

Hydrogeologische Untersuchungen im Tunnelbau – eine Zusammenschau der Vielfalt an unterschiedlichen Fragestellungen und Untersuchungsmethoden

Hydrogeological investigations in tunnelling – a synopsis of the variety of different questions and investigation methods

P. REICHL^{1,2}), G. DOMBERGER¹), Ch. RESZLER^{1,4}), G. WINKLER³)

¹ RESOURCES – Institut für Wasser, Energie und Nachhaltigkeit, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Elisabethstraße 16/II, A-8010 Graz.

² Steiermärkische Landesregierung, Abteilung 15 Energie, Wohnbau, Technik, Landhausgasse 7, A-8010 Graz.

³ Institut für Erdwissenschaften, Karl-Franzens-Universität, Heinrichstr. 26, A-8010 Graz.

⁴ Aquaconsol, Karl-Franzens-Universität, Elisabethstrasse 18, A-8010 Graz.

Korrespondierender Autor: Peter REICHL, peter.reichl@stmk.gv.at

Schlüsselwörter: Tunnelbau, Abflussentstehungsmodellierung, hydraulische Bohrlochversuche, Nutzung der Tunnelwässer, Hydrogeochemie und Isotope

Key words: Tunnelling, discharge generation modelling, hydraulic borehole tests, use of tunnel water, hydrogeochemistry & isotopes

Einleitung

Im Tunnelbau könnte man generell meinen, dass an den Hydrogeologen nur 2 Fragen gestellt werden, nämlich:

– *Wo kommt wie viel Wasser an?*

und

– *Wo geht das Wasser ab?*

Betrachtet man aber größere Tunnelbauvorhaben im Detail, so erkennt man einerseits, wie komplex aufgebaut die Planungen und Verfahren geworden sind, und andererseits, wie umfangreich der Hydrogeologe in diese Planungen und Verfahren zu einer Vielzahl an Fragestellungen eingebunden und unverzichtbar geworden ist.

In diesem Artikel wird ein Überblick über die diversen Fragestellungen an den Hydrogeologen gegeben, die im Zuge der Planungen, Bauausführung und Betrieb von größeren Tunnels gestellt werden. Zudem werden die zugehörigen Methoden und Untersuchungsabläufe beschrieben, die es erst ermöglichen, diese Fragestellungen zu beantworten.

Viele Bewertungen und Interpretationen sind aber nur in enger Zusammenarbeit und Zusammenschau mit anderen fachverwandten Disziplinen möglich. So sind z. B. hydrogeochemische Untersuchungen für eine Vielzahl an Fragestellungen unverzichtbar. Hydrogeochemische Analysen helfen und unterstützen den Hydrogeologen bei der Beantwortung der Frage – *wo kommt das Wasser her?* ebenso wie bei Fragestellungen über die Genusstauglichkeit bei Ersatzwasserprojekten bis hin zu Aussagen über das Versinterungspotential in Tunneldrainagen.

Welche Fragestellungen sind nun dabei im Einzelnen gemeint – welche Prognosen werden vom Hydrogeologen erwartet?

– Menge der beim Tunnelvortrieb anfallenden Bergwässer,

- Stationen/Bereiche, wo größere Wassermengen anfallen,
- Herkunft der Wässer und mögliche Auswirkungen an der Oberfläche,
- Untersuchungen zu Ersatzwasserstandorten (Eignung der Wässer, Schutzgebietsvorschläge u. dgl.),
- Versinterungspotential der Tunnelwässer,
- Nutzungsmöglichkeiten der Tunnelwässer,
- ...

Um all diese Fragen bestmöglich beantworten zu können und Aussagen für Behördenverfahren, Planungen und Ausschreibungen machen zu können, muss vorweg über den Baugrund eine hydrogeologische Modellvorstellung, das „hydrogeologische Konzeptmodell“, erarbeitet werden.

Hydrogeologische Modellvorstellung

Wasser im Untertagebau bedeutet auf der einen Seite mögliche Erschwernisse beim Auffahren des Gebirges und Kosten in der Beherrschung des Bergwassers in der Bau- und Betriebsphase. Auf der anderen Seite können Bergwasserzutritte messbare Veränderungen und Auswirkungen im hydrogeologischen System nach sich ziehen. Die Schwierigkeit bei der Beschreibung des hydrogeologischen Systems liegt in der Komplexität dieses Systems, welche sich aus der Kombination von statischen und dynamischen Systemkomponenten ergibt. Die Erfassung der statischen und dynamischen Systemkomponenten erfolgt durch die klassischen Methoden der Geologie, Hydrogeologie und Hydrologie sowie von verwandten Fachdisziplinen (u. a. Geophysik, Bodenkunde, Hydrochemie und Geochemie, Isotopenphysik). Die Wechselwirkung der statischen und dynamischen Systemkomponenten ergibt das „hydrogeologische Konzeptmodell“ – als konzeptionelle Vorstellung des Hydrogeologen hinsichtlich des hydrogeologischen Systems (siehe Abb. 1). Aufbauend darauf können verschiedene Eingriffsszenarien und damit verbundene Auswirkungen auf das unterirdische Wasser untersucht und beschrieben werden (REICHL et al., 2002).

Die Gesteine (statische Systemkomponenten), Festgesteine und Lockersedimente, sowie diese bedeckende Bodenbildungen stellen das Gerüst für die Wasserbewegung dar, welche zum Großteil in den Kluft- bzw. Poren Hohlräumen erfolgt. Die Erfassung und Darstellung der „gesteinsspezifischen Eigenschaften“ (z. B. Lithologie, Trennflächensystem) ergibt ein Geologisches Modell, in dem für jeden Punkt des Raumes diese Systemeigenschaften angegeben werden können. In Hinblick auf das Ziel einer hydrogeologischen Systembeschreibung müssen diese „gesteinsspezifischen Eigenschaften“ hinsichtlich ihres Einflusses auf die Wasserbewegung bewertet und zur besseren Übersichtlichkeit zu Gruppen – den hydrogeologischen Homogenbereichen – zusammengefasst werden. Das Ergebnis dieser Bewertung ist ein 3-dimensionales hydrogeologisches Homogenbereichsmodell.

Schwieriger ist die Erfassung und Beschreibung der dynamischen Systemkomponenten „Wasser“. Nicht nur, dass die „wasserspezifischen Eigenschaften“ mit unterschiedlicher Periodizität (z. B. jahreszeitlich oder langjährig) schwanken, sondern es können sich diese Schwankungen auch überlagern. In Wechselwirkung mit dem Gestein, das vom Wasser durchflossen wird, ergeben sich daraus unterschiedliche Entwicklungspfade von den quantitativen und qualitativen Inputbedingungen (z. B. Grundwasserneubildung, hydrochemische und isotopische Zusammensetzung) ausgehend hin zu den quantitativen und qualitativen Outputbedingungen (z. B. Quellschüttungen, Grundwasserstände, hydrochemische und isotopische Zusammensetzung). Das Verständnis dieser Entwicklungspfade auf der Untergrundpassage ermöglicht z. B. Aussagen hinsichtlich Speichereigenschaften der Gesteine, Verweilzeiten der Wässer und deren

Einzugsgebiete. Die Verknüpfung der statischen und dynamischen Systemkomponenten ergibt ein „hydrogeologisches Konzeptmodell“, wobei der Festlegung der Modellgrenzen und deren Eigenschaften eine wichtige Bedeutung zukommt (REICHL et al., 2002).

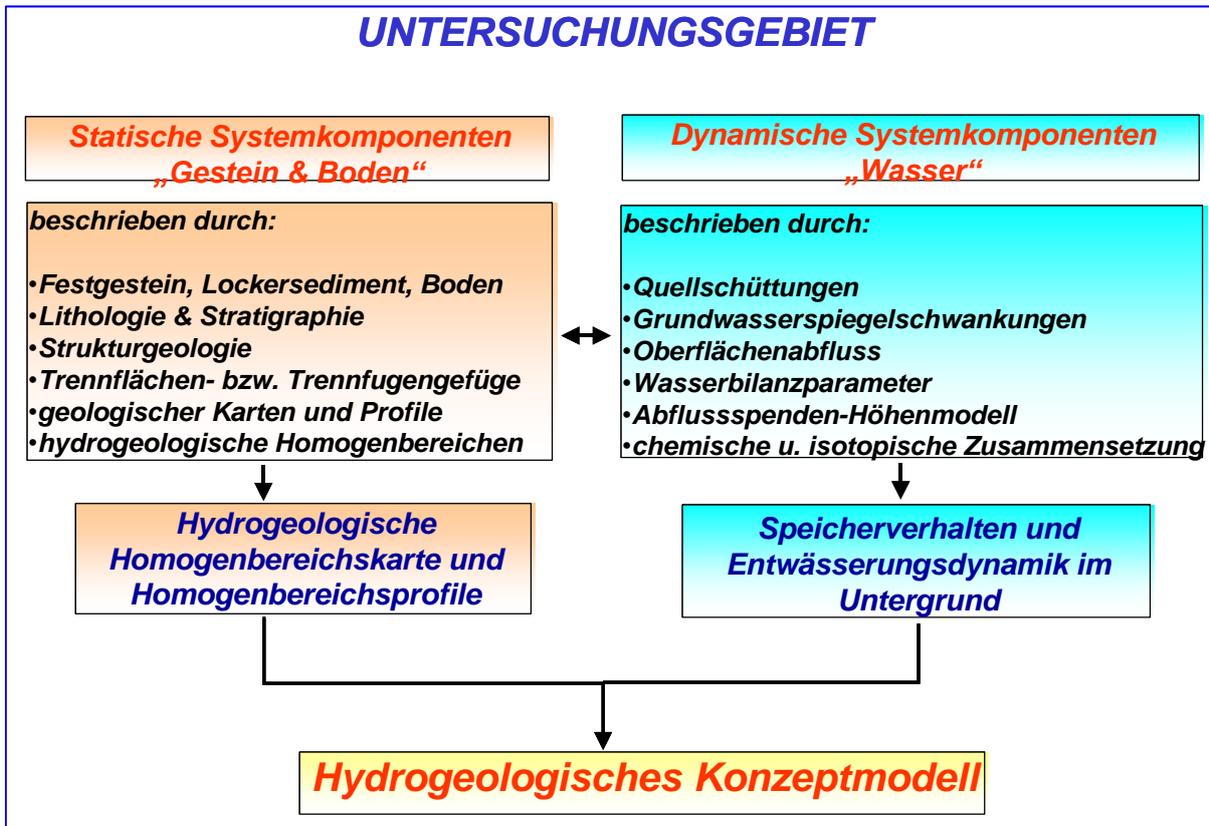


Abbildung 1: Entwicklung eines hydrogeologischen Konzeptmodells; modifiziert nach REICHL et al. (2002)

