

## **Gebrauchstauglichkeitsnachweis für die Gründung einer Festen Fahrbahn im Einschnitt in quellfähigem Baugrund**

*Dr.-Ing. E. Gartung ehemals LGA-Grundbauinstitut  
Priv.-Doz. Dr.-Ing. P.-A. von Wolffersdorff, BAUGRUND DRESDEN Ingenieures. mbH  
Dipl.-Ing. C. Schmidt, KREBS und KIEFER Beratende Ingenieure für das Bauwesen GmbH*

### **1 Gebrauchstauglichkeit**

Auf der Verbindung Berlin – München des europäischen Eisenbahn-Hochgeschwindigkeits-Netzes wird der 89 km lange Streckenabschnitt Nürnberg – Ingolstadt als Neubaustrecke (NBS) für die Entwurfsgeschwindigkeit  $v_e = 300$  km/h mit dem Oberbausystem „Feste Fahrbahn“ ausgeführt. Unter den Aspekten Sicherheit und Fahrkomfort werden an die Gleislage besonders hohe Anforderungen gestellt. Da die Schienenbefestigung auf der Festen Fahrbahn nur Korrekturen von maximal 20 mm in vertikaler Richtung zulässt, dürfen die nach dem Einbau der Festen Fahrbahn auftretenden Verformungen des Unterbaus und des Untergrunds nur sehr geringe Werte erreichen. Unter Berücksichtigung von 5 mm für Setzungen, welche im Laufe der Zeit infolge der dynamischen Einwirkungen durch den Eisenbahnbetrieb zu erwarten sind, wird in der Regel davon ausgegangen, dass maximal 15 mm Setzungen durch die Schienenbefestigung ausgeglichen werden können und dementsprechend nach dem Einbau der Festen Fahrbahn als zeitabhängige Gesamt-Restsetzung  $s_R$  aus den Eigen- und Untergrundverformungen eines Erdbauwerks, z. B. eines Dammes, zulässig sind.

Um diese Forderung für die Gebrauchstauglichkeit des Fahrwegs zu erfüllen, gelten im Regelfall für die in der Unteren Tragschicht zugelassenen Bodenarten sowie für den Einbau und die Verdichtung des Bodens im Unterbau strenge Qualitätskriterien [1, 2]. Die zu erwartenden Setzungen müssen im Zuge des geotechnischen Entwurfs nach DIN 4019 (Baugrund, Setzungsberechnungen) berechnet und mindestens während der Dauer der Bauausführung nach DIN 4107 (Baugrund, Setzungsbeobachtungen an entstehenden und fertigen Bauwerken) beobachtet werden. Die gemessenen Setzungen sind unter Berücksichtigung ihres zeitlichen Verlaufs auszuwerten; ggf. sind erforderliche technische

Maßnahmen zur Beeinflussung der Setzungen, z. B. zur Beschleunigung, zur Vergleichmäßigung oder zur Reduzierung durchzuführen. Setzungsberechnungen und Setzungsbeobachtungen der Erdbauwerke für Hochgeschwindigkeits-Eisenbahnen mit dem Oberbausystem Feste Fahrbahn sind – ebenso wie Standsicherheitsnachweise – Gegenstand der bautechnischen Prüfung.

Die für Setzungen, d. h. für die durch Belastung des Untergrunds bewirkten vertikalen, nach unten gerichteten Bewegungskomponenten des Fahrwegs skizzierten Gedanken gelten sinngemäß auch für nach oben gerichtete Vertikalverschiebungen, Hebungen, die z. B. in Einschnitten nach der mit dem Aushub verbundenen Entlastung des Untergrunds auftreten. Allerdings ist die nach dem Einbau der Festen Fahrbahn zulässige Hebung des Fahrwegs geringer als die zulässige Setzung. Sie beträgt im vorliegenden Fall wegen der Einstellung der Schienenbefestigung nur 10 mm.

Zahlreiche Einschnitte der NBS Nürnberg – Ingolstadt liegen in Tonstein und Ton. Nach dem Bodenaushub und der damit verbundenen Entlastung des Untergrunds können hier mehr oder weniger ausgeprägte Quellhebungen der Sohle auftreten. Für die Gebrauchstauglichkeit der Fahrweggründungen dieser Einschnitte war daher im Zuge der Ausführungsplanung der Nachweis zu führen, dass die nach dem Einbau der Festen Fahrbahn zu erwartenden Rest-Quellhebungen des Fahrwegs den zulässigen Betrag von 10 mm nicht überschreiten.

Für die Berechnung von Quellhebungen existieren keine dokumentierten, allgemein anerkannten technischen Regeln, etwa vergleichbar mit DIN 4019 für Setzungen. Die Quellhebungsprognosen mussten daher im vorliegenden Fall mit wissenschaftlichen Methoden erarbeitet werden. Bei der bautechnischen Prüfung war abzuwägen, ob dem Nachweis der Quellhebungen eine mit den üblichen Setzungsprognosen nach DIN 4019 vergleichbare Zuverlässigkeit attestiert werden konnte. Für Erdbauwerke, bei denen die zulässigen Restsetzungen überschritten werden, bei denen nicht eindeutig erfassbare Setzungsrisiken vorhanden sind, oder bei denen ungleichmäßige Hebungen auftreten können, ist der Einbau von Festen Fahrbahnen nicht zugelassen [2]. Die Beobachtung der Vertikalverformungen der Aushubsohle erfolgt für die Quellhebungen in den Einschnitten während und nach der Bauausführung nach den Regeln für Setzungsbeobachtungen entsprechend DIN 4107.

