenhorn-Decke (H)	2.0	2.0
Flysch ungeklärter Stellung	2.5	2.0
Modellbasis	3.0	4.5

IV Bewertung des konduktiven 3D-FE-Gebirgsmodells

Mit den oben definierten Randbedingungen und thermischen Gesteinseigenschaften wird eine stationäre, rein konduktive Gebirgstemperatur berechnet, die für die Definition der Temperatur an den Lokalmodellrändern benötigt wird. Dies ist das Grundkonzept der GDT-Methodik, das davon ausgeht, dass alle advektiven Wärmetransportprozesse ausschliesslich innerhalb des Lokalmodells stattfinden. Für eine Bewertung der gewählten Parameter des konduktiven 3D-FE-Gebirgsmodells werden die damit berechneten Temperaturen mit den gemessenen Temperaturdaten aus den folgenden vier Erkundungsbohrungen (Lokation s. Fig. 9) verglichen:

- Gasteretal
- Kandersteg
- Oeschinensee
- Almenalpbahn

In Fig. 10 sind die gemessenen Temperaturen aus diesen maximal 600 m tiefen Erkundungsbohrungen den rein konduktiv berechneten Ergebnissen gegenübergestellt. Die Almenalpbahn-Bohrung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Temperaturen. In der Gasteretal-Bohrung ist im tiefsten Abschnitt ($z > 500$ m) eine gute Übereinstimmung zu erkennen. Die beiden anderen Bohrungen, Kandersteg und Oeschinensee, zeigen grosse Abweichungen zwischen Messung und Simulation. Die geringe Zunahme der gemessenen Temperatur mit der Tiefe in diesen beiden Bohrungen lässt auf eine abwärts gerichtete Strömung von kälterem Grundwasser schliessen. Da alle vier Bohrungen in den tendenziell hochdurchlässigen Kalken der Doldenhorn-Decke liegen, sind solche Szenarien wahrscheinlich. Die Parameter des konduktiven 3D-FE-Gebirgsmodells sind plausibel.

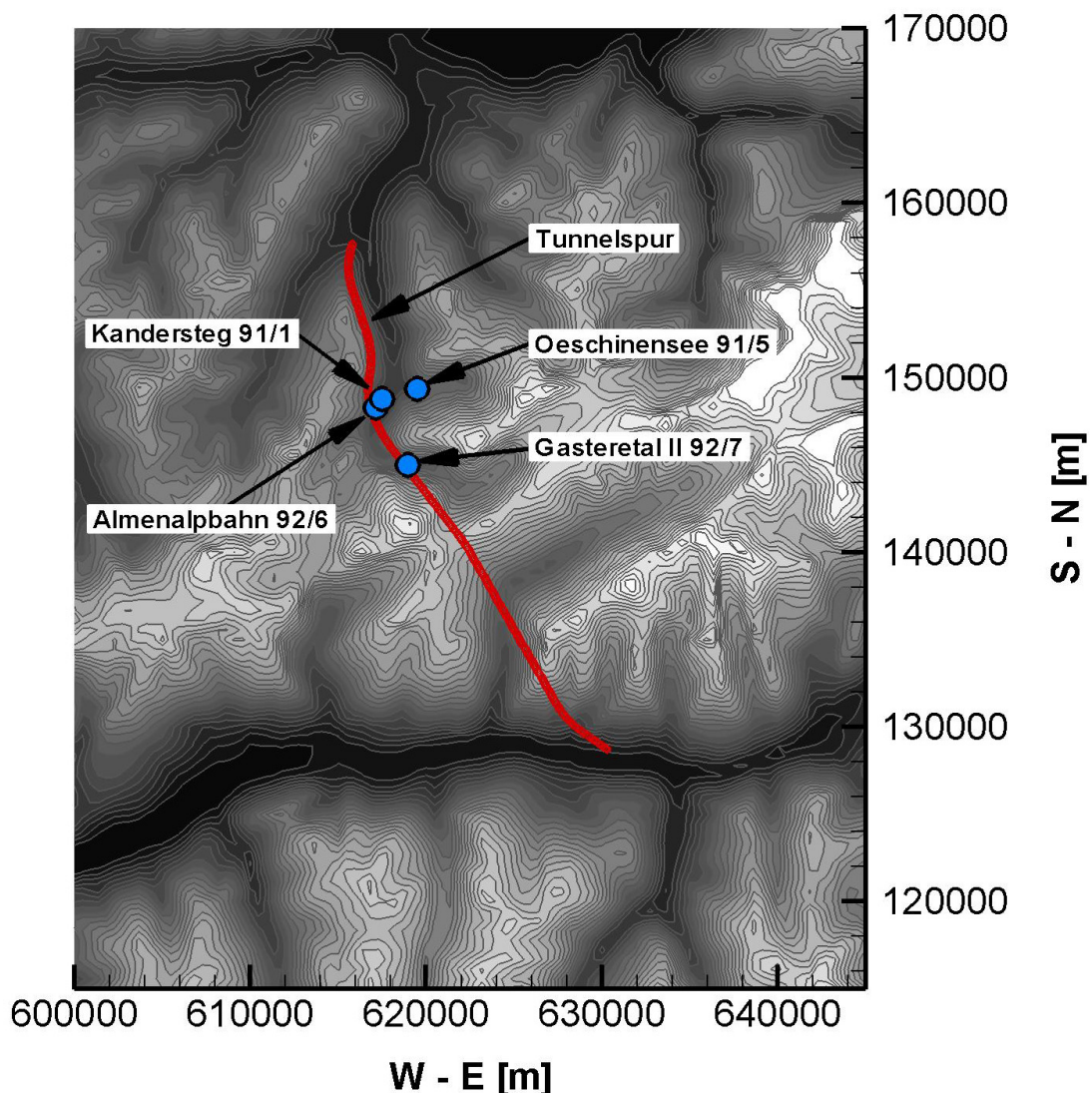


Fig. 9: Topographie des Untersuchungsgebietes. Tunnelspur (rote Linie) und Bohrungen (blaue Punkte) im Lötschberg-Gebiet.

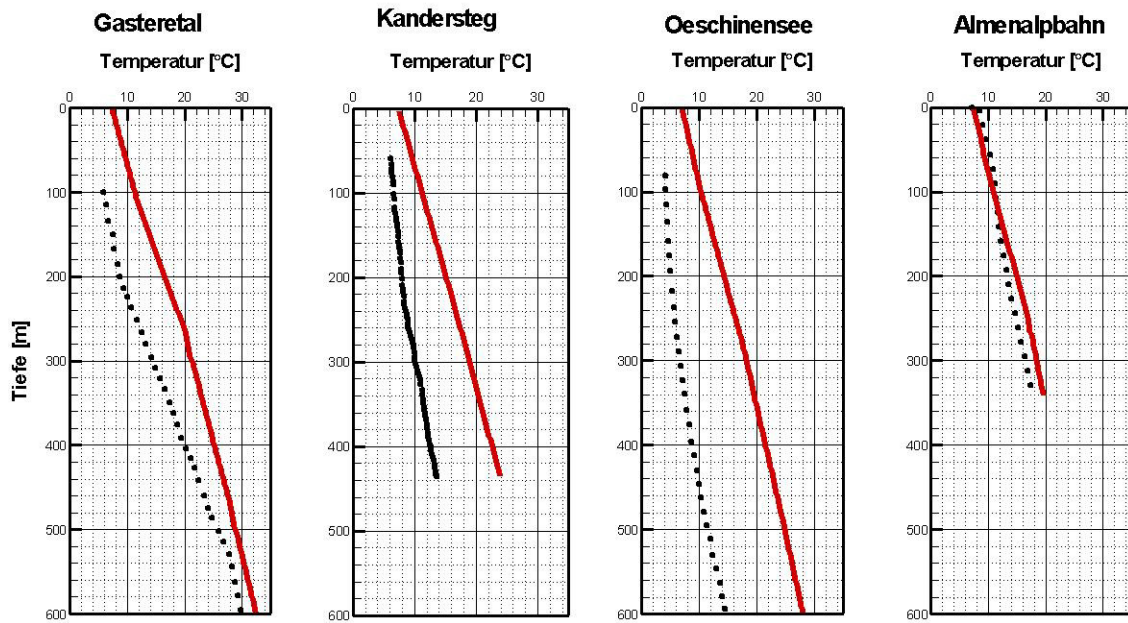


Fig. 10: Vergleich gemessene (schwarze Punkte) und rein konduktiv berechnete Fels-temperatur (rote Linien) in den vier Bohrungen Gasteretal, Kandersteg, Oeschinensee und Almenalpbahn.

Die Existenz von bedeutenden hydraulischen Wegsamkeiten mit advektivem Wärmetransport lässt auch Fig. 11 vermuten. Darin sind entlang der geplanten Tunnelspur die während des Tunnelvortriebs gemessenen Felstemperaturen und die rein konduktiv berechnete Gebirgstemperatur eingezeichnet. Es zeigen sich abschnittsweise erhebliche Unterschiede. Insbesondere treten im Bereich der Wildhorn-Decke sowie der Doldenhorn-Decke (bei 7'500 m < TM < 15'500 m) grössere Abweichungen bis zu 10 °C auf.

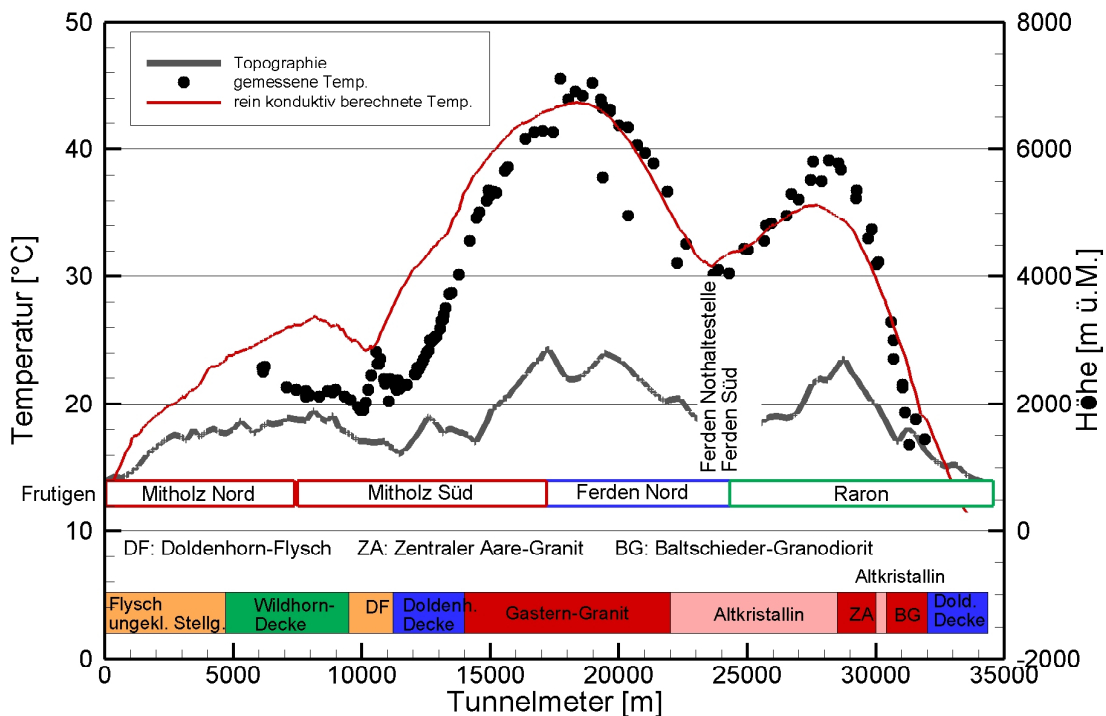


Fig. 11: Vergleich gemessener (schwarze Punkte) und rein konduktiv berechnete Fels-temperatur (rote Linien) entlang der Tunneltrasse. Eingezeichnet sind auch die Tunnelbauabschnitte sowie die Geologie.

5.2 Hydraulische Parameterbereiche für GDT

Tab. 2 fasst die räumliche Orientierung der in verschiedenen geologischen Einheiten gemessenen Kluftsysteme und Störzonen aus Kellerhals und Isler (1998) zusammen. Kellerhals und Isler (1998) vermuten, dass insbesondere die Kalke der Doldenhorndecke stark wasserführend sind und in diesem Streckenabschnitt mit dem höchsten Wasserzufluss zu rechnen ist.

Tab. 2: Störzonen und Kluftsysteme (nach Kellerhals und Isler 1998).

