

Tunnelbau 2015

 **Ernst & Sohn**
A Wiley Brand

DGGT 
Deutsche Gesellschaft
für Geotechnik e. V.
German Geotechnical Society

Taschenbuch für den **Tunnelbau 2015**

Kompodium der Tunnelbautechnologie
Planungshilfe für den Tunnelbau

Herausgegeben von der DGGT ·
Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.

unter Mitwirkung von
Dr. rer. nat. K. Laackmann
(Federführung),
Prof. Dr.-Ing. H. Balthaus,
Dipl.-Ing. O. Braach,
Dipl.-Ing. W.-D. Friebel,
Prof. Dr.-Ing. habil. A. Hettler,
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. B. Maidl,
Dipl.-Ing. M. Meissner, M.BC.,
Dipl.-Ing. W. Schuck,
Dipl.-Ing. S. Schwaiger,
Dipl.-Ing. D. Stephan,
Prof. Dr.-Ing. M. Thewes,
Dr.-Ing. B. Wittke-Schmitt

39. Jahrgang

 **Ernst & Sohn**
A Wiley Brand

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2015 Wilhelm Ernst & Sohn,
Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG,
Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen,
vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmi-
gung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm
oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Ma-
schinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendba-
re Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including those of translation into other languages).
No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting,
microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a ma-
chine language without written permission from the publisher.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sons-
tigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme,
dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es
sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetz-
lich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens
markiert sind.

Herstellung: pp030 – Produktionsbüro Heike Praetor, Berlin
Satz: BELTZ Bad Langensalza GmbH, Bad Langensalza
Druck und Bindung: CPI Books GmbH, Ebner & Spiegel, Ulm

Printed in the Federal Republic of Germany.
Gedruckt auf säurefreiem Papier.

Print ISBN: 978-3-433-03099-8
ePDF ISBN: 978-3-433-60579-0
ePub ISBN: 978-3-433-60580-6
eMobi ISBN: 978-3-433-60578-3
oBook ISBN: 978-3-433-63000-6

This page is left blank intentionally

This page is left blank intentionally

Vorwort zum neununddreißigsten Jahrgang

Das Taschenbuch für den Tunnelbau ist seit vielen Jahren ein praxisnaher Ratgeber für Auftraggeber, Planer und Bauausführende. Es greift aktuelle Entwicklungen und Problemstellungen auf und dokumentiert dabei den erreichten Stand der Technik. Es erscheint in diesem Jahr zum zweiten Mal im Verlag Ernst & Sohn. In bewährter Art haben Herausgeberbeirat und Verlag einen interessanten Themenmix zusammengestellt, bei dem erfahrene Autoren über innovative Lösungen und Erfahrungen aus aktuellen Projekten berichten.

Die Beiträge in der Ausgabe 2015 behandeln die Themenbereiche Geotechnische Untersuchungen, Konventioneller Tunnelbau, Maschineller Tunnelbau, Maschinen und Geräte, Baustoffe und Bauteile, Forschung und Entwicklung, Vertragswesen und betriebswirtschaftliche Aspekte sowie interessante Praxisbeispiele. Ein Einkaufsführer zum Thema Tunnelbaubedarf rundet das Buch ab.

Wir wünschen Ihnen eine anregende Lektüre und freuen uns über Rückmeldungen sowie Themen- und Beitragsvorschläge für zukünftige Ausgaben aus Ihren Reihen. Wenden Sie sich dazu bitte an die Mitglieder des Herausgeberbeirats oder an das Lektorat des Verlags Ernst & Sohn.



(Dr.-Ing. B. Wittke-Schmitt)



(Dr. rer. nat. K. Laackmann)

Inhalt

Geotechnische Untersuchungen

I. Vortrieb eines Autobahntunnels unter einem Flusstal	1
<i>Patricia Wittke-Gattermann, Ralf Druffel</i>	
1 Einleitung.....	2
2 Untergrund- und Grundwasserverhältnisse	3
3 Modellvorstellungen	4
4 Pumpversuche	10
5 Grundwasserabsenkung durch Brunnen	17
6 Vortriebskonzept	23

Konventioneller Tunnelbau

I. Herstellung und Tragwirkung von Schirmgewölbesicherungen	25
<i>Jochen Fillibeck</i>	
1 Einleitung.....	26
2 Rohrschirm	26
3 Injektionsschirm	37
4 Düsenstrahlschirm	45
5 Vereisungsschirm	60
6 Zusammenfassung und Wertung	72
II. NÖT-Vortriebe in den pleistozänen Dünensanden von Tel Aviv, Israel	75
<i>Marcus Scholz, Sebastian Schwaiger</i>	
2 Geologie.....	83
3 Hydrogeologie	85

This page is left blank intentionally

4	Einschätzung des Gebirgsverhaltens	86
5	Wasserhaltung.....	88
6	Planung der eingleisigen Streckentunnel und der Querschläge.....	90
7	Planung der Weichenkavernen	92
8	Querung bestehender Infrastruktur/Genehmigungsprozess....	94
9	Schlussbemerkung.....	95

