

Ettringittreiben in bindemittelbehandelten, sulfathaltigen Böden

Julia Knopp
Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Christian Moormann
Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Zusammenfassung

Im Erd- und Straßenbau ist es wiederholt zu Schadensfällen durch Quellhebungen gekommen, die auf eine Mineralreaktion im Boden zurückzuführen sind. Werden Böden mit natürlichem Sulfatgehalt zu bautechnischen Zwecken mit calciumbasierten Bindemitteln behandelt, so kann das Bindemittel unter bestimmten Randbedingungen mit den im Gips enthaltenen Sulfationen zum Mineral Ettringit reagieren. Infolge der mit dieser Mineralreaktion verbundenen Volumenvergrößerung kann es zu erheblichen Hebungsschäden kommen. Die für die Reaktion des Sulfattreibens im Boden maßgebenden Einflussfaktoren sind zwar grundsätzlich bekannt, quantitative Prüfmethode und standardisierte Strategien zur Gefahrenabwehr liegen derzeit allerdings noch nicht vor. Das Ziel der Forschungsarbeit, über die in diesem Beitrag berichtet wird, war die Entwicklung eines praxistauglichen Prüfverfahrens als Grundlage für eine hieraus abzuleitende Prüfvorschrift. Hierfür wurden an Proben aus verschiedenen Boden-Bindemittelgemischen und definierten Sulfatgehalten Quellhebungsversuche durchgeführt. Im Ergebnis wurde ein Zusammenhang zwischen dem Sulfatgehalt im Boden und den eingetretenen Quellhebungen festgestellt. Des Weiteren wurde ermittelt, dass eine Bodenbehandlung mit Weißfeinkalk mit größeren Volumendehnungen verbunden ist als eine Behandlung mit Zement.

1 Einführung

Bei Bodenbehandlungen mit calciumbasierten Bindemitteln ist es im Erd- und Straßenbau in den vergangenen Jahren wiederholt zu Schadensfällen durch Ettringittreiben gekommen. Durch die Bindemittelbehandlung wird im Boden der pH-Wert erhöht und dadurch werden Silikate und Aluminate aus der Tonfraktion freigesetzt. Die vorhandenen Sulfate im Porenwasser reagieren mit den freigesetzten Aluminaten und dem freien Calcium aus dem Bindemittel, so dass es zur Bildung von Mineralen aus der Gruppe der Ettringite kommt, die einen Kristallwasseranteil von etwa 4 M. % haben, sehr voluminös und leicht sind und somit zu schädigenden Quellhebungen führen können.

Ein Beispiel für einen Schadensfall infolge von Ettringittreiben ist der im Jahre 1995 hergestellte Autobahnzubringer K1077 der Bundesautobahn A81 bei Gärtringen, nahe Herrenberg. Im ersten von zwei Bauabschnitten traten bereits im Jahr nach der Fertigstellung Schäden auf. Es handelt sich um Hebungen des Baugrundes um bis zu 30 cm und Längsrisse in der Asphaltdecke mit einer Länge von bis zu 6 m bei einer Breite von ca. 2 cm (Bild 1) [1]. Ein aktuelleres Beispiel ist die Bundesautobahn A71 (Sömmerda-Ost). Nach dem Winter 2013/2014 traten an den im Herbst 2013

verbesserten Planien und Dammböschungen Schäden auf (Bild 2). Die Dämme waren im Sommer und Herbst 2013 fast vollständig aus dem Abtrag geschüttet worden, wobei die wiedereinzubauenden Böden aus dem Bereich des Mittleren und Unteren Gipskeupers stammen. In der Planung der Baumaßnahme waren umfangreiche Laborversuche durchgeführt worden, da bereits bei früheren Teilabschnitten Schäden aufgetreten waren [2], [3].



Bild 1: Bundesautobahn A81, Längsrisse in der Asphaltdecke [1]

Die Laborversuche ließen mit dem eingesetzten Bindemittel nur ein geringes Quellpotential vermuten. Die äußere Zone der Dammböschungen und das Planum wurden daraufhin im Herbst 2013 mit einem Hochofenzement mit hohem Sulfatwiderstand behandelt. Das Planum wurde mit einer Schutzlage aus Frostschutzmaterial überschüttet. Im Frühjahr 2014 wurde an fertiggestellten und überschütteten Planien eine Auflockerung mit einem Verlust der Festigkeit und der Tragfähigkeit festgestellt [4].

