

# Planung von bautechnischen Lösungen in den quellgefährdeten Einschnitten der Hochgeschwindigkeitsstrecke Nürnberg – Ingolstadt

Priv.-Doz. Dr.-Ing Peter-Andreas von Wolffersdorff, Dipl.-Ing Sylvia Rosner  
BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH, Dresden  
Dipl.-Ing. Peter Wegerer  
DB ProjektBau GmbH, Nürnberg

*Der überwiegende Teil der Einschnitte der Hochgeschwindigkeitsstrecke liegt in quellfähigen Locker- und Festgesteinen. Daher muss infolge des Aushubes der Einschnitte mit Quellhebungen gerechnet werden. Eventuelle Restquellhebungen nach Herstellung der Festen Fahrbahn müssen die hohen Gebrauchstauglichkeitskriterien des Fahrweges erfüllen. Es wird ein auf der Beobachtungsmethode beruhender Lösungsweg zur Beherrschung des Quellens in den Einschnitten vorgestellt. Die bautechnische Lösung sieht vor, die Quellhebungen durch zeitigen Aushub der Einschnitte weitgehend vorwegzunehmen und die Restquellhebungen durch einen optimierten Bodenaustausch auf das zulässige Maß zu begrenzen. Grundlagen hierfür sind Hebungsmessungen in situ und rechnerische Prognosen für den zeitlichen Quellhebungsverlauf. Diese Quellhebungsprognosen stützen sich auf eine umfangreiche Datenbasis von experimentellen Laboruntersuchungen.*

## 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 durch diagenetisch verfestigte Tonsteine des Keupers und in der südlichen Fränkischen Alb bzw. im Ingolstädter Becken abschnittsweise durch sedimentäre Ablagerungen, bestehend aus tertiären, vorwiegend überkonsolidierten Tonen. Wegen der potentiellen Quellfähigkeit dieser Locker- und Festgesteine muss infolge Aushub der Einschnitte mit Quellhebungen in den Einschnittsohlen 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 zu mindestens kleiner als das Korrekturmaß der Schienenbefestigung sein.

Die quellgefährdeten Einschnitte haben insgesamt eine Länge von ca. 10,5 km und stellen somit einen beträchtlichen Anteil der offenen Strecke dar. Im Einzelnen war die Quellproblematik für folgende Einschnitte zu behandeln:

- 11 Einschnitte mit einer Gesamtlänge von ca. 7,2 km in den diagenetisch verfestigten Tonsteinen (Baulos Nord),
- 7 Einschnitte mit einer Gesamtlänge von ca. 3,3 km in den überkonsolidierten Tonen (Baulos Süd).

Für den Bau der Hochgeschwindigkeitsstrecke war es deshalb zwingend erforderlich, einen Lösungsweg zu Beherrschung der Quellproblematik zu finden und so zu realisieren, dass die hohen Sicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsanforderungen bei minimierten Kosten erfüllt werden.

Nach folgenden Arbeitsschritten wurde vorgegangen:

1. Experimentelle und theoretische Untersuchungen des Quellens; Entwicklung eines geeigneten, praktikablen Quelldehnungsgesetzes zur Prognose der Endquellhebungen und des zeitlichen Verlaufes.
2. Erstellung von geologischen Modellen für die quellgefährdeten Einschnitte mit detailliertem Aufbau der quellfähigen Schichten.
3. Erarbeitung von Untersuchungsprogrammen für Quellversuche im Labor und von Messprogrammen für die Erfassung von Hebungen in situ (Extensometer-, Gleitdeformetermessungen, geodätische Messungen).

4. Durchführung von Hebungsmessungen in situ ab den ersten Aushubphasen der Einschnitte.
5. Durchführung von laborativen Quellversuchen.
6. Entwicklung eines Berechnungsverfahrens für die Quellhebungen und deren zeitliche Verläufe infolge Bodenaushub; Kalibrierung des Quelldehnungsgesetzes bzw. des Berechnungsverfahrens anhand der Laborversuchsergebnisse und der Ergebnisse von vorausseilenden Hebungsmessungen in situ.
7. Erstellung von Quellhebungsprognosen in vorgegebenen Berechnungsquerschnitten für die quellgefährdeten Einschnitte.
8. Aufstellung eines Bemessungskonzeptes für erforderliche Bodenaustauschdicken mit Nachweis von zulässigen Resthebungen.
9. Planung und Ausführung geeigneter bautechnischer Maßnahmen (teilweiser Bodenaustausch der quellfähigen Schichten).