Geologische Einheit		Streichen s	Einfallen e
Flysch (ungeklärter Stellung)	Kluftschar 1 (Hauptkluftsystem)	135	90
	Kluftschar 2	45 - 160	stark variierend
	Kluftschar 3 (Talklüfte)	90	steil
	Scherzonen und Ver- schiebungsflächen	45	flach bis steil
Doldenhorn Decke		22.5	15 – 30
Aar-Massiv Altkristallin	Kluftschar 1 (Hauptkluftsystem)	135	steil - 90
	Kluftschar 2	45	steil - 90
	Kluftschar 3	67.5 - 90	25 - 90
	Schieferung	22.5 – 45	45 - 85
Aar-Massiv Gastern-Granit	Klüftung	0 – 45	Mittelsteil - steil
	Struktur	22.5	40 - 60
Zentraler Aare-Granit	Klüftung	wie Altkristallin	
	Schieferung	unvollständig	

Bei der GDT-Methode wird für jede definierte Position auf der Tunnelspur (Evaluationspunkte) ein zylinderförmiges Lokalmodell entsprechend dem 3D-FE-Gebirgsmodell erstellt (Fig. 12). Die Achse des zylinderförmigen Lokalmodells entspricht der Normalen der Störzone, welche den Evaluationspunkt streicht. Die Störzone liegt genau in der Mitte des zylinderförmigen Lokalmodells. Für die räumliche Lage der Störzonen werden die in Tab. 2 aufgelisteten Werte verwendet.

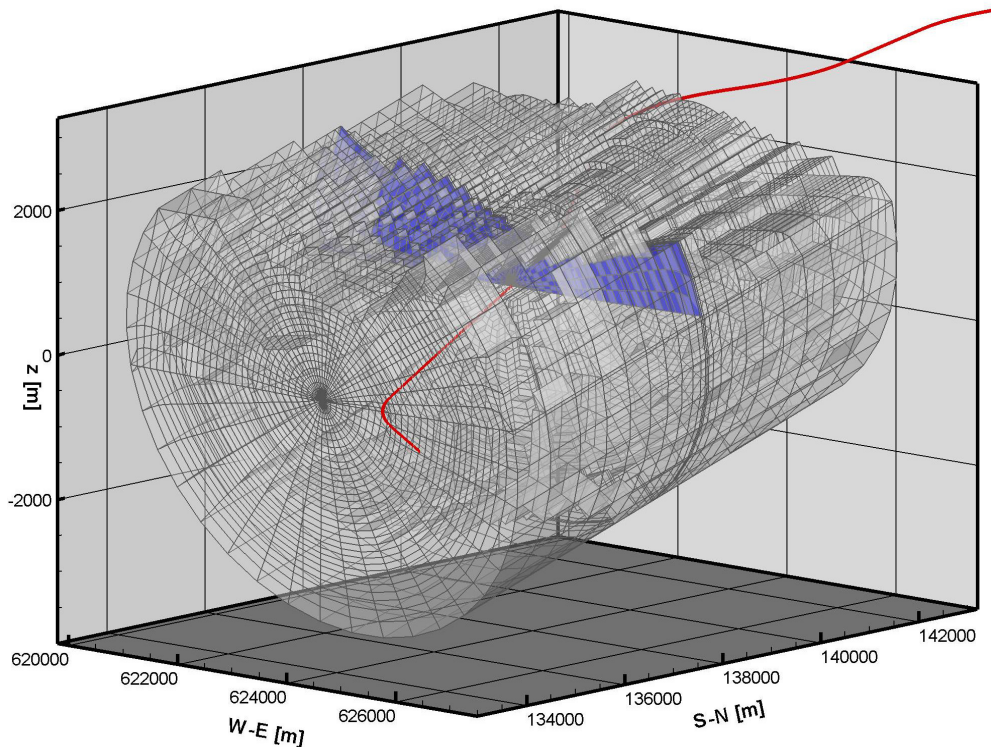


Fig. 12: Zylinderförmiges Lokalmmodell, erstellt entsprechend dem 3D-FE-Gebirgsmodell. Die blaue Fläche definiert eine Störzone, deren Normale mit der Zylinderachse und mit dem Mittelpunkt des Zylinders zusammenfällt. Die rote Linie stellt die Tunnelspur dar.

Die Orientierung der Störzone in den einzelnen Lokalmodellen variiert dabei zwischen den maximalen und minimalen Werten für das Streichen bzw. Fallen. Im "Flysch ungeklärter Stellung" werden beispielsweise 3 verschiedene Kluftsysteme mit unterschiedlicher Gewichtung und grossen Schwankungsbreiten genannt (Tab. 2). In den Lokalmodellen wird zwischen den Klassentypen der Störzonen und Klüfte nicht differenziert, sondern der gesamte Wertebereich der Orientierung verwendet, in diesem Fall Streichen von $45 - 160^\circ$ und Einfallen von $15 - 90^\circ$.

Für jede geologische Einheit werden so die spezifischen Wertebereiche für das Streichen und Einfallen der Störungen definiert.

Die hydraulische Durchlässigkeit der Störzone in den Lokalmodellen wird jeweils in 5 Schritten von 10^{-4} bis 10^{-6} m/s variiert. Ihre Mächtigkeit wird auf 1 m gesetzt, was als typischer Wert für Störungen im Lötschberg-Gebiet angenommen wird (Kellerhals und Isler, 1998). Damit entsprechen die Werte für die hydraulischen Leitfähigkeiten der Störzonen auch gleich ihrer Transmissivitäten. Ausserhalb der Störzone ist die hydraulische Leitfähigkeit der Gesteinsmatrix auf Null gesetzt, wodurch in der Gesteinsmatrix nur reine Wärmeleitung auftritt und der ganze advective Wärmetransport in der Störzone stattfindet, was einem worst-case Szenario entspricht.

5.3 In GDT verwendeter Satz von Störzonen-Modellen

In Fig. 13 ist eine kleine Auswahl von unterschiedlichen Störzonen-Typen dargestellt, die mit GDT automatisch als 3D-FE-Lokalmmodell erstellt werden können. Die beiden Störzonen in der Abbildung rechts oben stellen den allgemeinen Fall dar (durchgehende Kluftfläche). Für die vorliegende Untersuchung wird ausschliesslich dieser "rechteckige" Störungstyp verwen-

det. Wären aus der Vorerkundungsphase Informationen oder Vermutungen zu einer davon abweichenden Geometrie vorhanden, so würde man in GDT auch einschränkende Geometrien evaluieren lassen.

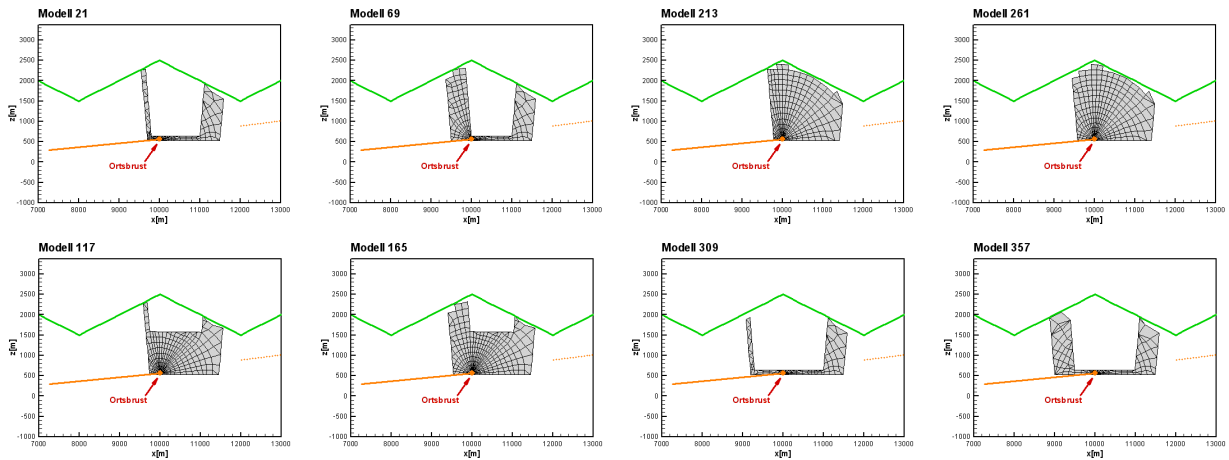


Fig. 13: Auswahl von verschiedenen Typen von Störzonenmodellen. In der vorliegenden Untersuchung wird ausschliesslich der durchgehende "rechteckige" Störungstyp (die beiden Abbildungen oben rechts) verwendet (aus Mégel et al, 2005).

Als Beispiel zeigt Fig. 14 ein Satz von Störzonenmodellen am Evaluationspunkt TM 35'045 m (Tunnelmeter) im Gastern-Granit. Die einzelnen Störzonen besitzen eine rechteckige Grundform, die an der oberen Begrenzung an die jeweilige Topographie angepasst ist. Die untere Begrenzungen der Störungen liegen unmittelbar unterhalb des Tunnelniveaus. Zu erkennen sind die 5 variierten Streichrichtungen, sowie die jeweils 5 Einfallswinkel.

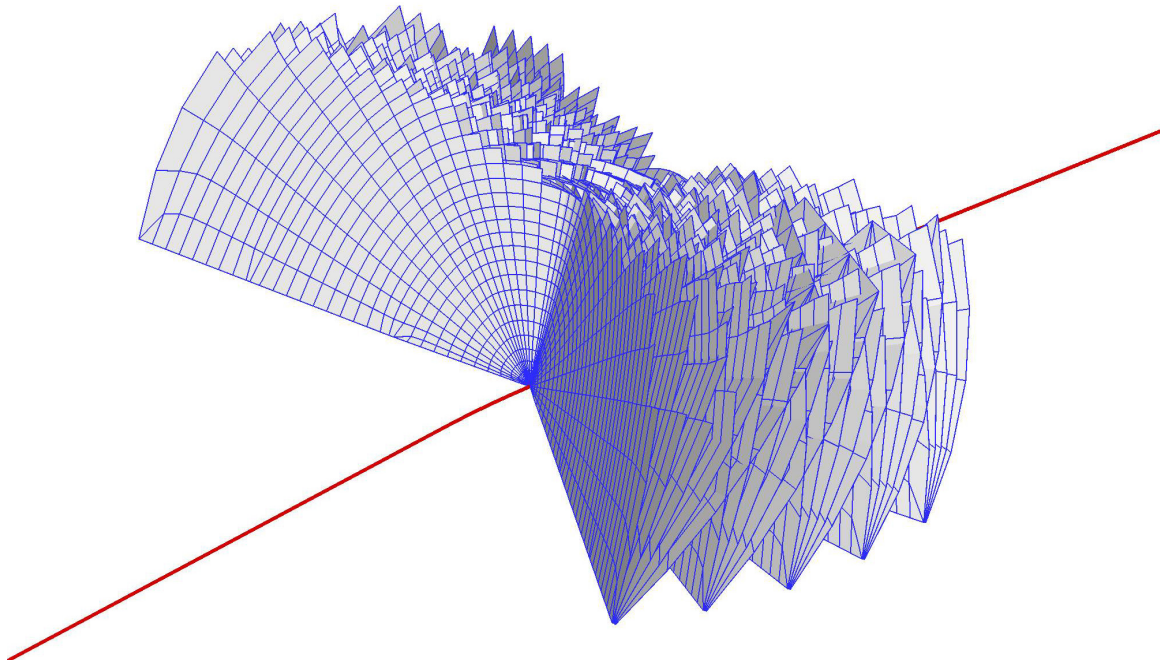


Fig. 14: Satz von Störzonen im Gastern-Granit bei Tunnelmeter TM 20'500 m. (rote Linie: Tunnelspur)

6 Prognose der Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses mit GDT und Vergleich mit Befund

6.1 Allgemeines Vorgehen

Der Einfachheit halber wird für die vorliegende Evaluation der GDT-Methodik ein durchgehender Vortrieb von Norden nach Süden angenommen. Diese Abweichung von den effektiven Vortriebsarbeiten hat keinen Einfluss auf die Aussagekraft dieser Evaluation. Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses mit GDT wurde für die Vortriebspositionen vorgenommen, ab denen Felstemperaturmessungen vorhanden sind.

Insgesamt werden an den 53 Evaluationspunkten im Abstand von 500 m (Fig. 15) je 150 Lokalm Modelle berechnet (wie in Fig. 12 dargestellt), die sich aus einer Kombination von 5 Werten für das Streichen, 5 Werten für das Einfallen und 6 Werten für die hydraulische Leitfähigkeit zusammensetzen. Die Geometrie der Störzone wird nicht variiert (vgl. Kapitel 5.3).