**III. Abdichtungssysteme mit Kunststoffdichtungsbahnen
für Tunnel ohne Dränage**97
Marc Meissner, Sebastian Schwaiger, Roland Herr

1	Einführung in das Thema	98
2	Übersicht der Abdichtungssysteme.....	99
3	Wahl des richtigen Abdichtungssystems	99
4	Abdichtungssystem Kunststoffdichtungsbahn	102
5	Anforderungen an die Kunststoffdichtungsbahn und deren Verlegung	105
6	Probleme erkennen, Ursachen analysieren, Lösungen finden	112
7	Regelausbildung und bisherige Erfahrungen	117
8	Weiterentwicklung des kombinierten Kontroll- und Injektionssystems.....	124
9	Erfahrungen mit dem Prüf- und Injektionssystem/ der Blockhinterlegung	129
10	Zusammenfassung.....	130

Maschineller Tunnelbau

**I. Einsatz von Informationssystemen im
maschinellen Tunnelbau**132
Peter-Michael Mayer, Janosch Stascheit Ulrich Maidl

1	Einleitung.....	134
2	IRIS.tunnel – Integriertes Risiko- und Informationssystem für den Tunnelbau	136

This page is left blank intentionally

3	Prozessdatenerfassung und -analyse mit dem Programmsystem PROCON.....	157
4	Fazit und Ausblick.....	176

Maschinen und Geräte

I.	Variable-Density-Maschine: Eine hybride Schildmaschine aus Erddruck- und Flüssigkeitsschild.....	181
	<i>Werner Burger, Michael Sträßer, Britta Schöber</i>	
1	Grundlagen.....	182
2	Praktische Ausführungen der Multi-Mode-Technologie.....	185
3	Das Variable-Density-Konzept	197
4	Entwicklung der High-Density-Suspension.....	202
5	Einsatzerfahrungen mit Variable-Density-Maschinen beim Klang-Valley-MRT-Projekt (KVMRT) in Kuala Lumpur	207
6	Zusammenfassung.....	227

Baustoffe und Bauteile

I.	Nachgiebiger Ausbau für druckhaftes Gebirge	230
	<i>Eckart Schneider, Markus Spiegl</i>	
1	Einleitung.....	232
2	Druckhaftes Gebirge	233
3	Geotechnische Grundlagen	234
4	Nachgiebiger Ausbau für konventionelle Vortriebe.....	236
5	Nachgiebiger Ausbau für Vortriebe mit Gripper-TBM (TBM-O).....	241
6	Nachgiebiger Ausbau mit Tübbing.....	243
7	Stauchelemente	245
8	Compex-Support-System.....	251
9	Zusammenfassung.....	254

This page is left blank intentionally

II. Stahlfaserbeton oder konventionelle Bewehrung für Tübbinge – ein Vergleich der Anwendung	257
<i>Benno Ring, Ulrich Maidl</i>	
1 Einleitung.....	258
2 Materialverhalten	258
3 Statische Berechnungen	269
4 Nachweise	274
5 Planungshinweise	285
6 Schlussfolgerungen	286
III. Zementfreier Ringspaltmörtel – Eigenschaften, Anforderungen und Anwendungsgrenzen	288
<i>Christian Thienert, Matthias Pulsfort</i>	
1 Einführung	289
3 Eigenschaften des drainierten Mörtelmaterials.....	310
4 Anforderungen und Zusammenfassung.....	314

Forschung und Entwicklung

I. Präventives Schädigungsmanagement im Tunnelbau – Schutz der oberirdischen Bebauung	318
<i>Pia Neugebauer, Steffen Schindler, Ingo Pähler, Andrea Blome, Peter Mark</i>	
1 Einleitung.....	319
2 Stand der Forschung bzw. der Technik.....	323
3 Konzept für das präventive Schädigungsmanagement	332
4 Praxisbeispiel Wehrhahn-Linie in Düsseldorf.....	350
5 Schlussfolgerung und Ausblick.....	357
Danksagung	361

This page is left blank intentionally

Vertragswesen und betriebswirtschaftliche Aspekte

I. Anwendung des holistischen Chancen-Risiken-Managements beim Brenner Basistunnel	362
<i>Konrad Bergmeister</i>	
1 Einleitung.....	364
2 Strukturierung der Risiken und Chancen	366
3 Vorgehensweise beim Chancen-Risiken-Management	368
4 Beschreibung des Brenner Basistunnels	378
5 Holistisches Chancen-Risiken-Management beim Brenner Basistunnel	384
6 Zusammenfassung und Ausblick	402