Kartierungen, Geländearbeiten und Messstellenbau

Ohne die notwendige Datenbasis sind sämtliche Fragestellungen nicht zu beantworten. Es ist bei Tunnelprojekten daher unumgänglich, bereits frühzeitig mit den entsprechenden Kartierungen und Geländearbeiten zu beginnen (FASCHING et al., 2010). Für Bewertungen und Prognosen sind die Ergebnisse flächendeckender Kartierungen dabei ebenso unverzichtbar wie die Betrachtung und Bewertung ausreichend langer Zeitreihen diverser Gelände- und Laborparameter. Unter flächendeckenden Kartierungen soll aber nicht verstanden werden, nur einen Korridorabschnitt an der Erdoberfläche zu kartieren, sondern die hydrogeologischen Aufnahmen sind ausgedehnt auf Einzugsgebietsbasis durchzuführen.

Zur Erlangung ausreichender Datenreihen unterschiedlicher Parameter kommt dem Messstellenbau und den technischen Ausstattungen repräsentativer Messstellen eine sehr wesentliche Bedeutung zu. Anhand des nachfolgenden Beispiels soll gezeigt werden, wie die Gesamtschüttung einer großen Karstquelle in Form hochauflösender Zeitreihen erfasst werden kann, nachdem entsprechende unterschiedliche Messsysteme eingebaut wurden. Der Einsatz unterschiedlicher Messsysteme ist deshalb notwendig, weil das Wasser der Karstquelle nicht nur an einem Punkt anfällt, sondern unterschiedliche Ableitungen in der Quelfassung vorhanden sind.

Die Ausgangslage war, dass an einer unterirdischen Herdmauer einer Stollenfassung das Wasser einer Karstquelle über eine Strecke von mehreren Metern flächenhaft angestaut wird. Zu beiden

Seiten der Herdmauer erfolgt u. a. ein Austritt nach über Tage. An einer Seite erfolgt dies über ein betoniertes Gerinne samt unterirdischem Absturzschacht und anschließender unterirdischer Drainageleitung in den Vorfluter. An der anderen Seite erfolgt die Ausleitung über ein Drainagerohr direkt in einen Fischteich. An der Herdmauer existiert des Weiteren ein Auslaufbauwerk mit freiem definiertem Auslauf in einen mehrere Kilometer entfernten Hochbehälter der Trinkwasserversorgung. Zusätzlich wird an der Herdmauer über eine Pumpleitung ein nahe, jedoch höher gelegener Ortsteil separat mit Trinkwasser versorgt. Es bestehen also 4 unterschiedliche Wasserentnahmen in einer großen Quelfassung. Um die Quellschüttung dieser Karstquelle bestmöglich messtechnisch erfassen zu können, wurden folgende Umrüstungen und Einbauten an den vier beschriebenen Messorten durchgeführt:

– **Ausleitung über betoniertes Gerinne und anschließenden Absturzschacht:**

Einbau eines geeigneten Messüberfalles (siehe Abb. 2) und kontinuierliche Messung des Wasserstandes über eine Drucksonde – die Umrechnung der hier anfallenden Wassermenge erfolgt über eine kalibrierte Wasserstands-Abflussbeziehung (Schlüsselkurve).



Abbildung 2: Errichtung Messüberfall und Einbau Drucksonde zur kontinuierlichen Registrierung des Wasserstandes

– **Ausleitung über Drainagerohr in einen Fischteich:**

Einbau eines Zägezahn-Durchflussmessers in das Drainagerohr (Abb. 3). Es erfolgt die Messung der Wassergeschwindigkeit; anschließend wird diese bei bekanntem Durchflussquerschnitt in die Wassermenge umgerechnet, die hier in den Fischteich abgeleitet wird.

– **Ausleitung über Pumpleitung für höher gelegen Ortsteil:**

Einbau eines Reed-Kontaktes in der Pumpleitung im Wasserzähler (Wasseruhr). Es erfolgt im Datenlogger bereits die Umrechnung der Reed-Kontakt-Daten in Wassermengen und deren Speicherung.

– **Auslaufbauwerk mit freiem definiertem Auslauf in einen mehrere Kilometer entfernten Hochbehälter der Trinkwasserversorgung:**

Die Messung der im Hochbehälter ankommenden Wassermenge erfolgt ebenfalls über den Einbau eines Reed-Kontaktes an der Zuflussleitung (Wasseruhr). Die Umrechnung der Reed-Kontakt-Daten in Wassermengen und die Speicherung dieser Daten wird hier an einem eigens installierten Datenlogger bewerkstelligt.

Zusätzlich werden an der Herdmauer in der Quellsfassung auch noch die Parameter elektrische Leitfähigkeit und Wassertemperatur gemessen. In der nachfolgenden Skizze (Abb. 4) wird das eben beschriebene Einbauschema graphisch dargestellt.

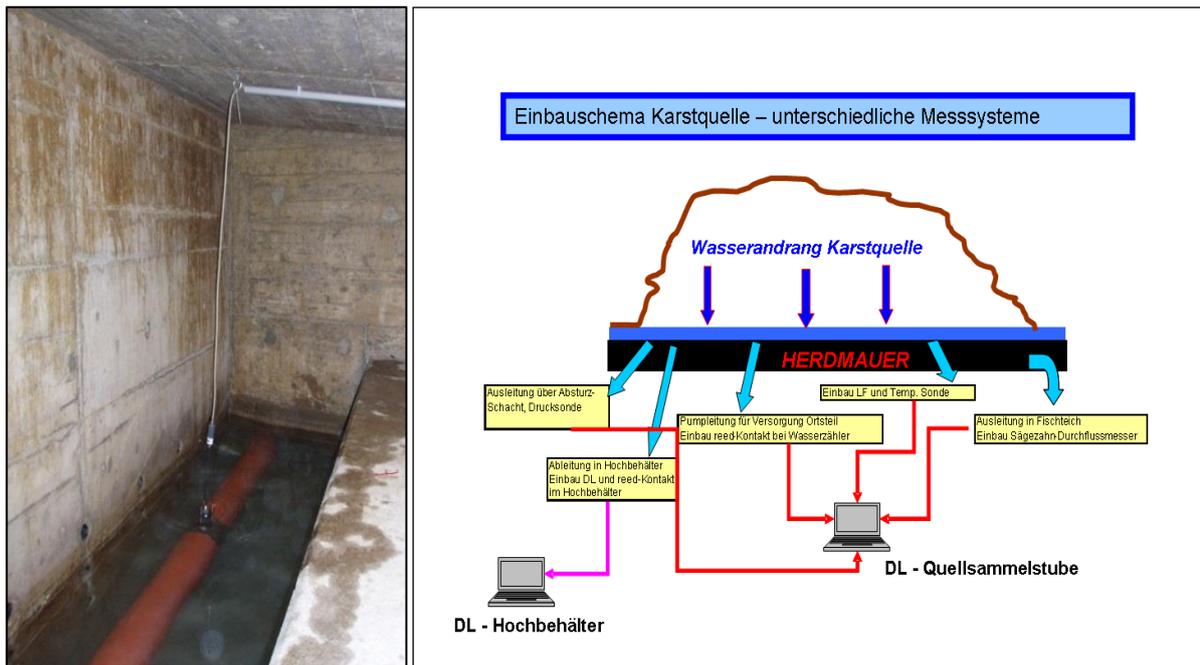


Abbildung 3: Sägezahn-Durchflusssystem

Abbildung 4: Einbauschema unterschiedlicher Messsysteme in einer gefassten Karstquelle zur Messung der Quellschüttung in zeitlich hochauflösender Form

Sämtliche gemessenen Parameter werden an Datenloggern vor Ort gespeichert und in regelmäßigen Abständen ausgelesen. Nach entsprechender Korrektur und Umrechnungsschritte der Daten an den einzelnen Messorten müssen nur mehr die einzelnen Datensätze summiert werden, um die Gesamtschüttung der Karstquelle zu erhalten.

Abflussentstehungsmodellierung, Wasserbilanz

Die Erstellung einer Wasserbilanz im Untersuchungsgebiet ist heute bei großen Tunnelbauvorhaben ein absolut notwendiger Untersuchungsschritt. Es gilt dabei die Frage zu beantworten, wie viel Wasser generell gemäß den klimatischen Bedingungen - z. B. Niederschlag - in einer Region verfügbar ist. Aber nur die Berechnung der Parameter der Wasserbilanz ist für die hydrogeologische Bewertung eines Untersuchungsgebietes heute nicht mehr ausreichend. Vielmehr gilt es auch die ober- und unterirdischen Abflussprozesse bestmöglich zu verstehen und zu quantifizieren und diese flächendeckend modellhaft abzubilden. Nur damit ist in weiterer Folge auch die Datenbasis bestmöglich geschaffen, etwaige Einflüsse an der Oberfläche zu erkennen, diese zuzuordnen und zu

quantifizieren. Auch hier muss vor allem einem ausreichenden Messstellennetz mit hochauflösenden Zeitreihen der Abflüsse ein großer Stellenwert eingeräumt werden. Die Anwendung eines hydrologischen Modells in einem von einem Tunnelbau betroffenen Gebiet verfolgt generell drei Ziele.

