

## Kenngößen zur Risikoabschätzung des Ettringitreibens von sulfathaltigen Böden

FA 5.171

Forschungsstelle: Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik (IGS) (Prof. Dr.-Ing. habil. C. Moormann)  
 Bearbeiter: Moormann, C. / Zweschper, B. / Knopp, J.  
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn  
 Abschluss: Dezember 2014

### 1 Aufgabenstellung

Bei der Behandlung eines Bodens durch die Zugabe von Bindemitteln wird das Ziel verfolgt, den Boden tragfähig, frostbeständig und damit dauerhaft widerstandsfähig gegen die Beanspruchungen durch Verkehr und Umwelteinflüsse zu machen. Trotz der zahlreichen positiven Erfahrungen und vorschriftsmäßiger Ausführung von Maßnahmen zur Bodenbehandlungen mit calciumbasierten Bindemitteln kam es im Straßenbau immer wieder zu Schadensfällen durch Sulfattreiben. Die Wirkungsweise des Sulfattreibens beruht auf der Volumenvergrößerung des Hydrogels infolge von chemischen Reaktionen, die zur Bildung von Mineralen aus der Gruppe der Ettringite führen. Ettringit kristallisiert nur unter sehr begrenzten chemisch-physikalisch-thermischen Randbedingungen. Bei einer Reaktion der Zement-Klinkerphase Calciumaluminathydrat mit sulfathaltigen Lösungen entwickeln sich gut ausgeprägte prismatische oder nadelige, pseudo-hexagonale Kristalle und faserige Aggregate. Mit einem Anteil von im Allgemeinen etwa 46 Gewichtsprozent zählt Ettringit zu den Mineralien mit dem höchsten Kristallwassergehalt überhaupt und ist daher relativ voluminös und leicht. Die primäre Bildung von Ettringit während des Erstarrens von Zement ist ein gewünschter Effekt, der durch einen planmäßig zugegebenen Anteil an Calciumsulfat als Erstarrungsregler im Zement herbeigeführt wird. Das sekundäre Wachstum von Ettringitnadeln in den Poren ruft dagegen die schädliche Quellhebung hervor.

Für die Reaktion des Sulfattreibens im Boden sind zwar Einflussfaktoren bekannt, quantitative Prüfmethode und standardisierte Strategien zur Gefahrenabwehr liegen derzeit allerdings noch nicht vor (Witt, 2012). Das Ziel der Forschungsarbeit war die Entwicklung eines praxistauglichen Prüfverfahrens als Grundlage für eine zu entwickelnde Prüfvorschrift. Dafür waren Kenngößen und Richtwerte zur Beurteilung des Risikos von Treiberscheinungen durch Ettringitbildung bei der Bindemittelbehandlung von sulfathaltigen Böden festzulegen.

### 2 Stand der Technik und Wissenschaft

#### 2.1 Einflussfaktoren

Es ist eine Reihe von Randbedingungen bekannt, die realisiert sein müssen, damit es zur Bildung von Ettringit kommen kann.

##### 2.1.1 Mineralbestand

Zunächst hat die Verfügbarkeit an bestimmten Mineralen elementaren Einfluss darauf, ob und in welchem Umfang die

Treibreaktion stattfinden kann. Der als kritisch zu bezeichnende Sulfatgehalt ist stets vom Anteil, der Art und der Verteilung der im Boden vorhandenen Tonminerale abhängig. Bei geringen Tonanteilen (< 10 %) sind relativ hohe Sulfatgehalte (> 10 000 ppm) zur Erzeugung signifikanter Quellhebungen erforderlich. Tendenziell nimmt der kritische Sulfatgehalt des Bodens mit zunehmendem Tonanteil ab. Weiter weisen kaolinitische (nicht quellfähige) Böden gegenüber smectitischen (quellfähigen) Böden einen größeren Bestand an Aluminaten auf und haben so bei sonst gleichen Bedingungen ein höheres Potenzial für schädigenden Ettringitaufwuchs (Witt, 2012). Grundsätzlich ist jedoch nicht in erster Linie die Menge an den für Treibreaktionen erforderlichen chemischen Verbindungen maßgebend, sondern vielmehr ihre Verteilung und Verfügbarkeit im Boden sowie die Größe der reaktiven Oberflächen bestimmter Minerale.