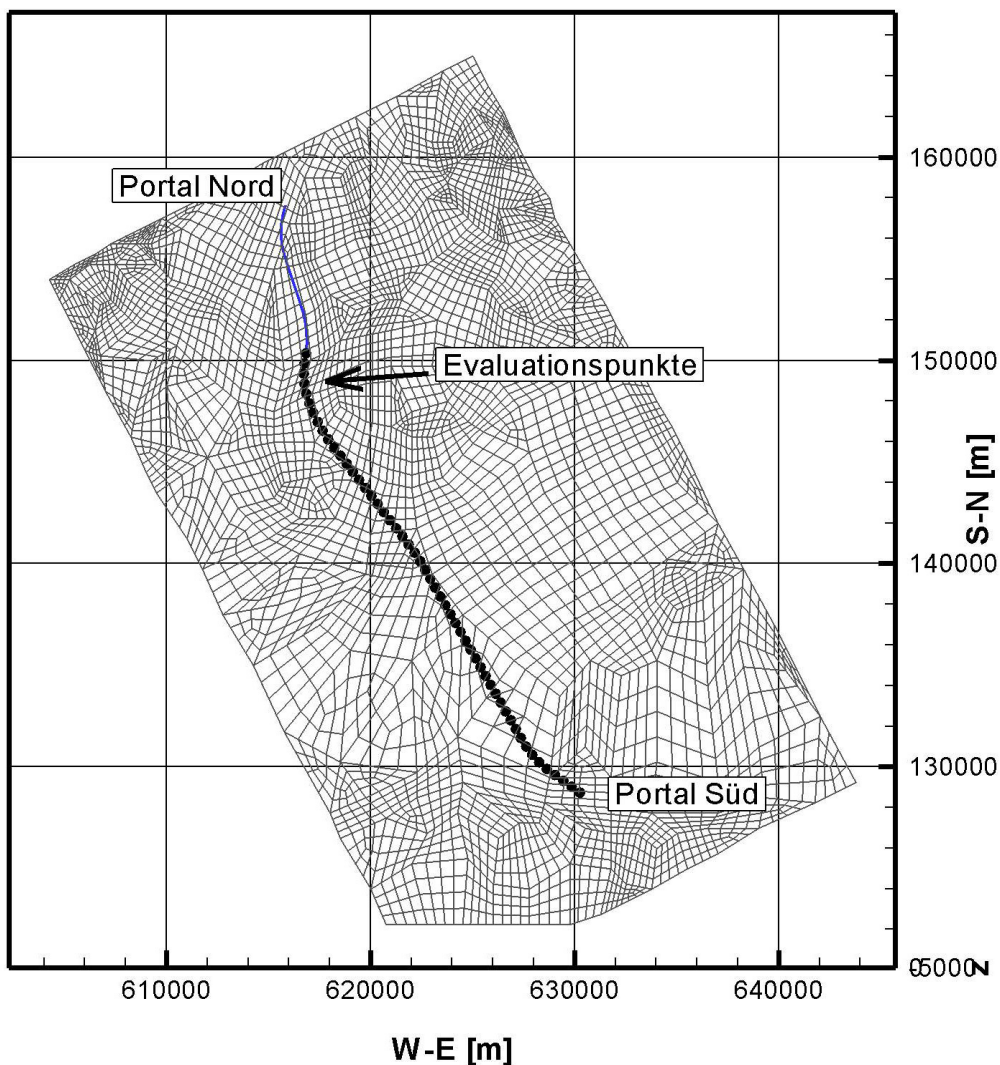


Fig. 15: Die 53 Evaluationspunkte (schwarz) auf der Tunnelspur, für die mit dem GDT-Methode jeweils die Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses unmittelbar vor der Ortsbrust evaluiert wurde.

In Tab. 3 sind alle verwendeten GDT-Parameter für jede der 53 Vortriebspositionen (=Evaluationspunkt) aufgelistet. Die Fig. 16 bis Fig. 18 demonstrieren das Vorgehen von GDT am Evaluationspunkt TM 12'000 m.

Tab. 3: GDT-Parameter für jede simulierte Vortriebsposition.

TM [m]	x [m]	y[m]	z [m]	Geologische Einheit	Streichen		Einfallen	
					min	max	min	max
8500.0	616821.3	150369.3	809.5	Wildhorn-Decke	0	180	0	75
9000.0	616745.2	149875.1	811.0	Wildhorn-Decke	0	180	0	75
9500.0	616712.9	149376.5	812.5	Wildhorn-Decke	0	180	0	75
10000.0	616743.0	148877.7	814.0	Wildhorn-Decke	0	180	0	75
10500.0	616835.1	148386.6	815.5	Wildhorn-Decke	0	180	0	75
11000.0	616986.4	147910.3	817.0	Doldenhorn-Flysch	0	45	15	45
11500.0	617174.3	147447.1	818.5	Doldenhorn-Flysch	0	45	15	45
12000.0	617390.9	146996.5	820.0	Doldenhorn-Flysch	0	45	15	45
12500.0	617635.1	146560.3	821.5	Doldenhorn-Decke	0	45	15	45
13000.0	617906.2	146140.2	823.0	Doldenhorn-Decke	0	45	15	45
13500.0	618202.2	145737.3	824.5	Doldenhorn-Decke	0	45	15	45
14000.0	618505.5	145339.9	826.0	Doldenhorn-Decke	0	45	15	45
14500.0	618808.9	144942.4	827.5	Doldenhorn-Decke	0	45	15	45
15000.0	619112.2	144544.9	825.5	Doldenhorn-Decke	0	45	15	45
15500.0	619415.6	144147.5	820.4	Gastern-Granit	0	45	45	75
16000.0	619718.9	143750.0	815.2	Gastern-Granit	0	45	45	75
16500.0	620022.2	143352.5	810.1	Gastern-Granit	0	45	45	75
17000.0	620325.5	142955.0	804.9	Gastern-Granit	0	45	45	75
17500.0	620628.9	142557.5	799.8	Gastern-Granit	0	45	45	75
18000.0	620932.2	142160.1	794.6	Gastern-Granit	0	45	45	75
18500.0	621235.6	141762.6	789.5	Gastern-Granit	0	45	45	75
19000.0	621538.9	141365.1	784.3	Gastern-Granit	0	45	45	75
19500.0	621842.3	140967.7	779.2	Gastern-Granit	0	45	45	75
20000.0	622138.4	140564.9	774.0	Gastern-Granit	0	45	45	75
20500.0	622409.6	140144.9	768.9	Gastern-Granit	0	45	45	75
21000.0	622658.5	139711.3	763.7	Gastern-Granit	0	45	45	75
21500.0	622904.9	139276.2	758.6	Gastern-Granit	0	45	45	75
22000.0	623151.2	138841.1	753.4	Gastern-Granit	0	45	45	75
22500.0	623397.6	138406.0	748.3	Gastern-Granit	0	45	45	75
23000.0	623644.0	137970.9	743.1	Gastern-Granit	0	45	45	75
23500.0	623890.3	137535.8	738.0	Altkristallin	45	135	25	75
24000.0	624136.7	137100.7	732.8	Altkristallin	45	135	25	75
24500.0	624383.1	136665.7	727.6	Altkristallin	45	135	25	75
25000.0	624629.4	136230.6	722.5	Altkristallin	45	135	25	75
25500.0	624875.8	135795.5	717.3	Altkristallin	45	135	25	75
26000.0	625122.2	135360.4	712.2	Altkristallin	45	135	25	75
26500.0	625368.5	134925.3	707.0	Altkristallin	45	135	25	75
27000.0	625614.9	134490.2	701.9	Altkristallin	45	135	25	75
27500.0	625861.3	134055.1	696.7	Altkristallin	45	135	25	75
28000.0	626107.7	133620.0	691.6	Altkristallin	45	135	25	75
28500.0	626354.0	133184.9	686.4	Altkristallin	45	135	25	75
29000.0	626600.3	132749.8	681.3	Altkristallin	45	135	25	75
29500.0	626846.7	132314.7	676.1	Altkristallin	45	135	25	75
30000.0	627093.1	131879.7	671.0	Zentraler Aare-Granit	45	135	25	75
30500.0	627339.4	131444.6	668.4	Zentraler Aare-Granit	45	135	25	75
31000.0	627598.8	131019.3	666.9	Zentraler Aare-Granit	45	135	25	75
31500.0	627898.2	130617.1	665.4	Altkristallin	45	135	25	75
32000.0	628236.1	130248.8	663.9	Baltschieder-Granodiorit	45	135	25	75
32500.0	628609.1	129916.2	662.4	Baltschieder-Granodiorit	45	135	25	75
33000.0	629011.2	129619.2	660.9	Baltschieder-Granodiorit	45	135	25	75
33500.0	629419.1	129330.0	659.4	Baltschieder-Granodiorit	45	135	25	75
34000.0	629827.0	129040.8	657.8	Baltschieder-Granodiorit	45	135	25	75
34500.0	630235.0	128751.8	654.9	Baltschieder-Granodiorit	45	135	25	75

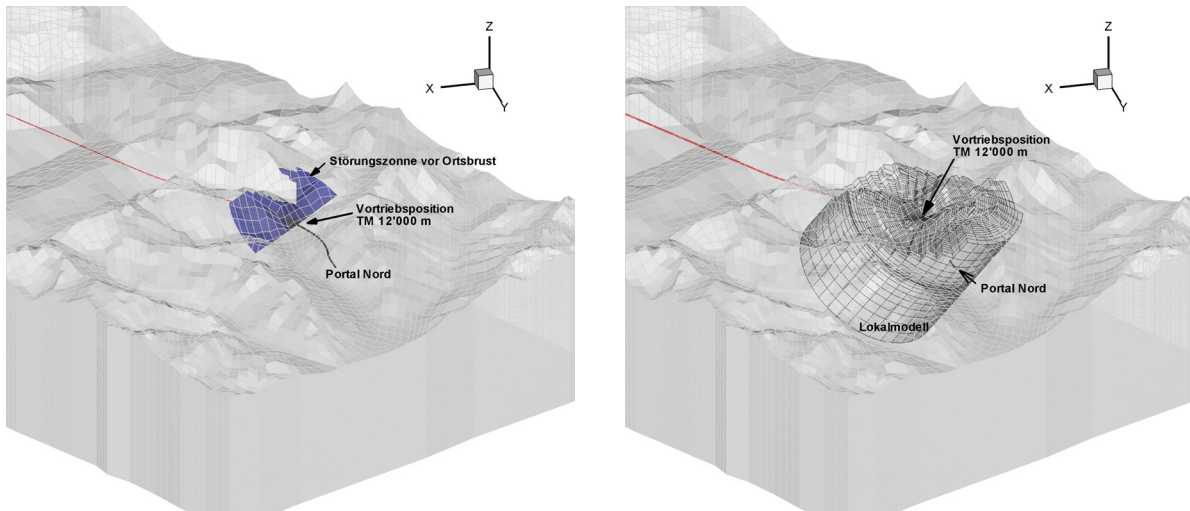


Fig. 16: Störzone (blaue Fläche) im konduktiven 3D-FE-Gebirgsmodell (grau) am Evaluationspunkt TM 12'000 m. Der bereits vorgetriebene Tunnel ist als schwarze Linie gekennzeichnet. Die rote Linie zeigt den geplanten Verlauf der Tunnelspur (links). Rechts ist das zylindersymmetrische Lokalmodell im Regionalmodell mit Störzone senkrecht zur Zylinderachse unmittelbar vor dem Durchstossen des Evaluationspunktes.

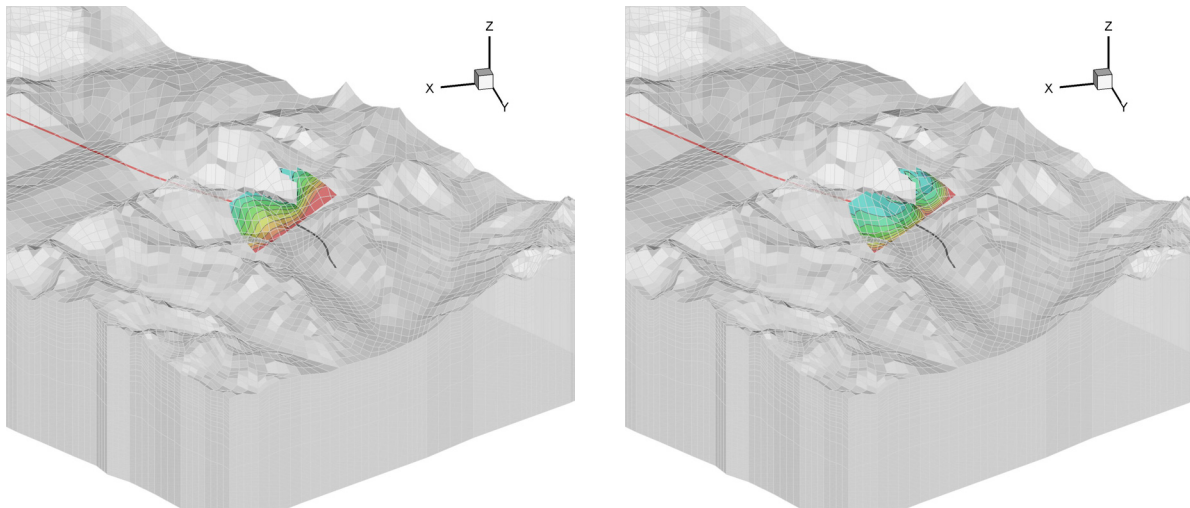


Fig. 17: Links: Ungestörte Gebirgstemperatur des konduktiven 3D-FE-Gebirgsmodells, interpoliert auf die Störzone. Rechts: Im Lokalmodell berechnete, durch Grundwasserströmung in der Störzone beeinflusste Temperatur.