Erstens werden anhand des Modells einzelne Komponenten der Wasserbilanz für ein größeres Gebiet im Bereich des Einflussbereichs ermittelt. Nach der generellen Wasserbilanzgleichung

$$N - Q - ET \pm \Delta S = 0$$

stellt N den Niederschlag dar, Q den Abfluss, ET die Evapotranspiration (Verdunstung) und der Restterm $\pm \Delta S$ die Änderung des Wasserspeichers im Gebiet. Der Niederschlag ist aufgrund von Stationsmessungen i. A. bekannt. Jedoch vor allem in gebirgigen Regionen ist die Dichte der Messstationen in der Höhe relativ gering, wodurch häufig Unsicherheiten in der Abschätzung der regionalen Verteilung des Niederschlages auftreten. Die Abflüsse werden kontinuierlich an Pegeln oder Datensammlern an Flüssen und Bächen gemessen. Für Wasserbilanzuntersuchungen sind lange Zeitreihen notwendig, welche im alpinen Raum nicht immer vorhanden sind. Die anderen beiden Größen der Wasserbilanzgleichung können für ein größeres Gebiet nicht gemessen werden. Sie werden aus dem hydrologischen Modell bestimmt. Die aktuellen Verluste durch Verdunstung, Wasseraufnahme durch Pflanzen und Transpiration hängen sehr stark von der aktuell in den Böden in einem Gebiet verfügbaren Wassermenge (= Bodenfeuchte) ab. Nur wenn genügend Wasser in der oberen Bodenzone vorhanden ist, kann die gesamte potentiell mögliche Verdunstung, die sowohl aus den atmosphärischen Randbedingungen wie Sonneneinstrahlung, Temperatur, Wind etc. als auch über die vorherrschende Vegetation über Formeln abgeschätzt werden kann, in Rechnung gestellt werden. Daher werden zu Wasserbilanzuntersuchungen solche Modelle eingesetzt, die kontinuierlich für jeden Tag die Bodenfeuchte bilanzieren. Mit dem Modell wird die Bodenfeuchtedynamik, d. h. das Aufsättigen und Austrocknen der Böden je nach Witterung, flächendifferenziert nach vorherrschenden Vegetationsarten und Böden ermittelt. Mit der Simulation der Bodenfeuchte geht aus dem Modell auch die Bestimmung des aktuell in einem Gebiet gespeicherten Wassers einher, was zur Ermittlung der Größe $\pm \Delta S$ in der Wasserbilanzgleichung notwendig ist. Das Ergebnis der Simulation ist die Wassermenge, die nach Abzug der Verdunstung aus dem Gebiet abfließt, im Gebiet gespeichert wird oder in tiefgründigere Zonen sickert. Stehen zuverlässige Abflussdaten an einem Pegel zur Verfügung, kann das Modell für das zugehörige Einzugsgebiet getestet bzw. „verifiziert“ und damit die Güte der ermittelten Wasserbilanz eingeschätzt werden. Dies betrifft nicht nur die simulierten Wasserbilanzkomponenten, sondern auch die aus Messdaten abgeleiteten Größen wie Niederschlag und Abfluss, welche in gebirgigen Regionen häufig mit Unsicherheiten behaftet sind.

Zweitens verlangt die Erstellung und Anwendung eines hydrologischen Modells immer ein großes Maß an grundsätzlichem Verständnis der in einem Gebiet ablaufenden hydrologischen Prozesse und Mechanismen. Aus dem Test des Modells an Abflussdaten lässt sich daher auch die Vorstellung des Anwenders über die Bedeutung von verschiedenen Abläufen der Entwässerung in einem Gebiet (wie Oberflächenabfluss, Versickerung, Speicherung im Boden oder tiefere Fließwege bzw. tiefgründige Entwässerung) testen und hinterfragen. Die Ausprägung dieser Prozesse hängt stark von der Gebietscharakteristik ab, und die Prozesse laufen typischerweise auf unterschiedlichen Zeitskalen ab, weshalb die Abflussdynamik zur Identifikation bzw. Differenzierung dieser Prozesse eine große Rolle spielt. Bezüglich der Fragestellungen im Tunnelbau ist vor allem der Anteil der tiefgründigen Entwässerung, etwa entlang von Störungen oder einzugsgebietsübergreifend (z. B. in verkarsteten Gebieten), von großem Interesse. Anhand der Modellsimulation kann der Anteil von oberflächlichem

bzw. oberflächennahem Abfluss quantifiziert und aus einem Vergleich der simulierten und gemessenen Abflüsse (Überschuss/Defizit) auf die Bereitschaft im Gebiet zur tiefgründigen Entwässerung geschlossen werden. Im Modell sind Gebietscharakteristik und Prozesse – vereinfacht – abgebildet. Das Modell kann daher als wichtiges Werkzeug zur hydrologischen Analyse in einem Gebiet dienen.

Drittens ist das hydrologische Modell ein wichtiges Werkzeug zur Abschätzung des Einflusses des Tunnels auf den Wasserkreislauf an der Oberfläche und somit unverzichtbar für die Beweissicherung. Wenn das Modell im unbeeinflussten Zeitraum sorgfältig verifiziert und validiert ist, d. h. aus den atmosphärischen Randbedingungen die Wasserbilanz entsprechend den Messdaten wiedergibt, kann es verwendet werden, um in der Bauphase und nach Fertigstellung des Tunnels die klimabedingte Variabilität der Abflüsse und Schüttungen von Änderungen aufgrund des Tunnelleinflusses zu trennen. Es ist jedoch unumgänglich, dass das Modell in gewissen Abständen aktualisiert wird und Berechnungen bzw. Modellanpassungen von Neudaten regelmäßig erfolgen. Nur dann können z. B. auftretende Abweichungen von gemessenen Werten im Vergleich zur Abflusssimulation analysiert, bewertet und interpretiert werden. Zudem ist es natürlich auch notwendig, das Modell nach Fertigstellung des Tunnels bereits in der Betriebsphase über einen ausreichend langen Zeitraum kontinuierlich weiter laufen zu lassen.

Nachfolgend ist der vorgestellte Prozessablauf in der Abb. 5 vereinfacht als Prinzipskizze dargestellt. In Abb. 6 ist dazu die Modellstruktur an Hand des Modellsystems MIKE SHE (REFSGAARD & STORM, 1995) graphisch als Beispiel beschrieben.

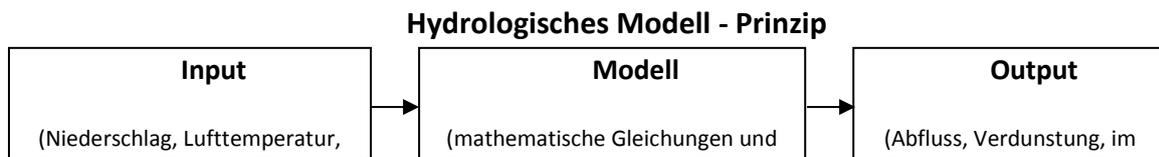


Abbildung 5: Prinzipskizze der Abflussentstehungsmodellierung

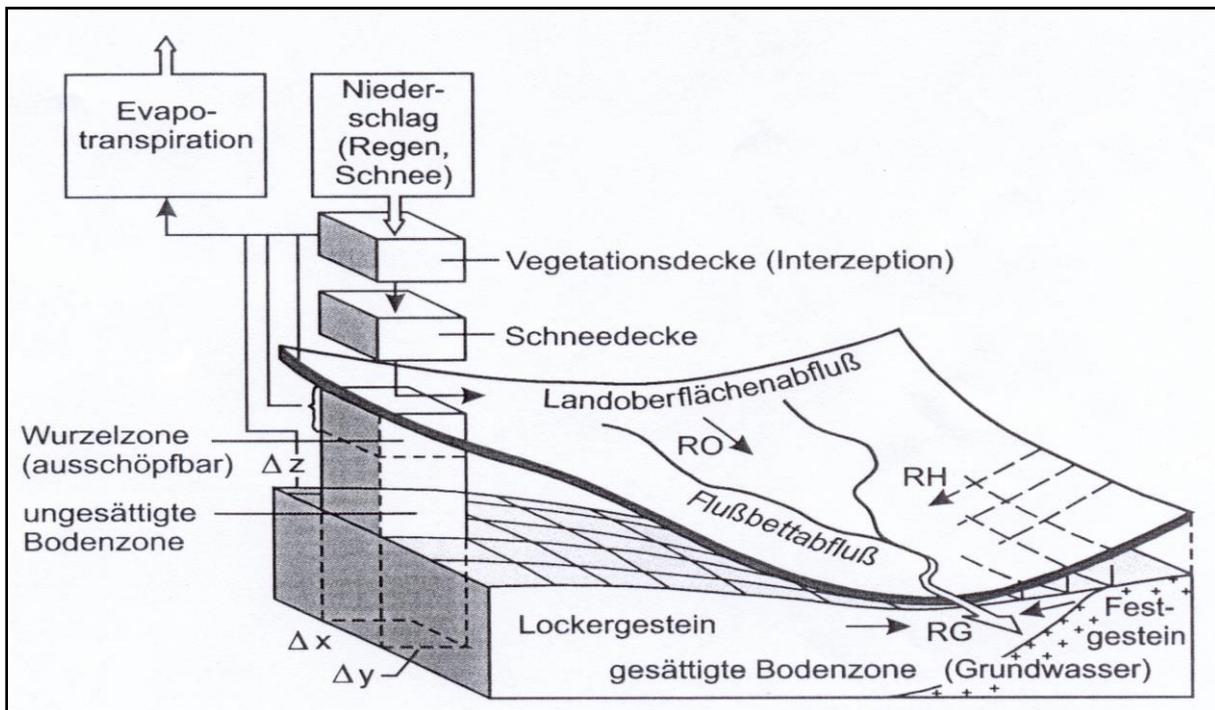


Abbildung 6: Räumliche Aufgliederung eines Einzugsgebiets und simulierte hydrologische Prozesse mit dem Modellsystem MIKE SHE