Der deutschsprachigen Literatur (unter anderem Witt, 2012) ist zu entnehmen, dass Sulfatgehalte ab 3 000 ppm potenziell schädigungsrelevant sind. Ihr Gefährdungspotenzial ist aber gering. Eine hohe Gefährdung ist erst ab einem Sulfatgehalt von größer 8 000 ppm anzunehmen. Die diesbezüglich von Witt (2012) angegebenen Grenzwerte finden sich auch in der Technischen Vorschrift des Texas Department of Transportation (2005) und in der UNI EN 1744-1. Die untere Grenze von 3 000 ppm wird auch von Dermatas & Mitchell (1992) bestätigt. Little et al. (2010) und Petry & Little (1992) geben an, dass bereits ein Sulfatgehalt von 2 000 ppm potenziell schädigungsrelevant ist. Hunter (1988) ermittelt eine Grenze von 10 000 ppm, ab der eine hohe Gefährdung besteht. Tidwell & McCallister (1997) stellen fest, dass oberhalb eines Sulfatgehalts von 12 000 ppm ein signifikantes Hebungproblem bei Verwendung von Kalk als Bindemittel besteht.

##### 2.1.2 Wasserangebot

Damit die gegebenenfalls vorhandenen Sulfate als Voraussetzung für die Treibreaktion in Lösung gehen können, muss ausreichend Wasser verfügbar sein. Auch für den weiteren Transport des gelösten Sulfats muss ausreichend Wasser vorhanden sein (Witt, 2012).

##### 2.1.3 Chemisches Milieu/Alkalität

Sulfattreiben findet nur in 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 in großem Umfang freigesetzt und stehen dann für die Treibreaktion zur Verfügung (Witt, 2012). Durch die Bodenstabilisierungen mit calciumbasierten Bindemitteln ist das für das Sulfattreiben erforderliche alkalische Milieu im Allgemeinen immer realisiert.

##### 2.1.4 Temperatur

Die Bodentemperatur hat starken Einfluss auf den Reaktionsmechanismus. Ettringitaufwuchs findet insbesondere im Tem-

peraturintervall zwischen etwa 15 und 20 °C statt. Thaumazit kristallisiert bei Temperaturen unter 10 °C (Witt, 2012).

### 2.1.5 Porenstruktur des Bodens

Auch die Porenstruktur des Bodens beeinflusst die Treibreaktion. Ein zusammenhängendes Porensystem begünstigt den konvektiven Transport sulfathaltiger Lösungen durch das Bodengerüst. Da die schädigende Volumenzunahme infolge Etringitaufwuchses aber in den Bodenporen stattfindet, kann eine gute Verdichtung des Bodens und damit eine Reduzierung der Porengröße die Quellgefährdung sogar erhöhen (Witt, 2012).

### 2.1.6 Überlagerungsdruck

Da der bei behinderter Volumendehnung entstehende Quelldruck erheblich (bis ca. 5 MPa) ist, können Quellhebungen durch im Straßenbau übliche Überlagerungsdrücke nicht überdrückt werden (Keller et al., 2002).

## 2.2 Versuche zur Beurteilung von Treiberscheinungen

Zur ersten groben 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 (Harris, 2002), Vorgeschlagen werden hier unter anderem die elektrische Leitfähigkeit des Bodensättigungsextrakts zu messen, einen Aceton- oder Bariumchlorid-Test durchzuführen oder den Sulfidgehalt zu bestimmen. Weitere Möglichkeiten sind das Verfahren nach DIN 4030-2:2008 oder die Bestimmung des Sulfatgehalts im Eluat nach LAGA M20 TR, Teil III, 2004. Zudem geben die stratigraphische Einordnung der jeweiligen Baugrundsichten und die geotechnische Erkundung bereits deutliche Hinweise auf einen möglichen Sulfatgehalt. Sulfatführende Böden oder Gesteine finden sich in Deutschland beispielsweise in den Schichten des Zechsteins, des Oberen Buntsandsteins, des Gipskeupers oder des Mittleren Muschelkalks.