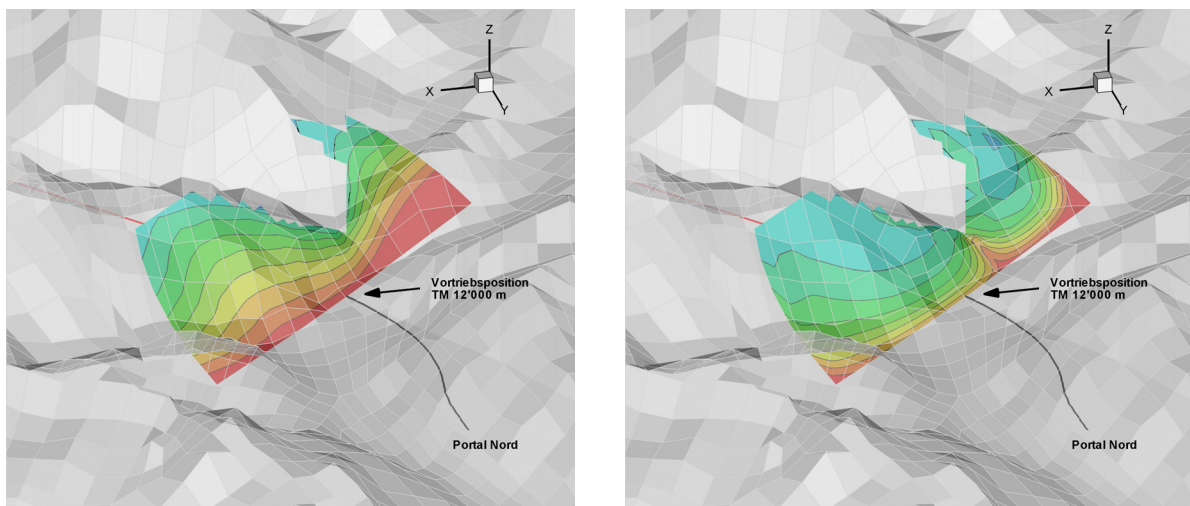


Fig. 18: Vergrößerter Ausschnitt von Fig. 17

6.2 Thermische Befunddaten LBT

Temperaturmessungen erfolgten in allen Teilabschnitten, ausser im Nordvortrieb Mitholz und im Portalbereich Frutigen (Tunnelmeter von 0 bis ca. 7'500), zwischen November 2000 und Januar 2005. Der Messung der Felstemperatur liegt ein einfaches, kostengünstiges Messprinzip zu Grunde, basierend auf den Untersuchungen von Busslinger und Rybach (1994).

Pro Messstelle liegt nur die Erstmessung vor; Angaben zu Wiederholungsmessungen sind uns nicht bekannt. Es wird allgemein angenommen, dass die Temperaturmessungen gemäss dem oben erwähnten Messkonzept durchgeführt wurden.

Für die vorliegende Evaluation der GDT-Methodik werden nur Felstemperaturmessungen verwendet, die mindestens 2 Tage und höchstens 10 Tage nach Abteufen der Messbohrung durchgeführt wurden (d.h. der thermische Einfluss der Bohrtätigkeit ist vernachlässigbar). Zudem sind nur Messwerte aus wassergefüllten Bohrungen berücksichtigt. Für die Messungen ohne Bohrdatum wird angenommen, dass sie in der vorgegebenen Zeitspanne durchgeführt wurden. Messungen in den Zugangsstollen werden nicht berücksichtigt. Fig. 19 zeigt die vorhandenen Felstemperaturen. Rot markiert sind die Temperaturwerte, die den oben erwähnten Anforderungen genügen und für die nachfolgende Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses nach der GDT-Methodik berücksichtigt wurden.

Temperaturmessungen von eintretendem Bergwasser werden nicht verwendet, obschon der Vergleich von Fels- und Wassertemperatur meist eine gute Übereinstimmung zeigt. Es gibt jedoch auch Abweichungen von bis 6 °C.

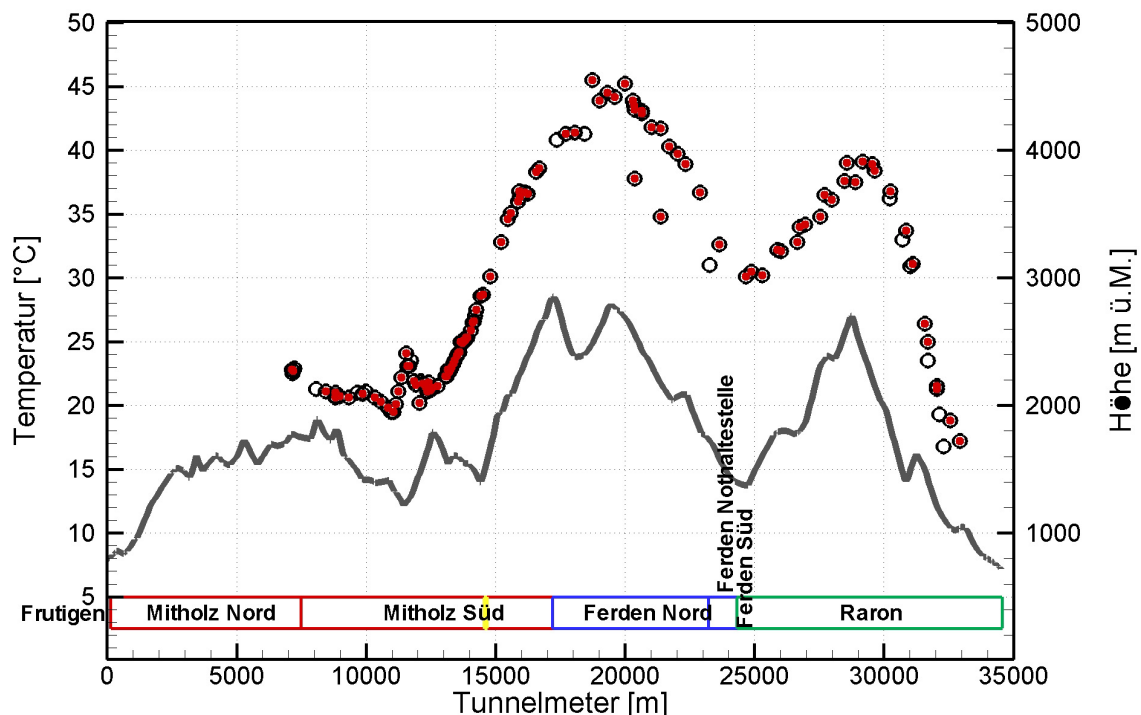


Fig. 19: Felstemperaturmessungen entlang dem LBT. Für die nachfolgende Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses mit GDT werden nur die rot ausgefüllten Temperaturwerte verwendet. Eingezeichnet sind ebenfalls die Tunnelbauabschnitte.

6.3 Hydraulische Befunddaten LBT

Die Daten über Wasserzutritte im LBT wurden von der BLS AlpTransit AG für dieses Forschungsprojekt zur Verfügung gestellt. Die verwendeten Werte sind in den noch nicht veröffentlichten Schlussberichten zu den einzelnen Vortriebsabschnitten zusammengestellt (vgl. auch Fig. 22).

Einzelwasserzutritte konnten teilweise wegen der Bauarbeiten nicht sofort nach Anfahren gemessen werden. Es handelt sich dann nicht um initiale Schüttungswerte, sondern dem Wert der ersten möglichen Messung; dieser Wert kann als den Wasserzufluss im Beharrungszustand angesehen werden. Bei den Angaben zu Gesamtwasserzuflüssen aus Tunnelabschnitten gibt es Ungenauigkeiten. So konnte zum Teil aus bautechnischen Gründen das Berg- und Schmutzwasser nicht separat gefasst werden. Der Bergwasseranfall in einem Abschnitt wurde dann aus der Differenz zwischen zwei Messstellen abgeschätzt. Grundsätzlich geben aber die vorhandenen Angaben einen guten Überblick über die Schüttungsverhältnisse im Tunnel, insbesondere darüber, in welchen Abschnitten öfter signifikante Schüttungen aufgetreten sind und wo nicht.

I Wasserführung im Abschnitt Mitholz Nord (TM-Bereich 125 bis 7'495)

Im Abschnitt Mitholz Nord wurden nur wenige Wasserzutritte angefahren. Alle Wasserzutritte zeigten eine deutliche Abnahme der Schüttung und liefern insgesamt heute nur noch etwa 1 l/s. Wasserzutritte aus der Sohle und die Verdunstung ist unbekannt. Der Wasseranfall im Bereich von Adelrain bis zum Portal ist stark witterungsabhängig und beträgt 1.5 bis 5 l/s. Wegen der geringen Überdeckung gibt es zum Teil eine direkte Verbindung zur Oberfläche. Der gesamte Bergwasseranfall im Beharrungszustand des Nordvortriebs wird auf maximal 10 l/s geschätzt.

Allgemein waren die gemessenen Wassermengen geringer als prognostiziert. Insbesondere waren die Wasserzutritte an der Grenze Flysch - Wildhorn-Decke viel kleiner als aufgrund der Erkenntnisse aus dem Sondierstollen erwartet. Im Flysch war der Bergwasserzufluss erwartungsgemäss klein. Beim Bau des Sondierstollens gab es im Bereich von TM 1'655 einen grossen Wasserzutritt von initial 500 l/min (~8 l/s), was zur Beeinträchtigung von mehreren Quellen im Adelrain führte. Während des Tunnelvortriebs wurden jedoch im entsprechenden Tunnelabschnitt keine Wasserzutritte angefahren.

Es ist auffallend, dass einige Wasserzutritte im Tunnel aus schiefrigen und eigentlich undurchlässigen Schichten stammen. Es wird vermutet, dass der Tunnel durch den Sondierstollen die geklüfteten Kalke und Sandsteine bereits drainiert wurde und die angetroffenen Wässer zumeist gefangene Vorkommen sind. Dafür spricht die rasche Abnahme der Schüttung und teilweise ungewöhnliche Chemie.

Es gab 12 Hauptzutrittsstellen mit initialen Schüttungen zwischen 0.3 und 30 l/s, zusammengestellt in Tab. 4. Vier Zutritte konnten bis zum Einbau der Innenschale überwacht werden, die anderen versiegten oder konnten nicht mehr gemessen werden.

Tab. 4: Die wichtigsten Wasserzutritte im Vortrieb Mitholz Nord. Die vier kursiven Zutrittswerte konnten bis zum Bau der Innenschale überwacht werden. Die übrigen versiegten oder waren nicht mehr messbar.

Tunnelmeter [TM]	Initale Schüttung [l/s]
296	2
369	2
408	0.5
296	2
581	0.3
2'035	20 - 30
2'038	20 - 30
2'238	0.5
4'310	2
5'524	3
5'613	10
5'707	3.3

II Wasserführung im Abschnitt Mitholz Süd (TM-Bereich 7'495 bis 17'195)

Ab Baubeginn des Südvortriebs wurde das anfallende Wasser in der Rigole des Sondierstollens gefasst. Die gemessenen Mengen sind das Total aus Berg- und Brauchwasser des Nord- und Südvortriebs Mitholz, dem Fensterstollen, dem Zwischenlos und dem Sondierstollen. Während der gesamten Bauzeit konnten mit den vorhandenen Messeinrichtungen immer nur Teilmengen des anfallenden Wassers in sehr unterschiedlicher Qualität gemessen werden.

Das Wasser aus den angefahrenen Zutritten im Tunnel wurde zuerst in einem Pumpensumpf gesammelt und von dort in die Schmutzwasserleitung gepumpt. Sobald der Vortrieb weit genug entfernt war und eine separate Fassung des Bergwassers möglich war, wurden die Wasserzutritte gefasst und die Schüttung gemessen. Die nachfolgend aufgeführten Schüttungen sind somit keine initialen Werte, sondern entsprechen den frühest möglichen Messwerten. 50 Wasserzutritte konnten überwacht werden. Sie liefern aber nur einen Bruchteil des gesamten Bergwassers, geben aber einen repräsentativen Überblick über die Schüttungsverhältnisse.

Zu Beginn war das Total der gemessenen Wassermenge ca. 25 l/s, welches mit dem Anfahren der wasserführenden Kalke im Stirnbereich der Doldenhorndecke sprunghaft auf 90 l/s stieg. Danach betrug der Anstieg bis zum Erreichen der "Autochton Nord" im Mittel 26.4 l/s pro km.

Die ersten nennenswerten Zutritte traten im Vortrieb Mitholz Süd im Flysch auf. Alle festgestellten Wasserzutritte nahmen innerhalb weniger Tage ab oder versiegten ganz. Die mengenmässig bedeutendsten Wasserzutritte stammen aus dem Stirnbereich der Doldenhorndecke. In der Doldenhorn-Decke waren die Wasserzutritte in der Oströhre geringer als in der vorausseilenden Weströhre.

Im anschliessenden Abschnitt (Kieselkalk – Betlis Kalk – Öhrlikalk) waren zahlreiche Tropfwasserstellen zu verzeichnen. Bei TM 11'455 deuteten starke Wasserzutritte in Vorausbohrungen auf wasserführende Störzonen hin. Für die Durchörterung dieser Zonen wurden Injektionen durchgeführt und der Wasseranfall betrug beim Durchfahren total noch 5 l/s. Ansonsten kann dieser Abschnitt aber als trocken bezeichnet werden. Im Öhrli-Kalk wurde zwi-

schen TM 12'385 und 12'415 ein Kluftsystem (steil bis senkrechtstehend, NW-SE-streichend) angefahren, welches Karsterscheinungen aufweist. Die Anfangsschüttung betrug hier 14 l/s. Der Wasseranfall ist die Summe von drei Hauptzutritten. Bei TM 12'675 trat ein weiterer Wasserzutritt auf in Zusammenhang mit einer steilstehenden Störung auf. Es sind ebenfalls mehrere Zutrittsstellen. Ein wichtiger Teil tritt hier durch die Sole aus. Die Gesamtschüttung schwankte zwischen 12 und 18 l/s.