Wie jedes Modell stellt ein hydrologisches Modell ein Abbild der Realität dar, in welchem verschiedene hydrologische Prozesse anhand mathematischer Gleichungen mit zugehörigen Parametern beschrieben sind. Aus den Eingangsgrößen („Input“), üblicherweise Niederschlag, Lufttemperatur und potentielle Verdunstung, werden als Ergebnis („Output“) verschiedene Größen wie Abfluss, Verdunstung etc. erzeugt (Abb. 5). Allerdings können in der Hydrologie viele Parameter in den mathematischen Gleichungen nicht gemessen werden, da sie räumlich sehr stark variieren (z. B. betreffend Boden). Außerdem stellt das Modell eine Vereinfachung der komplexen Vorgänge in der Natur (Infiltration, Fließen im Untergrund etc.) dar, weshalb immer ein Maß an Kalibrierung der einzelnen Parameter notwendig ist. Bei einer Kalibrierung werden die Parameter – im plausiblen Rahmen – so lange variiert, bis eine bestmögliche Deckung der simulierten Abflüsse mit den Abflussdaten an einem Pegel bzw. Datensammler erzielt wird (siehe Abb. 7). Durch die Kalibrierung können systematische Fehler verringert und somit die Zuverlässigkeit des Modells erhöht werden. Zusätzlich zur Kalibrierung ist auch eine Validierung an Abflussdaten, die in Zeiträumen unterschiedlich zum Kalibrierungszeitraum gemessen wurden, notwendig. Bei erfolgreicher Validierung ergibt sich ein „prognosefähiges“ Modell, das zur Analyse von natürlich oder anthropogen bedingten Veränderungen des Wasserhaushalts in einem Gebiet eingesetzt werden kann.

Bei großen Tunnelprojekten ist es notwendig, eine große Anzahl an Abflussmessstellen an der Oberfläche einzurichten. Davon müssen eine ausreichende Anzahl an Messstellen mittels Datenloggern ausgestattet werden, um dadurch zeitlich hochauflösende Zeitreihen des Oberflächenabflusses zur Verfügung zu haben. Dadurch wird eine große räumliche Abdeckung der Kalibrierung erzielt.

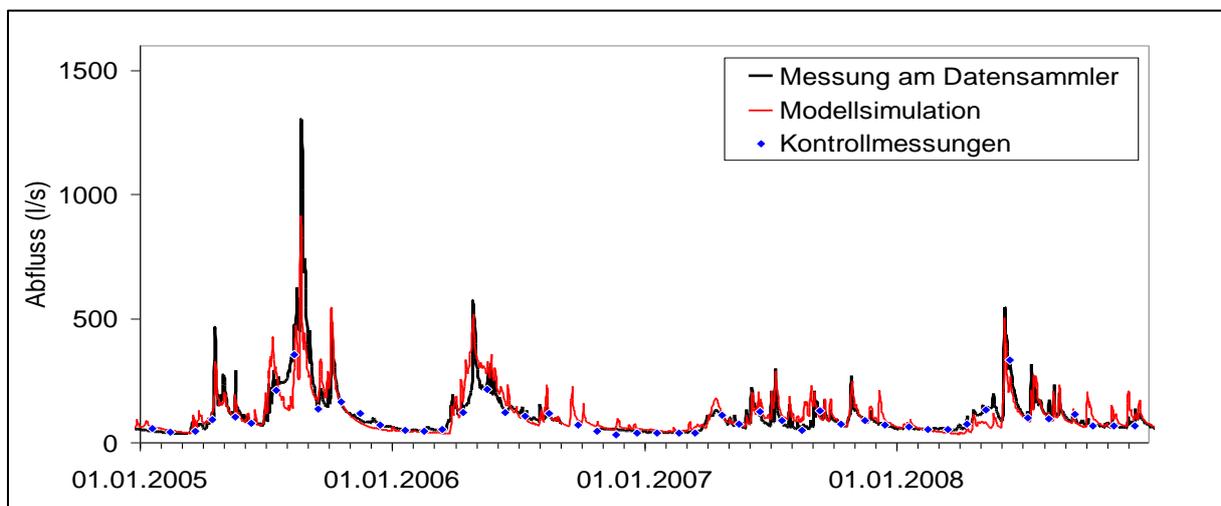


Abbildung 7: Beispiel für eine erfolgreiche Kalibrierung der Abflussdaten an einer Oberflächenabflussmessstelle

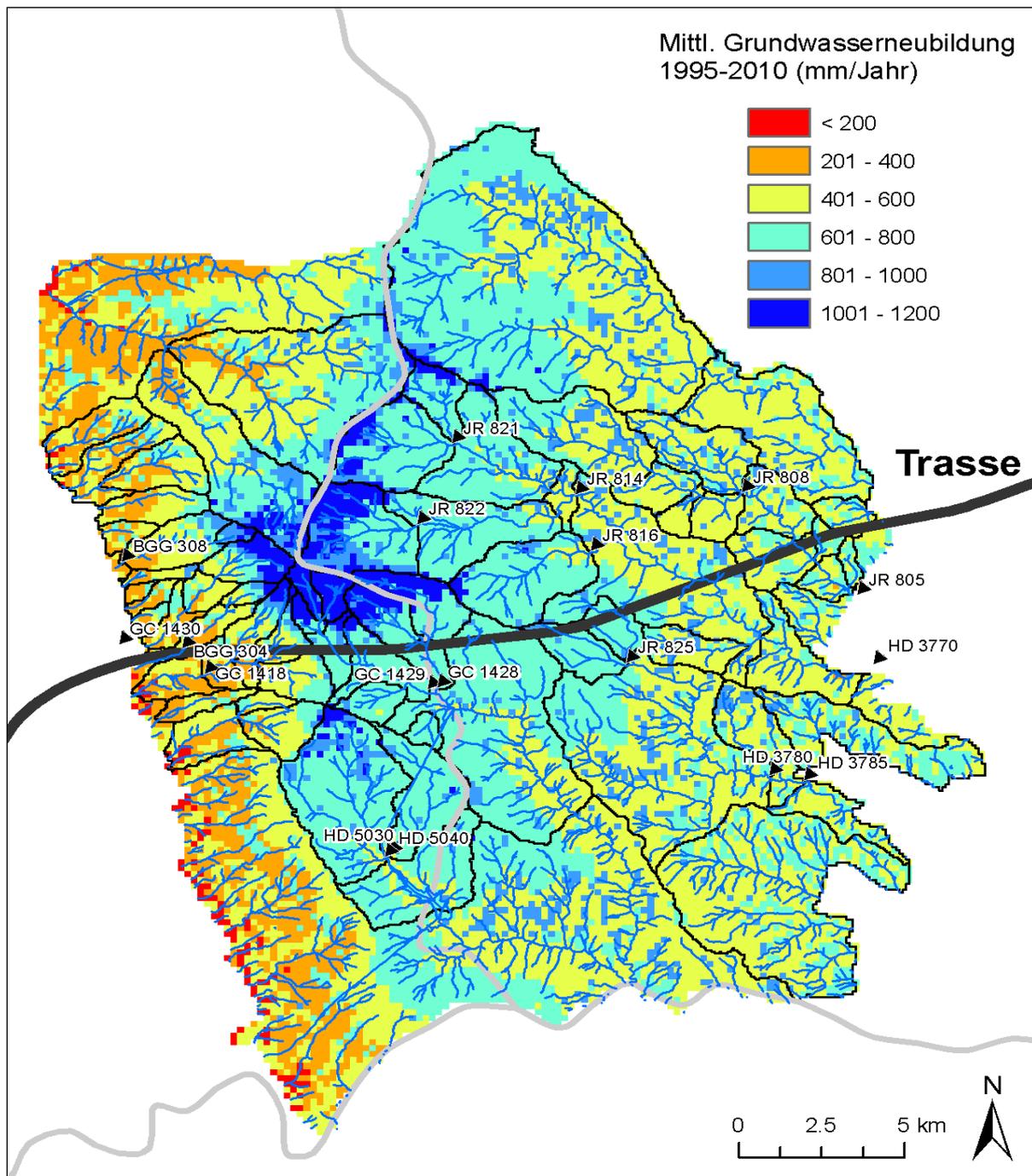


Abbildung 8: Simulierte Grundwasserneubildung (= Gesamtabfluss abzüglich des oberflächlich abfließenden Wassers) und Einzugsgebietsstruktur gemäß der vorhandenen Abflussmessstellen mit Datenloggerausstattung

Als Ergebnis der Abflusentstehungsmodellierung wird nicht nur Abfluss an einem Punkt dargestellt (als ein Indikator für die Summe der Prozesse im zugehörigen Einzugsgebiet), sondern aufgrund der Anwendung eines flächendifferenzierten Modells ist auch die räumliche Verteilung von Wasserbilanzgrößen darstellbar. Dies ist zur Veranschaulichung in der Abb. 8 graphisch dargestellt, wo die simulierte Grundwasserneubildung aus der Wasserbilanz flächendeckend abgelesen werden kann.