Dieser Bearbeitungsablauf zeigt, dass zur Planung und zur Realisierung von bautechnischen Lösungen nach der Beobachtungsmethode vorgegangen worden ist. Die Prognosen wurden im Sinne der Beobachtungsmethode verbessert, wobei insbesondere die bereits realisierten Bauzustände und deren zeitlicher Ablauf berücksichtigt wurden.

In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Grundlagen und Merkmale des o.g. Lösungsweges beschrieben.

## 2. Quellverhalten und geologische Modelle

### 2.1 Art des Quellens

Osmotische und mechanische Quellvorgänge sind bei den diagenetisch verfestigten Tonsteinen als auch bei den tertiären Tonen die hauptsächlichen Ursachen für Hebungen, die infolge des Aushubes in den Einschnitten entstehen können (1).

Mineralogische Untersuchungen haben gezeigt, dass in diesen Fest- und Lockergesteinen keine Bestandteile enthalten sind, die Anhydritquellen verursachen.

### 2.2 Diagenetisch verfestigte Tonsteine

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 Zusammenhänge zwischen Verwitterungsgrad und Quellvermögen angenommen:

- Größere Quellmaße infolge Entlastungen bei höherem Verwitterungsgrad,
- Geringere Quellpotenziale bei höherem Verwitterungsgrad, d.h. kleinere Quelldrücke bei vollständig unterdrückter Volumendehnung,
- Schnellere Quellvorgänge bei höherem Verwitterungsgrad.

### 2.3 Tertiäre Tone

Das Quellvermögen der tertiären Tone hängt sowohl von der Zusammensetzung des Lockergesteins als auch von Belastungsgeschichte in situ ab, die in der Regel zu einer Überkonsolidierung geführt hat. Im Unterschied zu den diagenetisch verfestigten Tonsteinen gibt es keine Verfestigung, die der Quellfähigkeit entgegenwirkt.

### 2.4 Geologische Modelle

Im Rahmen der geologischen Modellbildung wurden für die diagenetisch verfestigten Tonsteine folgende 4 Homogenbereiche mit unterschiedlichen Quelleigenschaften in Abhängigkeit vom Verwitterungsgrad 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

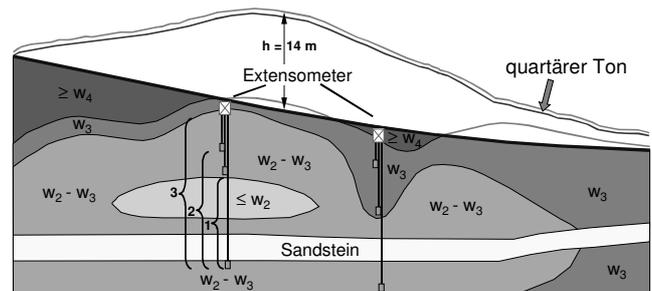


Bild 1: Geologisches Modell mit Schichtenaufbau nach Verwitterungsstufen Einschnitt „Hilpoltstein“, Baulos Nord

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

Die geologische Modellierung für die Einschnitte in den tertiären Tonen (Baulos Süd) war einfacher

als die für die Einschnitte in den diagenetisch verfestigten Tonsteinen. Es brauchte nur zwischen nicht quellfähigen und potenziell quellfähigen Untergrund mit einheitlichen Quelleigenschaften unterschieden werden.

### 3. Quelldehnungsgesetz

#### 3.1 Endquelldehnungen

Der logarithmische Ansatz nach Grob (2) ist die Grundlage für das hier verwendete eindimensionale Quelldehnungsmodell. Es ist in Bild 2 dargestellt.

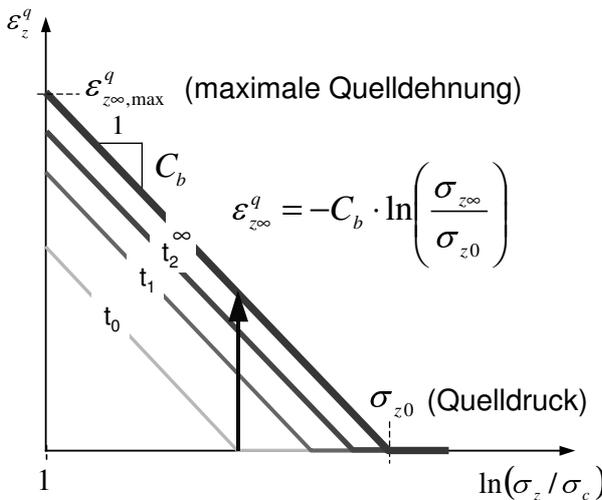


Bild 2: Eindimensionales Quell-Dehnungsmodell

In der Gleichung des Bildes 2 ist  $\sigma_{z0}$  der Quelldruck, bei dem das Quellen vollständig überdrückt wird.  $\sigma_c$  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  $\sigma_z$ . Die erforderlichen Parameter  $C_b$  und  $\sigma_{z0}$  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 (5) vorgeschlagen. Unter der Annahme konstanter Entlastungsspannungen ist folgende Darstellung möglich.