In der anschliessenden Quinter-Kalk-Strecke zwischen TM 13'130 und TM 13'455 kamen in der Oströhre Karsthohlräume zum Vorschein mit einer totalen Schüttung von 6.5 l/s.

Im gesamten Abschnitt südlich der Deckenbasis der Doldenhorn-Decke (Autochton Nord, Karbon, Kristallin) war der Wasseranfall sehr gering. Es konnte keine Wasserzutritte über längere Zeit gemessen werden. Danach traten wieder etliche Wasserzutritte auf, die aber in der Regel nach kurzer Zeit versiegten.

Tab. 5: Die überwachte Wasserzutritte im Vortrieb Mitholz Süd. Es sind jeweils die Werte der ersten möglichen Messung angegeben. Die kursiven Werte sind Angaben über Gesamtschüttungen in einer Zone.

Tunnelmeter [TM]	Schüttung [l/s]	Tunnelmeter [TM]	Schüttung [l/s]
9'763	2.5	11'568	0.4
9'851	1	11'570	0.2
10'135	0.4	12'390	0.24
10'141	0.5	12'392	1.1
10'793	22	12'400	14
10'885	3.5	12'410	6.8
10'945	3	12'641	5
10'963	5	12'673	6
10'977	2	12'673	1.7
10'982	1	12'675	12-18
10'985	10	13'017	2
10'994	34	13'293	6.5
11'000	0.1	13'405	1.6
11'002	0.3	13'488	6
11'010	1.3	13'512	0.5
11'015	1.5	13'776	7.2
11'023	0.25	13'845	2
11'038	1.5	13'898	0.3
11'039	0.45	13'905	3.2
11'046	2	13'946	0.6
11'047	1.4	14'033	0.9
11'072	1.6	14'275	0.1
11'079	6	14'385	1
11'080	0.2	14'780	0.1
11'090	32	15'315	2
11'100	0.8	15'325	1
11'103	0.63	15'345	1
11'105	0.35	15'357	2
11'123	0.6	15'885	0.1
11'455	5	15'975	0.05
11'463	4	16'285	0.7
11'547	5	16'315	1
11'548	3	16'465	0.1
11'555	5	16'570	0.5
		17'071	0.01

III Wasserführung im Abschnitt Ferden Nord (TM-Bereich 17'195 bis 23'230)

Im Abschnitt Ferden Nord sind die Wasserzutrittsstellen im Altkristallin sehr gering. In einigen Vorausbohrungen wurden geringe Schüttungen registriert. Beim Durchfahren konnten entsprechende Stellen aber nicht lokalisiert werden.

Im Bereich des Jungfrau keil (Fig. 7) und der Sedimenteinschuppungen des Lias (Kalk, Kalkschiefer, Sandstein) wurde die grösste Wasserführung im Los Ferden angetroffen. Aufgrund der nicht gänzlich auszuschliessenden Verbindung zu den Thermen von Leukerbad, wurden aufwändige Abdichtungen durchgeführt. Die Vorausbohrungen zeigten den grössten Wasseranfall in den ersten Sedimenteinschuppungen des Lias. Einzelne Drainage- oder Injektionsbohrungen wiesen eine Anfangsschüttung von bis zu 7.5 l/s auf.

Die zweite Sedimentschuppe ergab im Tunnelbereich nur Tropfwasser. Einige wenige Zutritte gab es im Zufahrts- und Lüftungstollen (ZLS). Auch der Jungfrau keil wies nur wenige Wasserzutritte (<2 l/s) auf.

Da die einzelnen wasserführenden Zonen abgedichtet wurden, kann der effektive Wasseranfall nur geschätzt werden. Aus den beiden Tunnelröhren inkl. Zuleitungstollen wird im Bereich Sedimentschuppen und Jungfrau keil von einer totalen Schüttung von 50 l/s ausgegangen.

Die Wasserdrücke wurden in Horizontalbohrungen gemessen. In den Sedimentschuppen betrug der Druck bis zu 120 bar. Im Jungfrau keil lagen die Wasserdrücke bei 73 bis 83 bar.

In der Übergangszone zum Gastern Granit und im Gastern Granit selber waren Wasserzutritte relativ häufig. Sie wurden mit dem Vortrieb mitgenommen, d.h. es wurden immer neue Wasserzutritte angefahren, wobei 100-150 m hinter der Ortsbrust die Zutritte meist schon wieder versiegten. Von ca. TM 19'000 bis 23'000 fanden die Wasserzutritte meist entlang von steilen bis senkrechten, NW-SE streichenden Klüften statt. Ab ca. TM 16'955 gegen Norden sind es Zutritte aus NE-SW streichenden Klüfte.

Es gab allgemein relativ wenige Störungen, deren Wasserführung über längere Zeit gemessen werden konnte. Der stärkste Wasserzutritt von 30 l/s wurde bei TM 19'991 registriert. Der Zufluss nahm relativ schnell auf ca. 5 l/s ab und nach wenigen Wochen waren nur noch Tropfstellen zu sehen.

Tab. 6: Die Wasserzutritte im Gastern Granit, die über längere Zeit gemessen werden konnten. Es sind jeweils die Werte der ersten möglichen Messung.

Tunnelmeter [TM]	Schüttung [l/s]
18'672	0.1
18'796	0.4
18'803	3.0
19'838	0.3
19'991	30.0
22'701	0.2

IV Wasserführung im Abschnitt Ferden Süd und Ferden Nothaltestelle (TM-Bereich 23'230 bis 24'320)

Es gab nur leichtes Tropfwasser im Bereich des Abschnitts Ferden Süd inkl. Nothaltestelle. Es wurden keine Messstellen eingerichtet.

V Wasserführung im Abschnitt Raron (TM-Bereich 24'320 bis 34'565)

Im Abschnitt Raron traten Wasserzutritte hauptsächlich im Autochton Gampel-Baltschieder auf. Das nördlich anschliessende Kristallin wies nur wenige, kleine Wasserzutritte auf. Allgemein sind die Messungen der Schüttung relativ ungenau.

Im folgenden werden die Zonen mit bedeutender Wasserführung aufgelistet (von Nord nach Süd):

- Im Altkristallin nördlich des Autochtons Gampel-Baltschieder gab es neben vereinzelt, kleinen Zutritten nur Tropfwasser. Alle Zutritte trockneten mit der Zeit aus.
- Bei TM 32'133 wurden einige Karströhren (Quintner Kalk) angefahren, die mehrere l/s brachten. In einer Vorausböhrung bei TM 31'951 wurde ein grösseres Wasservorkommen von anfänglich 30 l/s angebohrt.
- Im Bereich von TM 32'155 (Dogger-Kalke) traten wasserführende Zonen auf. Die Schüttung war aber hier insgesamt klein. Der totale Wasserzutritt wird auf 11 l/s geschätzt.
- Im Bereich von TM 32'400 (Aalénien-Schiefer und eingefaltete Lias-Kalke) gab es mit Ausnahme von wenigen, rasch versiegenden Quellen keine Wasserzutritte. Die bedeutenden Zutritte waren bei TM 32'830 und 32'913.
- Zwischen TM ca. 33'255 und TM 33'855 (vorderer Teil Lias-Kalke und mittlerer-hinterer Teil der Lias-Kalke) wurde ein ausgedehnter Schicht- und Kluftkalk angefahren, der, wie erwartet, das wasserreichste Gestein in diesem Los ist.

Es wurden Drainagebohrungen erstellt, um die Wassermengen und -drücke zu erfassen. Praktisch auf der ganzen Kalkstrecke strömte Wasser von total bis 25 l/s aus der Tunnelbrust oder den Drainagebohrungen. In einer Bohrung wurden 80 l/s. Die Drainage-Bohrungen waren alle nach wenigen Tagen bis Wochen versiegt. Die Entwässerung hatte zur Folge, dass erwartungsgemäss die Quellen in St. German trocken fielen. Die einhergehende Absenkung des Dorfkerns kam aber überraschend.

- Im Bereich zwischen TM 33'955 und 34'055 (Grenze Kristallin / Lias-Dolomit) nahm das Tropfwasser in Richtung Norden stetig zu. Es wurden deshalb Drainage-Bohrungen gemacht die initiale Schüttungen von bis ca. 13 l/s zeigten. Es wurde deshalb eine Verbindung zu Oberflächenwasser vermutet, da die gemessenen Schüttungswerte einen Zusammenhang mit dem Niederschlag zeigten.

6.4 Prognose der Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses mit GDT für LBT

I Ergebnisse von GDT

Wie in Kapitel 5.2 und 5.3 beschrieben, werden an jedem der 53 Evaluationspunkte auf der Tunnelspur (Schrittweite 500 m) jeweils 150 Lokalmodele mit unterschiedlichen Parametern für Orientierung und hydraulische Leitfähigkeit der wasserführenden Störung erstellt und das räumliche Temperaturfeld berechnet. Die so berechneten Felstemperaturen entlang der Tunnelspur werden mit den gemessenen Gebirgstemperaturen verglichen. Da die gemessenen Gebirgstemperaturen entlang der Tunnelspur nicht in regelmässigen Abständen vorliegen, wurden diese auf ein Profil mit gleichmässigen Abständen von 100 m interpoliert. Für die Auswertung werden ausschliesslich diese interpolierten Messwerte verwendet.

Für die Selektion der möglichen Szenarien der zuströmenden Wassermengen im Beharrungszustand nach der Durchörterung von wasserführenden Störungen hat es sich als sinnvoll erwiesen, nur die Temperaturen unmittelbar vor der Ortsbrust (< 300 m Abstand) für einen Vergleich zwischen Simulation und Messung zu verwenden. Der Grund hierfür ist, dass jedes Lokalmodele nur eine einzige Störung am Evaluationspunkt entlang einer Strecke von etwa 8'000 m aufweist. Damit wird die Felstemperatur im Lokalmodele auch nur durch eine einzige wasserführende Störung mit einem bestimmten Streichen und Fallen beeinflusst. Im realen Gebirge können jedoch innerhalb kurzer Streckenabschnitte mehrere, verschiedene Störungen aufeinanderfolgen, wodurch ein komplexerer Verlauf der Felstemperatur entlang der Tunnelachse entsteht. Ist dies der Fall, so kann mit einem Modelle mit einer einzigen Störzone grundsätzlich keine Übereinstimmung der Felstemperatur ab einer gewissen Entfernung von der Störzone gefunden werden. Die Beschränkung der Selektionskriterien auf die limitierte Strecke von 300 m vor der Ortsbrust heisst aber auch, dass die Durchlässigkeit der Störzone tendenziell überschätzt wird und die prognostizierten Schüttungen eher zu hoch sind.

Der Selektionsprozess in GDT wurde so eingestellt, dass alle Störzonenmodelle verworfen werden, bei denen die simulierte Temperatur in dem Abschnitt bis 300 m vor der Ortsbrust um mehr als 3°C von der gemessenen Temperatur abweicht.

In Fig. 20 sind exemplarisch an 6 verschiedenen Evaluationspunkten die Temperaturen der jeweils 150 Lokalmodele entlang der Tunnelspur bis zur Ortsbrust abgebildet. Die interpolierten Messwerte sind als schwarze Punkte dargestellt. Die roten Linien zeigen die Simulationsergebnisse derjenigen Modelle, deren Temperaturresiduen innerhalb der definierten Grenzwerte liegen und somit für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses verwendet werden. Die grauen Linien stellen Simulationsergebnisse von Lokalmodele dar, die verworfen werden.

Die Abbildungen oben links und oben rechts in Fig. 20 stellen die thermische Auswirkung von Störungen im Doldenhorn-Flysch bzw. der Doldenhorn-Decke an den Evaluationspunkten TM 12'000 und TM 17'500 dar. An beiden Evaluationspunkten gelingt unmittelbar vor der Ortsbrust eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung. Mehr als 1 km nördlich der Ortsbrust (in den Figuren nach links) ist der Unterschied zwischen Messung und Simulation jedoch sehr gross. Der Grund hierfür ist, dass besonders in dem Abschnitt zwischen TM 7'500 und TM 13'500 das rein konduktive 3D-FE-Gebirgsmodell zu hohe Temperaturen im Vergleich zu den Messwerten zeigt (Fig. 11). Offenbar ist in diesem Abschnitt die Gebirgstemperatur grossräumig durch Grundwasserströmungen stark beeinflusst.

Die beiden Abbildungen in der Mitte von Fig. 20 zeigen Ergebnisse, bei denen vor der Ortsbrust im Gastern-Granit bei TM 19'500 und TM 22'500 keine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Simulation und Messwerten gefunden wurde. An diesen beiden Orten wird folglich eine geringe Wahrscheinlichkeit eines Wasserzuflusses prognostiziert.

