

Quellverhalten diagenetisch verfestigter Tonsteine in den Einschnitten der Neubaustrecke Nürnberg – Ingolstadt der Deutschen Bahn AG

Privatdozent Dr.-Ing. P.-A. von Wolffersdorff

BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH, Dresden

Dipl.-Ing. H. Heidkamp MSc.

SOFISTiK AG, Oberschleißheim

1 Einleitung

Die ca. 90 km lange Bahn-Hochgeschwindigkeitsstrecke Nürnberg – Ingolstadt quert von Nord nach Süd die Nürnberger Senke, das nördliche Albvorland, die Fränkische Alb und das Ingolstädter Becken. Die großen Reliefunterschiede entlang der Strecke sowie die hohen Anforderungen an den Streckenverlauf erfordern zahlreiche Dämme, Einschnitte, Brücken und Tunnel, bei deren Planung und Ausführung überwiegend komplizierte geologische und geohydrologische Verhältnisse zu berücksichtigen sind.

Die Trasse führt im nördlichen Albvorland bereichsweise über eine Gesamtlänge von ca. 7,2 km durch diagenetisch verfestigte Tonsteine des Keupers. Wegen der potentiellen Quellfähigkeit dieser Gesteine musste während und nach der Herstellung der Einschnitte mit Quellhebungen in den Einschnittssohlen gerechnet werden.

Da die Hochgeschwindigkeitsstrecke als Feste Fahrbahn ausgeführt wird, sind während des Streckenbetriebes sehr geringe Verformungstoleranzen einzuhalten. Eventuell eintretende Quellhebungen nach dem Einbau der Festen Fahrbahn müssen diesen restriktiven Verformungskriterien genügen, oder müssen zumindest kleiner als das Korrekturmaß der Schienenbefestigung sein.

Für den Bau der Hochgeschwindigkeitsstrecke war es deshalb zwingend erforderlich, einen Lösungsweg zur Beherrschung der Quellproblematik zu finden und so zu realisieren, dass die hohen Sicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsanforderungen bei minimierten Kosten erfüllt werden. Die prinzipielle Vorgehensweise bestand darin, die Quellhebungen durch einen möglichst zeitigen Aushub der Einschnitte vor Beginn der Herstellung der Festen Fahrbahn weitgehend eintreten zu lassen, so dass durch die Vorwegnahme des größten Teiles der Quellhebungen nur noch geringe und mit dem Fahrweg verträgliche Restquellhebungen zu erwarten sind. Da diese Vorgehensweise den Grundsätzen der Beobachtungsmethode entspricht, spielen die Prognosen des Quellhebungs-Zeit-Verlaufs eine zentrale Rolle.

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die experimentellen Untersuchungen und theoretischen Entwicklungen zum Quellen einschließlich einer Modellierung des Quellverhaltens mit der Methode der Finiten Elemente (FEM).

2 Quellverhalten und Verwitterungsgrad

2.1 Quelleigenschaften der diagenetisch verfestigten Tonsteine

Osmotische und mechanische Quellvorgänge sind bei den diagenetisch verfestigten Tonsteinen die hauptsächlichen Ursachen für Hebungen, die infolge des Aushubes in den Einschnitten entstehen können (*Fritzsche (2002)*). Mineralogische Untersuchungen haben gezeigt, dass in diesen Gesteinen keine Bestandteile, die das sehr starke und ungleichmäßige Anhydritquellen verursachen, enthalten sind.

Drei verschiedene Arten diagenetisch verfestigter Tonsteine mit ausgeprägtem Quellvermögen wurden angetroffen: Feuerletten, Opalinuston und Amaltheenton. Durch die Diagenese entsteht in diesen Tonsteinen eine Verfestigung, die der Quellfähigkeit entgegenwirkt. Mit zunehmender Verwitterung nimmt die diagenetische Verfestigung ab. Bisher konnte noch kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Diagenese, dem Verwitterungsgrad, und dem Quellvermögen nachgewiesen werden. Es wurden folgende Abhängigkeiten des Quellvermögens vom Verwitterungsgrad angenommen:

- Größere Quellungen infolge Entlastungen mit zunehmendem Verwitterungsgrad,
- Geringere Quellpotenziale, d.h. kleinere Quelldrücke bei vollständig unterdrückter Volumendehnung, mit zunehmendem Verwitterungsgrad,
- Schnellere Quellvorgänge mit zunehmendem Verwitterungsgrad.

Ausführliche Erläuterungen zum Quellverhalten der diagenetisch verfestigten Tonsteine werden auch von *Gartung et al. (2005)* gegeben.

2.2 Verwitterungsstufen für die geologische Modellierung

Die o.g. Abhängigkeit des Quellvermögens vom Verwitterungsgrad erfordert zuerst eine verfeinerte Einteilung des quellfähigen Baugrundes nach Verwitterungsstufen. Im Rahmen der geologischen Modellbildung der quellgefährdeten Einschnitte wurden für die diagenetisch verfestigten Tonsteine folgende 4 Homogenbereiche mit unterschiedlichen Quelleigenschaften festgelegt und berücksichtigt:

- Verwitterungsstufe w_2 und geringer verwittert
- Verwitterungsstufe w_2-w_3
- Verwitterungsstufe w_3
- Verwitterungsstufe w_3-w_4 und stärker verwittert

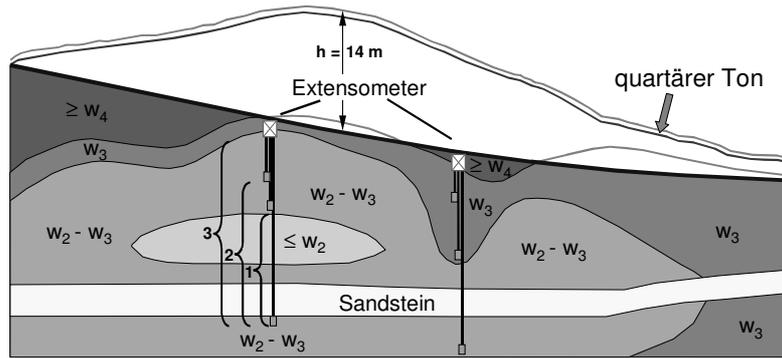


Bild 1: Geologisches Modell des Einschnittes „Hilpoltstein“ mit Schichtenaufbau nach Verwitterungsstufen und mit Lage der Extensometer-Messstellen

Bild 1 zeigt den Längsschnitt des geologischen Modells für den Einschnitt „Hilpoltstein“. Es ist zu sehen, dass die höheren Verwitterungsstufen in den flachen Randbereichen und die geringeren Verwitterungsstufen in den Bereichen der größeren Aushubtiefen liegen.