Für die Reaktion des Sulfatreibens im Boden sind zwar die Einflussfaktoren bekannt, allerdings steht der Bau-praxis kein standardisiertes Prüfverfahren mit eindeutig definierten Kenngrößen zur Verfügung.

Das Ziel des Forschungsprojektes „Kenngrößen zur Risikoabschätzung des Ettringitreibens“, gefördert durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), war die Entwicklung eines praxistauglichen Prüfverfahrens als Grundlage für eine hieraus abzuleitende Prüfvorschrift. Dafür waren Kenngrößen und Richtwerte zur Beurteilung des Risikos von Treiberscheinungen durch Ettringitbildung bei der Bindemittelbehandlung von sulfathaltigen Böden festzulegen. Im Ergebnis wurde ein Zusammenhang zwischen dem Sulfatgehalt im Boden und den eingetretenen Quellhebungen festgestellt. Des Weiteren wurde ermittelt, dass eine Bodenbehandlung mit Weißfeinkalk mit größeren Volumendehnungen verbunden ist, als eine Behandlung mit Zement.



Bild 2: Aufgequollenes Planum durch Treibmineralien BAB A71 [4]

2 Einflüsse auf die Ettringitbildung

Aus der Literatur sind unterschiedliche, für eine Ettringitneubildung maßgebende Einflussfaktoren bekannt:

- Mineralbestand:

Der Anteil, die Art und die Verteilung der im Boden vorhandenen Tonminerale sind wesentliche Einflussfaktoren auf das Ettringitreiben. Bindemittel führen im Boden zu einer Erhöhung des pH-Werts. Silikate und Aluminate werden in Folge aus der Tonfraktion freigesetzt und stehen zur Ettringitbildung zur Verfügung. Der kritische Sulfatgehalt des Bodens nimmt daher mit zunehmendem Tonanteil ab. Bei geringen Tonanteilen

(< 10%) sind somit relativ hohe Sulfatgehalte (> 10.000 ppm) zur Erzeugung von Quellhebungen erforderlich [5].

- Sulfatgehalt:

In der deutschsprachigen Literatur (u.a. [5]) werden Sulfatgehalte ab 3.000 ppm als potentiell schadigungsrelevant eingestuft. Eine hohe Gefährdung wird erst ab einem Sulfatgehalt von größer 8.000 ppm angenommen. Diese Grenzwerte werden auch in der Technischen Vorschrift des Texas Department of Transportation [6] angegeben.

- Wasserangebot:

Voraussetzung für die Treibreaktion ist, dass vorhandene Sulfate in Lösung gehen. Hierfür und für den weiteren Transport des Sulfats muss ausreichend Wasser verfügbar sein [5].

- Chemisches Milieu / Alkalität:

Sulfatreiben findet nur in einem alkalischem Milieu statt. Die Bindemittelzugabe hat im Boden eine starke Erhöhung der Alkalität zur Folge. Bei einem pH-Wert > 10,5 werden Aluminat- und Silikationen aus den Tonmineralen des Bodens freigesetzt und stehen für die Treibreaktion zur Verfügung [5].

- Temperatur:

Die Bodentemperatur hat starken Einfluss auf den Reaktionsmechanismus. Ettringit bildet sich insbesondere bei Temperaturen zwischen 15°C und 20°C. Bei Temperaturen unter 10°C kristallisiert Thaumazit [5].

- Porenstruktur des Bodens:

Ein zusammenhängendes Porensystem begünstigt den konvektiven Transport sulfathaltiger Lösungen durch das Bodengerüst. Da die schädigende Volumenzunahme infolge Ettringitaufwuchs aber in den Bodenporen stattfindet, kann eine gute Verdichtung des Bodens und damit eine Reduzierung der Porengröße die Quellgefährdung erhöhen [5].

- Bindemittel:

Besonders kritisch erscheint nach KELLER et al. [1] die Bodenbehandlung mit Weißfeinkalk von verwitterten, gipshaltigen Böden. Wird stattdessen Zement als Bindemittel verwendet, verringert sich das Schadensrisiko. Die Phasenneubildung erfolgt bei einer Behandlung mit Zement zwar schneller, da im Gegensatz zu einer Behandlung mit Kalk die notwendigen Aluminate aus den reaktiven Calciumaluminaten aus dem Zement sofort zur Verfügung stehen, allerdings entwickeln sich deutlich geringere Ettringitgehalte als bei Weißfeinkalk.