## 2 Quellen

Unter dem Begriff „Quellen“ versteht man in der Geotechnik eine zeitabhängige Volumenzunahme, die eintritt, wenn ein Boden oder Fels bei oder nach Entlastung Wasser aufnimmt [3]. Ein kohäsionsloser Boden quillt nicht. In einem kohäsionslosen Boden treten beim Aushubvorgang an der Sohle eines Einschnitts nur elastische Vertikalverformungen auf, die rasch abklingen. Hingegen können bei Baugruben oder in Einschnitten im Tonstein/Ton zusätzlich zu den elastischen Entspannungs-Verformungen mehr oder weniger lang andauernde, durch Quellen bedingte Sohlhebungen auftreten.

Als Ursache kommen für das Quellen unterschiedliche Kraftwirkungen in Frage. Bekannt ist die Umwandlung von Anhydrit zu Gips, bei welcher Wasser aufgenommen und im Kristallgitter gebunden wird. Dabei tritt eine erhebliche Volumenvergrößerung ein. Die treibende Kraft ist hier auf ein chemisches Potenzial zurückzuführen. Da beim Anhydrit-Quellen sehr große und sehr ungleichmäßigen Verformungen auftreten können, die sich kaum zuverlässig prognostizieren lassen, sollen nach dem „Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahnen“ [2] in Einschnitten mit Anhydrit im Untergrund keine Festen Fahrbahnen eingebaut werden. Bei der NBS Nürnberg – Ingolstadt kommen Anhydrit oder andere Mineralien, die bei chemischer Umwandlung quellen, in relevanten Tiefen nicht vor. Deshalb sind im vorliegenden Fall nur Quellvorgänge zu betrachten, die durch das Matrixpotenzial, (die Saugspannungen des Porenwassers) und/oder durch ein osmotisches Potenzial bewirkt werden.

Das Quellvermögen von Tonstein/Ton ist von dessen Porenzahl, d. h. vom Verdichtungszustand abhängig. Nach Bjerrum, zitiert von Alonso [4], ist im Tonstein aus der früheren Verdichtung eine „Verformungsenergie“ gespeichert („locked in strain energy“), die je nach diagenetischer Verfestigung, z. B. Zementierung, mehr oder weniger fest „eingeschlossen“ ist. Wenn die diagenetische Verfestigung gelöst wird, z. B. durch Auflösen des Bindemittels, durch Rissbildung bei Austrocknung oder durch mechanische Einwirkungen (Belastung oder Entlastung), allgemein auch durch Einflüsse der Verwitterung, dann wird das Quellvermögen aktiviert. Gründer [5] und Razizadeh [6] haben bei ihren Untersuchungen an den Tonsteinen Feuerletten (Keuper) und Opalinuston (Jura), die im Los Nord der NBS Nürnberg – Ingolstadt vorkommen, beobachtet, dass sie im unverwitterten Zustand praktisch nicht quellen. Um das Quellvermögen zu ermitteln, haben die beiden Autoren die Tonsteine getrocknet, auf diese Weise die diagenetische Verfestigung zerstört und gleichzeitig sehr hohe Saugspannungen erzeugt. Als Ergebnis haben sie im

Quelldruckversuch hohe Quelldrücke und im Quellhebungsversuch bei Wasserzugabe ohne Auflast relativ große Volumenzunahmen ermittelt. Für die Erdbaupraxis haben die genannten Autoren empfohlen, bei und nach dem Aushub eine Austrocknung der Tonsteine/Tone möglichst zu vermeiden, um den Quellvorgang nicht in Gang zu setzen.

Das in der Natur aktivierbare Quellvermögen der Tonsteine/Tone des Lösses Nord der NBS Nürnberg – Ingolstadt ist also von der noch vorhandenen, diagenetisch bedingten Festigkeit, bzw. vom Grad der Entfestigung durch Verwitterung abhängig. Daraus folgt, dass für die Prognose der Quellhebungen die Feststellung des Verwitterungsgrads der Tonsteine/Tone im Zuge der geologischen Erkundung und Baugrundbeschreibung von erheblicher Bedeutung ist. Hier wurde der Tonstein/Ton von w1 für den unverwitterten Zustand bis w5 für den vollkommen verwitterten Zustand untergliedert. Von praktischer Bedeutung waren für die Quellprognosen die Verwitterungsstufen w2 bis w4. Tonsteine der Stufe w1 kamen in relevanter Tiefe in den untersuchten Einschnitten nicht vor, Tone der Stufe w5 wurden ausgetauscht.