Bohrlochuntersuchungen und hydraulische Bohrlochversuche

Gebirgskörper sind aufgrund ihrer tektonischen Entwicklung zumeist komplex und heterogen aufgebaute tektonische oder lithologische Einheiten mit variierenden hydraulischen Eigenschaften. Die hydraulische Charakterisierung dieser heterogenen Gebirgskörper ist bei großen Infrastrukturprojekten eine große Herausforderung, aber unumgänglich, um die notwendigen hydrogeologischen Prognosen zu erstellen. Vor allem die Heterogenitäten durch Störungzonen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Maßstäbe erfordern den Einsatz passender Untersuchungsmethoden. Erkundungsbohrungen und die in ihnen durchführbaren bohrlochgeophysikalischen und hydraulischen Untersuchungen stellen unverzichtbare Informationsmöglichkeiten in der Vorerkundung derartiger Großprojekte dar. Hydraulische Bohrlochversuche ermöglichen die direkte Erfassung hydraulischer Gebirgseigenschaften sowohl über größere Gebirgsbereiche als auch über kleinräumig diskrete Gebirgsabschnitte. Geophysikalische Bohrlochlogs ermöglichen eine über die gesamte Bohrlochteufe hoch aufgelöste Information der petrophysikalischen Eigenschaften und stellen somit eine wichtige indirekte Möglichkeit und Ergänzung zur Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften dar. Mit Hilfe dieser Untersuchungsmethoden können Gebirgseinheiten/-bereiche erfasst und charakterisiert werden, wodurch sich Einheiten mit ähnlichen hydrogeologischen und hydraulischen Eigenschaften zu „hydrogeologischen Einheiten“ zusammenfassen lassen (REICHL et al., 2002).

Der Begriff „hydraulische Bohrlochversuche“ wird als Oberbegriff für unterschiedliche stationäre und instationäre Versuche in einer offenen oder ausgebauten Bohrung verwendet. Zudem können sich die Tests über die gesamte Bohrlochlänge oder nur über Teilstrecken, welche mittels Packern (Einfach- oder Mehrfachpacker) separiert werden, erstrecken (z. B. NRC, 1996; HORNE, 2005). Übergeordnet können drei Gruppen von hydraulischen Bohrlochversuchen unterschieden werden:

- Injektions- oder Produktionstests mit konstanter Rate (z. B. Pumpversuche),
- Injektions- oder Produktionstests mit konstantem Druck (z. B. Wasserabpressversuche),
- Injektions- oder Produktions- Slug- und Pulse-Versuche.

Typische Untersuchungsziele sind die hydraulischen Eigenschaften eines Gebirgskörpers wie hydraulische Durchlässigkeit, Transmissivität und Speicherkoeffizient, der statische Formationsdruck sowie im Besonderen bei Packerversuchen das Fließmodell und etwaige Bohrlocheinflüsse auf das Fließverhalten wie Skin-Effekte. Die Wahl des jeweilig geeigneten Tests ist vorwiegend von den Faktoren Zielstellung, Zeitrahmen und Formationsdurchlässigkeit abhängig. In der GDA-E1-041 wird eine Übersicht über die verschiedenen hydraulischen Versuche und ihren Verwendungsmöglichkeit in Abhängigkeit der Durchlässigkeit und der daraus resultierenden Versuchsdauer gegeben (Abb. 9).

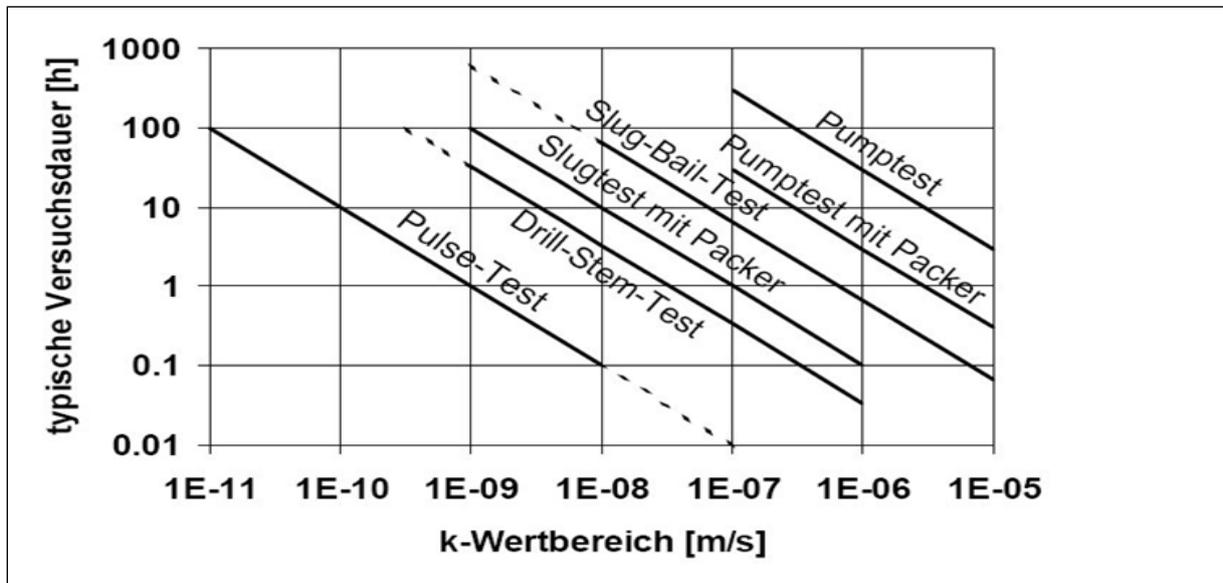


Abbildung 9: Übersicht von hydraulischen Bohrlochversuchen; unterteilt nach Durchlässigkeit versus Versuchsdauer

Hydraulische Packertests ermöglichen die Bestimmung hydraulischer Gebirgsparameter sowie der hydraulischen Potentiale von bestimmten Gebirgsbereichen in diskreten Teufenstufen. Der Ablauf dieser Versuche entspricht im Wesentlichen einer Testsequenz bestehend aus Testinitialisierung, einer diagnostischen Phase zur ersten Parameterabschätzung, der Hauptphase und einer Schlusssequenz (z. B. REICHL et al., 2006). Die Tests ermöglichen eine direkte Bestimmung der hydraulischen Gebirgseigenschaften Speicherkoefizient und Transmissivität innerhalb der Testintervalle, aus denen die hydraulische Durchlässigkeit abgeleitet werden kann. Durch eine Vielzahl von Erkundungsbohrungen, welche im Zuge von großen Infrastrukturprojekten abgeteuft werden und in denen hydraulische Versuche durchgeführt werden können, ist eine hydraulische Charakterisierung von tektonischen und lithologischen Einheiten auch für größere, heterogen aufgebaute Untersuchungsgebiete möglich (Abb. 10).

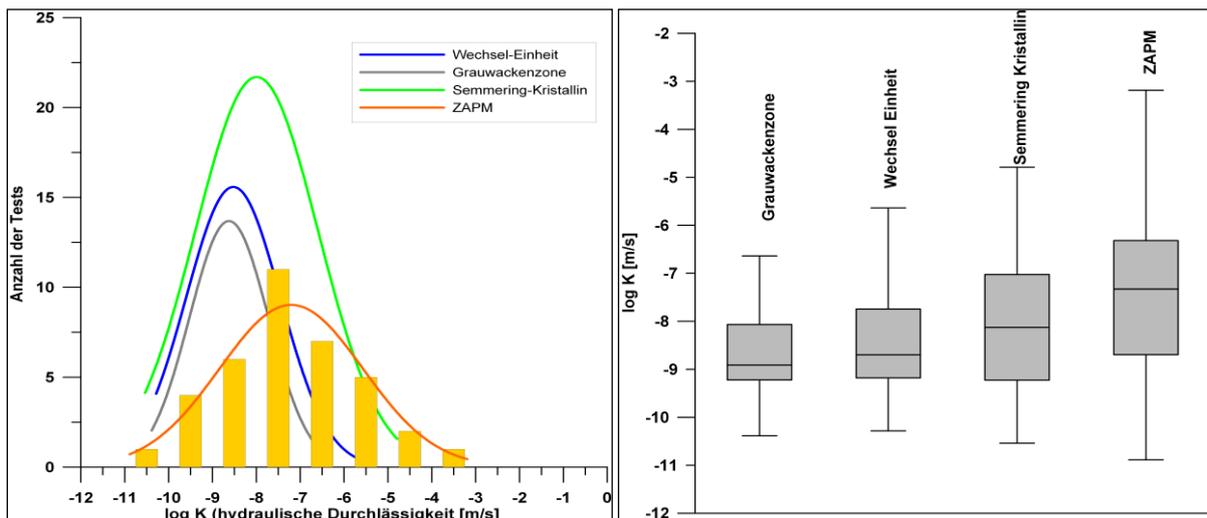


Abbildung 10: Charakterisierung von unterschiedlichen tektonisch/lithologischen Einheiten auf Basis der hydraulischen Durchlässigkeit

Neben lithologischen und tektonischen Abhängigkeiten können auch Korrelationen zwischen hydraulischen Eigenschaften und der Tiefe mittels Packerversuchen (z.B. LEE & FARMER, 1993; STÖBER,

2007; WINKLER & REICHL, 2014) bestimmt werden (Abb. 11). Des Weiteren ermöglichen Packertests eine gezielte, teufengebundene Probenahme von Wässern für isotopehydrologische und hydrochemische Untersuchungen.