- Überlagerungsdruck:

Bei einer behinderten Volumendehnung entstehen beim Ettringitreiben sehr hohe Quelldrücke (bis ca. 5 MPa). Im Straßenbau können daher die Quellhebungen nicht überdrückt werden [1].

3 Quellhebungsversuche

Zur Beantwortung der offenen Fragestellungen wurde das Quellverhalten in Abhängigkeit vom Sulfatgehalt mit Pulverquellversuchen nach THURO [7] in Oedometerversuchsständen systematisch untersucht.

3.1 Probenmaterialien

Insgesamt wurden für die Versuchsreihe vier verschiedene Materialien verwendet. Ausgewählt wurden zwei natürlich sulfathaltige und zwei sulfatfreie Böden.

Als Versuchsböden wurden geeignete Böden und Halbfestgesteine ausgewählt, die in Süddeutschland häufig bei Straßenbaumaßnahmen angetroffen bzw. eingesetzt werden.

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse von zwei unterschiedlichen Böden, eines natürlich sulfathaltigen und eines sulfatfreien Bodens eingegangen.

Probenmaterial „GBET“ ist ein gipshaltiger, gemischtkörniger Verwitterungsboden der Bodengruppe SU (nach DIN 18196) aus einem Steinbruch bei Epfendorf-Trichtingen. Das Material hat einen natürlichen Sulfatgehalt, da ca. 8% Gips nachgewiesen wurden. Zudem enthält das Material vor allem Dolomit (54%) und Illit (25%). Daneben wurden Anteile quellfähiger Tonminerale (2%), Kaolinit (2%), Quarz (4%), Calcite (2%) festgestellt.

Das Probenmaterial „WTF3“ ist ein Gestein aus dem Wagenburgtunnel in Stuttgart. Es wurde in einem geologischen Fenster oberhalb des Gipshorizontes gewonnen und ist ausgelaugt, enthält also weder Gips- noch Anhydrit. Das Material besteht zum Großteil aus Illit (44%), quellfähigen Tonmineralen (23%) und Dolomit (18%). Außerdem wurde Calcit (6%), Quarz (6%) und Kaolinit (1%) festgestellt.

Beide Materialien wurden schonend bei 60°C im Ofen getrocknet und anschließend zu einem Pulver aufbereitet.

3.2 Probenherstellung und Versuchseinrichtung

Die Prüfeinrichtung entspricht einem vereinfachten Oedometergerät (Bild 3). Das Versuchsmaterial wurde homogen mit Bindemittel und bei den Versuchsböden ohne geogenen Sulfatgehalt zusätzlich mit Calciumsulfat-Dihydrat vermengt. Um es homogen vermischen und in den Odometerring einbauen zu können, wurden alle vier Materialien zu einem Pulver mit einer Korngröße $\leq 0,5$ mm aufbereitet. Anschließend wurde die Mischung mittels einer hydraulischen Presse in einen Odometerring gepresst. Die Probe wurde dann in den Versuchsstand eingebaut und durch Zugabe von demineralisiertem Wasser wurde die Probe gesättigt und der Quellprozess eingeleitet. Da die Temperatur einen starken Einfluss auf den Reaktionsmechanismus hat, wurde während der Versuche die Temperatur im Labor konstant auf 18°C gehalten. Verdunstetes Wasser wurde ausgeglichen.

3.3 Versuchsverlauf und Auswertung

Zu Beginn der Versuche kam es wegen der Pulveraufbereitung bei allen Proben infolge von Hydratationseffekten zu initialen Volumendehnungen. Aufgrund der hohen spezifischen Oberfläche des Pulvers kann zunächst eine Wasseranlagerung an Ionen bzw. Körnern erfolgen, sobald die Proben mit demineralisiertem Wasser in Kontakt kommen. Die Folge ist eine starke Quellhebung. Dies kann dazu führen, dass auch nicht quellfähiges Material ein scheinbares Quellen aufweist. Mit kleiner werdender Korngröße nehmen diese Hydratationseffekte zu und überlagern anfangs die Quellvorgänge infolge von Mineralreaktionen. Auch in der Literatur zu Pulverquellversuchen finden sich hierzu Hinweise (u.a. [7] und [8]). Nach einer Stagnation kam es während der Quellhebungsversuche dann zu weiteren Volumendehnungen, die auf eine Ettringitneubildung zurückgeführt werden konnten. Eine typische zeitabhängige Entwicklung der Volumendehnungen ist in Bild 4 dargestellt.