Die beiden unteren Abbildungen in Fig. 20 zeigen die Temperatur vor den Evaluationspunkten im Altkristallin bei TM 27'000 und TM 32'500. Im Gegensatz zu den Evaluationspunkten der mittleren Abbildungen gelingt hier bei einigen Modellen wieder eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung.

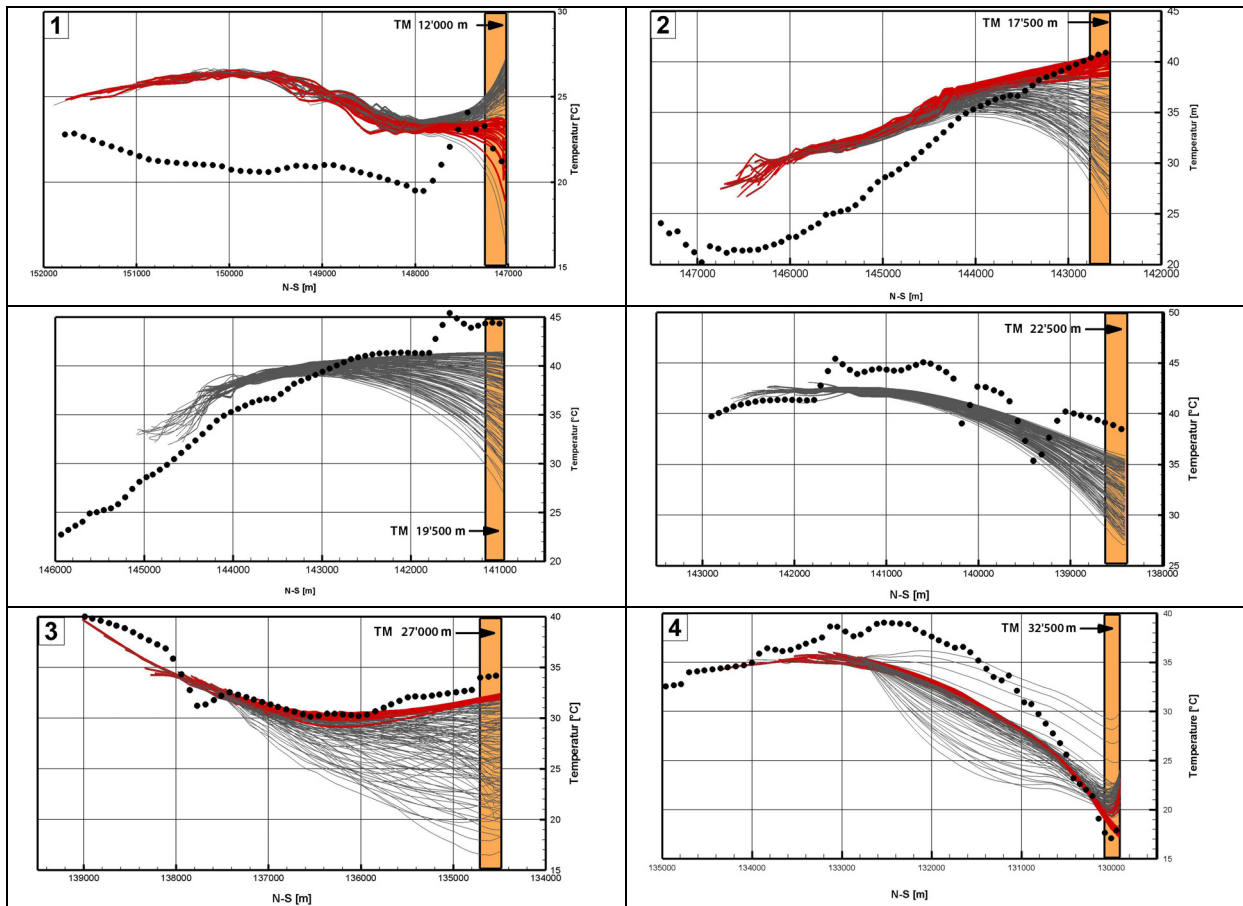


Fig. 20: TM 12'000, TM 17'500, TM 19'500, TM 22'500, TM 27'000, TM 32'500. Schwarze Punkte: auf äquidistante Positionen interpolierte Messwerte der Tunneltemperatur. Linien: Temperatur der Lokalmodelle, rot: Temperaturabweichung innerhalb der Toleranzen, grau: Temperaturen ausserhalb der Toleranzen. Orange: Bereich der Modellselektion (300 m).

In Fig. 21 sind die Verteilungen der berechneten Schüttungsrate Q_P , Druck P_P und Zonenvolumen V_P der Störzonenmodelle 1-4 der Fig. 20 dargestellt, deren Tunneltemperatur auf den letzten 300 m des Vortriebs mit den gemessenen Felstemperaturen auf max. 3°C übereinstimmen. Die Intervalle betragen bei den Schüttungen 5 l/s, beim Druck 0.5 bar und beim Volumen $5 \times 10^5 \text{ m}^3$. Nfit ist die Anzahl der selektierten Störzonenmodelle aus 150, Q50%, P50% und V50% sind die Medianwerte der berechneten Schüttungsrate, Druck und Störzonenvolumen (oberhalb Tunnelniveau), Q10%, P10%, V10% und Q90%, P90%, V90% sind die entsprechenden Perzentile. Es zeigt sich, dass je nach Vortriebsposition eine variierende Streubreite von möglichen Werten für Schüttung, Druck und Volumina auftritt. Bei allen Vortriebspositionen zeigt sich meist aber ein wahrscheinlichster Wert, der mit dem Medianwert gut korreliert.

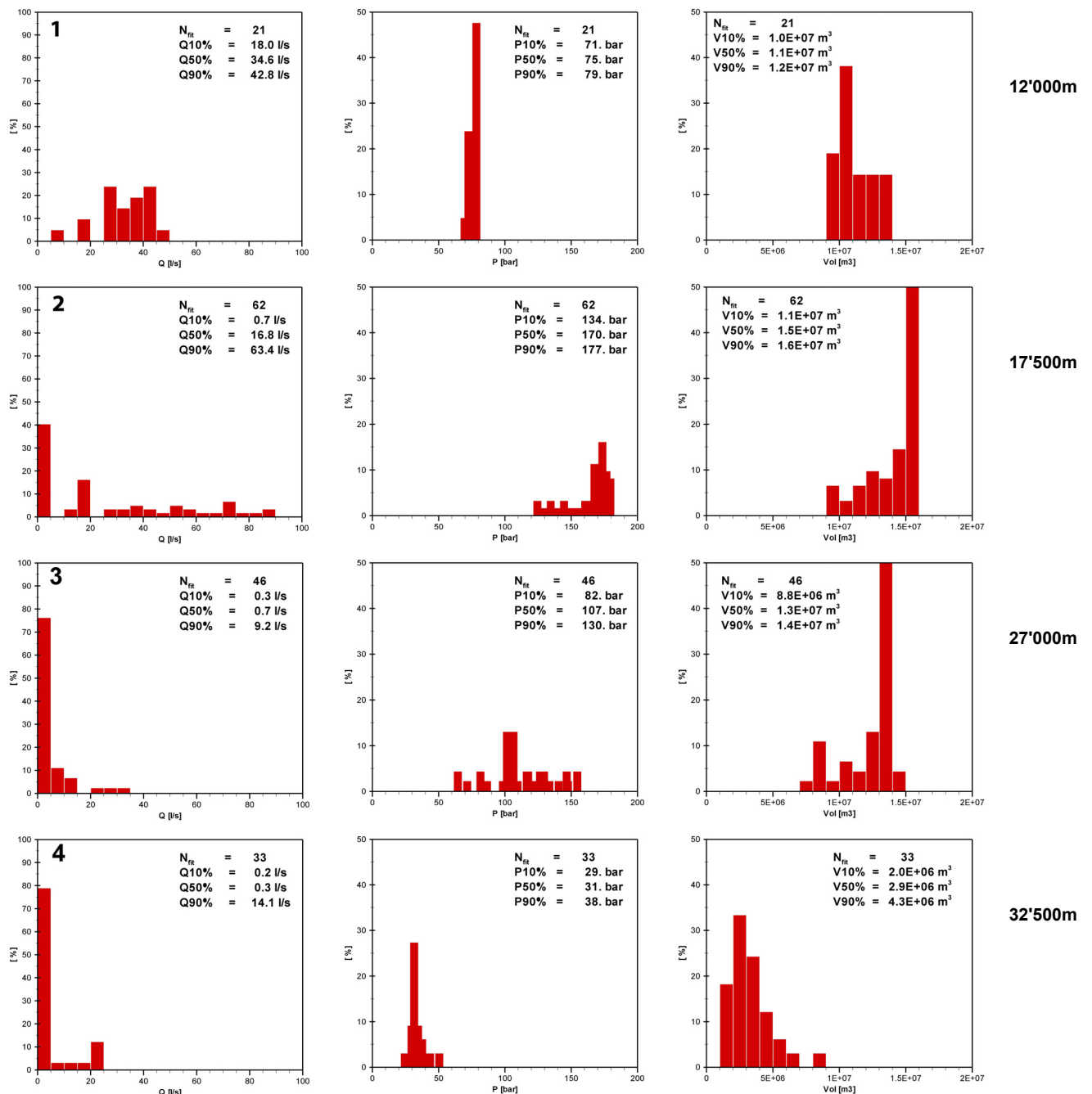


Fig. 21: Verteilung der berechneten Schüttungsrate Q_P , Druck P_P und Zonenvolumen V_P der Störzonenmodelle aus Fig. 20, deren Tunneltemperatur auf den letzten 300 m des Vortriebs mit den gemessenen Felstemperaturen bis max. 3°C übereinstimmen.

II Bewertung der Ergebnisse

Fig. 22 zeigt die Schüttungsraten, die während des Vortriebs des LBTs bestimmt wurden. Es sei hier nochmals auf die Schwierigkeiten der messtechnischen Bestimmung der Schüttungsraten (vgl. Kapitel 6.3) hingewiesen. Ebenfalls sind die Bandbreiten für das Streichen und Fallen von Störungen aus der Vorerkundung angegeben. Nebst den Schüttungswerten ist zudem ersichtlich, dass das Auftreten von Zuflüssen entlang der Tunnelspur unterschiedlich war; klar sind Zonen zu erkennen, wo Zuflüsse – wenn auch kleine – häufig aufgetreten sind (Bsp. Doldenhorn), und lange Abschnitte, die praktisch kaum Wasser zeigten (Bsp. Alt-kristallin).

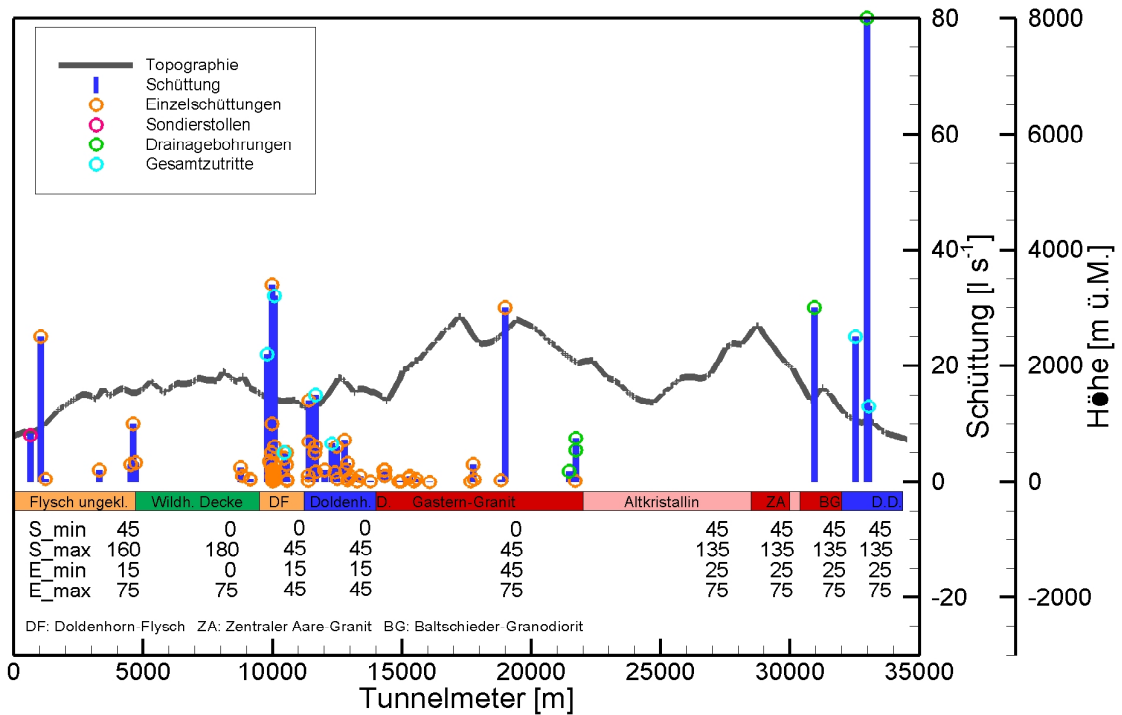


Fig. 22: Befunddaten Schüttungen mit Charakterisierung. Die farbige Leiste skizziert die unterschiedlichen geologischen Einheiten entlang der Tunnelspur (s. auch Tab. 7). Darunter ist der Wertebereich für das Streichen (S_{\min} – S_{\max}) und Einfallen (E_{\min} – E_{\max}) der Störungen in den Lokalmodellen angegeben.