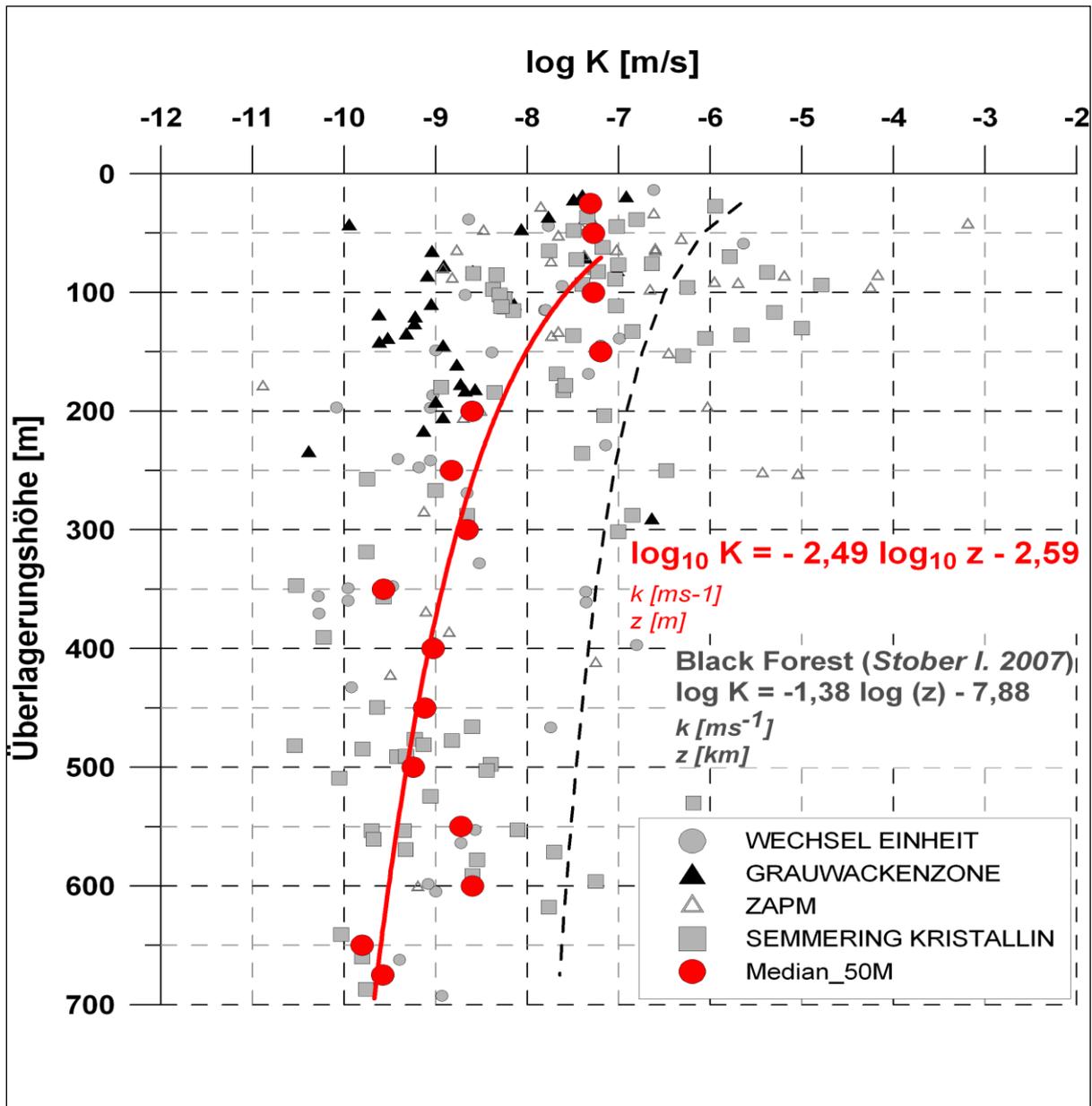


Abbildung 11: Charakterisierung von unterschiedlichen tektonischen/lithologischen Einheiten auf Basis hydraulischer Durchlässigkeiten versus Überlagerungshöhe. Modifiziert nach WINKLER & REICHL (2014)

Hydrogeochemie und Isotope

Nicht nur die hydraulischen Bedingungen sind für eine hydrogeologische Bewertung des Untergrundes maßgeblich, auch die hydrochemische und isotopehydrologische Typisierung der Wässer nimmt einen hohen Stellenwert ein. Mit Hilfe dieser Typisierungen können wesentliche Aussagen vor allem über die Herkunft der Wässer abgeleitet werden. (REICHL et al., 2006).

Im nachfolgenden Diagramm (Abb. 12) wird anhand eines Piper-Diagrammes veranschaulicht, wie die Analysenergebnisse von Wässern graphisch aufbereitet werden können, um hydrogeochemische Unterscheidungen und Interpretationen anstellen zu können.

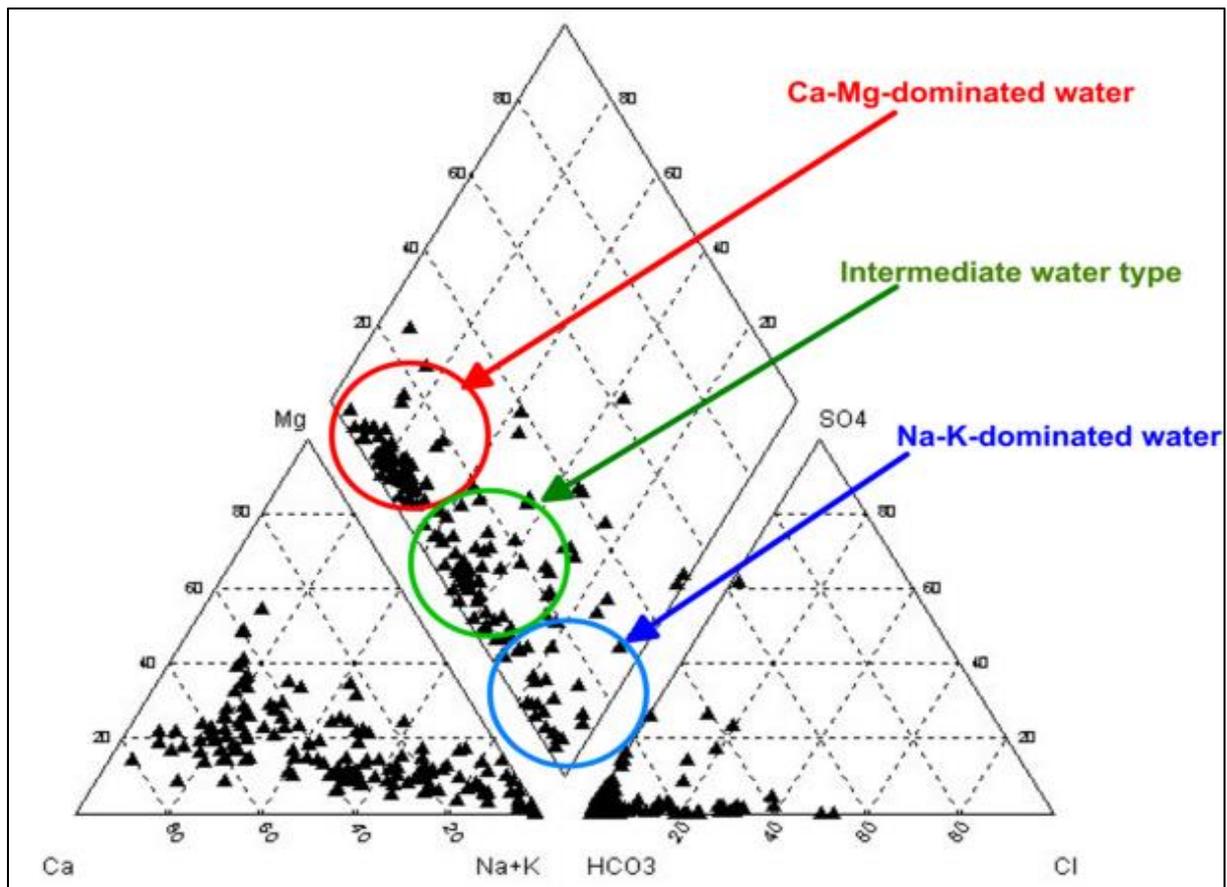


Abbildung 12: Typisierung von Wässern mit Hilfe des Piper-Diagrammes

Qualitative Untersuchungen zur Wasserchemie und Mikrobiologie sind zudem anzustellen, wenn es darum geht, mögliche Ersatzwasserstandorte in Hinblick auf ihre Trinkwassergenusstauglichkeit zu untersuchen oder auch Aussagen über die Mischungsmöglichkeit mit anderen bereits vorhandenen Wässern zu tätigen.

Immer mehr rücken in jüngster Vergangenheit Fragestellungen zur Sinterproblematik von Tunnel drainagen in den Vordergrund. Dabei sind entsprechende hydrogeochemische Untersuchungen in Verbindung mit Modellrechnungen unverzichtbare Bestandteile in der Beantwortung der Fragen zum Sinterverhalten der zutretenden Bergwässer geworden. In der nachfolgenden Abbildung wird anhand einer Systemskizze (siehe Abb. 13) veranschaulicht, welche Reaktionsabläufe bei der Sinterbildung stattfinden. Zudem wird am nachfolgenden Bild verdeutlicht, wie wichtig bereits in der Planung das Verständnis von Versinterungsabläufen ist. Dies hat Auswirkungen z. B. auf die Wahl und den Einsatz von Bauhilfsstoffen (eluatarme Betone), aber auch bei der Planung von Putznischen u. dgl., um im Betrieb bei Tunnelwartungsarbeiten so zeit- und kosteneffizient als möglich agieren zu können. Zusätzlich können auf Basis entsprechender Untersuchungsergebnisse Empfehlungen für den richtigen Einsatz von Inhibitoren gegeben werden (siehe dazu: DIETZEL et al., 2008a, b, c; DIETZEL et al., 2009; DIETZEL et al., 2010; MITTERMAYR et al., 2008; MITTERMAYR et al., 2012a,b).