3 Quelldehnungsmodell

3.1 Endquelldehnungen

Der logarithmische Ansatz nach *Grob (1972)* ist die Grundlage für das verwendete eindimensionale Quelldehnungsmodell. Es ist in Bild 3 dargestellt.

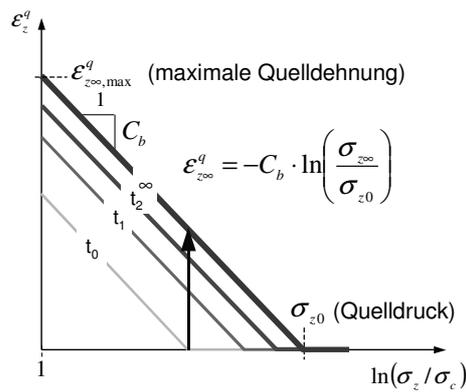


Bild 2: Eindimensionales Quelldehnungsmodell

In der Gleichung des Bildes 2 ist σ_{z0} der Quelldruck, bei dem das Quellen vollständig überdrückt wird. σ_c ist eine Mindestspannung, bei deren Unterschreitung keine weitere Zunahme des Quellens mehr eintritt. Der Quellhebungsbeiwert C_b ist das Maß für die Abhängigkeit der Quelldehnungen von den Vertikalspannungen σ_z . Die erforderlichen

Parameter C_b und σ_{z0} des Quelldehnungsgesetzes werden aus Quelldehnungsversuchen im Labor bestimmt.

3.2 Quelldehnungs-Zeit-Verlauf

Eine zeitabhängige Erweiterung des in Bild 2 dargestellten Quelldehnungsmodells wurde von *Kiehl (1990)* vorgeschlagen. Unter der Annahme konstanter Entlastungsspannungen ist folgende eindimensionale Darstellung möglich.

$$\varepsilon_z^q(\hat{t}) = -C_b \cdot \ln\left(\frac{\sigma_{z\infty}}{\sigma_{z0}}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\hat{t}}{\eta_q}\right) \right] \quad (1)$$

Das Referenzzeitmaß η_q wird aus den Zeitverläufen der Quellhebungsversuche bestimmt.

Neu in Gleichung (1) ist die spezifische Zeit \hat{t} , die einen Zeitmaßstab unabhängig von der Quellschichtdicke definiert. Zur Erfassung des Einflusses der Dicke einer quellfähigen Schicht wird für die eindimensionale Modellierung folgender Potenzansatz vorgeschlagen (siehe auch *von Wolffersdorff et al. (2002)*).

$$\hat{t} = t \cdot \left(\frac{d_{\text{Probe}}}{D_{\text{Schicht}}} \right)^n \quad (2)$$

Zur Erfassung der in der Regel unbekanntenen Wasserwegigkeit in situ wird die Übertragung des zeitlichen Verlaufes im Laborversuch (Zeit t) auf das zeitliche Quellverhalten in situ (Zeit \hat{t}) über den Exponenten n gesteuert. Dieser Exponent wird vorzugsweise durch eine Anpassung des rechnerischen Quellhebungsverlaufs an vorausgehende Messergebnisse in situ, z.B. von Extensometermessungen, bestimmt.

Das von *Grob (1972)* vorgeschlagene eindimensionale Modell wurde von *Wittke-Gattermann (1998)* für dreidimensionale Zustände erweitert. *Kiehl (1990)* hatte die zeitabhängige Erweiterung des Grobschen Quelldehnungsmodells auch dreidimensional formuliert. Sie lässt sich in folgender Form darstellen

$$\frac{\partial \varepsilon_i^q(t)}{\partial t} = \frac{1}{\eta_q} (\varepsilon_{i\infty}^q - \varepsilon_i^q(t)) \quad (3)$$

Dabei sind $\varepsilon_i^q(t)$ die Hauptkomponenten der Quelldehnungen zum Zeitpunkt t und $\varepsilon_{i\infty}^q(t)$ die Hauptkomponenten der Endquellhebungen gemäß des in Bild 2 angegebenen logarithmischen Ansatzes einschließlich seines Gültigkeitsbereiches unter Verwendung der 3 Hauptspannungskomponenten σ_i anstatt nur der Vertikalspannungskomponente σ_z . Gleichung (3) repräsentiert die Klasse der viskosen Materialmodelle, die sich effizient in Finite-Elemente-Programme implementieren lassen. *Heidkamp & Katz (2002, 2004)* beschreiben ausführlich einen Lösungsalgorithmus für die numerische Modellierung des zeitabhängigen Quelldehnungs-Verhaltens im Rahmen der FEM. Dieser Algorithmus wurde in das Programmsystem der Firma SOFiSTiK AG implementiert und an charakteristischen FE-Berechnungen validiert.

Der eindimensionale Potenzansatz gemäß Gleichung (2) zur Berücksichtigung des Einflusses der Schichtdicke auf den Quellhebungs-Zeit-Verlauf kann ohne weiterführende theoretische Entwicklungen nicht auf direktem Weg in die FEM implementiert werden (siehe hierzu Wittke-Gattermann (1998) und Wittke (2003)).

4 Quellversuche im Labor

4.1 Versuchsarten

Für die Untersuchung der Quellproblematik in den Einschnitten mit den diagenetisch verfestigten Tonsteinen wurden insgesamt 116 Versuche als mehrere Versuchsserien in 3 Labors durchgeführt. Hinsichtlich der Lastregime unterscheiden sich die Versuchsserien wie folgt:

- mehrstufige konventionelle Quellhebungsversuche,
- mehrstufige Quellhebungsversuche nach Huder/Amberg,
- kombinierte Quelldruck-Quellhebungsversuche.

In Tabelle 1 sind alle durchgeführten Quellversuchsserien mit Unterscheidung nach Gesteinsart, nach Labor und nach Lastregime zusammengestellt

Tabelle 1: Durchgeführte Quellversuche

	Kombinierter Quell- druck-Quellhebungs- versuch	Quellhebungsversuch		Quellversuch nach Huder Amberg	
	TU Karlsruhe	GH Kassel	Baugrund Dresden	GH Kassel	Baugrund Dresden
Feuerletten (kmF)	17	20		3	19
Amaltheenton (I _v)	13	7	3	3	6
Opalinuston (al ₁)	6	4			15

Beim konventionellen Quellhebungsversuch wird nach Wasserzugabe unter vorgegebener axialer Druckspannung σ_z , die zumeist stufenweise vermindert wird, die axiale Quelldehnung ϵ_z^q bestimmt (Paul (1986)). Dieser Versuch ist kraftgesteuert und kann in konventionellen einaxialen Kompressionsgeräten (Ödometer) durchgeführt werden (siehe Bild 3a).