Bild 3: Prüfeinrichtung

Zur Auswertung der Quellhebungsversuche wurden sowohl die Volumendehnungen infolge der Hydratation als auch die Volumendehnungen infolge der Ettringitneubildung über Kurvenanpassungen analysiert. Grundlage für die Kurvenanpassung war die Annahme, dass sich beide Prozesse durch eine exponentielle Annäherung beschreiben lassen, so dass sich folgender Zusammenhang ergibt:

$$\varepsilon_{vol}(t) = \varepsilon_{vol,\infty} - \varepsilon_{vol,hyd} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{hyd}}} - \varepsilon_{vol,ett} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{ett}}} \quad \text{Gl. 1}$$

$\varepsilon_{vol,hyd}$ entspricht hierbei dem Betrag der Quelldehnung infolge Hydratation, $\varepsilon_{vol,ett}$ dem Betrag der Quelldehnung infolge Ettringitneubildung für $t \rightarrow \infty$. Der Zeitparameter τ gibt allgemein den Zeitraum an, den ein exponentiell ansteigender Prozess benötigt, um auf 63,2% seines Endwertes anzusteigen. Anhand von Kurvenanpassungen der Messwerte kann so sowohl der Betrag der initialen Volumendehnung infolge Hydratation $\varepsilon_{vol,hyd}$ als auch der Betrag der Volumendehnungen infolge Ettringitbildung $\varepsilon_{vol,ett}$ ermittelt werden. Ein Beispiel für eine Kurvenanpassung ist in Bild 4 dargestellt.

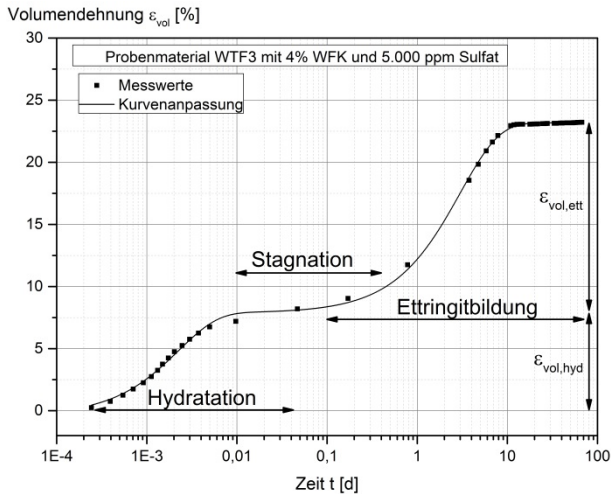


Bild 4: Zeitabhängige Entwicklung der Volumendehnung am Beispiel einer Probe aus Probenmaterial WTF3 mit 4% Weißfeinkalk und 5.000 ppm Sulfat. Kurvenanpassung an die Messwerte.

3.4 Versuchsergebnisse

Das Versuchsprogramm sah vor, bei den natürlich sulfatfreien Materialien, Sulfatgehalte von 0, 3.000, 5.000, 8.000 und 10.000 ppm zu untersuchen und die Zugabemenge an Portlandzement CEM I 32,5 R (CEM I) und Weißfeinkalk (WFK) sowohl bei den Materialien mit einem natürlichen Sulfatgehalt als auch bei den sulfatfreien Materialien mit 4 M.-% konstant zu halten.

Aus dem Versuchsprogramm ergeben sich hinsichtlich der durch Ettringitreiben verursachten Volumendehnungen folgende Erkenntnisse:

Am Probenmaterial GBET wurden im Rahmen des Projektes zwei Bindemittelgehalte (0 und 4 M.-%) untersucht. Es ergaben sich Volumendehnungen infolge Ettringitbildung bis zu 24% bei einer Behandlung mit Weißfeinkalk und bis zu 19% bei einer Behandlung mit Portlandzement.