### 3 Modell zur Beschreibung der Quellhebungen

Die Größe der beim Quellen erreichten Volumenänderung eines Bodenelements ist von dessen Spannungszustand abhängig. Je größer die vertikale Spannung bzw. die Auflast, umso geringer ist die Quellhebung. Diejenige Spannung oberhalb der kein Quellen mehr stattfindet, wird als „Quelldruck“  $\sigma_{z0}$  bezeichnet. Analog der für die einachsige Kompression bekannten halblogarithmischen Darstellung lässt sich die Beziehung zwischen der Quelldehnung  $\varepsilon_z$  und der Spannung  $\sigma_z$  an der Stelle  $z$  mit der Gleichung (1), (Bild 1) darstellen [7].

$$\varepsilon_z = -C_b \cdot \ln (\sigma_z / \sigma_{z0}) \quad (1)$$

Gleichung (1) gilt nur im Druckspannungsbereich  $\sigma_{z0} > \sigma_z > \sigma_c$  für Spannungen  $\sigma_z$ , die geringer sind als der Quelldruck  $\sigma_{z0}$  und größer als die Auflastspannung  $\sigma_c$  z. B. aus einer nicht quellenden Überlagerung der quellfähigen Schicht. Die beiden Parameter Quellhebungsbeiwert  $C_b$  (Neigung der Geraden im halblogarithmischen Maßstab) und Quelldruck  $\sigma_{z0}$  sind im Laborversuch zu ermitteln. Die Mindestspannung  $\sigma_c$  ergibt sich im vorliegenden Fall aus dem Gewicht des Oberbaus zuzüglich – soweit zutreffend – einer im Zuge des Bodenaustauschs einzubringenden, nicht quellenden Bodenschicht.

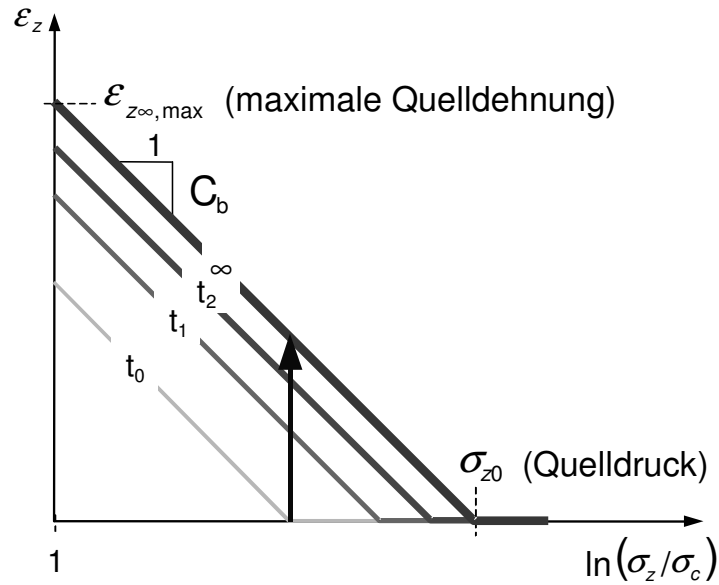


Bild 1: Quelldehnung  $\epsilon_z$  in Abhängigkeit der totalen Spannung  $\sigma_z$