Beim Quellhebungsversuch nach Huder/Amberg (Huder & Amberg (1975)) wird ein ödometrischer Be-, Ent- und Wiederbelastungszyklus vor Beginn der Quellhebungsstufen durchgeführt (siehe Bild 3b).

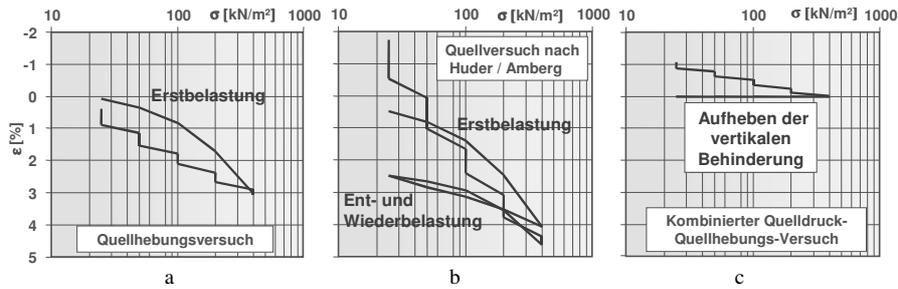


Bild 3: Lastregime (Spannungs-Dehnungsverläufe) der 3 verschiedenen Quellversuchsarten

Dagegen wird beim Quelldruckversuch nach Wasserzugabe der maximale Druck σ_{z0} bei verhinderter Axialdehnung bestimmt (Paul (1986)). Dieser Versuch kann in der Regel nicht in einem konventionellen Ödometer durchgeführt werden.

Der kombinierte Quelldruck-Quellhebungsversuch mit dem in Bild 3c dargestellten Lastregime ist versuchstechnisch am aufwändigsten (Pimentel (1996)). Er erfordert eine elektronische Steuerung, mit der sowohl Axialkräfte als auch Axialverschiebungen vorgegeben werden können.

4.2 Abhängigkeit des Quellvermögens vom Verwitterungsgrad

Bild 4 zeigt im ε - $\log \sigma$ -Diagramm die Ergebnisse von Versuchsserien, die an den 4 Verwitterungsstufen des Amaltheentons durchgeführt wurden, sowie die entsprechenden repräsentativen Quelldehnungsgeraden.

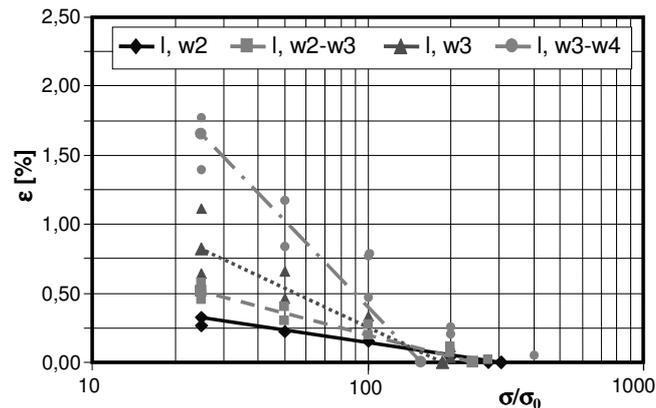


Bild 4: Repräsentative Quelldehnungsgeraden des Amaltheentons in Abhängigkeit vom Verwitterungsgrad

Diese 4 Geraden veranschaulichen die in Abschnitt 2 angenommene Abhängigkeit des Quellvermögens vom Verwitterungsgrad. Sie sind das Ergebnis einer überwiegend empirischen Ermittlung von repräsentativen Werten der Quellparameter C_b und σ_{z0} (Fritzsche

(2002)). Die Bestimmung der beiden Quellparameter ausschließlich anhand statistischer Methoden hat sich als untauglich erwiesen.

4.3 Streuung der Versuchsergebnisse und Bestimmung der Quellparameter

Auch bei Versuchsserien mit gleichem Lastregime, die an ein und derselben Versuchseinrichtung an Materialien aus dem gleichen Homogenbereich durchgeführt wurden, streuen die Ergebnisse beträchtlich (siehe Bild 5). Diese Streuungen sind größer als diejenigen, die bei der Ermittlung der Scherfestigkeitsparameter φ und c anhand einer vergleichbaren Datenbasis auftreten.

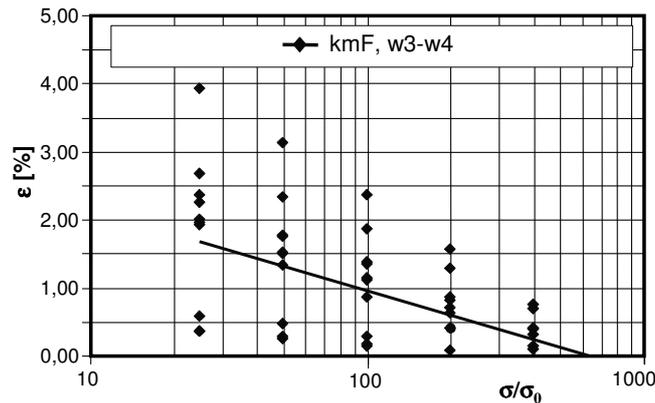


Bild 5: Streuung der Versuchsergebnisse und repräsentative Quelldehnungsgerade für Feuerletten w3-w4

Obwohl die 4 Homogenbereiche gemäß Abschnitt 2.2 mit unterschiedlichen Quelleigenschaften separat ausgewertet wurden, streuen die Ergebnisse der Quellversuche erheblich. Die Bestimmung der Parameter für das Quelldehnungsgesetz ist bei den diagenetisch verfestigten Tonsteinen mit verschiedenen Verwitterungsstufen insofern schwierig, weil zusätzlich Korrelationen der Quellparameter zum Verwitterungsgrad berücksichtigt werden müssen.

Das Referenzzeitmaß η_q wurde anhand der Quellhebungs-Zeit-Verläufe jedes einzelnen Versuches bestimmt, indem es solange variiert wurde, bis der rechnerische Quellhebungsverlauf visuell am besten mit den Versuchsergebnissen übereinstimmte. Die repräsentativen η_q -Werte für die Homogenbereiche wurden als Mittelwerte aus den o.g. Einzeldaten bestimmt.

4.4 Einfluss der Versuchsart auf die Größe der Quellhebungen

Alle Versuchsarten sind zu Vergleichszwecken mit Probenmaterial der verschiedenen quellfähigen Materialien ausgeführt worden. Bild 6 zeigt die Ergebnisse der 3 verschiedenen Versuchsarten an Feuerletten der Verwitterungsstufe w_3 sowie die zugehörigen repräsentativen Quelldehnungsgeraden.