Für alle Probenmaterialien konnte die Beobachtung von KELLER et al. [1] bestätigt werden, wonach die Behandlung von verwitterten, gipshaltigen Böden mit Weißfeinkalk kritischer als diejenige mit Zement ist, da größere Volumendehnungsbeträge gemessen wurden.

Für Probenmaterial WTF3 wurde ein Zusammenhang zwischen dem Sulfatgehalt und der Volumendehnung infolge Ettringitbildung festgestellt (Bild 5). Umso höher die Sulfatgehalte waren, desto größere Volumendehnungen wurden gemessen.

In allen Probenmaterialien konnte die Kristallisation von Ettringitmineralen über Röntgendiffraktometrie und Elektronenmikroskopaufnahmen (Bild 6) bestätigt werden. Der mineralogische Nachweis wurde an allen Materialien für Proben mit einer Zugabemenge von 4% Weißfeinkalk bzw. Portlandzement und natürlichem Sulfatgehalt bzw. 10.000 ppm Sulfat exemplarisch mittels Röntgendiffraktometrie erbracht. Es wurden Ettringitgehalte zwischen 2 und 5 M.-% nachgewiesen.

Basierend auf dem durchgeführten Versuchsprogramm können für eine erste Abschätzung der infolge Ettringitbildung zu erwartenden Volumendehnungen in Abhängigkeit des Sulfatgehalts des behandelten Bodens die in den Bildern 7 und 8 angegebenen Bandbreiten verwendet werden. Zur Ermittlung der Bandbreiten wurden die in den Versuchen gemessenen Volumendehnungen für alle untersuchten Materialien in Abhängigkeit der Bindemittelart gemittelt. Zu beachten ist, dass der kritische Sulfatgehalt zum einen stark materialabhängig ist und zum anderen durch die Wahl des Bindemittels beeinflusst wird.

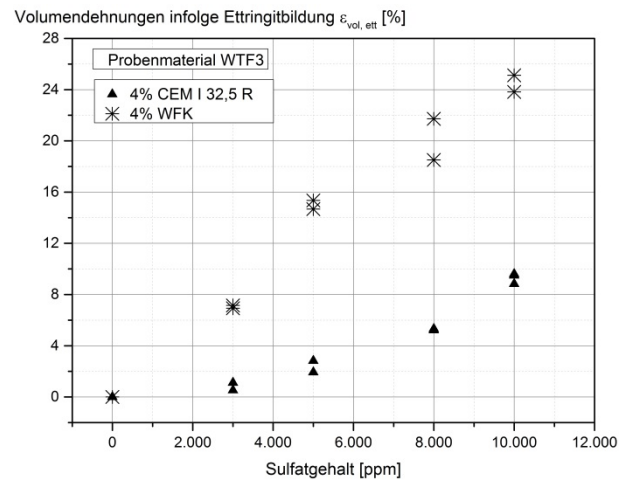


Bild 5: Probenmaterial WTF3. Volumendehnungen infolge Ettringitneubildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts. (CEM I 32,5 R: Zementzugabe, WFK: Weißfeinkalkzugabe): deutliche Zunahme der Volumendehnungen in Abhängigkeit des Sulfatgehalts.

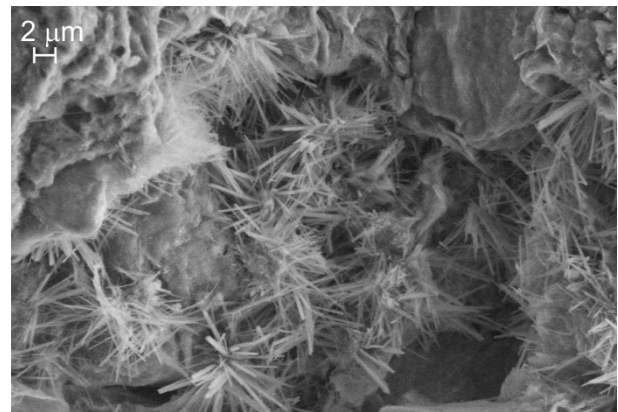


Bild 6: Elektronenmikroskopaufnahme am Probenmaterial WTF3 mit 4% Portlandzement und 10.000 ppm Sulfat