Tunnelbaubedarf

Nach Warenuntergruppen gegliedertes Lieferantenverzeichnis	407
---	-----

Inserentenverzeichnis

Alphabetisches Verzeichnis der Inserenten	421
---	-----

Autorenverzeichnis	429
---------------------------------	------------

This page is left blank intentionally

This page is left blank intentionally

Geotechnische Untersuchungen

I. Vortrieb eines Autobahntunnels unter einem Flusstal

Die Röhren des Tunnels Hirschhagen der BAB A44 unterfahren in der Nähe der Ortschaft Hessisch Lichtenau die Bundesstraße B7, eine eingleisige Bahnstrecke und das Tal der Losse. Der Baugrund besteht aus Buntsandstein und tertiären Tonen und Sanden. Es ist geplant, den Vortrieb im Schutz einer Grundwasserhaltung durchzuführen. Die Grundwasserabsenkung soll mithilfe einer Großbrunnenanlage durchgeführt werden. Zur Bemessung dieser Anlage wurden zwei Pumpversuche durchgeführt, die mit numerischen Berechnungen ausgewertet wurden. In dem dazu erarbeiteten großräumigen Modell werden die trennflächenbedingte Anisotropie des Buntsandsteins und der Einfluss benachbarter gering durchlässiger Störungen berücksichtigt.

Excavation of highway tunnel underneath a river valley

In Eschenstruth near Hessisch-Lichtenau, Germany, the two tubes of the tunnel Hirschhagen of the BAB A44 are driven underneath of the federal road B7, a rail track and the valley of river Losse. The tunnel is located in the Buntsandstein which consists of an alternating layer of Sandstones and Claystones and in a Tertiary formation, which consists of Clay and Sand. It is planned to lower the groundwater level by means of a number of large scale pumping wells before the tunnel is excavated. In order to achieve the necessary data for the design of the wells, two pumping tests were carried out and evaluated by means of numerical analyses. Two

40 m deep pumping wells and adjacent piezometers were constructed and installed, respectively. The numerical analyses for the evaluation of the tests were based on a large-scale model which accounts for the effects of the inhomogeneous and anisotropic permeability of the rock mass and the influence of adjacent faults.

1 Einleitung

Der 4,2 km lange Tunnel Hirschhagen der BAB A44 unterquert in Eschenstruth bei Hessisch-Lichtenau die Bundesstraße B7, eine Eisenbahnstrecke und die Losse. Die beiden Tunnelröhren liegen in diesem Bereich in einer Subrosionssenke, in der Buntsandstein und Tertiärer Ton anstehen. Es ist geplant, den Vortrieb unterhalb der Losse im Schutz einer Grundwasserhaltung durchzuführen [1]. Die Grundwasserabsenkung soll mithilfe einer Großbrunnenanlage durchgeführt werden. Die Losse soll abgedichtet werden (Bilder 1 und 2).

Zur Bemessung der Brunnenanlage wurden zwei Pumpversuche durchgeführt, die mit numerischen Berechnungen ausgewertet