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

Das Referenzzeitmaß  $\eta_q$  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 folgender Potenzansatz vorgeschlagen (siehe 8).

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

Zur Erfassung der nicht bekannten 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 durch eine Anpassung des rechnerischen Quellhebungsverlaufs an vorausgehende in situ Messergebnisse, z.B. von Extensometermessungen bestimmt.

### 4. Quellversuche im Labor

#### 4.1 Versuchsarten

Für die Untersuchung der Quellproblematik in den Einschnitten mit den diagenetisch verfestigten Tonsteinen und mit den tertiären Tonen wurden insgesamt 169 Versuche in mehreren Versuchsserien in 4 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 Locker- bzw. Festgesteinart, Labor und Lastregime zusammengestellt

Beim konventionellen Quellhebungsversuch wird nach Wasserzugabe unter vorgegebener axialer Druckspannung  $\sigma_z$ , die zumeist stufenweise vermindert wird, die axiale Quelldehnung  $\varepsilon_z^q$  bestimmt (6). Dieser Versuch ist kraft gesteuert und kann im konventionellen einaxialen Kompressionsgeräten (Ödometer) durchgeführt werden.

Beim Quellhebungsversuch nach Huder/Amberg (4) wird ein ödometrischer Be-, Ent- und Wiederbelastungszyklus vor Beginn der Quellhebungsstufen durchgeführt.

Dagegen wird beim Quelldruckversuch nach Wasserzugabe der maximale Druck  $\sigma_{z0}$  bei verhinderter Axialdehnung bestimmt (6). Dieser Versuch kann in der Regel nicht in einem konventionellen Ödometer durchgeführt werden.

Der kombinierte Quelldruck-Quellhebungsversuch ist versuchstechnisch am aufwendigsten (7). Hierfür ist eine elektronische Steuerung notwendig, mit der sowohl Axialkräfte als auch Axialverschiebungen vorgegeben werden können.

Tabelle 1: Durchgeführte Quellversuche

	QDV <sup>1)</sup>	Quellhebungsversuch			Quellversuch nach Huder Amberg		
	TU Karlsruhe	GH Kassel	Baugrund Dresden	TU München	GH Kassel	Baugrund Dresden	TU München
Feuerletten (kmF)	17	20			3	19	
Amaltheenton (I <sub>v</sub> )	13	7	3		3	6	
Opalinuston (al <sub>1</sub> )	6	4				15	
Tertiäre Tone (tt, tk)	22		7	7			17

<sup>1)</sup> Kombiniertes Quelldruck-Quellhebungsversuch

#### 4.2 Ausgewählte Laborversuchsergebnisse und Bestimmung der Quellparameter

Aus den umfangreichen Versuchsauswertungen werden ausgewählte Ergebnisse vorgestellt.

Bild 3 zeigt im  $\varepsilon$ -log $\sigma$ -Diagramm die Ergebnisse von Versuchserien, die an den 4 Verwitterungsstufen des Amaltheentons durchgeführt wurden, sowie die entsprechenden repräsentativen Quelldehnungsgeraden.

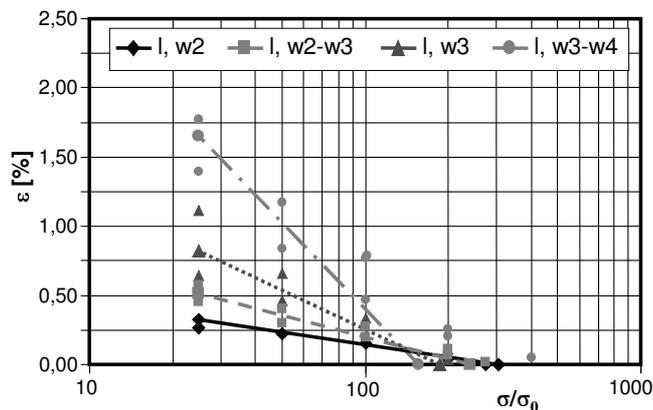


Bild 3: Repräsentative Quelldehnungsgeraden des Amaltheentons in Abhängigkeit vom Verwitterungsgrad

Diese 4 Geraden veranschaulichen den in Abschnitt 2.2 angenommenen Zusammenhang zwi-

schen Quellvermögen und Verwitterungsgrad. Sie sind das Ergebnis einer überwiegend empirischen Ermittlung von repräsentativen Werten der Quellparameter  $C_b$  und  $\sigma_{z0}$  (1). Die Bestimmung der beiden Quellparameter ausschließlich anhand statistischer Methoden hat sich als untauglich erwiesen.