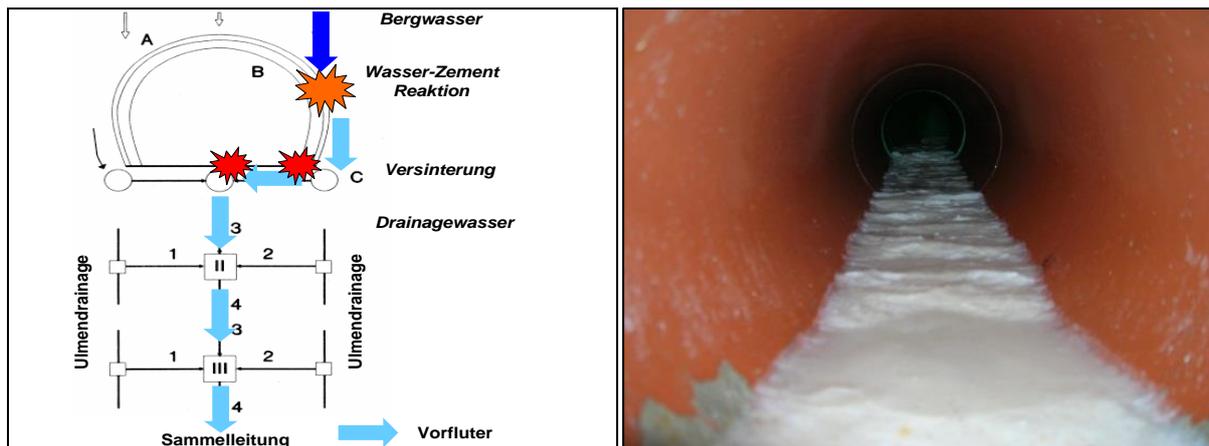


Abbildung 13: Schematischer Querschnitt und Grundriss des Drainagesystems von Tunnelbauten; Ansicht einer Tunneldrainage mit Calcit-Ausfällungen

Für die Charakterisierung der Wasserbewegung stellen die sogenannten Umweltisotope Deuterium (^2H), Sauerstoff-18 (^{18}O) und Tritium (^3H) geeignete Tracer dar. Als native Bestandteile des Wassermoleküls verhalten sich die Umweltisotope hydrochemisch nahezu konservativ und erlauben die direkte Verfolgung der Wasserbewegung. Gleichzeitig ermöglichen Umweltisotope Aussagen über die Herkunft, die mittlere Einzugsgebietshöhe und die Speicherung der Wässer im Untergrund. Dies ist insbesondere in alpinen Gebieten mit ausgeprägter Topographie und lithologisch uneinheitlichen Einzugsgebieten von Bedeutung. Hier kommt es im Bereich von verkarsteten Karbonatgesteinen und größeren Störungszonen zum Teil zu gebietsübergreifenden Entwässerungen, so dass das orographische Quelleinzugsgebiet mit dem tatsächlichen hydrologischen Einzugsgebiet nicht übereinstimmt.

Methodischer Ansatz - Stabile Isotope (Sauerstoff 18, Deuterium):

In alpinen Gebieten können die Sauerstoff-18-Gehalte bzw. die Deuteriumgehalte von Quellwässern zu einer Abschätzung der mittleren Höhe des hydrologisch wirksamen Einzugsgebietes verwendet werden, da es mit zunehmender Einzugsgebietshöhe zu einer Abnahme der ^{18}O -Gehalte in den infiltrierenden Niederschlägen kommt. Da die Quellwässer in Abhängigkeit von ihrer Verweilzeit und ihrer Speicherung im Untergrund jedoch oft jahreszeitlichen Schwankungen der Isotopengehalte unterliegen, sollten für die Berechnung und Interpretationen nur solche Messstellen herangezogen werden, bei denen zumindest eine einjährige Datenreihe vorhanden ist.

Methodischer Ansatz – Tritium ^3H :

Tritium ^3H gelangte in großen Konzentrationen mit den nuklearen Tests der 1950er- und 1960er-Jahre in die Atmosphäre, entsteht in geringen Konzentrationen aber auch auf natürlichem Weg und wird mit dem Niederschlag in das aquatische System eingetragen. Tritium gibt Hinweise über die mittleren Verweilzeiten des Wassers im Untergrund. Damit dient Tritium der Wassertypisierung und der Interpretation von Speichereigenschaften und dem Aquifervolumen der wasserführenden Gebirgseinheiten.

Grundlage für die hydrogeologische Interpretationsmethodik der Tritiumgehalte von Wässern ist die Ausgangskonzentration von Tritium im Niederschlag und die damit verbundene Markierung der versickernden Wässer bzw. die Halbwertszeit des radioaktiven Tritiums von etwa 12,3 Jahren. Abb. 14 zeigt den Verlauf des Tritium-Gehaltes im Niederschlag (Graz, Wien) seit den Bombentests in den 50er- und 60er-Jahren. Der Farbbalken im rechten Bereich des Diagramms stellt beispielhaft für alpine Verhältnisse Tritiummittelwerte von Wasserproben aus Ostösterreich im Raum Semmering-

Wechsel dar und klassifiziert die analysierten Wässer nach deren Verweilzeiten. Daraus ergibt sich eine Klassifizierung von Wässern langer Verweilzeit (Werte <6 TU, blau) und Wässern mit geringer Verweilzeit bzw. Mischwässern (6-18 TU, grün und gelb). Wässer mit Tritiumgehalten über 18 TU stellen wiederum Wässer mit erhöhter Verweilzeit dar. Von besonderer Bedeutung sind Wässer mit erhöhten Verweilzeiten, da diese länger gespeicherte Wasservorkommen repräsentieren und von kurz gespeicherten Wasservorkommen unterscheiden und damit Auskunft über die Zirkulationspfade im aquatischen System geben.

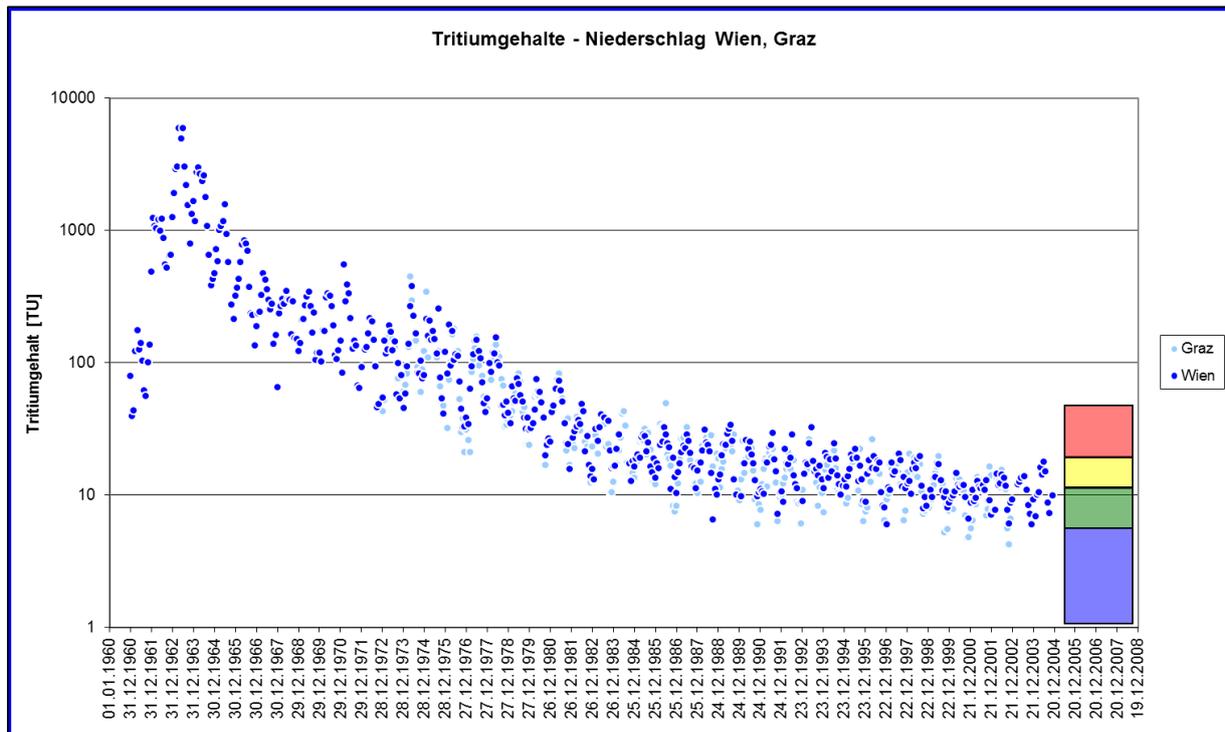


Abbildung 14: Verlauf vom Tritiumgehalt im Niederschlag in Verbindung mit Klassifizierung von ausgesuchten Wässern im alpinen Raum Semmering-Wechsel (Östösterreich)

Nutzung von Tunnelwässern

Tunnelwasser bereitet beim Tunnelvortrieb oft Erschwernisse oder erfordert zusätzliche Baumaßnahmen. Auch in der Betriebsphase, wo es bei dem(den) Portal(Portalen) anfällt, fließt es meist ungeschätzt und ungenutzt in den nächsten Vorfluter. Dieser Sichtweise widersprechend kann Tunnelwasser aber auch aktiv in mögliche Nutzungsüberlegungen eingebunden werden.

Die Nutzungsmöglichkeiten können entsprechend der anfallenden Tunnelwassermenge, Tunnelwasserqualität und Tunnelwassertemperatur in eine energetische Nutzungskomponente (Erdwärme und Erdkälte) und eine Komponente der Wasserversorgung (Brauchwasser, Trinkwasser, Notwasservorsorge, Spezialnutzungen) eingeteilt werden (siehe z. B. DOMBERGER & REICHL, 2008a,b; DOMBERGER, 2009; DOMBERGER, 2010).

Es gibt internationale und nationale Beispiele für die Nutzung von Tunnelwasser. Hinsichtlich der energetischen Nutzungskomponente ist die Schweiz besonders hervorzuheben, die einige Heizsysteme mit dem Energieträger Tunnelwasser bereits realisiert hat. Hinsichtlich der Nutzung von Tunnelwasser im Sinne der Wasserversorgung existieren nur wenige Beispiele (siehe u. a. RYBACH et al., 2003; KOHL, 2004). Nutzungsüberlegungen können auf Bestandstunnel angewendet werden,

sollten aber im Speziellen auch bei der Planung und Bauausführung von Neutunneln schon möglichst frühzeitig einfließen.

An eine Nutzung von Tunnelwasser sollte in enger interdisziplinärer Zusammenarbeit über die gesamte Planungs- und Bauzeit eines Tunnels herangegangen werden. Ressourcenbewertung, bauliche Umsetzung und bedarfsgerechte Planung sind für eine zielgerichtete Tunnelwassernutzung von vorrangiger Bedeutung.