Zwischen Auftretenswahrscheinlichkeit von Schüttungen und den Schüttungsraten selber muss unterschieden werden: Die Auftretenswahrscheinlichkeit kann in erster Linie als eine Folge der Störzonenendichte angesehen werden, während die Schüttungsrate selber nicht nur von der grossräumigen Durchlässigkeit der Störzone, sondern auch von der lokalen hydraulischen Anbindung derselben an den Tunnel abhängt. Wie diese Anbindung jeweils konkret aussehen wird, kann kaum vorausgesagt werden. In GDT wird immer von Störzonen mit homogener Leitfähigkeit ausgegangen, wodurch bei einer Durchörterung eine perfekte hydraulische Anbindung erzeugt wird. Die berechneten Schüttungsraten sind daher tendenziell maximal.

Die GDT-Ergebnisse werden mit den Befunddaten wie folgt verglichen (vgl. Fig. 23):

- Vergleich der GDT-Ergebnisse mit den gemessenen Schüttungsraten der Einzelergebnisse.
- Vergleich der GDT-Ergebnisse mit der Anzahl der über 500 m-Intervallen aufsummierten Ereignisse.

Dieser Vergleich zeigt folgendes (vgl. Fig. 24 und Fig. 25):

- Abschnitt **TM 0 bis TM 7'000**: In diesem Abschnitt kann die GDT-Methode nicht eingesetzt werden, da hier keine Temperaturdaten vorliegen. Dasselbe gilt für den Abschnitt **ab TM 33'000** (vgl. Temperaturmessungen in Fig. 11).
- Innerhalb der Haupt-Zutrittszone (**TM 9'000 bis TM 17'000**) prognostiziert die GDT-Methode eine fast durchwegs hohe Zutrittswahrscheinlichkeit. Im Unterschied zu den Befunddaten sind die berechneten Schüttungen nach TM 10'000 generell höher, da die GDT-Methode von keiner Drainagewirkung des bereits vorgetriebenen Tunnelabschnittes ausgeht.

- Im Abschnitt **TM 19'000 bis TM 25'000** treten die effektiven Wasserzutritte etwa 1-2 km vor dem Abschnitt mit der prognostizierten erhöhten Zutrittswahrscheinlichkeit auf. Die Ursache dafür ist möglicherweise, dass die tatsächliche räumliche Lage der Störungen ausserhalb der mit GDT evaluierten Bandbreiten für Streichen und Fallen der Störungen liegt.
- Im Abschnitt **TM 25'000 bis TM 31'000** prognostiziert die GDT-Methode in Übereinstimmung mit den Befunddaten keine Schüttungsereignisse.

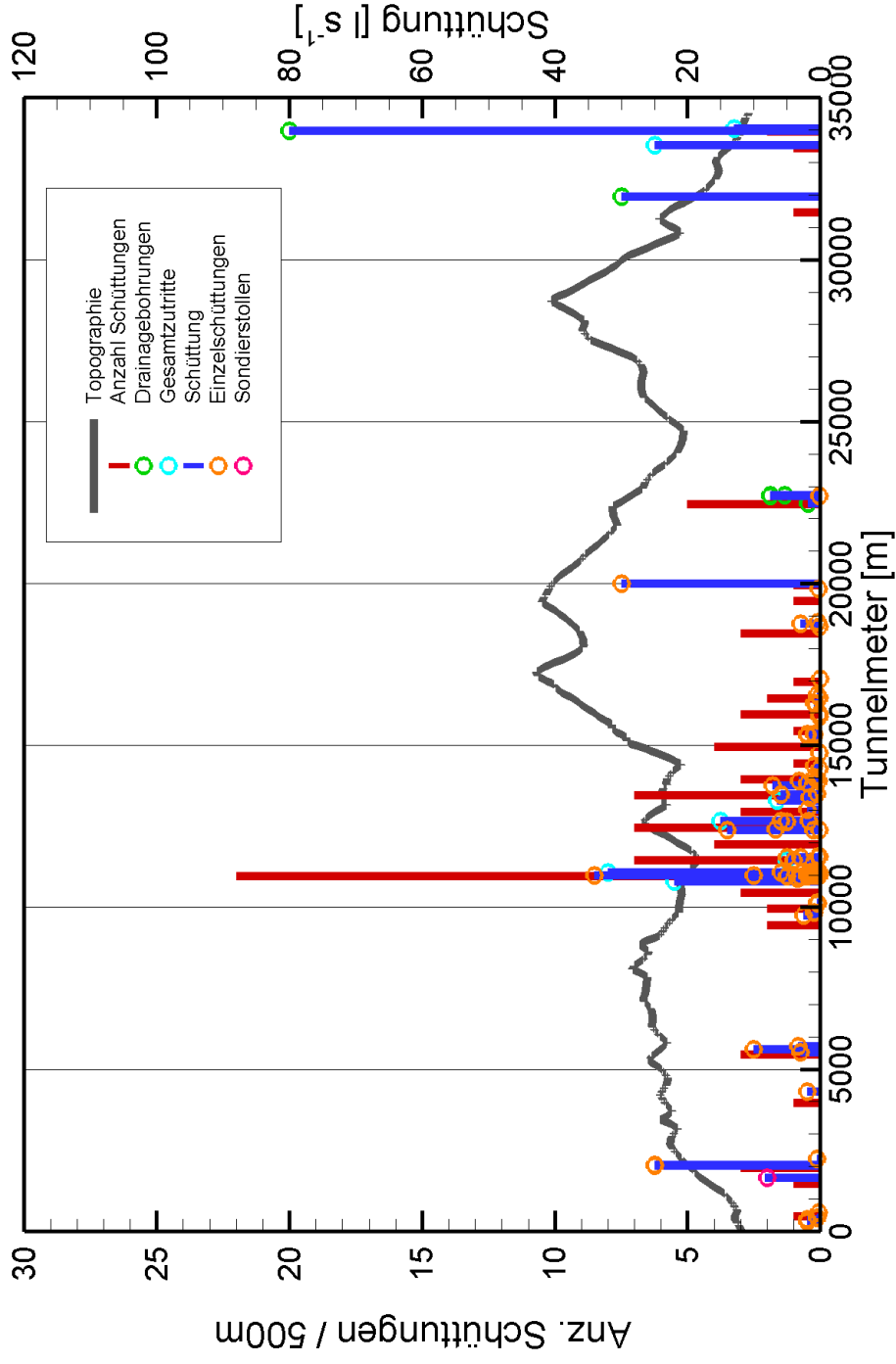


Fig. 23: **Befunddaten** (wie Fig. 22). Zusätzlich ist die Anzahl von gemessenen Schüttungen in Intervallen von jeweils 500 m dargestellt (rote Balken).

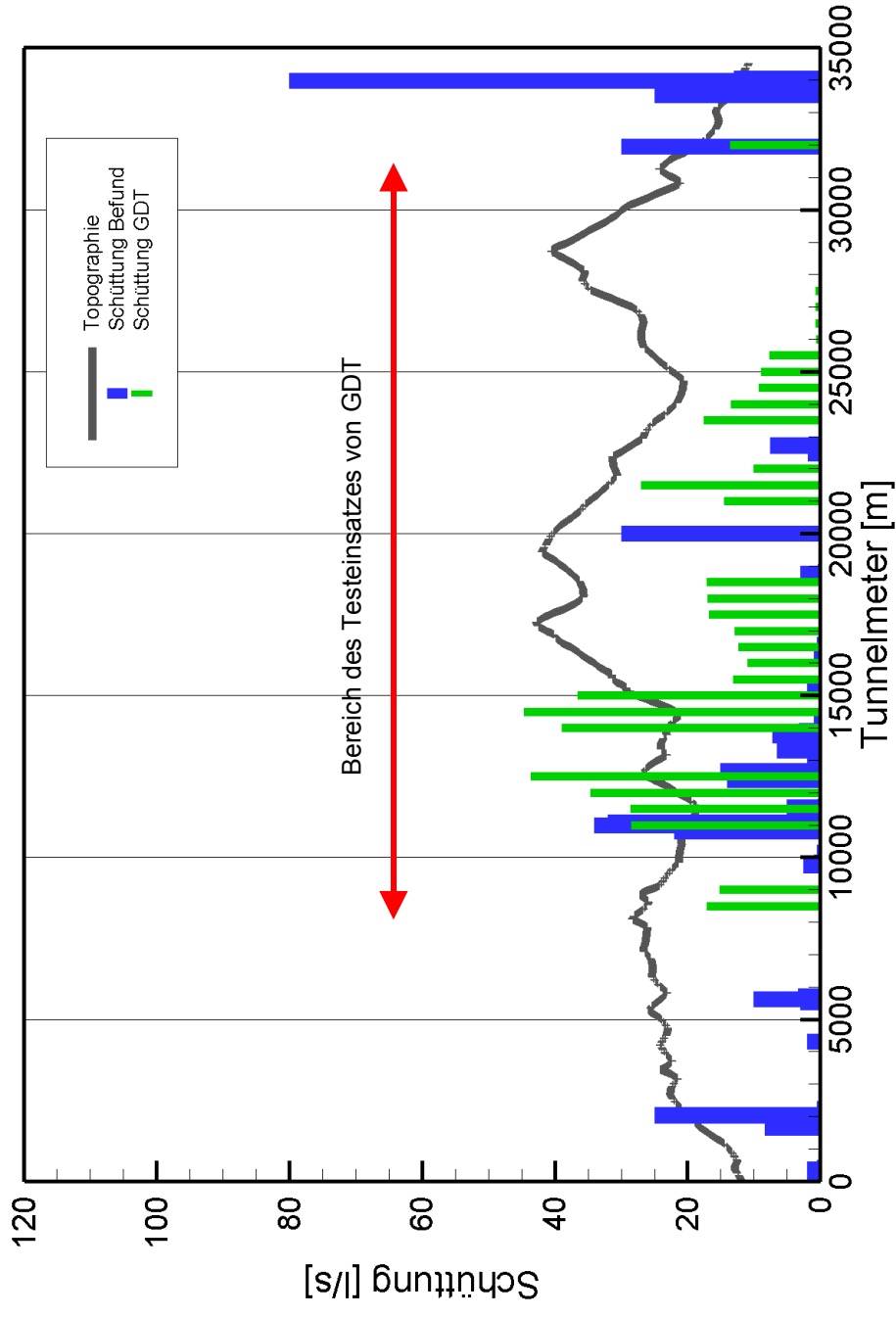


Fig. 24: **GDT-Berechnungen.** Die grünen Balken zeigen die prognostizierten, wahrscheinlichsten Schüttungen (Q50%=50%-Perzentile) für jeden Evaluationspunkt im Abstand von 500 m. Die blauen Balken stellen die Befunddaten dar.