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 4). Diese Streuungen sind größer als diejenigen, die bei der Ermittlung der Scherfestigkeitsparameter  $\varphi$  und  $c$  anhand einer vergleichbaren Datenbasis auftreten.

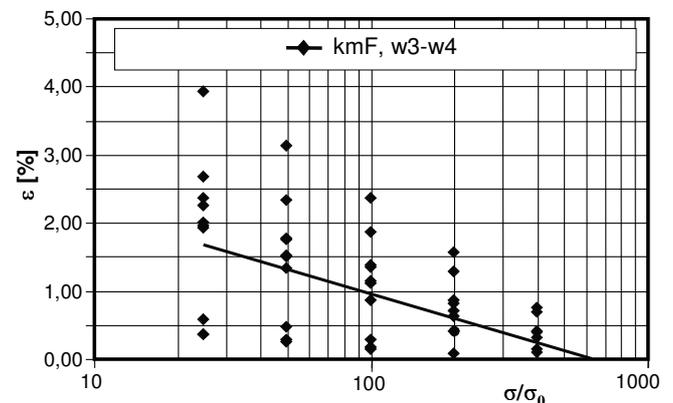


Bild 4: Streuung der Versuchsergebnisse und repräsentative Quelldehnungsgerade für Feuerletten w3-w4

Bei den diagenetisch verfestigten Tonsteinen streuen die Ergebnisse der Quellversuche noch mehr als bei den tertiären Tonen, obwohl Proben aus den o.g. 4 Homogenbereichen mit unterschiedlichen Quelleigenschaften separat ausgewertet wurden. Die Bestimmung der Parameter für das Quelldehnungsgesetz war insofern noch schwieriger, weil zusätzlich Korrelationen der Quellparameter zum Verwitterungsgrad berücksichtigt werden mussten.

Das Referenzzeitmaß  $\eta_q$  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  $\eta_q$ -Werte für die Homogenbereiche wurde als Mittelwerte aus den o.g. Einzeldaten bestimmt.

Die umfangreichen Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass das Quellvermögen der diagenetisch verfestigten Tonsteine größer ist als das der tertiären Tone.

### 4.3 Einfluss der Versuchsart auf die Größe der Quellhebungen

Alle Versuchsarten sind zu Vergleichszwecken mit Probenmaterial der verschiedenen quellfähigen Materialien ausgeführt worden. Bild 5 zeigt die Ergebnisse der 3 verschiedenen Versuchsarten an Feuerletten der Verwitterungsstufe w3 sowie die zugehörigen repräsentativen Quelldehnungsgeraden.

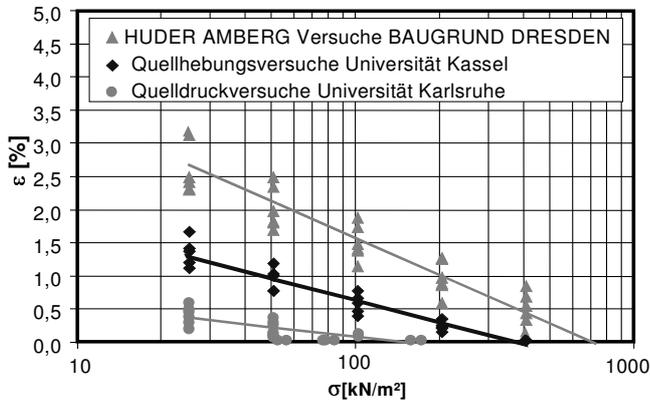


Bild 5: Ergebnisse 3 verschiedener Versuchsarten an Feuerletten w3 mit zugehörigen repräsentativen Quelldehnungsgeraden

Es ist offensichtlich, dass das experimentell festgestellte Quellvermögen der diagenetisch verfestigten Tonsteine von der Versuchsart abhängt. Eine solche Abhängigkeit wurde auch bei den tertiären Tonen festgestellt. Bild 6 zeigt die unterschiedlichen Ergebnisse von kombinierten Quelldruck-Quellhebungsversuchen und konventionellen Quellhebungsversuchen.