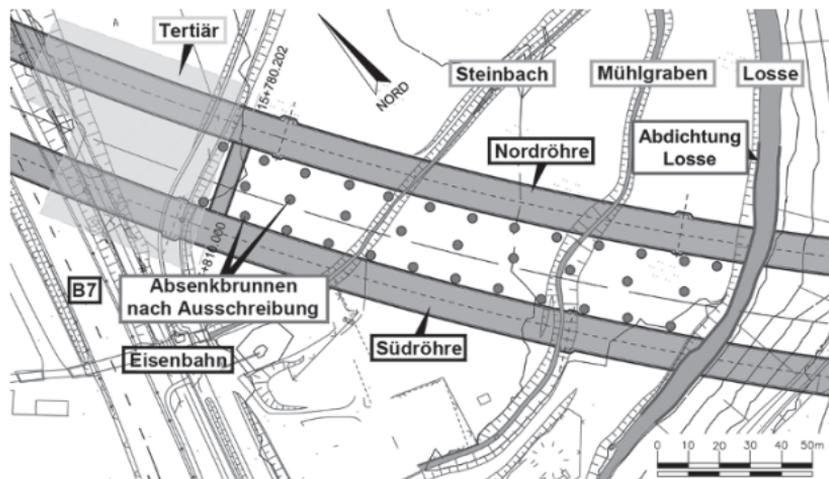


Bild 1. Lageplan Tunnel Hirschhagen, Detail

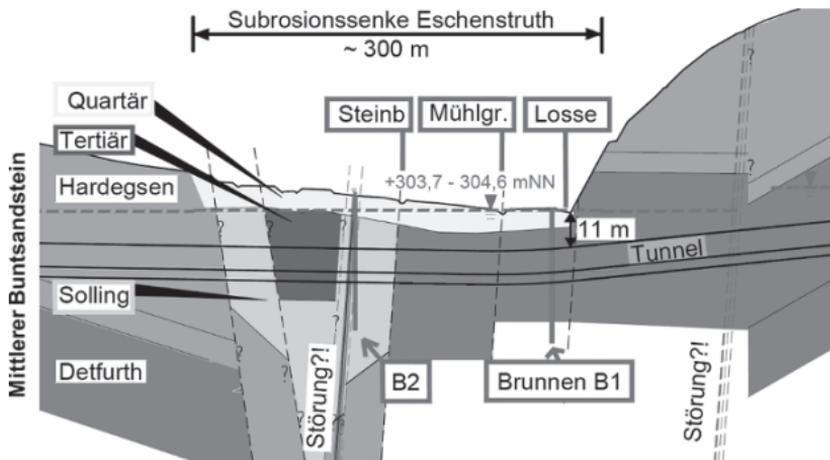


Bild 2. Längsschnitt, Detail

wurden. Darüber hinaus wurde eine rechnerische Simulation der geplanten GW-Absenkung durchgeführt, die mithilfe der im Bild 2 dargestellten Brunnengalerie vorgenommen werden soll. Die Ergebnisse der Versuche und Berechnungen dienten als Grundlage für den Entwurf der Brunnenanlage und des Vortriebskonzepts für die Tunnel in diesem Abschnitt.

2 Untergrund- und Grundwasserverhältnisse

Im Kern der Subrosionssenke stehen bindige Lockergesteine des Tertiärs an. An diesen Bereich schließen sich nach den Seiten und nach unten die Schichten des Buntsandsteins der Solling-Folge (smS) an. In Richtung Losse folgen auf die Solling-Folge die Schichten der Detfurth-Folge des Buntsandsteins. Diese Schichten werden von einer ca. 4 bis 10 m mächtigen Schicht aus Quartär überlagert. Am südlichen Rand der Tertiärrinne befindet sich eine Störung. Weiter südlich im Hang hinter dem Lossetal sind ebenfalls Störungen prognostiziert (Bild 2) [2].

Nach den Bohrprofilen der im Bereich der Losse abgeteufte Erkundungsbohrungen und der Bohrungen für die Grundwasser-

messstellen des Pumpversuchs ist der Buntsandstein insbesondere im Bereich der Störung teilweise entfestigt und enthält Zerrüttungszonen. Dieser vermutlich von der Störung beeinflusste Bereich reicht nach den Ergebnissen der Erkundungsbohrungen bis ca. 100 m südlich der Tertiärrinne.

Der Grundwasserspiegel steht nach den Ergebnissen der Messungen in verschiedenen Grundwassermessstellen bei ca. 304 mNN geringfügig unterhalb der Geländeoberfläche an. Es ist davon auszugehen, dass eine hydraulische Verbindung zwischen Quartär und Buntsandstein vorhanden ist.

Im geotechnischen Gutachten [2] ist mit $k_f = 9 \cdot 10^{-8}$ bis $4 \cdot 10^{-4}$ m/s eine sehr große Bandbreite für die Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte des Buntsandsteins angegeben. Für die Ausführungsplanung für die Brunnengalerie und für den Tunnelvortrieb war in Anbetracht der Risiken eine genauere Abschätzung der Durchlässigkeitsbeiwerte erforderlich. Aus diesem Grund wurde entschieden, Pumpversuche durchzuführen.

3 Modellvorstellungen

3.1 Anisotropie und Inhomogenität

Der mittlere Buntsandstein besteht überwiegend aus einer Wechselfolge von Sand- und Tonsteinen. Insbesondere in der Hardeggen-Folge, der Detfurth-Folge und der Volpriehausen-Folge werden durchgehende Tonsteinlagen sehr häufig angetroffen. Dagegen besteht die Solling-Folge überwiegend aus dickeren Sandsteinpaketen, in die wenige Tonsteinlagen eingelagert sind (Bild 3). Auch in den Bohrungen für die Brunnen und die Grundwassermessstellen für den Pumpversuch wurden ausgeprägte Tonsteinlagen angetroffen.

Da die Sandsteinlagen eine deutlich größere Wasserdurchlässigkeit besitzen als die Tonsteinlagen, bedingt die Wechsellagerung eine ausgeprägte Inhomogenität und Anisotropie der Wasserdurchlässigkeit der verschiedenen Formationen des Buntsandsteins.