Bei einer Bodenverbesserung sollte in Verdachtsfällen der Sulfatgehalt aber nicht nur qualitativ sondern auch quantitativ bestimmt werden. Dies erfordert mineralogische und chemische Analysen. Mittels mineralogischer Untersuchungen (zum Beispiel 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 aufwendig sind. Hier empfehlen sich chemische Analysen, wie zum Beispiel die Ionenchromatographie nach DIN EN ISO 10304-1:2009.

Muss von einer Gefährdung ausgegangen werden, so empfehlen sich für eine fundierte Prognose Quellhebungsversuche an Proben des Boden-Bindemittelgemischs nach Paul (1986).

Obwohl die Reaktionsmechanismen wie oben beschrieben hinlänglich untersucht wurden und daher bekannt sind, steht der Baupraxis weiterhin kein standardisiertes Prüfverfahren zur Verfügung, mit dem das Gefährdungspotenzial für das Auftreten von Sulfatreiben bei der Behandlung eines tonigen Bodens

mit calciumbasierten Bindemittel im Einzelfall bereits im Vorfeld einer Baumaßnahme zuverlässig abgeschätzt werden kann.

Es fehlen aber auch eindeutig definierte Kenngrößen einschließlich einer baupraktischen Angabe von Grenzwerten, für als potenziell schadensrelevant zu betrachtende Sulfatgehalte von Böden. Es gibt daher derzeit keine klar definierten Anwendungsgrenzen der Behandlung sulfathaltiger, toniger Böden mit calciumbasierten Bindemitteln.

## 3 Experimentelle Arbeiten

Zur Beantwortung der offenen Fragestellungen wurden im Rahmen der Forschungsarbeit Quellhebungsversuche und einaxiale Druckversuche durchgeführt.

### 3.1 Versuchsböden

Insgesamt wurden vier verschiedene Materialien für die Laborversuche verwendet. Als Versuchsböden wurden geeignete Böden und Halfestgesteine ausgewählt, die in Süddeutschland häufig bei Straßenbaumaßnahmen angetroffen werden. Ausgewählt wurden zwei natürlich sulfathaltige und zwei sulfatfreie Böden. Letztere wurden für die Versuchsdurchführung mit einem definierten Sulfatgehalt versetzt.

Probenmaterial 1 "Gipstagebau Epfendorf-Trichtingen (GB ET)": Bei dem Probenmaterial 1 handelt es sich um einen Verwitterungslehm aus einem Steinbruch bei Epfendorf-Trichtingen. Das Material hat einen natürlichen Sulfatgehalt, da ca. 8,1 % Gips enthalten sind. Es handelt es sich um einen gemischtkörnigen Verwitterungsboden der Bodengruppe SU nach DIN 18196. Das Material enthält vor allem Dolomit (54 %) und Illit (25 %). Daneben wurden Anteile quellfähiger Tonminerale (2 %), Kaolinit (2 %), Quarz (4 %), Calcite (2 %) und ein Gipsanteil von rund 8 % nachgewiesen.

Probenmaterial 2 "Wagenburgtunnel Stuttgart, Versuchsquerschlag II (WT VQ II)": Das Probenmaterial 2 ist ein Gestein aus dem Wagenburgtunnel bei Stuttgart. Es wurde in einem Versuchsquerschlag unterhalb des Gipshorizonts gewonnen. Das Material hat einen natürlichen Sulfatgehalt. Der Versuchsquerschlag wurde mehrere Jahre bewässert. Daher ist die Anhydrit-Gips-Umwandlung weitgehend abgeschlossen. Das Material enthält als Hauptbestandteil Gips (43 %), Anhydrit (9,3 %) ist aber noch in geringen Anteilen nachweisbar. Das Probenmaterial enthält weiterhin Illit (17 %), Quarz (10 %), aber auch einen Anteil an quellfähigen Tonmineralen (15 %). Zudem wurden geringe Anteile Kaolinit (2 %), Feldspat (1 %), Calcit (2 %) und Dolomit (1 %) nachgewiesen.