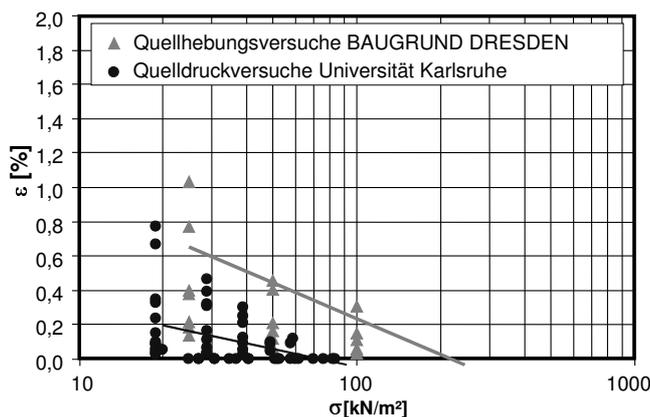


Bild 6: Ergebnisse 2 verschiedener Versuchsarten an tertiären Tonen mit zugehörigen repräsentativen Quelldehnungsgeraden

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 Tone stark gestört als auch die diagenetischen Bindungen überwiegend zerstört, auch wenn weitgehend ungestörte Proben eingebaut worden sind (siehe auch (9)).

## 5. Berechnung der Quellhebungen und Hebungsmessungen in situ

### 5.1 Berechnungsverfahren

Für die Quellhebungsprognosen wurde auf der Grundlage des in Abschnitt 3 erläuterten Quelldehnungsgesetzes ein der konventionellen Setzungsberechnung ähnliches Berechnungsverfahren entwickelt. Es ist ausführlich in (1) beschrieben. Analog zur Setzungsberechnung sind Kriterien für eine Grenztiefe, bis zu der Quellhebungen auftreten können, festzulegen. Die Grenztiefe ist erreicht,

1. wenn die Spannungen  $\sigma_z$  nach Aushub die Größe des Quelldruckes  $\sigma_{z0}$  erreichen,
2. wenn die aushubbedingte Spannungsabnahme  $\Delta\sigma_z^q$  30% von  $\sigma_z$  nach Aushub beträgt,
3. wenn nicht quellfähiges Locker- bzw. Festgestein erreicht ist.

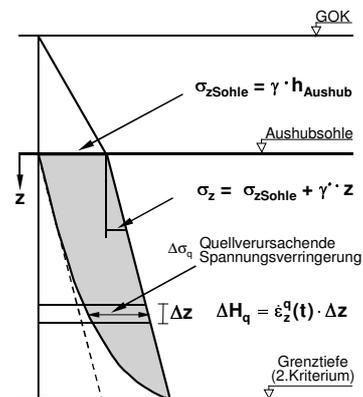


Bild 7: Berechnung der Quellhebungen – Verlauf der quellwirksamen Spannungsänderungen

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 und 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.

Im Unterschied zu den Quelluntersuchungen im Tunnelbau (2, 10, 11) hat sich eine eindimensionale Modellierung als ausreichend erwiesen.

## 5.2 Zeitverlauf der Quellhebungen

Im Einschnitt „Hilpoltstein“ wurden mit Beginn des Aushubes zwei Extensometermessstellen unterhalb der geplanten Einschnittsohle installiert. Bild 8 zeigt die gemessenen Quellhebungen seit Beginn des Aushubes bis April 2004 für die Schichtpakete des linken 3-fach-Extensometers gemäß Bild 1.

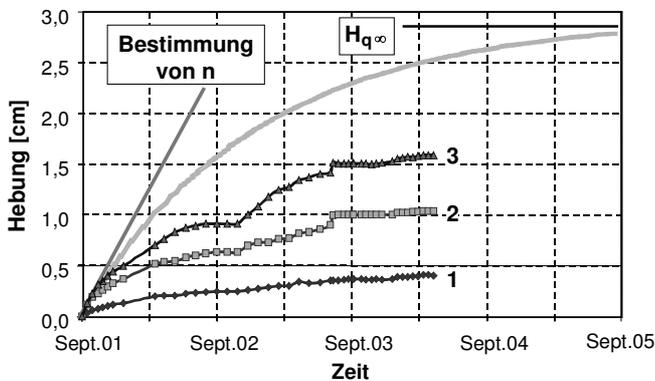


Bild 8: Bestimmung des Exponenten  $n$  anhand von Extensometer-Messergebnissen im Einschnitt „Hilpoltstein“ (Bau-km 30+500)

Die Anordnung der Messanker und der dazwischen liegenden Schichtpakete gehen ebenfalls aus Bild 1 hervor. Die Messergebnisse in Bild 8 enthalten nur die gemessenen Quellhebungen. Soforthebungen infolge der einzelnen Aushubphasen sind herausgefiltert.