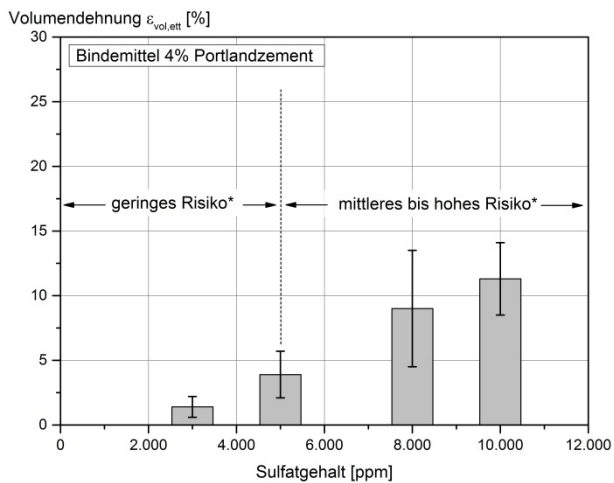
4 Grundlagen für eine Prüfvorschrift

In den im Rahmen der Forschungsarbeit durchgeführten Quellhebungsversuchen wurde der Einfluss der Bindemittelart und des Sulfatgehalts näher untersucht.

4.1 Kritische Einflussgrößen

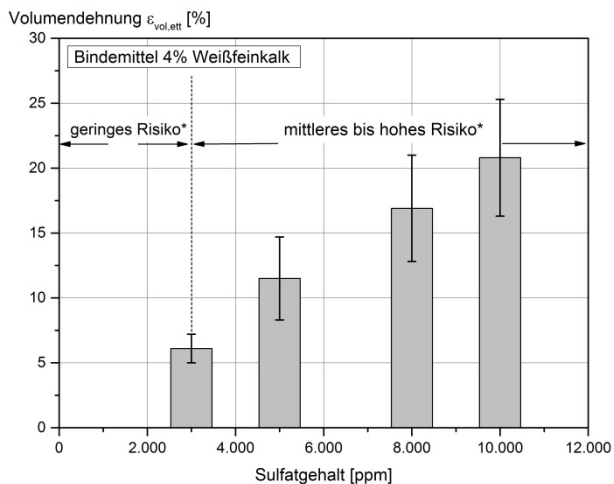
Es konnte die Beobachtung von KELLER [1] bestätigt werden, dass eine Bodenbehandlung mit Weißfeinkalk mit größeren Volumendehnungen verbunden ist als eine

Behandlung mit Zement und eine Verwendung von Zement daher das Schadensrisiko verringern kann. Es ist daher zu empfehlen, in Böden mit einem kritischen Sulfatgehalt auf eine Bindemittelbehandlung mit Weißfeinkalk generell zu verzichten.



* Risikobewertung abhängig von Anwendung

Bild 7: gemittelte Volumendehnungen in Abhängigkeit des Sulfatgehalts zur Risikobewertung für zementbehandelte Böden (4% CEM I 32,5 R)



* Risikobewertung abhängig von Anwendung

Bild 8: gemittelte Volumendehnungen in Abhängigkeit des Sulfatgehalts zur Risikobewertung für kalkbehandelte Böden (4% Weißfeinkalk)

Unabhängig von der Gesteins- bzw. Bodenart und der Art des Bindemittels wurde ein Zusammenhang zwischen dem Sulfatgehalt und der Volumendehnung durch eine Ettringitneubildung festgestellt. Die Größe der Volumendehnung wird aber stark von der Bodenart und der Bindemittelart beeinflusst. Ein geringes Gefährdungspotential für einen Sulfatgehalt von 3.000 ppm konnte nur bei Verwendung von Portlandzement bestätigt werden. Bei einem Sulfatgehalt von 3.000 ppm wurden Volumendehnungen bis maximal 2% (Bild 7) festgestellt. Bei einer Stabilisierung mit Weißfeinkalk zeigten sich hingegen bereits bei einem Sulfatgehalt von 3.000 ppm Volumendehnungen von 5% bis 7% infolge Ettringittreibens (Bild 8). Je nach Anwendungsfall besteht daher bereits bei relativ geringen Sulfatgehalten

ein Schadensrisiko. Als erste Näherung können, basierend auf den in den Versuchen gewonnenen Versuchsergebnissen, die in Bild 7 und 8 angegebenen Bandbreiten für die in Abhängigkeit vom Sulfatgehalt erwarteten Volumendehnungen für eine Risikobewertung herangezogen werden.