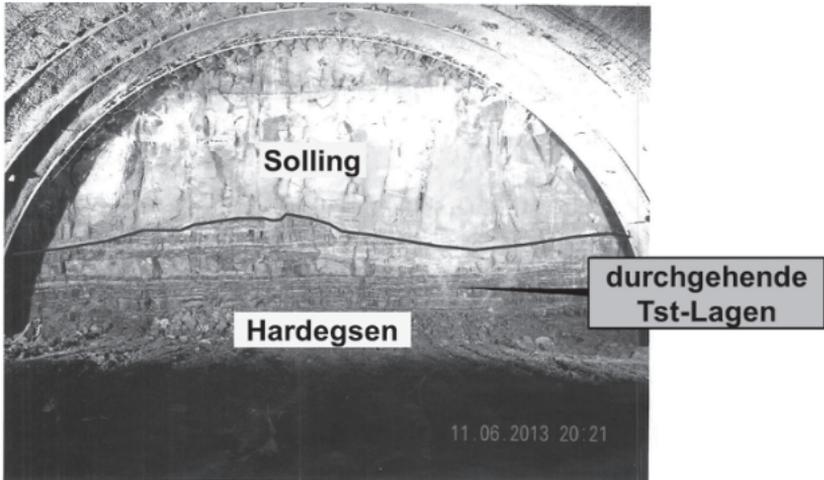


Bild 3. Ortsbrust im Buntsandstein

3.2 Grundwasserströmung im anisotropen und inhomogenen Untergrund

Eine Grundwasserströmung findet im Fels überwiegend entlang von Trennflächen statt. Dagegen ist die Durchströmung der Gesteinsmatrix meist vernachlässigbar gering. Zur Veranschaulichung der Größenordnung der Durchlässigkeit von klüftigem Fels sind in Bild 4 die Durchlässigkeitsbeiwerte k_T parallel zu einer Trennflächenschar mit einem Trennflächenabstand von $d = 1$ m sowie verschiedenen Öffnungsweiten und Rauigkeiten den isotropen Durchlässigkeitsbeiwerten von Lockergestein gegenübergestellt. Danach entspricht die Durchlässigkeit eines Felses mit Trennflächenöffnungsweiten von $2\bar{a}_i = 0,2$ mm und Trennflächenabständen von $d = 1$ m der Durchlässigkeit eines Feinsandes. Für $2\bar{a}_i = 0,7$ mm ergibt sich bereits die Durchlässigkeit eines Kiesel [3] [4].

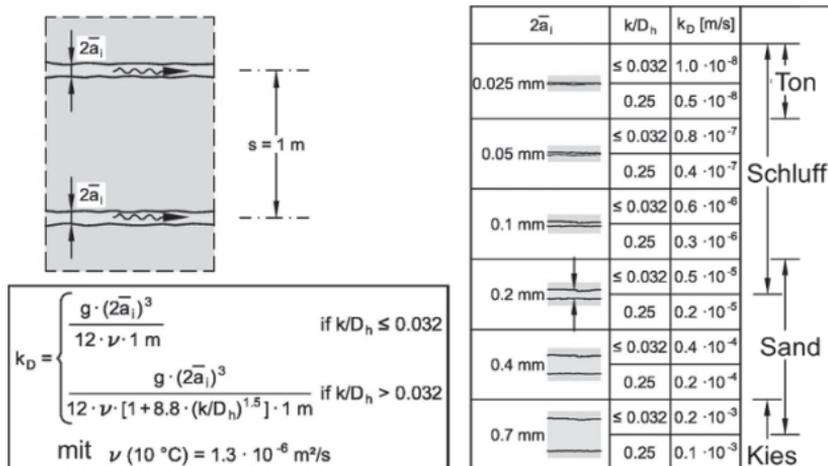


Bild 4. Durchlässigkeitsbeiwerte eines Felses mit einer Schar durchgehender offener Trennflächen [4]

Im Buntsandstein sind die Tonsteinlagen, wie bereits erwähnt, gering durchlässig. Dagegen sind die Sandsteinlagen stärker durchlässig, da in diesen ausgeprägte Trennflächen (Klüfte) ausgebildet sind. Die Sickerströmung findet daher überwiegend in den Sandsteinschichten und damit in horizontaler Richtung statt. Die vertikale Durchströmung der Wechsellagerung ist durch die gering durchlässigen Tonsteinlagen behindert (Bild 5).

In einer Berechnung kann die genaue Abfolge der durchlässigen und wenig durchlässigen Schichten einer Wechsellagerung nur schwer berücksichtigt werden, da die Lage und Erstreckung der einzelnen Schichten in der Regel nicht genau bekannt sind.

Daher wird vereinfachend von einer äquivalenten Wasserdurchlässigkeit ausgegangen, die in horizontaler Richtung größer ist als vertikal. Dabei sind die durchlässigeren Schichten für die horizontale und die undurchlässigeren Schichten für die vertikale Durchlässigkeit der Wechsellagerung bestimmend (Bilder 6 und 7) [3] [4].