Der gemessene Zeit-Hebungs-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 8 ist der rechnerische Zeit-Hebungs-Verlauf mit  $n = 0,82$  dargestellt.

## 6. Quellhebungsprognosen

### 6.1 Bemessungskonzept für die Bodenaustauschdicken

Das Grundprinzip für die Beherrschung der Quellhebungen besteht darin, durch möglichst zeitigen Aushub der Einschnitte die Quellhebungen weitgehend vorweg zu nehmen und die Restquellhebungen, die nach dem Einbau der Festen Fahrbahn noch zu erwarten sind, durch einen optimierten Bodenaustausch auf das zulässige Maß zu begrenzen. Grundlage für das Bemessungskonzept des Bodenaustausches bilden die rechnerischen Quellhebungsprognosen. In Bild 9 ist der Nachweis der zulässigen Hebungen zur Bemessung der erforderlichen Bodenaustauschdicken dargestellt.

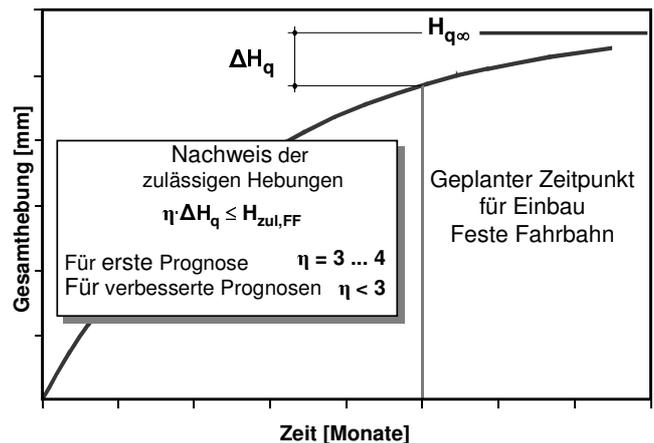


Bild 9: Nachweis der zulässigen Hebungen

Die Bodenaustauschdicke ist so zu dimensionieren, dass nach dem rechnerischen Quellhebungsverlauf, in dem auch der Bodenaustausch berücksichtigt ist, nur noch Restquellhebungen  $\Delta H_q$  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  $\Delta H_q$  mit einem Sicherheitsfaktor von mindestens 3 beaufschlagt.

### 6.2 Quellhebungsprognosen für den Einschnitt „Hilpoltstein“

Die Quellhebungsprognosen, die bei Anwendung der Beobachtungsmethode die zentrale Rolle

spielen, werden im Folgenden am Beispiel des Einschnittes „Hilpoltstein“ erläutert.

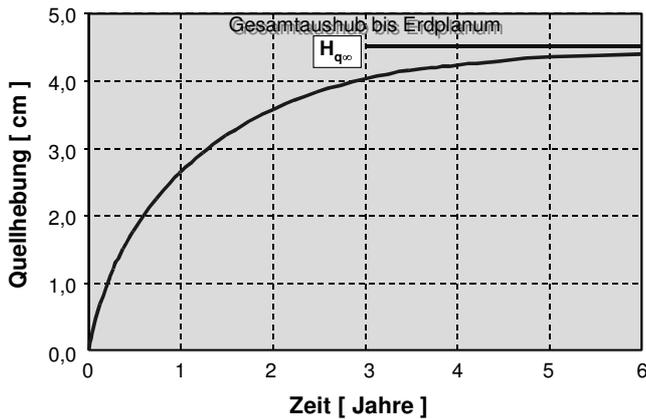


Bild 10: Erste Quellhebungsprognose für den Berechnungsquerschnitt BQ2 im Einschnitt „Hilpoltstein“

Kurz nach Beginn der Aushubarbeiten wurde eine erste Prognose erstellt. Hierfür wurde angenommen, dass der Einschnitt sofort bis zur Endaushubtiefe ausgehoben wird. Ein eventueller Bodenaustausch wurde nicht berücksichtigt. In Bild 10 sind der Zeit-Hebungs-Verlauf und die Endquellhebung für den Berechnungsquerschnitt BQ2 dargestellt.