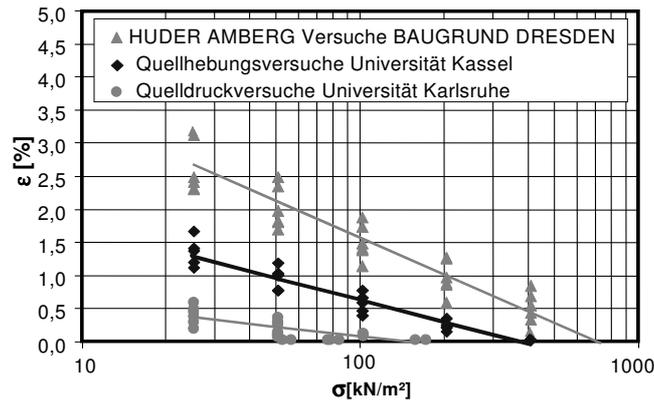


Bild 6: Ergebnisse 3 verschiedener Versuchsserien an Feuerletten w_3 mit zugehörigen repräsentativen Quelldehnungsgeraden

Es ist offensichtlich, dass das experimentell festgestellte Quellvermögen der diagenetisch verfestigten Tonsteine von der Versuchsart abhängt.

Die Ergebnisse der Hebungsprognosen und der Hebungsmessungen in situ haben bestätigt, dass rechnerische Quellhebungen auf der Basis von Quellparametern, die anhand der kombinierten Quelldruck-Quellhebungsversuche bestimmt wurden, realitätsnah sind. Dagegen ist das mit den beiden anderen Versuchsarten festgestellte Quellvermögen viel zu groß.

Konventionelle Quellhebungsversuche und Versuche nach Huder/Amberg sind nicht geeignet, um das Quellverhalten in situ unter Laborbedingungen zu erfassen. Infolge der Vorbelastungen vor Beginn der Hebungsphasen wird sowohl die Struktur der Tonsteine stark gestört als auch die diagenetischen Bindungen überwiegend zerstört, auch wenn weitgehend ungestörte Proben eingebaut worden sind (siehe auch von Wolffersdorff & Fritzsche (2003)).

5 Berechnung der Quellhebungen und Hebungsmessungen in situ

5.1 Eindimensionale Berechnungsmethode

Für die Quellhebungsprognosen wurde auf der Grundlage des in Abschnitt 3 erläuterten Quelldehnungsgesetzes eine der konventionellen Setzungsberechnung ähnliche Berechnungsmethode entwickelt. Sie ist ausführlich in (Fritzsche (2002)) beschrieben. Analog zur Setzungsberechnung sind Kriterien für eine Grenztiefe, bis zu der Quellhebungen auftreten können, festzulegen. Die Grenztiefe ist erreicht,

1. wenn die Spannungen σ_z nach Aushub die Größe des Quelldruckes $\sigma_{z,0}$ erreichen,
2. wenn die aushubbedingte Spannungsabnahme $\Delta\sigma_z^q$ 30% von σ_z nach Aushub beträgt,
3. wenn nicht quellfähiges Locker- bzw. Festgestein erreicht ist.

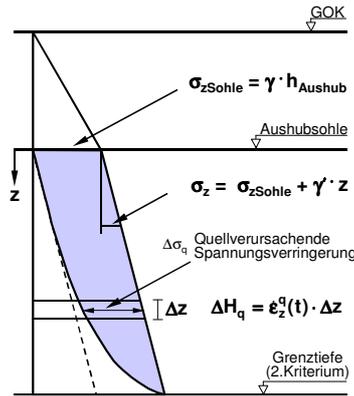


Bild 7: Eindimensionale Berechnungsmethode – Verlauf der quellwirksamen Spannungsänderungen

Bild 7 zeigt den Verlauf der aushubbedingten, quellwirksamen Spannungsänderungen $\Delta\sigma_z^q$. Es wurde eine parabolische Abnahme dieser Spannungsänderungen bis zur Grenztiefe nach dem 2. Kriterium angenommen. Die Quellhebungen werden ermittelt, indem die Quelldehnungen nach Gleichung (1) in Verbindung mit Gleichung (2) für verschiedene Zeitpunkte numerisch über die Tiefe integriert werden.

Bei mehreren Aushubphasen wurden die Quellhebungen für jede Aushubphase getrennt mit den entsprechend unterschiedlichen Startzeitpunkten und Spannungen $\Delta\sigma_z^q$ berechnet und anschließend überlagert. Bodenaustausch und Oberkonstruktion wurden als Flächenlasten angesetzt.

5.2 Finite-Elemente-Methode

Wie in Abschnitt 3.2 erläutert ist, wurde die zeitabhängige Entwicklung der Quelldehnungen im Rahmen eines viskosen Modellierungs-Ansatzes in die FEM implementiert. Für den hier vorgenommenen Vergleich der Ergebnisse zwischen konventioneller, eindimensionaler Methode und der FEM wurde das in Bild 8 dargestellte zweidimensionale Finite-Elemente-Modell verwendet.

Die konventionelle Methode war ursprünglich nur für die Prognosen von Endquellhebungen in den Einschnittssohlen entwickelt worden. Die Erweiterung für Zeitverläufe war aufwändig und erfordert zusätzliche Annahmen und Randbedingungen, die die Nachvollziehbarkeit der Methode erschweren.

Der Aufwand für die Anwendung der Finite-Elemente-Methode hat sich als nicht größer erwiesen als der Aufwand für die Handhabung der o.g. konventionellen Berechnungsmethode. Die großen Vorteile bei der Anwendung der FEM bestehen darin, dass die einzelnen Bauphasen einfach und realitätsnah modelliert werden können (siehe Bild 9). Die zeitliche Entwicklung des Quellvorgangs im gesamten betroffenen Bereich lässt sich somit unter Berücksichtigung der Bauphasen fein auflösen. Dadurch ergibt sich insgesamt ein transparenter Berech-

nungsablauf und der Einfluss der einzelnen Bauphasen hinsichtlich der Quellproblematik ist detailliert darstellbar. Darüber hinaus lassen sich die Quellhebungen an beliebig vielen Punkten innerhalb des Quellhebungsbereiches auswerten.