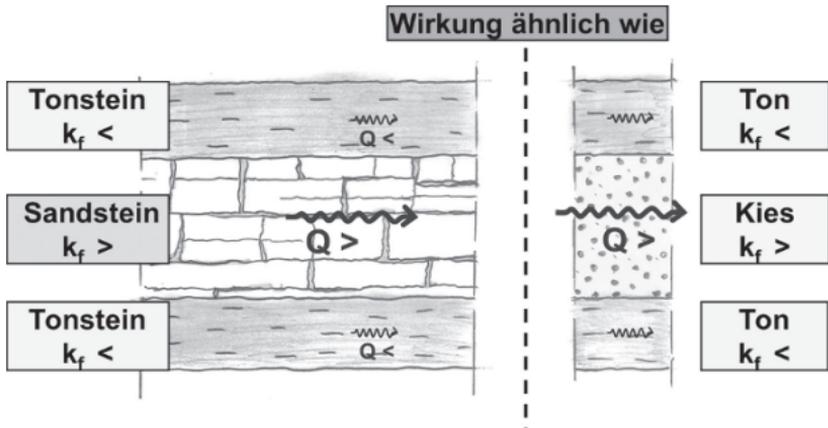


Bild 5. Durchlässigkeit Baugrund, inhomogen und anisotrop

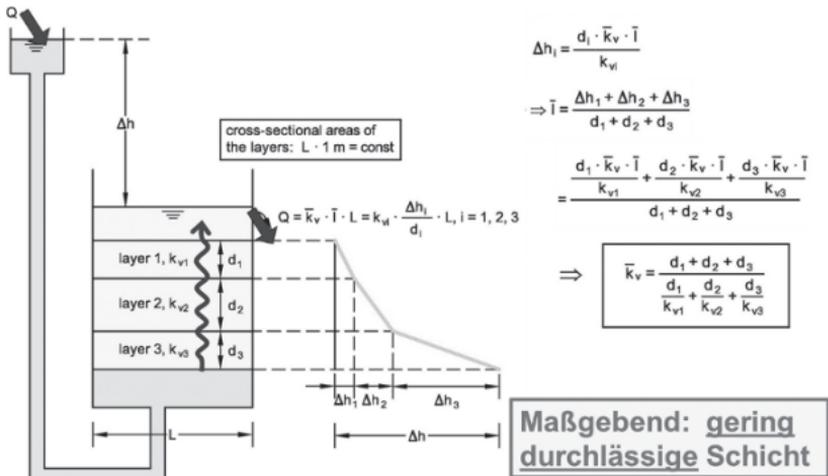


Bild 6. Geschichteter Baugrund, vertikale Durchlässigkeit [4]

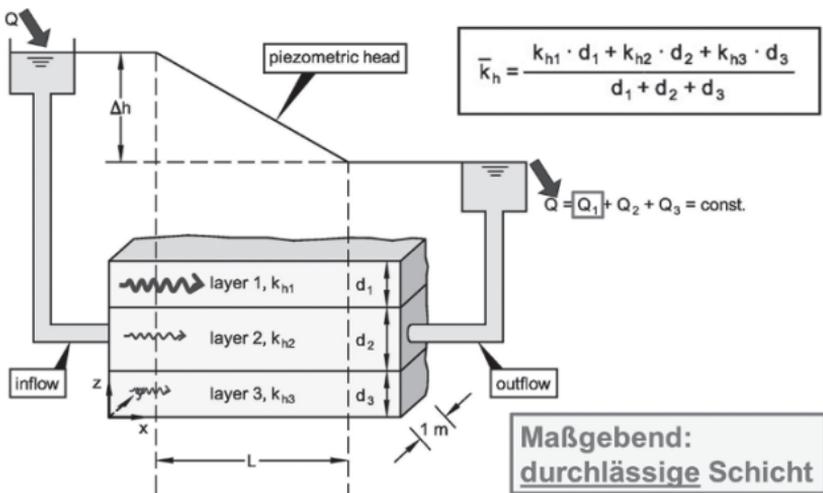


Bild 7. Geschichteter Baugrund, horizontale Durchlässigkeit [4]

3.3 Zufluss zu einem Brunnen

Der Zufluss zu einem Brunnen in einer horizontalen Wechsellagerung des Buntsandsteins erfolgt entlang der horizontal durchlässigen Sandsteinschichten. Im Gegensatz zur Grundwasserabsenkung im Untergrund mit isotroper Wasserdurchlässigkeit, bei der das Wasser innerhalb des Absenktrichters nahezu vollständig dem Untergrund entzogen wird, verbleibt hier Restwasser oberhalb der wenig durchlässigen Tonschichten. Es ergeben sich einzelne Absenktrichter in den durchlässigen Schichten. Eine vollständige Absenkung wird durch die nur gering durchlässigen Schichten zumindest über größere Zeiträume verhindert (Bild 8).

In den grundwasserführenden Schichten erfolgt, wie zuvor erläutert, die Grundwasserströmung entlang der Trennflächen. Falls mit dem Brunnen allerdings keine wasserführenden Trennflächen angeschnitten werden, findet auch keine Absenkung statt (Bild 9).