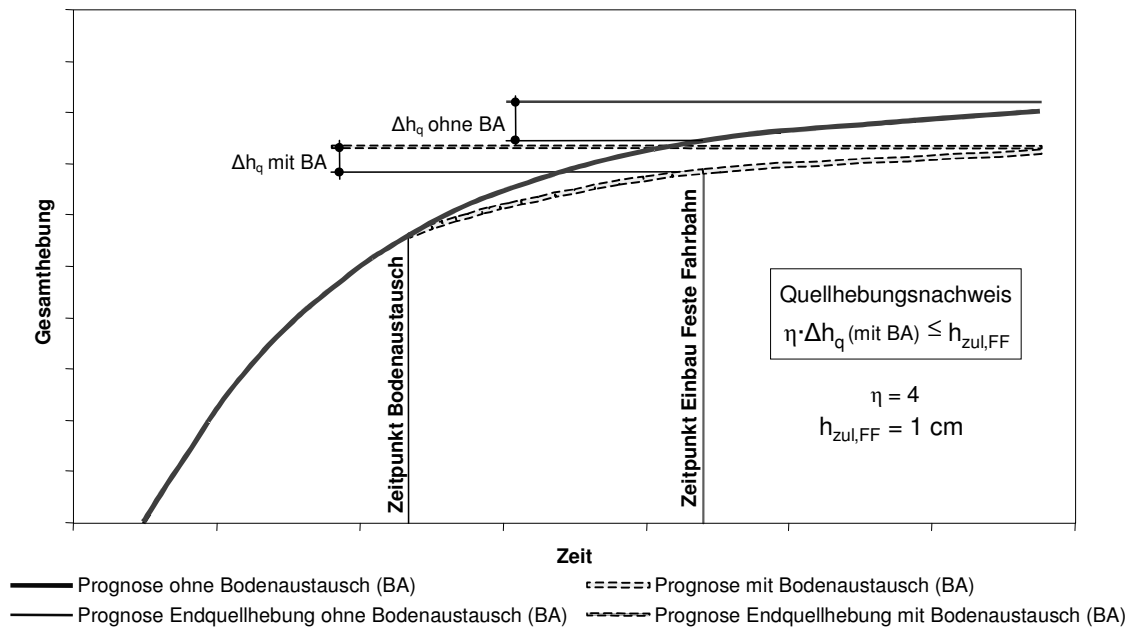


Bild 2: Zeitliche Entwicklung der Quellhebung

Gleichung (1) beschreibt die insgesamt mögliche Quelldehnung unter der Voraussetzung, dass genügend Wasser angesaugt werden kann, um das gesamte vorhandene, das Quellen bewirkende Potenzial auszugleichen. Sie erfasst nicht den zeitlichen Verlauf des Quellvorgangs, sondern nur den möglichen Endzustand. Unter der Annahme, dass genügend Wasser verfügbar ist, dass der Quellvorgang unmittelbar nach erfolgtem Aushub beginnt, der Zustand der totalen Spannungen konstant bleibt und dass der Quellvorgang

stetig verläuft, lässt sich die Quelldehnung zum Zeitpunkt  $t$  nach der von Kiehl [8] eingeführten Erweiterung der Gleichung (1) durch Gleichung (2) beschreiben.

$$\varepsilon_z(t') = -C_b \cdot \ln(\sigma_z / \sigma_{z0}) \cdot [1 - \exp(-t' / \eta_q)] \quad (2)$$

Darin ist  $\eta_q$  ein Referenzzeitmaß, das aus dem Zeitverlauf von Quellhebungsversuchen ermittelt wird. Die spezifische Zeit  $t'$  definiert einen von der Dicke der quellenden Schicht unabhängigen Zeitmaßstab. Der Einfluss der Schichtdicke  $D_{\text{Schicht}}$  der quellenden Schicht wird – ähnlich wie bei der Konsolidation unter Belastung – unter Bezug auf die Dicke der Probe im Quellversuch  $D_{\text{Probe}}$  durch den Ansatz nach Gleichung (3) erfasst [9].

$$t' = t \cdot (D_{\text{Probe}} / D_{\text{Schicht}})^n \quad (3)$$

Der Exponent  $n$  – im Falle der Konsolidation der Wert 2 – wird mit Hilfe von Extensometer-Messungen der Quellhebungen in-situ bestimmt.

Mit dem skizzierten eindimensionalen Modell, das – wie alle bodenmechanischen Modelle – eine Reihe von Vereinfachungen enthält, können in Analogie zu den bei Belastung üblichen – ebenfalls eindimensionalen – Setzungsberechnungen die an der Sohle von Einschnitten möglichen Quellhebungen berechnet werden. Erforderlich sind dazu eine gründliche geologische Erkundung zur Ermittlung der Bauabschnitte mit quellfähigen Tonsteinen/Tonen und deren Verwitterungszustand, die experimentelle Bestimmung des Quelldrucks  $\sigma_{z0}$  sowie des Quellhebungsbeiwerts  $C_b$  in Laborversuchen an ungestörten Proben und die Abschätzung der durch den Aushub bedingten Spannungsänderungen im Untergrund. Für die Prognose der nach dem Einbau der Festen Fahrbahn noch zu erwartenden Rest-Quellhebungen ist darüber hinaus die Kenntnis des zeitlichen Verlaufs des Quellvorgangs im Laborversuch und eine Kalibrierung an Hand von in-situ Extensometer-Messungen erforderlich.

## 4 Laborversuche

Das Quellvermögen eines Tonbodens hängt ab von seinem Tongehalt (Tonfraktion), von der Plastizitätszahl und der Schrumpfgrenze als kennzeichnende Größen für die Art der vorhandenen Tonminerale, vom Ausgangswassergehalt, bzw. von der Anfangsporenzahl, vom Matrixpotenzial und von der Spannungsgeschichte. Auch der Elektrolytgehalt des

Porenwassers beeinflusst den Quellvorgang. Für Homogenbereiche des quellfähigen Baugrunds, in welchen diese Merkmale hinreichend genau übereinstimmen, wurden an repräsentativen Bodenproben der Güteklasse 1 nach DIN 4021 die für die Quellhebungsprognose benötigten Parameter  $C_b$  und  $\sigma_{z0}$  experimentell bestimmt. In Bild 3 sind exemplarisch für den Amaltheenton die Quelldehnungs-Spannungs-Diagramme für vier unterschiedliche Verwitterungsstufen dargestellt. Die vier Geraden haben unterschiedliche Schnittpunkte mit der Abszisse und unterschiedliche Neigungen. Sie zeigen, dass der Quelldruck  $\sigma_{z0}$  mit zunehmendem Verwitterungsgrad abnimmt, während der Quellhebungsbeiwert  $C_b$  mit zunehmendem Verwitterungsgrad größer wird.