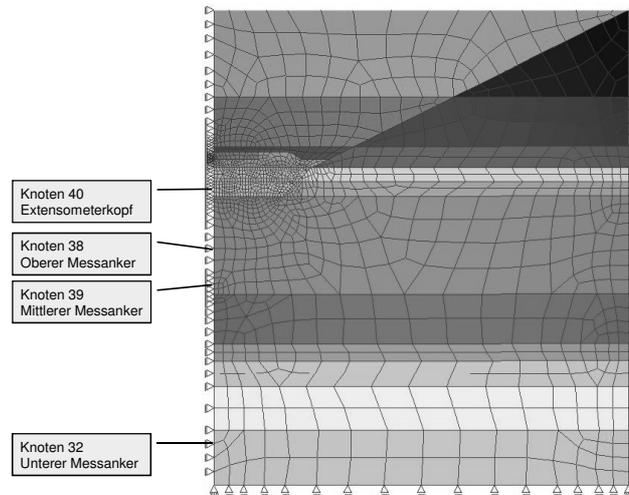


Bild 8: Zweidimensionales Finite-Elemente-Modell des Extensometer-Querschnittes bzw. des Berechnungsquerschnittes BQ2 im Einschnitt „Hilpoltstein“ (Bau-km 30+500)

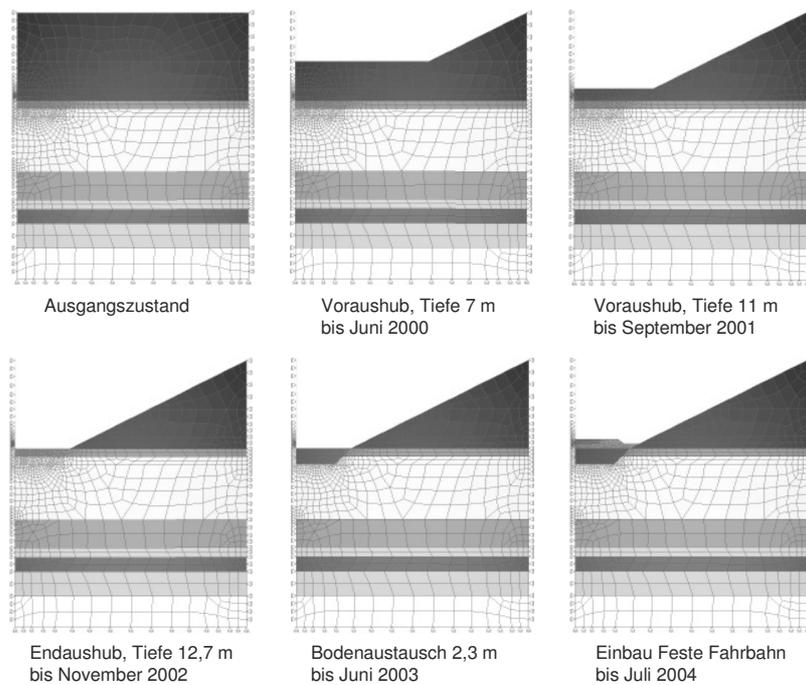


Bild 9: Die maßgeblichen 6 Berechnungsphasen für die FE-Berechnung der Quellhebungen

Da in den hier gezeigten FE-Berechnungen der Maßstabeffekt auf die Zeitdauer des Quellhebungsvorganges nicht auf direktem Weg berücksichtigt werden konnte, war es notwendig, anhand der Extensometer-Messergebnisse anstatt des Maßstabexponenten n ein Referenzzeitmaß η_q unabhängig von den unterschiedlichen η_q -Werten der anstehenden Verwitterungsstufen nachträglich unter Berücksichtigung der jeweils anstehenden Schichtdicke in situ zu kalibrieren.

Die effektive Erfassung der mehrdimensionalen Maßstabsabhängigkeit des Zeitverhaltens von Quellvorgängen ist nach wie vor ungelöst und es besteht der dringende Bedarf, hierfür ein einfaches, praxistaugliches Modell, das sich nicht auf die in der Regel unüberprüfbar Wasserausbreitungsvorgänge in situ stützt, zu entwickeln.

5.3 Zeitverlauf der Quellhebungen

Im Einschnitt „Hilpoltstein“ wurden nach der ersten Aushubphase zwei Extensometer-Messstellen unterhalb der geplanten Einschnittssohle installiert. Bild 10 zeigt die gemessenen Quellhebungen seit Beginn des Aushubes bis April 2004 für die Schichtpakete des linken 3-fach-Extensometers gemäß Bild 1. Die Anordnung der Messanker und der dazwischen liegenden Schichtpakete gehen ebenfalls aus Bild 1 hervor.

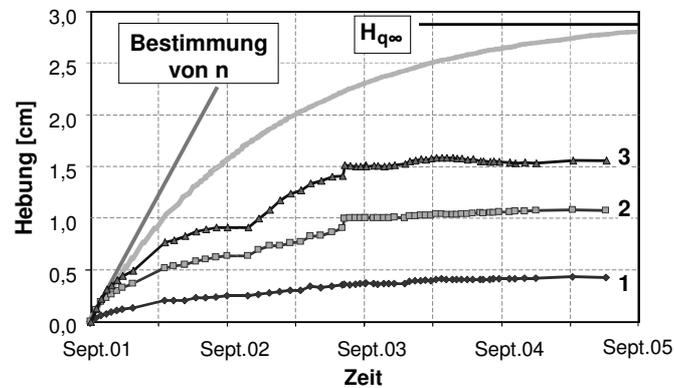


Bild 10: Bestimmung des Exponenten n anhand von Extensometer-Messergebnissen im Einschnitt „Hilpoltstein“ (Bau-km 30+500)

Die Messergebnisse in Bild 10 enthalten nur die gemessenen Quellhebungen. Soforthebungen infolge der einzelnen Aushubphasen sind herausgefiltert.

Der gemessene Hebungs-Zeit-Verlauf lässt sich wie folgt unterteilen:

- Voraushub ab September 2001,
- Zwischenaushub bis Unterkante Bodenaustausch ab November 2002,
- Einbau des Bodenaustausches und darüber liegender Oberbauschichten ab Juli 2003.

Die Messergebnisse für das Schichtpaket des Extensometers zeigen, dass die Quellhebungen weitgehend zur Ruhe gekommen sind, insbesondere nach Einbau des Bodenaustausches.

Diese Messergebnisse in situ wurden auch zur Bestimmung des Zeitparameters n verwendet. Er wurde solange variiert, bis der Anfangsanstieg des rechnerischen Quell-Hebungs-Zeitverlaufes mit dem der Messergebnisse gut übereinstimmte. In Bild 10 ist der rechnerische Hebungs-Zeit-Verlauf bei sofortigem, vollständigen Aushub und ohne Bodenaustausch mit $n = 0,82$ dargestellt.