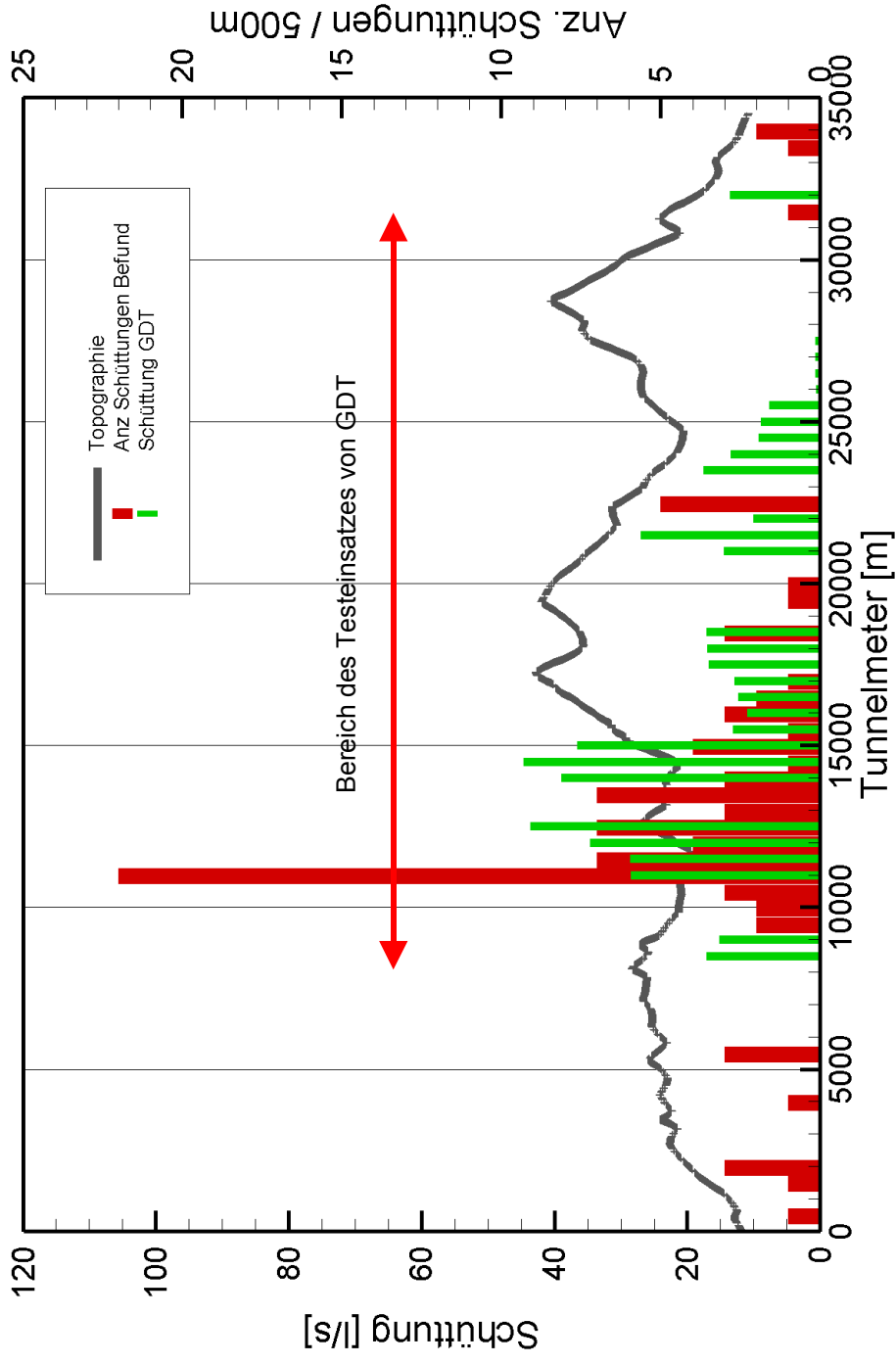


Fig. 25: **GDT-Berechnungen.** Die grünen Balken zeigen die prognostizierten, wahrscheinlichsten Schüttungen (Q50%=50%-Perzentile) für jeden Evaluationspunkt im Abstand von 500 m. Die roten Balken stellen die Anzahl der effektiven Schüttungen pro 500 m dar.

Tab. 7: Einschätzung der prognostizierten Zutrittswahrscheinlichkeit nach Abschnitten

ab TM [m]	Geologie	GDT	Befund		Zutrittswahrscheinlichkeit
		Schüttung [l/s]	Anzahl Schüttungen	Maximalwert [l/s]	
8'500	Wildhorn-Decke, Doldenhorn-Flysch	6.5	4	2.5	mittel
11'000	Doldenhorn-Flysch Doldenhorn-Decke	27.1	40	34.0	hoch
13'500	Doldenhorn-Decke Gastern-Granit	26.6	18	7.2	hoch
16'000	Gastern-Granit	14.0	8	1.0	mittel
18'500	Gastern-Granit	3.4	4	30.0	gering
21'000	Gastern-Granit Altkristallin	10.3	5	5.4	mittel
23'500	Altkristallin	11.4			mittel
26'000	Altkristallin	0.5			gering
28'500	Zentraler Aare-Granit, Altkristallin Baltschieder Granodiorit	0.0			gering
31'000	Baltschieder-Granodiorit	2.8	1	30.0	gering

In GDT wird neben der wahrscheinlichsten Schüttungsrate auch der hydrostatische Initialdruck berechnet. Der Medianwert des wahrscheinlichsten Druckes ist in Fig. 26 eingezeichnet. Sie geben im Wesentlichen die Höhenlage des Ausbisses der Störzonen an der Oberfläche wieder. Gemessene, initiale Druckwerte sind nur sehr wenige vorhanden, ein Vergleich ist daher nicht möglich.

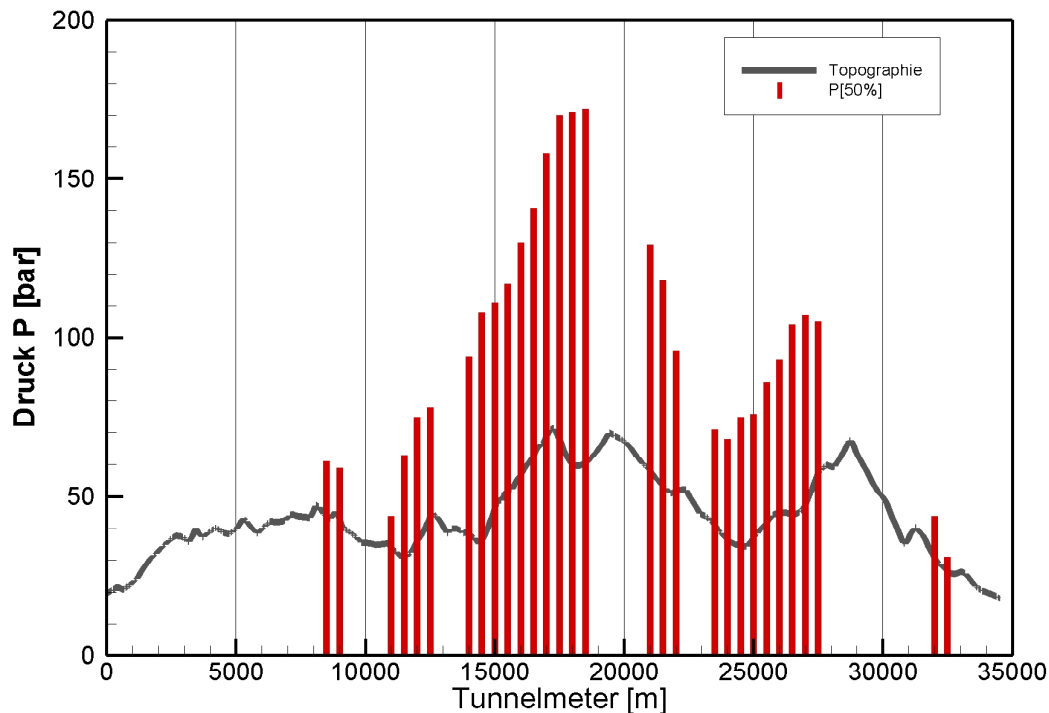


Fig. 26: **Simulationsergebnisse.** Die roten Striche bezeichnen den Medianwert des berechneten initialen Druckes.

7 Schlussfolgerungen

Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes war es anhand der geologischen Vorerkundungsdaten für den Lötschberg-Basistunnel zu evaluieren, inwieweit beim Vortrieb von tief liegenden Tunnels mit der GDT-Methodik aus gemessenen Tunneltemperaturen systematisch die Wahrscheinlichkeit des Wasserzuflusses vor der Ortsbrust prognostiziert werden kann.

Zusammenfassend wurde folgendes festgestellt:

1. *Mit GDT konnten Abschnitte mit hoher und tiefer Wasserzuflussgefährdung identifiziert werden.* Allerdings ergaben sich bei der Position auch Abweichungen um bis zu 2 km. Die Ursache dafür kann in einem ungenügenden Parametersatz für die GDT-Evaluationen liegen (v.a. Bandbreite von Streichen und Fallen von Störzonen).
2. *Die von GDT berechneten Zuflusswerte sind für eine gegebene wasserführende Störzone maximal:*
GDT berechnet den wahrscheinlichsten Zufluss einer einzigen, rundum ideal an den Tunnel angekoppelten Störzone. In der Realität kann aber von solch einer idealen Ankopplung nicht immer ausgegangen werden. Zudem muss im Allgemeinen von einer vortriebsbegleitenden Drainage des Gebirges ausgegangen werden, was in GDT nicht berücksichtigt wird.
3. *Der direkte Vergleich zwischen Schüttungsraten aus GDT und Befund ist problematisch.* GDT berechnet die Schüttung im Beharrungszustand, aber noch ohne signifikante Absenkung des Bergwasserspiegels. In der Praxis ist die Messung solcher Schüttungsraten aus logistischen Gründen schwierig.

Die Schlussfolgerungen daraus sind wie folgt:

1. Die Parametersätze von GDT (bspw. Streichen und Fallen von Störzonen, Herkunft von Wässern, etc.) wurden aus Gründen des Aufwandes nicht an die während des Vortriebs gewonnenen Erkenntnisse angepasst. Bei einer Anwendung der GDT-Methodik während eines Vortriebs würden diese neuen Erkenntnisse laufend bei der Festlegung der GDT-Parameter berücksichtigt werden. Zudem wäre es sinnvoll und auch künftig möglich, wesentlich mehr als 150 Lokalmodelle pro Vortriebsposition auszuwerten (Totale Rechenzeit: ca. 24 Stunden für 1000 Lokalmodelle).
2. Es wird geschätzt, dass die GDT-Methodik mindestens eine Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Tunneltrasse von 5 - 10 K benötigt. Die Methodik ist somit für Tunnel ab 200 - 300 m Tiefenlage einsetzbar.

Es hat sich gezeigt, dass die GDT-Methodik die Identifikation von hydrogeologisch kritischen Tunnelabschnitten unterstützen kann. Sie kann komplementär zu anderen geophysikalischen Vorerkundungsmethoden im Tunnelbau eingesetzt werden.

Referenzen

- Busslinger A., Rybach L., 1994. Ausführungsangaben zum Geothermik-Untersuchungsprogramm Sondierstollen Piora. Institut für Geophysik, ETH Zürich, Interner Bericht Nr. 2000. Bericht zuhanden Projektleitung Alptransit Gotthard Basistunnel.
- Busslinger A., Rybach L., 1999. Geothermal prediction of water-bearing zones. Tunnel 1/99, 33-41
- GEOWATT AG, 2005. Revidierte Felstemperaturprognose für den Gotthard-Basistunnel auf der Basis neuer Temperatur- und Geologiedaten.
- Kohl, T. and Hopkirk, R. J., 1995. FRACTure a simulation code for forced fluid flow and transport in fractured porous rock, Geothermics 24(3): 345-359.
- Kohl, T., Signorelli, S. & Rybach, L., 2001. Three-dimensional thermal investigation below high Alpine topography, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 126, pp.195-210
- Kellerhals, P., Isler, A., 1998. Lötschber-Basistunnel: Geologische Voruntersuchungen und Prognose, Geologische Berichte, Landeshydrogeologie und -geologie Bern.
- Medici, F., Rybach, L., 1996. Geothermal map of Switzerland 1:500'000 (Heat Flow Density). Beitr. Geol. Schweiz, Ser. Geophy. Nr. 30
- Mégel, Th., Kohl, Th, Rybach, L., Bassetti, S., Signorelli, S., 2005. Evaluation der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten" in Bezug auf Aussagekraft und Nutzen für den Vortrieb, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Bericht-Nr. 1085, 2005
- Schärli, U., Kohl, T., 2002. Archivierung und Kompilation geothermischer Daten der Schweiz und angrenzender Gebiete. ISSN 0253-1186, Schweizerische Geophysikalische Kommission (Beiträge zur Geologie der Schweiz: Geophysik, Nr. 36).
- Signorelli, S., 2004. Geoscientific Investigations For The Use Of Shallow Low-Enthalpy Systems, Diss. ETH No. 15519.

Anhang

Das Finite Element Programm FRACTure ist für gekoppelte thermisch - hydraulisch - elastische 3-D Probleme entwickelt worden und, ergänzt mit weiteren linearen und nicht-linearen Konstitutivgesetzen, seit seiner Fertigstellung 1992 kontinuierlich zur Lösung von Problemen in den Bereichen Grundlagenforschung und Ingenieurwissenschaft angepasst und eingesetzt worden. FRACTure (Akronym für Flow, Rock And Coupled Temperature) ist ein vollumfängliches 3-D Programm, welches ohne halbanalytische Lösungsansätze, bzw. vereinfachende physikalische Prozesse implementiert wurde.

Das Programm erlaubt die Anwendung von 1-D, 2-D und 3-D Elementen mit unterschiedlichen linearen und quadratischen Formfunktionen, wobei für die korrekte Berechnung von Kluffstrukturen ein spezieller, speicherplatzsparender Algorithmus eingesetzt wird. Dabei lassen sich Klüfte z.B. Klüfte und Störungen durch niederdimensionierte Elemente darstellen (mittels Angabe von Transmissivitäten) die an höherdimensionierte Elementen anliegen (die durch hydraulische Leitfähigkeiten definiert sind).

FRACTure wird ergänzt durch den Maschengenerator WinFra, der mit einer graphischen Benutzeroberfläche ausgestattet ist. Dieses Programm ist mit Schnittstellen für digitale Geländemodelle, DXF Formate zur Anbindung von CAD Programmen sowie weiteren graphischen und textorientierten Formaten versehen. Hiermit lassen sich in einer halb-automatischen Prozedur komplexe 3-D Gitter erstellen, die über 1 Mio. Knoten umfassen können.

Die Bandbreite der bisherigen Anwendungen umfasst schwerpunktmäßig die Hydrogeologie in geklüftetem Gestein, Konzepte und Simulationen von geothermischer Nutzung, die Erfassung des Topographieeinflusses auf hydraulisch-thermische Prozesse, poro- oder thermo-elastisch induzierten Spannungsveränderungen im Gestein oder die Prognose von Druck- und Temperaturverhalten beim Bau tiefliegender Tunnelprojekte.