Nach dieser ersten Prognose waren Endquellhebungen von insgesamt ca. 4,5 cm zu erwarten.

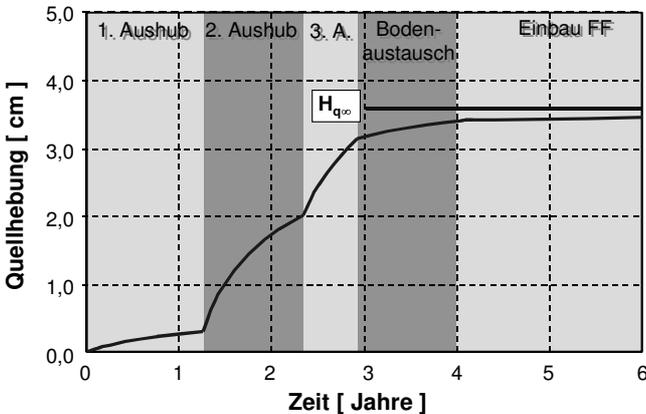


Bild 11: Verbesserte Quellhebungsprognose für den Berechnungsquerschnitt BQ 2 im Einschnitt „Hilpoltstein“

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 im Los Nord, Mindestdicke 1 m im Los Süd). Wenn die im Bild 9 angegebene Nachweisbedingung nicht

erfüllt war, wurde die Bodenaustauschdicke dementsprechend vergrößert. In Bild 11 ist eine verbesserte Prognose des Zeithebungsverlaufes für den Berechnungsquerschnitt BQ2 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.

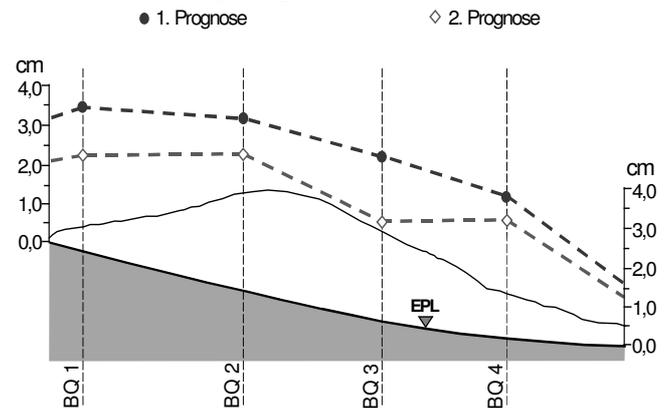


Bild 12: Hebungsband der Endquellhebungen entlang der Trasse im Einschnitt „Hilpoltstein“

In Bild 12 ist das Hebungsband mit 4 Berechnungsquerschnitten für die Endquellhebung entlang der Trassenachse dargestellt. Die Endquellhebungen der verbesserten Prognose sind kleiner als die der ersten Prognose.

## 7. Bautechnische Maßnahmen

### 7.1 Bodenaustausch im Baulos Nord

Bei der Festlegung der Bodenaustauschdicken wurde berücksichtigt, dass unkontrollierter Wasserzutritt das Quellvermögen verstärken kann. In Bild 13 ist der ausgeführte Bodenaustausch mit unterschiedlichen Regeldicken dargestellt.

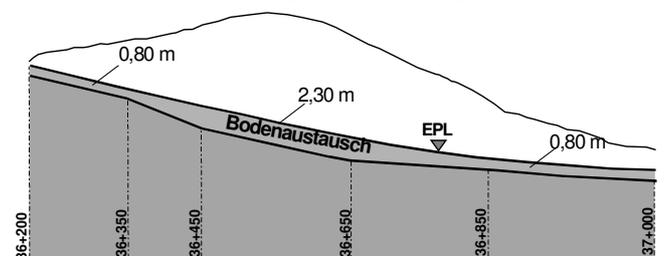


Bild 13: Bodenaustausch mit unterschiedlichen Regelmächtigkeiten im Los Nord

Die erforderlichen Bodenaustauschdicken wurden nach dem o.g. Bemessungskonzept ermittelt. Da in diesen Einschnitten – unabhängig von der Quellproblematik – eine 30 cm dicke Bodenver-

besserung in den Einschnittsohlen ohnehin vorgesehen war, wurde eine Mindestaustauschdicke von 0,5 m vorgegeben.

Um jeglichen Wasserzutritt oberhalb des Bodenaustausches zu verhindern, wurde über den Bodenaustausch eine 8 cm dicke Asphalt Schutzschicht aufgebracht (siehe Bild 14 links).