6 Quellhebungsprognosen

6.1 Bemessungskonzept für die Bodenaustauschdicken

Trotz Vorwegnahme von Quellhebungen durch möglichst zeitigen Aushub der Einschnitte, war in vielen Einschnitten ein Bodenaustausch notwendig, um die nach Einbau der Festen Fahrbahn noch zu erwartenden Resthebungen auf das zulässige Hebungsmaß begrenzen zu können. Auf der Grundlage der Quellhebungsprognosen in Verbindung mit einem geeigneten Bemessungskonzeptes war es möglich, diesen Bodenaustausch zu optimieren. In Bild 11 ist dieses Bemessungskonzept für die erforderlichen Bodenaustauschdicken mit dem Nachweis der zulässigen Hebungen dargestellt.

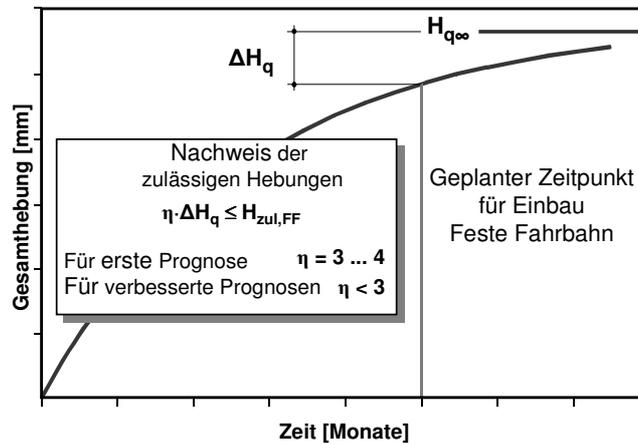


Bild 11: Nachweis der zulässigen Hebungen

Die Bodenaustauschdicke ist so zu dimensionieren, dass nach dem rechnerischen Quellhebungsverlauf, in dem auch der Bodenaustausch berücksichtigt ist, nur noch Restquellhebungen ΔH_q eintreten, die kleiner sind als das festgelegte zulässige Hebungsmaß $H_{zul,FF}$ von 1 cm.

Wegen der Unsicherheiten bei der geologischen Modellierung, der starken Streuung der Laborversuchsergebnisse, des vereinfachten Berechnungsverfahrens und der geringen Erfahrungen mit Quellhebungen in Einschnitten wurden die erwarteten Restquellhebungen ΔH_q mit einem Sicherheitsfaktor von mindestens 3 beaufschlagt.

6.2 Quellhebungsprognosen für den Einschnitt „Hilpoltstein“

Kurz nach Beginn der Aushubarbeiten wurde eine erste Prognose erstellt. Hierfür wurde angenommen, dass der Einschnitt sofort bis zur Endtiefe ausgehoben wird. Ein eventueller Bodenaustausch wurde nicht berücksichtigt. In Bild 12 sind der Hebungs-Zeit-Verlauf und die Endquellhebung für den Berechnungsquerschnitt BQ2 dargestellt (BQ2 siehe Bild 15). In diesem Berechnungsquerschnitt ergeben sich infolge großer Aushubtiefe in Verbindung mit ungünstiger geologischer Schichtung der diagenetisch verfestigten Tonsteine die größten Quellhebungen. Nach dieser ersten Prognose waren Endquellhebungen von insgesamt ca. 4,5 cm zu erwarten.

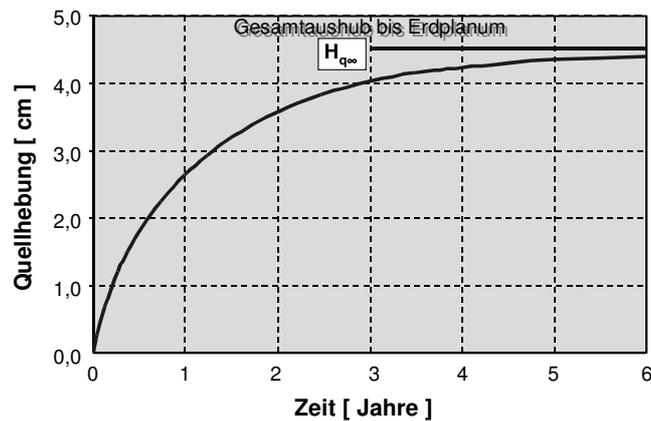


Bild 12: Erste Quellhebungsprognose für den Berechnungsquerschnitt BQ2 im Einschnitt „Hilpoltstein“

Die Bemessung der Bodenaustauschdicken erfolgte zu einem späteren Zeitpunkt. Die Quellhebungsprognose wurde dahingehend verfeinert, dass sowohl bisher erfolgte Bautätigkeit (Voraushub) als auch der noch geplante Bauablauf detaillierter im Quellhebungsverlauf berücksichtigt wurden. Außerdem wurde ein Bodenaustausch berücksichtigt (Mindestdicke 0,5 m). Wenn die im Bild 11 angegebene Nachweisbedingung nicht erfüllt war, wurde die Bodenaustauschdicke dementsprechend vergrößert. In Bild 13 sind für den Berechnungsquerschnitt BQ2 die letzte verbesserte Prognose des Hebungs-Zeit-Verlaufes nach der eindimensionalen Berechnungsmethode und der Quellhebungs-Zeit-Verlauf der nachträglich erstellten FE-Berechnung dargestellt.

Während des dreiphasigen Aushubs nehmen die Quellhebungen überproportional zu. Dieser Verlauf wird durch den als Oberflächenlast wirkenden Bodenaustausch stark vermindert, so dass die Restquellhebungen nach Einbau der Festen Fahrbahn den Anforderungen des Bemessungskonzeptes hinreichend genügen.

Beide Quellhebungszeitverläufe stimmen gut mit einander überein. Der mit der FEM ermittelte Verlauf ergibt um 10% größere Hebungen als der Verlauf mit der konventionellen Berechnungsmethode.

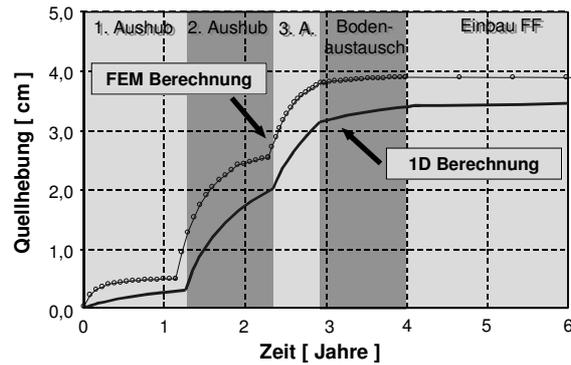


Bild 13: Verbesserte Quellhebungsprognose und Quellhebungsverlauf der nachträglichen FE-Berechnung für den Berechnungsquerschnitt BQ 2 im Einschnitt „Hilpoltstein“

Bild 14 zeigt den Vergleich zwischen rechnerischen Quellhebungsverläufen und den Extensometer-Messergebnissen. Der Kurvenverlauf der letzten verbesserten Quellhebungsprognose und der Kurvenverlauf der nachträglichen FE-Berechnungen stimmen für das gesamte Schichtpaket zwischen den Extensometer-Messstellen gut überein, jedoch sind die Gesamtquellhebungen nach Einbau der Festen Fahrbahn um ca. 30% größer als die gemessenen Hebungen. Der maßgebliche Grund dafür ist, dass die Quellparameter zur sicheren Seite anhand der Versuchsdaten aller 3 Versuchsarten ermittelt wurden.