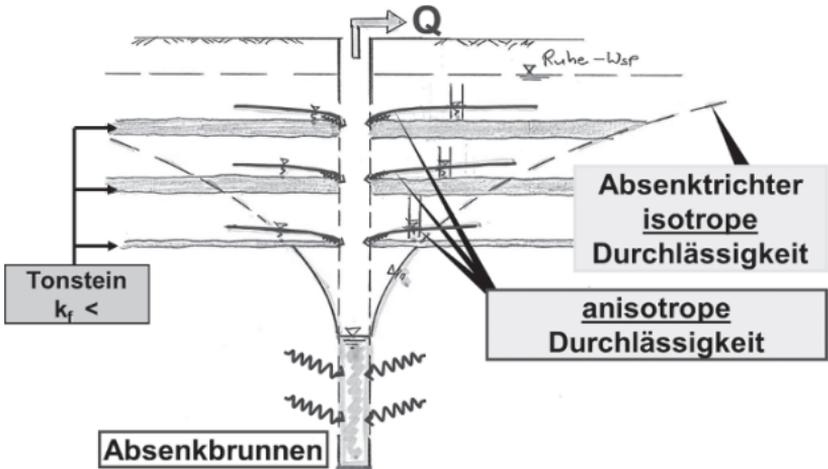


Bild 8. Einfluss der Inhomogenität und Anisotropie auf den Absenktrichter

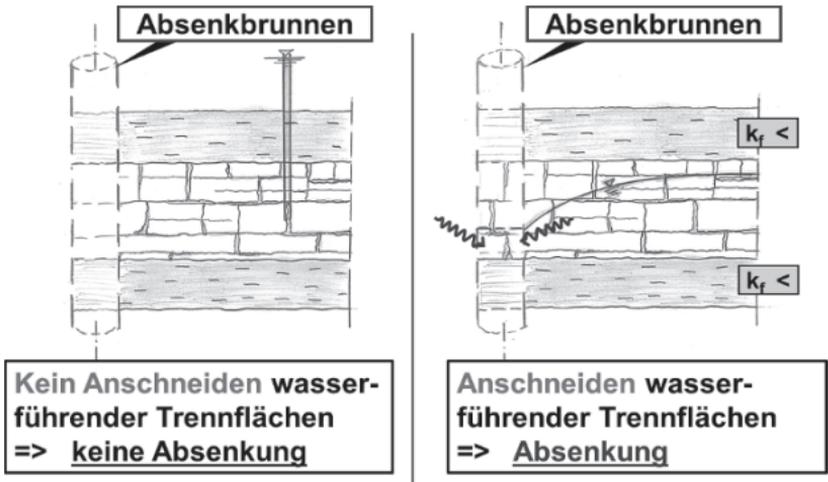


Bild 9. Grundwasserabsenkung im inhomogenen Kluftwasserleiter

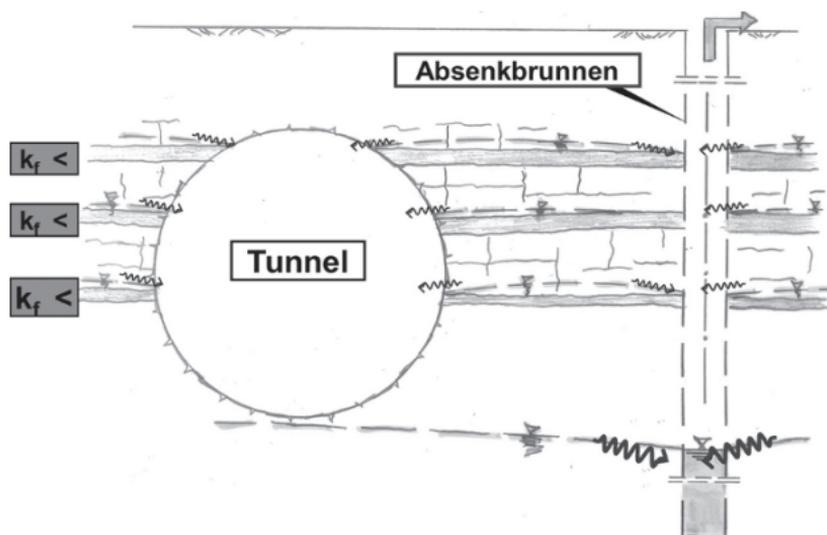


Bild 10. Potenzielle Sickerwasserzutritte zum Tunnel am Top gering durchlässiger Schichten

3.4 Zufluss zu einem Tunnel

Auch nach der Inbetriebnahme der Absenkbrunnen kann es aus den o. g. Gründen zu Sickerwasserzutritten im Tunnel kommen, indem Wasser entlang der wasserführenden Schichten dem Tunnel zuströmt (Bild 10).

4 Pumpversuche

4.1 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Es wurden zwei Pumpversuche durchgeführt. Dazu wurden zwei 40 m tiefe Brunnen mit einem Durchmesser von 324 mm hergestellt und Grundwassermessstellen in unterschiedlichen Abständen zu diesen Brunnen eingerichtet. Der Brunnen B1 liegt ca. 20 m westlich der Losse. Der Brunnen B2 liegt am südlichen Rand der Tertiärrinne im Buntsandstein (Bild 11).

Die Filterstrecken der Brunnen liegen im Buntsandstein. Die Grundwassermessstellen wurden überwiegend im Buntsandstein, teilweise aber auch im Quartär bzw. im Tertiär, verfiltert.