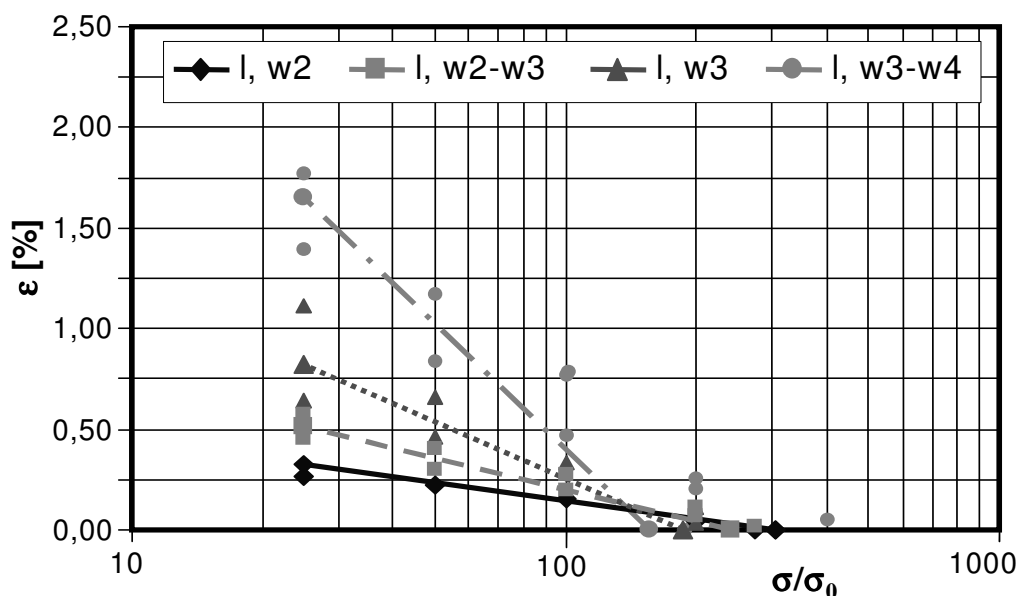


Bild 3: Quelldehnungs-Spannungsdiagramme für Amaltheenton in Abhängigkeit des Verwitterungsgrads

Für die Aufgabenstellung im Los Nord der NBS Nürnberg – Ingolstadt wurden in vier bodenmechanischen Labors insgesamt 90 Quellversuche auf drei unterschiedliche Arten durchgeführt: Einfache Quellhebungsversuche, Quellversuche nach Huder und Amberg und kombinierte Quelldruck- Quellhebungsversuche [11]. Beim einfachen Quellhebungsversuch entsprechend der Empfehlung Nr. 11 der DGGT [10] wird die Probe im Kompressionsgerät mit der Auflastspannung, die der Entnahmetiefe entspricht, belastet, dann wird die Wasserzuleitung geöffnet und die Probe wird stufenweise entlastet. Bei jeder Entlastungsstufe nimmt die Probe Wasser auf. Wenn der Quellvorgang einer Entlastungsstufe abgeschlossen ist, wird die Volumenzunahme als Veränderung der Probenhöhe gemessen, als Quelldehnung  $\epsilon_z$  registriert, es folgt die nächste Stufe und so fort. Auf diese Weise werden Wertepaare der totalen Spannung  $\sigma_z$  und der zugehörigen

Quelldehnung  $\varepsilon_z$  gewonnen (siehe Bild 4 a). Sie werden im halblogarithmischen Maßstab aufgetragen. Aus dem Diagramm können die Parameter  $C_b$  und  $\sigma_{z0}$  ermittelt werden. Die zweite Art der Versuchsdurchführung folgt dem Belastungsschema nach Huder und Amberg [11]. Dabei wird die Probe belastet wie zuvor, dann wird sie jedoch einmal schnell entlastet, wieder belastet, und erst dann erfolgt die stufenweise Entlastung unter Wasserzugabe mit Messung der Quelldehnung. Bild 4 b zeigt die Darstellung eines solchen Versuchsverlaufs. Infolge des zusätzlichen Be- und Entlastungszyklus tritt bei dem Verfahren nach Huder und Amberg in der Probe eine stärkere Zerstörung der diagenetischen Bindung auf als im einfachen Quellhebungsversuch. Dabei wird ein höherer Anteil des Quellvermögens aktiviert, und es werden größere Werte für den Quellhebungsbeiwert  $C_b$  gemessen als im einfachen Quellversuch. Die Störung der diagenetischen Bindung und der empfindlichen Struktur der Probe ist am geringsten bei der dritten Art der Versuchsdurchführung, dem kombinierten Quelldruck-Quellhebungsversuch. Dabei kann die Probe zunächst ohne Volumenänderung bis zum Erreichen des Quelldrucks Wasser aufnehmen, dann wird sie unter Messung der Dehnungen stufenweise entlastet (siehe Bild 4c). Die inzwischen von der Baustelle vorliegenden Extensometermessungen zeigen, dass im vorliegenden Fall die Prognoseberechnungen mit den in kombinierten Quelldruck- Quellhebungsversuchen bestimmten Parametern den gemessenen Quellhebungen am nächsten kommen [9].