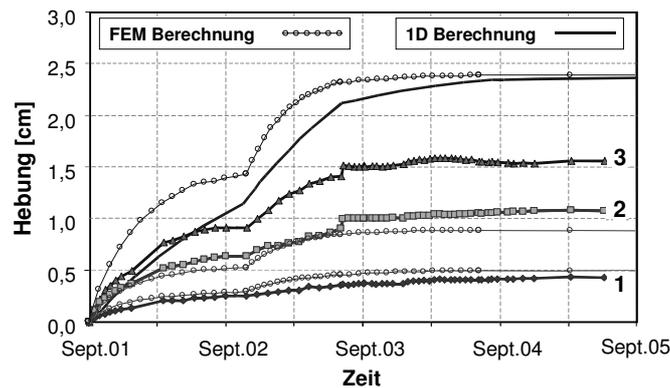


Bild 14: Vergleich zwischen den rechnerischen Quellhebungsverläufen (verbesserte Prognose und nachträgliche FE-Berechnung) und den Extensometer-Messergebnissen

Zusätzlich sind in Bild 14 die Quellhebungsverläufe der FE-Berechnungen für die Schichtpakete zwischen den einzelnen Messpunkten dargestellt. Zwischen diesen rechnerischen Kurvenverläufen und den entsprechenden Messergebnissen gibt es eine gute Übereinstimmung.

Die rechnerischen Kurvenverläufe für die 3 Schichtpakete zwischen den 4 Extensometer-Messpunkten erhält man aus einer einzigen FE-Berechnung. Nach der konventionellen Methode wären hierfür 3 unterschiedliche Berechnungen notwendig gewesen. Die Darstellungen in Bild 14 spiegeln somit auch Vorteile der FE-Berechnungen wider.

In Bild 15 ist das Hebungsband mit 4 Berechnungsquerschnitten für die Endquellhebung entlang der Trassenachse dargestellt. Die Endquellhebungen der verbesserten Prognose, bei denen insbesondere der Bauablauf realitätsnäher berücksichtigt werden konnte, sind kleiner als die der ersten Prognose.

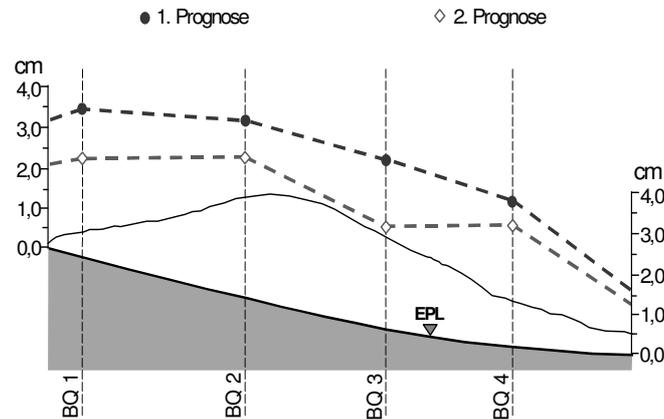


Bild 15: Hebungsband der Endquellhebungen entlang der Trasse im Einschnitt „Hilpoltstein“

Bei den eindimensionalen Quellhebungsprognosen wurde vorausgesetzt, dass Hebungsunterschiede nur in Streckenlängsrichtung auftreten und dass die maßgebenden Größtwerte immer in der Trassenachse entstehen. Die zweidimensionalen FE-Berechnungen ermöglichen auch eine Betrachtung des Quellhebungsverlauf im Querschnitt des Einschnittes. Bild 16 zeigt den mit der FE-Berechnung ermittelten Querschnittsverlauf der Gesamtquellhebungen. Die Gesamtquellhebung in der Trassenachse entspricht der in Bild 13 dargestellten Endquellhebung des mit FEM ermittelten Hebungs-Zeit-Verlaufes.

Bild 16 zeigt außerdem, dass die am äußeren Rand der Festen Fahrbahn ermittelte Quellhebung nur um ca. 11% bzw. um 4,2 mm kleiner als die Quellhebung in der Trassenachse ist. Das heißt, die Hebungsunterschiede in Trassenquerrichtung sind insbesondere im unmittelbaren Bereich der Gleise vernachlässigbar klein. Somit hat sich mit den FE-Berechnungen nachträglich bestätigt, dass im Unterschied zu den Quelluntersuchungen im Tunnelbau (*Grob (1972), Wittke-Gattermann (1998), Wittke (2003)*) eine eindimensionale Modellierung für Quellhebungsprognosen in Einschnitten ausreichend ist.

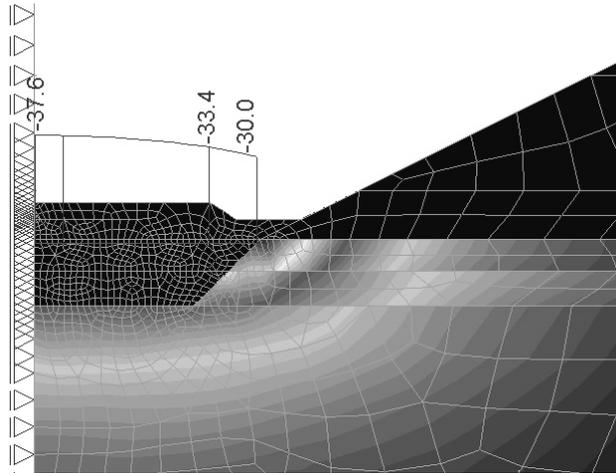


Bild 16: Verteilung der mit der FEM ermittelten Gesamtquellhebungen im Einschnittsquerschnitt

7 Bautechnische Maßnahmen

Bei der Festlegung der Bodenaustauschdicken wurde berücksichtigt, dass unkontrollierter Wasserzutritt das Quellvermögen verstärken kann. In Bild 17 ist der ausgeführte Bodenaustausch mit unterschiedlichen Regeldicken für den Einschnitt „Hilpoltstein“ dargestellt.