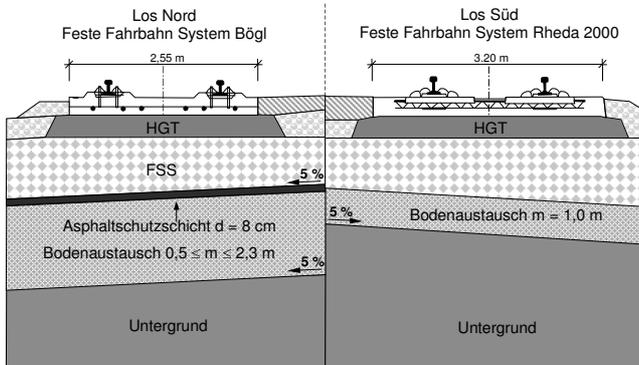


Bild 14: Fahrwegaufbau für die Quelleinschnitte im Baulos Nord und Baulos Süd

## 7.2 Bodenaustausch im Baulos Süd

Im Bereich der quellgefährdeten tertiären Tone wurde eine einheitlicher Bodenaustausch von 1 m Dicke ohne Oberflächenschutz ausgeführt (siehe Bild 14 rechts). Diese Dicke war vor allem deswegen notwendig, um die dynamische Stabilität nachweisen zu können (3). Wegen des geringeren Quellvermögens der tertiären Tone hätte auch ein geringerer Bodenaustausch ausgereicht.

Losübergreifend wurde der Bodenaustausch mit Materialien vorgenommen, die dem Anforderungskatalog Feste Fahrbahn genügen.

## 8. Schlussbemerkungen

Während der Herstellung der Einschnitte wurden die Hebungen kontinuierlich durch Extensometer- und Gleitdeformermessungen 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.

Durch die umfangreichen Untersuchungen zum Quellverhalten und die konsequenten 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 und im Baulos Süd 1 m. Im Vergleich zu dem ursprünglich vorgesehenen Bodenaustausch ergeben sich dadurch Einsparungen von über 50 %.

## Quellennachweis

1. Fritzsche, S.: *Untersuchung und bautechnische Beherrschung des Quellverhaltens von Tonsteinen am Beispiel der Einschnitte der NBS Nürnberg – Ingolstadt*. Diplomarbeit, Institut für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, 2002
2. Grob, H.: *Schwelldruck im Belchentunnel*. Proc. Int. Symp. für Untertagebau, Luzern, S. 99-119, 1972
3. Hu, Y, Gartung, E, Prühs, H, Müllner, B.: *Bewertung der dynamischen Stabilität von Erdbauwerken unter Eisenbahnverkehr*. Geotechnik, 26(1), S 42-56, 2003
4. Huder, J.; Amberg, G.: *Quellung in Mergel, Opalinuston und Anhydrit*. Schweizerische Bauzeitung, 83, S. 975-980, 1975
5. Kiehl, J. R.: *Ein dreidimensionales Quellgesetz und seine Anwendung auf den Felshohlraumbau*. Sonderheft Geotechnik, Vorträge zum 9. Internationalen Felsmechanik Symposium, 1990
6. Paul, A.: *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, 1986.
7. Pimentel, E.: *Quellverhalten von diagenetisch verfestigten Tonstein*. Veröffentlichung des Inst. Boden- und Felsmechanik Universität Karlsruhe, Heft 139, 1996
8. von Wolffersdorff, P.-A.; Hempel, M.; Raitchel, M.: *Bau einer Hochgeschwindigkeitsstrecke auf quellfähigen Untergrund*. Proc. 12. Donau-Europäische Konferenz, Passau, VGE Verlag Glückauf, S. 407-410, 2002
9. von Wolffersdorff, P.-A.; Fritzsche, S.: *Laboratory swell tests on overconsolidated clay and diagenetic solidified clay rocks*. Proc. Geotechnical Measurements and Modelling, Karlsruhe, A.A. Balkema Pub., S. 407-412, 2003
10. Wittke-Gattermann, P.: *Verfahren zur Bemessung von Tunnels in quellfähigen Gebirge und Kalibrierung an einem Versuchsbauwerk*. WBI-Print 1 Verlag Glückauf, Essen, 1998
11. Wittke, M.: *Begrenzung der Quelldrücke durch Selbstabdichtung beim Tunnelbau im anhydritführenden Gebirge*. WBI-Print 13 Verlag Glückauf, Essen, 2003