4.1 Prüfverfahren zur Ermittlung des Quellpotentials

Grundsätzlich kann zur Abschätzung des Schadensrisikos nach dem Ablaufplan in Bild 9 vorgegangen werden.

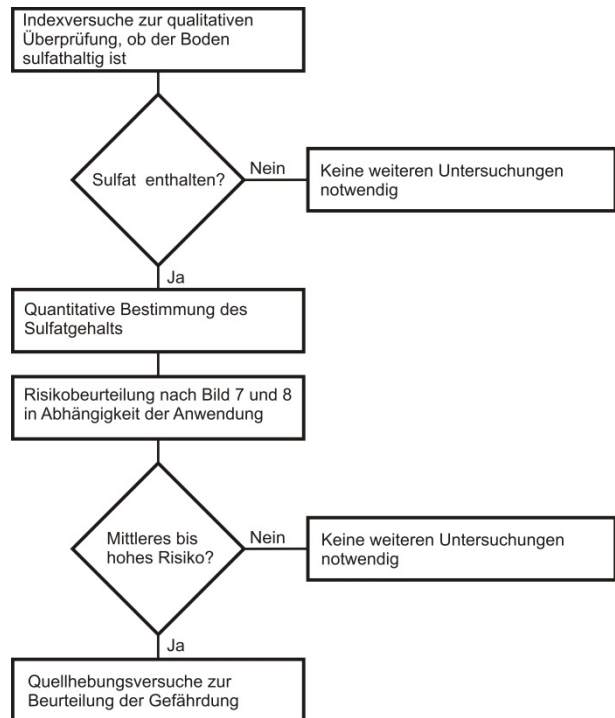


Bild 9: Ablaufplan zur Abschätzung des Schadensrisikos

Für eine erste grobe Abschätzung der Quellgefährdung kann mittels Feldversuchen qualitativ bestimmt werden, ob ein Boden sulfathaltig ist. Eine Zusammenfassung möglicher Feldversuche findet sich in einer Studie aus den USA [9]. Vorgeschlagen wird hier u.a., die elektrische Leitfähigkeit des Bodensättigungsextraktes zu messen, einen Aceton- oder Bariumchlorid-Test durchzuführen oder den Sulfidgehalt zu bestimmen. Zudem geben die stratigraphische Einordnung der jeweiligen Baugrundsichten und die geotechnische Erkundung bereits deutliche Hinweise auf einen möglichen Sulfatgehalt. Die Versuche wurden im Rahmen des beschriebenen Forschungsvorhabens nicht untersucht und können daher nicht bewertet werden. Mittels mineralogischer Untersuchungen (z.B. röntgendiffraktometrische Messung) ist es möglich, den Sulfatträger und den Mengenanteil im Boden zu bestimmen. Für Reihenuntersuchungen von Baugrundproben sind mineralogische Verfahren allerdings nicht geeignet, da sie sehr aufwändig sind. Hier empfehlen sich chemische Analysen. Anhand der Bilder 7 und 8 kann in Abhängigkeit der Anwendung eine erste Risikobeurteilung durchgeführt

werden. Muss von einer mittleren bis hohen Gefährdung ausgegangen werden, so empfehlen sich für eine fundierte Prognose Quellhebungsversuche an Proben des Boden-Bindemittelgemischs.

5 Zusammenfassung

In dem hier dokumentierten Forschungsprojekt wurden Einflussgrößen für die Ettringitbildung mit dem Ziel untersucht, Grundlagen für die Entwicklung einer praxistauglichen Prüfvorschrift zu erarbeiten.

Als Einflussfaktoren, die eine Ettringitneubildung begünstigen sind insbesondere der Mineralbestand, das Wasserangebot, das chemische Milieu, die Temperatur, die Porenstruktur, die Bindemittelart und der Überlagerungsdruck als wesentliche Einflussfaktoren aus der Literatur bekannt.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde das Quellverhalten an Materialien mit natürlichem Sulfatgehalt (hier beispielhaft das Probenmaterial GBET) und ohne einen natürlichen Sulfatgehalt (hier beispielhaft das Probenmaterial WTF3) untersucht. Es wurde festgestellt, dass ein Zusammenhang zwischen dem Sulfatgehalt und der Volumendehnung infolge Ettringitbildung besteht. Für eine Abschätzung der in Abhängigkeit vom Sulfatgehalt und eingesetzten Bindemittel zu erwartenden Hebungen wurden die in den Bildern 7 und 8 dargestellten Kenngrößen als Richtwerte abgeleitet. Der ‚kritische Sulfatgehalt‘ ist zum einen stark materialabhängig und wird zum anderen durch die Wahl des Bindemittels beeinflusst. Es konnte validiert werden, dass eine Bindemittelbehandlung mit Weißfeinkalk ungünstiger ist als eine Behandlung mit Portlandzement, da sowohl bei den natürlich sulfatfreien als auch bei den natürlich sulfathaltigen Materialien bei Verwendung von Weißfeinkalk größere Volumendehnungen eintraten.