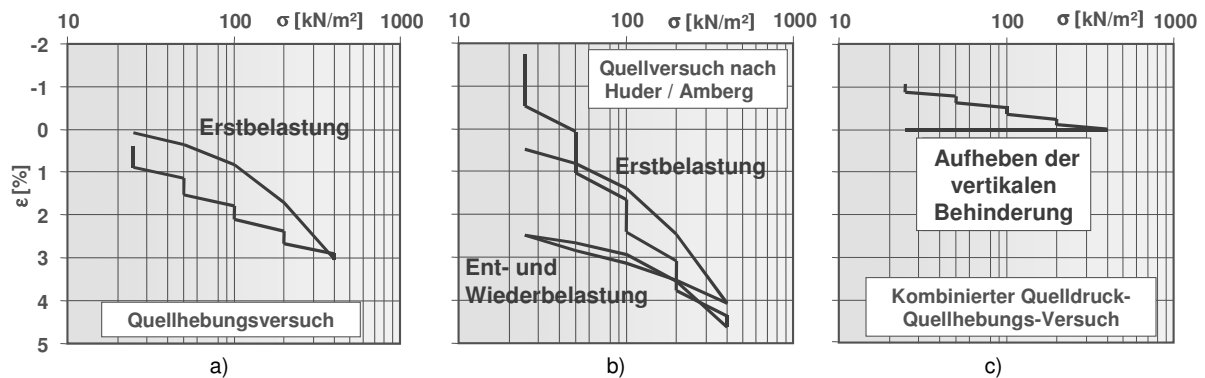


Bild 4: Lastregime (Spannungs-Dehnungs-Verlauf) der 3 verschiedenen Quellversuchsarten

## 5 Maßnahmen zur Beschränkung der Quellhebungen

Im Los Nord der NBS Nürnberg – Ingolstadt wurden für 11 Einschnitte in den quellfähigen Tonsteinen/Tonen der Formationen Keuper und Jura mit den in Laborversuchen bestimmten Quellhebungsparametern in insgesamt 34 Berechnungsquerschnitten die zu erwartenden maximalen Quellhebungen berechnet. In Abhängigkeit von der Einschnittstiefe, der



geologischen Formation und dem Verwitterungsgrad lagen die errechneten Endwerte der Quellhebungen zwischen 0 und 46 mm. Dabei zeigte sich, dass der größte Anteil der Quellhebungen in der Nähe der Aushubsohle bis in ca. 3 m Tiefe auftritt. Bild 5 zeigt hierfür ein Beispiel. Es folgt daraus, dass als wirksame technische Maßnahme für die Beschränkung der Quellhebungen auf das zulässige Maß ein teilweiser Bodenaustausch in Frage kommt. Wenn die obere Lage des quellfähigen Bodens durch einen nicht quellfähigen Boden ersetzt wird, wirkt die nicht quellende Schicht als „Auflast“. Die minimale Spannung  $\sigma_c$  wird dadurch erhöht, der Betrag der für den Quellvorgang wirksamen Spannungsänderung vermindert. Außerdem wird die quellwirksame Zone in den tiefer liegenden, weniger stark verwitterten Tonstein verlagert, was zu einem geringeren Betrag des Quellhebungsbeiwerts  $C_b$  und damit ebenfalls zu geringeren rechnerischen Quelldehnungen führt.

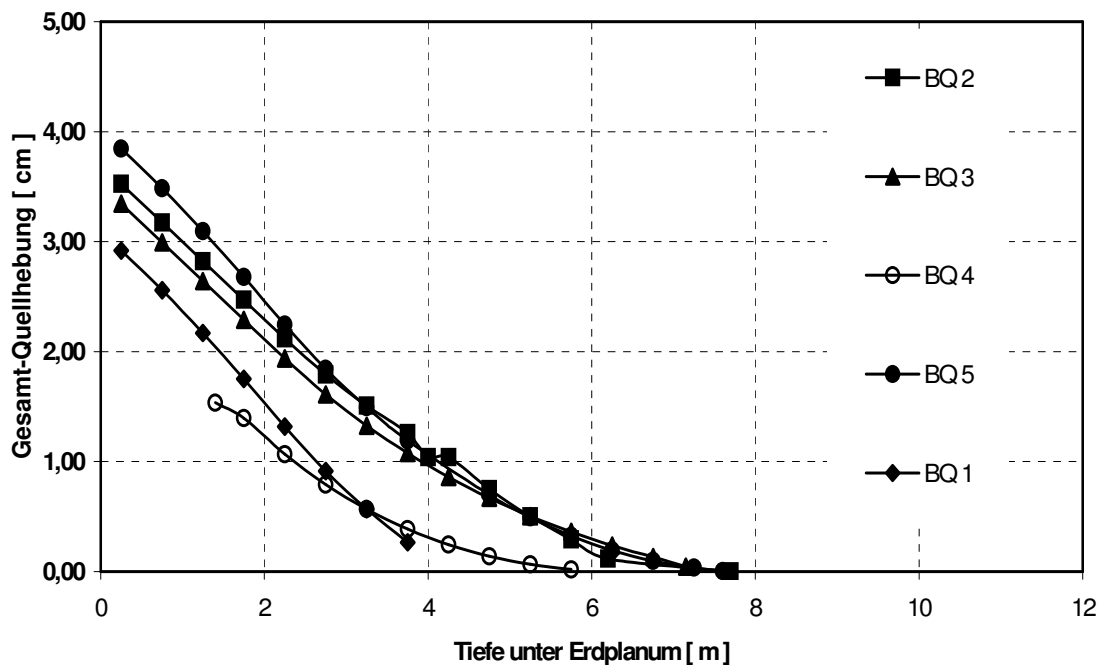


Bild 5: Quellhebungen in Abhängigkeit der Tiefe für Berechnungsquerschnitte mit unterschiedlichen Aushubtiefen