Beim Pumpversuch am Brunnen B1 wurde in der Phase 1 das Wasser über einen Zeitraum von ca. 5 Tagen mit einer Förderrate von $30 \text{ m}^3/\text{h}$ abgepumpt. Im Brunnen stellte sich dadurch eine Absenkung von 2,56 m ein. Anschließend wurde in einer Phase 2 die Leistung der Pumpe auf $50 \text{ m}^3/\text{h}$ erhöht und über einen Zeitraum von 7 Tagen Wasser abgepumpt. Damit wurde eine Absenkung von 6,14 m im Brunnen erzielt (Bild 12).

Die gemessenen Ganglinien im Brunnen und in den Grundwassermessstellen steigen mit den Durchflussmengen am Pegel Hessa der Losse an. Daraus kann man schließen, dass die Grundwasserstände im betrachteten Gebiet vom Wasserstand in der Losse und damit bei dem verhältnismäßig kleinen Einzugsgebiet der Losse von den regionalen Niederschlägen abhängt.

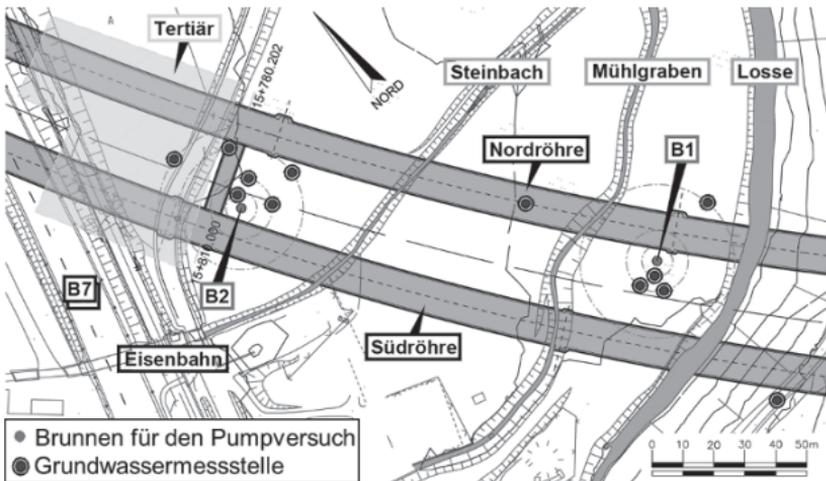


Bild 11. Lageplan der Brunnen und Grundwassermessstellen

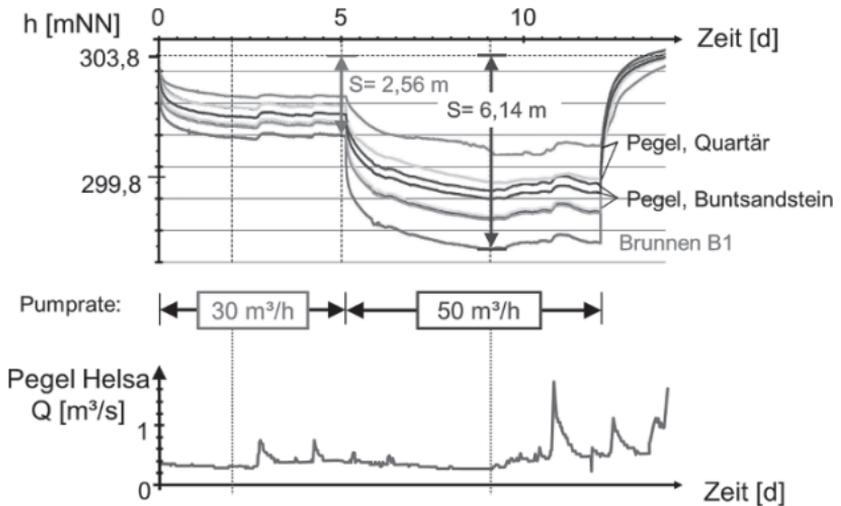


Bild 12. Pumpversuch B1, Messergebnisse

Beim Pumpversuch am Brunnen B2 wurde eine Absenkung von 6,25 m in der Phase 1 mit einer Förderrate von $30 \text{ m}^3/\text{h}$ und eine Absenkung von 15,0 m in der Phase 2 mit einer Förderrate von $50 \text{ m}^3/\text{h}$ erzielt.

4.2 Auswertung mit Sickerströmungsberechnungen

Um die tatsächlichen Verhältnisse möglichst wirklichkeitsnah nachzubilden, wurden dreidimensionale Sickerströmungsberechnungen nach der FE-Methode durchgeführt. Dabei wurde das von WBI entwickelte Programm HYD-03 angewendet, mit dem Berechnungen der räumlichen Sickerströmung im anisotropen Fels durchgeführt werden können [3] [4].

Bild 13 zeigt das verwendete FE-Netz. Der Berechnungsausschnitt ist 10.000 m lang, 5.000 m breit und 78,8 m hoch. Es wurde eine Symmetrieebene in der Brunnenachse angenommen.