Als Prüfverfahren zur Ermittlung des Quellpotentials und zur Abschätzung des Schadensrisikos wurde ein Ablaufplan (Bild 9) vorgeschlagen.

Für eine erste grobe Abschätzung der Quellgefährdung kann mittels Feldversuchen qualitativ bestimmt werden, ob ein Boden sulfathaltig ist. Eine Zusammenfassung möglicher Feldversuche findet sich in einer Studie aus den USA [9]. Bei Vorhandensein von Sulfat im Boden muss der Sulfatträger und der Mengenanteil im Boden ermittelt werden. Für Reihenuntersuchungen von Baugrundproben sind mineralogische Verfahren (z.B. röntgendiffraktometrische Messung) weniger geeignet, da sie sehr aufwändig sind. Hier empfehlen sich chemischen Analysen. Anhand der Bilder 7 und 8 kann in Abhängigkeit der Anwendung eine erste Risikobeurteilung durchgeführt werden.

Im Rahmen des vorgestellten Forschungsvorhabens konnten bisher nur einige wesentliche der vielen Randbedingungen, die die Kristallisation von Ettringitmineralen begünstigen, untersucht werden. Hinsichtlich des Einflusses bestimmender Faktoren wie z.B. der Porenstruktur, des Verdichtungsgrades, der Umgebungstem-

peratur, des Bindemittelgehalts, des Dolomit-Gehalts, des Einflusses von Frost-Tau-Wechseln und auch hinsichtlich der Anwendbarkeit der Indexversuche zur qualitativen Sulfatbestimmung im Feld, besteht weiterer Forschungsbedarf.

6 Literaturverzeichnis

- [1] P. KELLER, A. MOSTHOF, V. LAPTEV und S. GILDE: Gipskeuper: Baugrundrisiken durch die Bildung von Ettringit/Thaumasit, 3. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, 387-400, Esslingen, 2002.
- [2] T. HECHT und M. KRINGS: Besondere Erfahrungen beim Erdbau mit treibmineralbildenden Böden, 16. Brandenburgischer Bauingenieurtag, Cottbus, 2009.
- [3] T. HECHT: Fahrbahnanhebungen infolge von Treibmineralbildung in bindemittelverbesserten gipshaltigen Böden, 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau, 2010.
- [4] DEGES: A71 AS Sömmerda Ost, provisorische Anbindung B85, Verformung und Risse im Erdkörper, Präsentation der DEGES bei der Pressekonferenz zur A 71 im TMBLV, 2014.
- [5] K. WITT: Wirkmechanismen und Effekte bei der Bodenstabilisierung mit Bindemitteln, 8. Erdbaufachtagung, 2012.
- [6] TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION: Guidelines for Treatment of Sulfate Rich Soils and Bases in pavement Structures, 2005.
- [7] K. THURO: Der Pulver-Quellversuch - ein neuer Quellhebungsversuch, Geotechnik 16, 101-106, 1993.
- [8] F. RAUH und K. THURO: Rasche und optimierte Vorhersage von Quelleigenschaften bei Tonen mithilfe des Pulverquellversuchs, 16. Tagung für Ingenieurgeologie und Forum "Junge Ingenieurgeologen", Bochum, 2007.
- [9] P. HARRIS: Laboratory and field procedures for measuring the sulfate content of texas soil. Develop guidelines an procedures for stabilisation of sulfate soils, Texas Transportaion Institut, 2002.

Danksagung

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Forschungsarbeiten wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ausgeführt. Unser Dank gilt außerdem der fachlichen Betreuergruppe bestehend aus Herrn Dr. Kuhl, Herrn Dr. Schade und Herrn Prof. Witt.