Bedarfsanalysen (Heiz- oder Kühlenergie, Wasserversorgung), Analysen der infrastrukturellen Rahmenbedingungen, wasserrechtliche und naturschutzrechtliche Rahmenbedingungen, Ressourcenabschätzung, Tunnelbautechnik und Wirtschaftlichkeit repräsentieren nur einige der relevanten und oft in Wechselwirkung stehenden Aspekte. Beispielsweise steht der Injektionsaufwand zur Reduktion von Tunnelwasserzutritten den Kosten und dem möglichen Nutzen von Tunnelwassernutzungen gegenüber.

Die hydrogeologische Ressourcenbewertung stellt den Ausgangspunkt der langen Kette von Nutzungsaspekten dar. Die jahreszeitlichen Schwankungen und die Minimalwerte der Menge, Qualität und Temperatur von Tunnelwasser sind die Eckdaten einer möglichen Nutzung. Weiterhin ist der Zeitpunkt des Auftretens dieser Minimalwerte von größter Bedeutung für die Nutzungsüberlegungen. Beispielsweise ist Heizenergie vermehrt in den Wintermonaten bereitzustellen und Wasser, wenn entsprechender Bedarf besteht - z. B. im Fall von geringer Schüttung anderer Wasserspender. Speziell Tunnel mit hohen Überdeckungen können Wässer mit hohen Verweilzeiten führen, die oft verzögert und gedämpft oder gar nicht auf Schadstoffeinträge aus der Umwelt oder Trockenzeiten an der Oberfläche reagieren. Diese Zusammenhänge stellen den zentralen Inhalt einer Ressourcenbewertung dar.

Die technisch-rechtlich-wirtschaftlichen Zusammenhänge bei geplanten Tunnelwassernutzungen sind sehr vielfältig. Neben ressourcenseitigen Aspekten (Geologie, Hydrogeologie) sind die technischen (Wasserfassung und Wasserableitung, Tunnelbau) und die wasserrechtlichen und umweltrelevanten Aspekte zu berücksichtigen. Die Einrichtung einer interdisziplinären Expertengruppe wäre ein günstiger Ausgangspunkt zur Diskussion der zukünftigen Vorgangsweise im Zusammenhang mit der Nutzung von Tunnelwasser und würde den vielschichtigen Nutzungsaspekten entsprechen.

Schlussfolgerung und Zusammenfassung

Anhand der vielen unterschiedlichen hydrogeologischen Fragestellungen im Tunnelbau kann sehr deutlich abgeleitet werden, dass auch unterschiedliche Untersuchungsmethoden zum Einsatz gelangen müssen. Die Fragestellungen reichen von Aussagen über die zu erwartenden Bergwassermengen samt deren hydrogeochemischer Zusammensetzung, über die zu erwartenden Spitzenwasserzutritte, über mögliche Auswirkungen auf Bergwasserausleitungen, über die Eignung von Quellen als mögliche Ersatzwasserstandorte samt Schutzgebietsvorschlägen, über das Sinterverhalten von Bergwässern in den Tunnel drainagen samt Empfehlungen zur Verhinderung bzw. Verzögerung der Ausfällungen bis hin zu möglichen Nutzungsvarianten der anfallenden Berg- bzw. Tunnelwässer. Um all diese Fragen bestmöglich beantworten zu können, muss zunächst einmal die notwendige Datenbasis geschaffen werden, die nur durch intensive Messungen und Probenahmen im Gelände samt dem dazu notwendigen z. T. sehr schwierig umzusetzenden Messstellenbau und der notwendigen Messstellenwartung erreicht werden kann.

Zudem ist es bei allen Fragestellungen notwendig, eine rege Zusammenarbeit mit vielen fachverwandten Disziplinen durchzuführen. Dies auch deshalb, weil heute bereits eine große

Spezialisierung auf allen Fachgebieten stattgefunden hat. Nur dadurch wird es möglich sein, vor allem bei Tunnelbauvorhaben mit großen Überlagerungen die z. T. hoch komplexen Zusammenhänge und schwierig zu prognostizierenden Gebirgsabschnitte bestmöglich beschreiben und bewerten zu können. Nur dadurch ist es der Hydrogeologie erst möglich, die an sie gestellten Fragen bestmöglich beantworten zu können und die notwendigen Prognosen zu erstellen.

Referenzen

- Dietzel, M., T. Rinder, A. Niedermayr, F. Mittermayr, A. Leis, D. Klammer, S. J. Köhler, & P. Reichl (2008a): Ursachen und Mechanismen der Versinterung von Tunneldrainagen. - Berg- und hüttenmännische Monatshefte, 153 10, S. 369 – 372.
- Dietzel, M.; T. Rinder, A. Leis, P. Reichl, P. Sellner, C. Draschitz, G. Plank, D. Klammer, & H. Schöfer (2008b): Koralm Tunnel as a Case Study for Sinter Formation in Drainage Systems - Precipitation Mechanisms and Retaliatory Action - Geomechanik und Tunnelbau, 1, Heft 4, 271-278
- Dietzel, M., T. Rinder, A. Niedermayr, S. J. Köhler, & A. Leis (2008c): Versinterungen in Drainagesystemen von Tunnelbauten - Mechanismen, Monitoring und Prognosen. – Geotechnik, 34, S. 89 – 100.
- Dietzel, M., J. Tang, A. Leis, & S. J. Köhler (2009): Oxygen isotopic fractionation during inorganic calcite precipitation — Effects of temperature, precipitation rate and pH - Chemical geology, 268, 1-2, S. 107 – 115.
- Dietzel, M., G. Harer, D. Klammer, S. J. Köhler, A. Leis, F. Mittermayr, A. NIEDERMAYR, P. REICHL, & T. RINDER (2010): Karbonatabscheidungen in Drainagesystemen von Tunnelbauten. - Beiträge zur Hydrogeologie, 57, S. 143 – 153.
- Domberger, G. & P. Reichl (2008a): Hydrogeologische Aspekte der Nutzungsmöglichkeiten und wasserwirtschaftliche Bedeutung von Tunnelwasser – BHM – Berg- und hüttenmännische Monatshefte – 153. Jg. – 2008 – Heft 10 – Springer Wien-New York.
- Domberger, G. & P. Reichl (2008b): Nutzungsmöglichkeiten von Tunnelwasser aus hydrogeologischer Sicht – Felsbau-Magazin – September 2008 – VGE Verlag GmbH.
- Domberger, G. (2009): Geothermie in Österreich – Wasserkraft – Magazin des Vereins Kleinwasserkraft Österreich – Ausgabe 23 / März 2009
- Domberger, G. (2010): Quantitatives und qualitatives Monitoring bei Thermalwassernutzungen – Tagungsband - ÖWAV-Veranstaltung – Nachhaltige Nutzung und Schutz von Thermalwasservorkommen – 15.4.2010 - Wien
- Fasching, A., R. Vanek, T. Stadlmann, P. Reichl, G. Domberger, G. Forstinger & O. K. Wagner (2010): New Semmering Base Tunnel – the investigation programme 2008/2009 and the knowledge gained in the areas of geology, hydrogeology and geotechnical engineering – Geomechanics and Tunneling, Volume 3 – April 2010
- GDA- E-1-041 (2004): Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit in Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten. S.21
- Horne, R. N. (2005): Modern Well Test Analysis - A Computer-Aided Approach. 2. Edit., Petroway Inc., p. 185
- Kohl, T. (Geowatt AG): Potential geothermischer Energienutzung (PDF-Datei – Internet, Bozen)
- Lee, C.H. & I. Farmer (1993): Fluid Flow in Discontinuous Rocks, Chapman & Hall, London, United Kingdom (GBR), United Kingdom (GBR).
- Mittermayr, F., D. Klammer, M. Dietzel, C. Bauer, M. Böttcher, M. Koch, S. J. Köhler, A. Mayer & A. Leis (2008): Thaumasisbildungen in Tunnelbauten - Hydrogeochemie und stabile Isotope. – Geotechnik, 34, S. 115 – 132.
- Mittermayr, F., C. Bauer, D. Klammer, M. Böttcher, A. Leis, P. Escher & M. Dietzel (2012a): Concrete under Sulphate Attack: An Isotope Study on Sulphur Sources - Isotopes in environmental and health studies, 48, 1, S. 105-117.
- Mittermayr, F.; D. Klammer, D. Höllen, S. J. Köhler, M. Böttcher, A. Leis & M. Dietzel, (2012b): Deterioration of Concrete: Application of Stable Isotopes - Proceedings of the 10th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM) 2012 S. 435-443.
- NRC - Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow and National Research Council U.S. (1996): Rock Fractures and Fluid Flow. National Academy Press, Washington D.C.
- Reichl, P., E. Strobl & G. Winkler (2002): Hydrogeologische Systembeschreibung - Eine Grundlage für die Bewertung umweltrelevanter Auswirkungen von Untertagebauwerken.- Felsbau 5/2002 Oktober, Rock and Soil Engineering - Fachzeitschrift für Ingenieurgeologie, Geomechanik und Tunnelbau 20/5: 112 - 120
- Reichl, P., B. Frieg, G. Domberger, A. Leis & G. Winkler (2006): Hydraulic borehole tests in combination with hydrochemical and isotopic water sampling. Felsbau - Rock and Soil Engineering 24/4: 30-38.
- Refsgaard, J.C. und B. Storm, (1995): MIKE SHE. In: Computer Models of Watershed Hydrology, Singh, V.P., Ed., Water Resources Publications, Colorado, USA, 809-846.

Rybach, L., J. Wilhelm & H. Gorhan (2003): Geothermal use of tunnel waters – a Swiss speciality; International Geothermal Conference, Reykjavík, Sept. 2003

Stober, I. & K. Bucher (2007): Hydraulic properties of the crystalline basement, Hydrogeology Journal 15: 213 – 224

Winkler, G. & P. Reichl (2014): Scale dependent investigations of faulted crystalline rocks – examples from the Eastern Alps, Austria, in: Sharp, J.: Fractured Rock Hydrogeology, IAH Selected Papers, 20, 181-196.