Mit der Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Quellhebungen wurden die Querschnitte ermittelt, in welchen ohne technische Maßnahmen eine Überschreitung der zulässigen Restquellhebungen von 10 mm nicht auszuschließen war. Für diese Querschnitte wurde ein teilweiser Bodenaustausch vorgesehen. Die Schichtdicke des Bodenaustauschs wurde mittels der Quellhebungsberechnungen dimensioniert. Es ergab sich je nach den Verhältnissen des Einzelfalls eine erforderliche Tiefe des Bodenaustauschs von 0 bis 1.3 m.

Den in dem Prognosemodell für die Rest-Quellhebungen enthaltenen Unsicherheiten wurde dadurch begegnet, dass für die Größe und die Verteilung der Spannungsänderungen unterhalb der Aushubsohle auf der sicheren Seite liegende Annahmen getroffen wurden. Außerdem wurde der Betrag für die zulässigen Rest-Quellhebungen rechnerisch nur teilweise (bis ca. 30 %) ausgenutzt, es waren hier stets Reserven vorhanden. Schließlich wurden die beim Aushub auftretenden Vertikalverformungen an 13 Stellen mit Mehrfachextensometern beobachtet. Nach Vorliegen erster Messergebnisse wurden die Entwurfsberechnungen mit verbesserten Kennwerten wiederholt. Es wurde während der Bauausführung – im Sinn der Beobachtungsmethode – eine schrittweise Verbesserung der Berechnungen vorgenommen. Damit war eine ständige Kontrolle der Zuverlässigkeit des Gebrauchstauglichkeitsnachweises gegeben.

Die Tiefe des Bodenaustauschs wurde nach praktischen Gesichtspunkten abgestuft und kam mit 0,5 m; 0,7 m; 0,8 m und 1,3 m zur Ausführung. Mit der Festlegung der Mindestdicke der nicht quellenden Boden-Austauschschicht von 0,5 m sollte auch Quellhebungsunterschieden vorgebeugt werden. Im Hinblick auf mögliche Quellhebungsunterschiede, die für die Gebrauchstauglichkeit ausschlaggebend sein können, wurde in Analogie zu DIN 4019 und nach Erfahrungen von Fredlund [13] angenommen, dass in einem Querschnitt Unterschiede der zeitabhängigen Vertikalverschiebungen in der Größenordnung von 50 % der errechneten Quellhebungsbeträge auftreten können. In Längsrichtung der Trasse wurden die sich aus der Veränderlichkeit der geologischen Verhältnisse und der Einschnittstiefen ergebenden Unterschiede der Vertikalverschiebungen nachgewiesen. Um lokalen Wasserzutritt von oben zu vermeiden, wurde in EPL eine 8 cm dicke Asphaltbetonschicht angeordnet. Zur Abwehr eventueller seitlicher Zuflüsse aus temporär auftretenden lokalen Schichtwässern wurde eine Längsentwässerung eingebaut.

Die Messungen während der Bauausführung haben gezeigt, dass die rechnerischen Quellhebungs-Prognosen auf der sicheren Seite lagen. Nach positiv abgeschlossener ganzheitlicher Verformungsbetrachtung wurden die Einschnitte für den Einbau der Festen Fahrbahn freigegeben. Inzwischen ist die Feste Fahrbahn installiert, sie wird aber noch nicht von Zügen befahren. Die laufenden Präzisionsmessungen zeigen geringfügige, variable Vertikalverschiebungen der Oberfläche der Festen Fahrbahn, die auf physikalische Einflüsse wie Temperaturunterschiede und feine, atmosphärisch bedingte Veränderungen der Bodenfeuchte zurückgeführt werden können. Die eigentlichen Quellhebungen sind bereits abgeklungen.

## 6 Schlussbetrachtung

Der Gebrauchstauglichkeitsnachweis für die Gründung der Festen Fahrbahn in den Einschnitten mit quellfähigen Tonsteinen und Tonen im Los Nord der NBS Nürnberg – Ingolstadt basiert auf geotechnischen Arbeitsmethoden, die auch bei Setzungsprognosen angewendet werden. Die geologische Detailerkundung, Gewinnung repräsentativer Fels- bzw. Bodenproben und die Ermittlung der maßgebenden Kennwerte in Laborversuchen für die Quellhebungsprognose unterscheiden sich nicht wesentlich von denjenigen für Setzungsprognosen. Auch die Annahme der durch das Bauvorhaben im Untergrund auftretenden Spannungsänderungen und die Rechenmodelle, mit denen die damit verbundenen Verformungen ermittelt werden, sind miteinander vergleichbar. Ein Unterschied besteht bei den wirklich auftretenden Porenwasserbewegungen. Während beim Konsolidationsvorgang unter Belastung die Bewegung des vorhandenen Porenwassers gut vorausgesagt werden kann, ist es möglich, dass der Quellprozess überhaupt nicht oder verzögert auftritt, wenn das erforderliche Wasser nicht unmittelbar verfügbar ist. Während der Bauausführung und danach werden sowohl die auftretenden Setzungen als auch die auftretenden Quellhebungen gemessen und mit der Prognose verglichen. Zusammenfassend ist es im vorliegenden Fall unter Berücksichtigung der Sicherheitsreserven des Modells und der in-situ-Messungen berechtigt, dem Gebrauchstauglichkeitsnachweis für die Fahrbahngründung in Einschnitten in quellfähigen Tonsteinen und Tonen die gleiche Aussagekraft und Zuverlässigkeit zu attestieren wie den Setzungsberechnungen für Damfstrecken, bei denen zeitabhängige Setzungen auftreten.