Probenmaterial 3 "Wagenburgtunnel Stuttgart, Geologisches Fenster F3 (WT F3)": Das Probenmaterial 3 ist ein Gestein aus dem Wagenburgtunnel bei Stuttgart ohne geogenen Sulfatgehalt. Es wurde in einem "geologischen Fenster" oberhalb des Gipshorizonts gewonnen. Das Material besteht zum Großteil aus Illit (44 %). Weiter enthält es einen signifikanten Anteil an quellfähigen Tonmineralen (23 %), Dolomit (18 %) sowie Calcit (6 %), Quarz (6 %) und Kaolinit (1 %). Das Probenmaterial 3 enthält weder Gips noch Anhydrit.

Probenmaterial 4 "Bindige Deckschichten, bmk Steinbruchbetriebe, Werk Robert Bopp, Talheim bei Heilbronn (LL HN)": Das

Probenmaterial 4 ist ein Lösslehm aus Talheim bei Heilbronn. Das Material weist keinen natürlichen Sulfatgehalt auf und besteht vor allem aus Illit (58 %) und Quarz (23 %). Auch hier wurde aber wiederum ein Anteil quellfähiger Tonminerale (6 %) nachgewiesen. Zudem sind geringe Anteile Kaolinit (2 %), Feldspat (10 %) und Calcit (1 %) vorhanden.

### 3.2 Quellhebungsversuche

Zunächst wurde das Quellverhalten der vier Materialien in Pulverquellversuchen (nach Thuro, 1993) untersucht.

Hierbei wurden zwei Materialien mit einem natürlichen (Probenmaterial 1 und 2) und zwei ohne natürlichen Sulfatgehalt (Probenmaterial 3 und 4) verwendet. Den Probenmaterialien 3 und 4 wurde Sulfat künstlich in definierten Mengen zugesetzt.

Da der Bindemittelgehalt im Vergleich zum Sulfatgehalt einen geringen Einfluss auf die Ettringitbildung hat, sah das Versuchsprogramm vor, den Sulfatgehalt in vier Stufen zwischen 10 000 ppm und 0 ppm zu variieren und die Bindemittelmenge konstant zu halten. Nach Untersuchungen von Witt (2012) sind der Sulfatgehalt, die Verteilung des Sulfatgehalts im Boden sowie die Art und Menge der im Boden enthaltenen Tonminerale bestimmende Faktoren für das Ettringittreiben. Zugunsten einer stärkeren Variation des Sulfatgehalts wurde daher für die Probenmaterialien mit künstlich zugesetztem Sulfat (Probenmaterial 3 und 4) jeweils die Zugabemenge an Portlandzement und Weißfeinkalk mit 4 M.-% konstant gewählt. Das zugemischte Sulfat wurde in vier Stufen zwischen 0 und 10 000 ppm variiert. Auch bei den natürlich sulfathaltigen Böden wurde die Zugabemenge an Portlandzement und Weißfeinkalk mit 4 M.-% konstant gewählt.

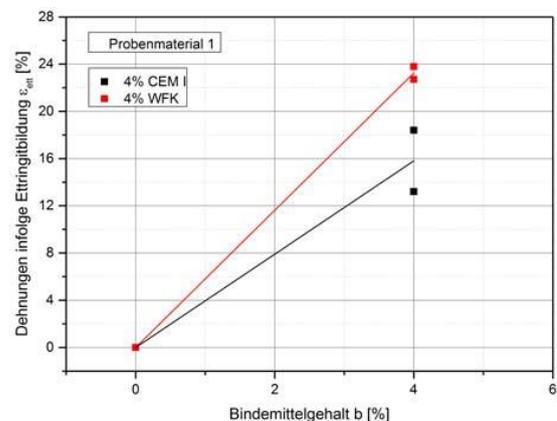
Die Prüfeinrichtung (Bild 1) bestand aus einer Prüfkörper-Bewässerungseinheit, die wie ein vereinfachtes Oedometergerät aufgebaut war, und einer Präzisionsmessuhr zur Messung der Quellhebungen.