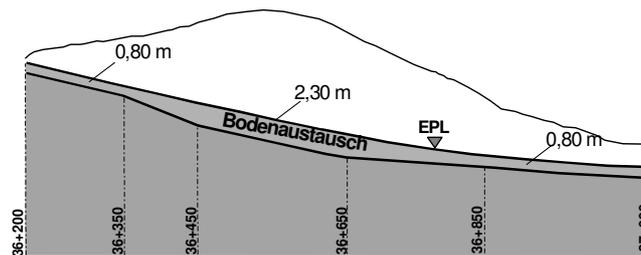


Bild 17: Bodenaustausch mit unterschiedlichen Regelmächtigkeiten im Einschnitt „Hilpoltstein“

Die erforderlichen Bodenaustauschdicken wurden nach dem o.g. Bemessungskonzept ermittelt. Da in den Einschnitten – unabhängig von der Quellproblematik – eine 30 cm dicke Bodenverbesserung in den Einschnittssohlen ohnehin vorgesehen war, wurde eine Mindestaustauschdicke von 0,5 m vorgegeben (von *Wolffersdorff et al. (2004)*).

Um jeglichen Wasserzutritt oberhalb des Bodenaustausches zu verhindern, wurde über den Bodenaustausch eine 8 cm dicke Asphaltenschutzschicht aufgebracht. Der Bodenaustausch erfolgte mit Materialien, die dem Anforderungskatalog Feste Fahrbahn genügen.

8 Schlussbemerkungen

Während der Herstellung der Einschnitte wurden die Hebungen kontinuierlich durch Extensometermessungen überwacht. Ergänzend wurden geodätische Messungen nach den wichtigsten Zwischenbauzuständen auf den jeweiligen Planien durchgeführt. Die Messergebnisse haben tendenziell den Verlauf der Quellhebung bestätigt und gezeigt, dass die prognostizierten Quellhebungen zu groß sind und demzufolge auf der sicheren Seite liegen. Wie erwartet sind die Hebungen in allen Einschnitten nach Einbau des Bodenaustausches weitgehend zur Ruhe gekommen.

Die Eignung der für die Prognosen verwendete eindimensionale Berechnungsmethode konnte nachträglich durch vergleichende Finite-Elemente-Berechnungen bestätigt werden.

Durch die umfangreichen Untersuchungen zum Quellverhalten und die konsequente Anwendung der Beobachtungsmethode konnten die erforderlichen Bodenaustauschdicken optimiert werden (maximale Dicke 2,30 m, minimale Dicke 0,5 m). Die durchschnittliche Bodenaustauschdicke im Baulos Nord beträgt 0,85 m. Im Vergleich zu dem ursprünglich vorgesehenen Bodenaustausch ergeben sich dadurch Einsparungen von über 50 %.

9 Literaturverzeichnis

- Fritzsche, S. (2002):* Untersuchung und bautechnische Beherrschung des Quellverhaltens von Tonsteinen am Beispiel der Einschnitte der NBS Nürnberg – Ingolstadt, Diplomarbeit, Institut für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg
- Gartung, E. / von Wolffersdorff, P.-A. / Schmidt, C. (2005):* Gebrauchstauglichkeitsnachweis für die Gründung einer Festen Fahrbahn im Einschnitt in quellfähigem Baugrund, Beiträge zur Tagung „Erdbau für Verkehrswege 2005“, LGA Nürnberg, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstitutes, Nürnberg, Heft 83
- Gartung, E. / von Wolffersdorff, P.-A. / Schmidt, C. (2005):* Serviceability Assessment for a High Speed Railway Track in Overconsolidated Clay Formations, Case Studies in Geotechnical Engineering, GEOPRACTICE 2005, July 25-26, 2005, Indian Institute of Science, Bangalore, Editors: G.L. Sivakumar Babu & T.G. Sitharam. pp. 237 – 246
- Grob, H. (1972):* Schwelldruck im Belchentunnel, Proc. Int. Symp. für Untertagebau, Luzern, S. 99-119
- Heidkamp, H. / Katz, C. (2002):* Soils with swelling potential – Proposal of a finite state formulation within an implicit intergration scheme illustrative FE-calculations, Proc. Fifth World Congress on Computational Mechanics Vienna 2002
- Heidkamp, H / Katz, C. (2004):* The swelling phenomenon of soils – Proposal of an efficient continuum modelling approach, Proc. ISRM Regional Symposium EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquy, Verlag Glückauf GmbH, S. 743-748

- Huder, J. / Amberg, G. (1975):* Quellung in Mergel, Opalinuston und Anhydrit, Schweizerische Bauzeitung, 83, S. 975-980
- Kiehl, J. R. (1990):* Ein dreidimensionales Quellgesetz und seine Anwendung auf den Fels-hohlraumbau, Sonderheft Geotechnik, Vorträge zum 9. Internationalen Felsmechanik Symposium
- Paul, A. (1986):* Quellversuche an Gesteinsproben, Empfehlung Nr.11 des Arbeitskreises 19 – Versuchstechnik Fels – der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. Bautechnik, 63(3), S. 100-104
- Pimentel, E. (1996):* Quellverhalten von diagenetisch verfestigtem Tonstein, Veröffentlichung des Institutes für Boden- und Felsmechanik Universität Karlsruhe, Heft 139
- von Wolffersdorff, P.-A. / Hempel, M. / Raithel, M. (2002):* Bau einer Hochgeschwindigkeitsstrecke auf quellfähigem Untergrund, Proc. 12. Donau-Europäische Konferenz, Passau, VGE Verlag Glückauf, S. 407-410
- von Wolffersdorff, P.-A. / Fritzsche, S. (2003):* Laboratory swell tests on overconsolidated clay and diagenetic solidified clay rocks, Proc. Geotechnical Measurements and Modelling, Karlsruhe, A.A. Balkema Pub., S. 407-412
- von Wolffersdorff, P.-A. / Rosner, S. / Wegerer, P. (2004):* Planung von bautechnischen Lösungen in den quellgefährdeten Einschnitten der Hochgeschwindigkeitsstrecke Nürnberg-Ingolstadt, Vorträge der Baugrundtagung 2004 in Leipzig, Hrsg. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), Verlag Glückauf GmbH, S. 211-228
- Witke-Gattermann, P. (1998):* Verfahren zur Bemessung von Tunnels in quellfähigem Gebirge und Kalibrierung an einem Versuchsbauwerk, WBI-Print 1, Verlag Glückauf GmbH, Essen
- Witke, M. (2003):* Begrenzung der Quelldrücke durch Selbstabdichtung beim Tunnelbau im anhydritführenden Gebirge, WBI-Print 13, Verlag Glückauf GmbH, Essen