Im Hinblick auf die Richtlinie 836 – „Erdbauwerke planen, bauen und instand halten“ [1] zeigt das Ergebnis der hier vorgestellten Untersuchungen zum Problem der Quellhebungen in Einschnitten in Tonstein/Ton, dass bezogen auf die im Los Nord der NBS Nürnberg – Ingolstadt vorliegenden geologischen und geometrischen Gegebenheiten die Anforderungen für den Regelquerschnitt nach Bild A 1.4 der Ril 836 auf der sicheren Seite liegen. Im Regelquerschnitt sind in der Unteren Tragschicht, die bis 3,0 m unter Schienenoberkante, also ca. 2,3 m unter EPL reicht, keine TA- oder TM-Böden, also keine quellfähigen, ausgeprägt plastischen oder mittelpastischen Tone vorgesehen. Hätte man in allen Einschnitten des hier behandelten Bauloses die Forderungen des Regelquerschnitts eingehalten und überall einen 2,3 m tiefen Bodenaustausch vorgenommen, dann wären die zulässigen Rest-Quellhebungen von 10 mm automatisch überall eingehalten worden. Durch die Quellhebungs-Untersuchungen wurde jedoch erreicht, dass bei Einhaltung der zulässigen Rest-Quellhebungen der Bodenaustausch nur mit 0,5 m bis 1,3 m ausgeführt

werden musste. Unter dem Vorbehalt, dass auch der Nachweis der Langzeit-Setzungen infolge dynamischer Einwirkungen aus dem Eisenbahnbetrieb keine größere Dicke des Bodenaustauschs verlangt [14], kann festgestellt werden, dass die Untersuchungen der Quellproblematik geholfen haben, Baukosten einzusparen. Darüber hinaus haben sie einen Beitrag zum besseren Verständnis des Quellproblems in der angewandten Bodenmechanik geleistet.

## Literatur

- [1] DB Netz AG: Richtlinie 836 – Erdbauwerke planen, bauen und instand halten. Fassung vom 20.12.1999
- [2] DB Netz AG: Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn. 3. Auflage 1995
- [3] Madsen F. (1993): Quellfähige Gesteine. Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der LGA, Heft 64. Tonmineralogie für die Geotechnische Praxis, Herausgeber E. Gartung. S. 67 - 80
- [4] Alonso E., E. & Alcoverro J. (2002): Swelling rocks. Bauhaus Universität Weimar, Schriftenreihe Geotechnik Heft 08. 4th Workshop on Unsaturated Soils, Herausgeber T. Schanz.
- [5] Gründer J. (1978): Struktureller Aufbau und geomechanische Eigenschaften des stark überkonsolidierten Tons - am Beispiel des Feuerletzens. Veröffentlichungen des Grundbauinstituts der LGA, Heft 31
- [6] Razizadeh F., B. (1980): Geomechanische Eigenschaften der Verwitterungszonen der diagenetisch verfestigten Tone des Dogger Alpha. Veröffentlichungen des Grundbauinstituts der LGA, Heft 41
- [7] Grob H. (1972): Schwelldruck im Belchentunnel. Proc. Int. Symp. Für Untertagebau, Luzern, S. 99 – 119.
- [8] Kiehl J., R. (1990): Ein dreidimensionales Quellgesetz und seine Anwendung auf den Felshohlraumbau. Sonderheft Geotechnik, Vorträge zum 9. Int. Felsmechanik Symp.
- [9] Wolffersdorff v. 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, S. 221 – 228.
- [10] Paul A. (1986): Quellversuche an Gesteinsproben. Empfehlung Nr. 11 des Arbeitskreises 19 – Versuchstechnik Fels – der Deutschen Gesellschaft für Erd- u. Grundbau e. V. Bautechnik 63 (3), S. 100 – 104.
- [11] Huder J. & Amberg G. (1975): Quellung in Mergel, Opalinuston und Anhydrit. Schweizerische Bauzeitung, 83, S. 975 – 980.

- [12] Wolffersdorff v. P.-A. & Fritzsche S. (2004): Laboratory swell tests on overconsolidated clay and diagenetic solidified clay rocks.
- [13] Fredlund D., G. & Rahardjo H. (1993): Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons Inc.
- [14] Hu Y. (2005): Dynamische Stabilität von Erdbauwerken unter Eisenbahnverkehr. LGA Erdbau für Verkehrswege 2005.