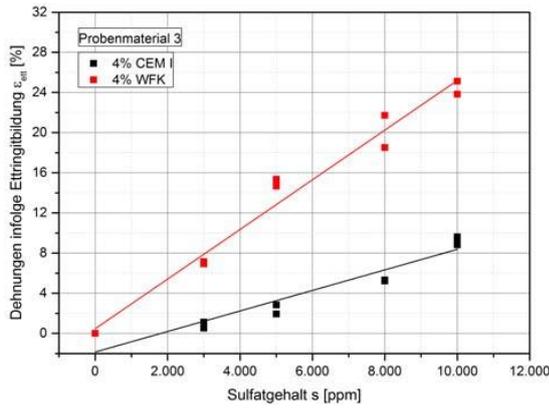
**Bild 1: Prüfeinrichtung**

Alle vier Materialien wurden zu Pulver aufbereitet, bevor sie mit den Zugabestoffen homogenisiert und in Oedometerringe gepresst wurden. Zu Beginn der Versuche kam es deshalb bei allen Proben zu initialen Hebungen infolge von Hydratationseffekten. Nach einer Stagnation kam es zu weiteren Hebungen, die auf eine Ettringitneubildung zurückgeführt werden konnten. Hinsichtlich der durch Ettringittreiben verursachten Hebungen konnte Folgendes festgestellt werden:

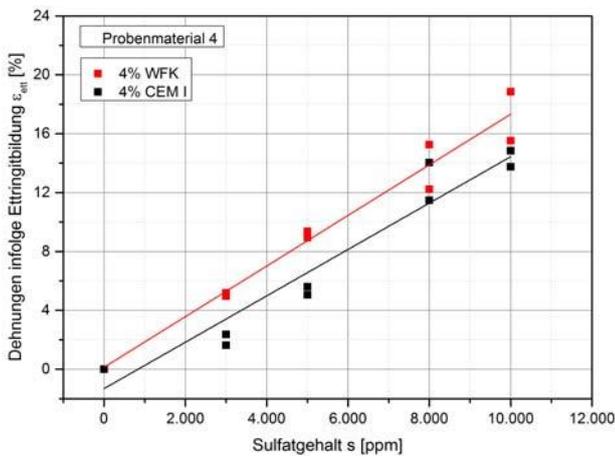
- Für Probenmaterial 1 ergab sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Bindemittelgehalt und der Hebung infolge Ettringitbildung (Bild 2). Allerdings wurden bisher nur zwei Bindemittelgehalte (0 und 4 M.-%) untersucht. Daher besteht hier noch weiterer Forschungsbedarf.
- Es konnte für das Probenmaterial 1 die Beobachtung von Keller et al. (2002) bestätigt werden, dass die Bodenbehandlung mit Weißfeinkalk von verwitterten, gipshaltigen Böden kritischer als die mit Zement ist, da größere Dehnungsbeträge gemessen wurden.
- Probenmaterial 2 zeigte keine eindeutigen Dehnungen infolge Ettringitbildung, da vermutlich die Versuchsdauer von 60 Tagen nicht ausreichend war. Hier müssen Langzeitversuche abgewartet werden.
- Für die Probenmaterialien 3 und 4 konnte ein linearer Zusammenhang zwischen dem Sulfatgehalt und der Dehnung infolge Ettringitbildung festgestellt werden (Bilder 3 und 4).
- Für die Probenmaterialien 3 und 4 ergaben sich bei den zementstabilisierten Proben und einem Sulfatgehalt von 3 000 ppm ca. 2 bis 5 % Hebungen. Es konnte daher bestätigt werden, dass unterhalb von 3 000 ppm bei einer Bodenbehandlung mit Zement im Regelfall nur eine geringe Gefährdung gegeben ist. Bei einer Behandlung mit Weißfeinkalk hingegen zeigen Probenmaterial 3 und 4 bereits bei einem Sulfatgehalt von 3 000 ppm Hebungen von 5 bis 7 %, sodass hier bereits bei diesen geringen Sulfatgehalten ein Gefährdungspotenzial besteht. Für eine Abschätzung der in Abhängigkeit vom Sulfatgehalt und eingesetztem Bindemittel zu erwartenden Hebungen können die Richtwerte der Tabelle 1 (beziehungsweise Bild 5 und 6) entnommen werden. Es zeigt sich, dass "Kritische Sulfatgehalte" zum einen stark materialabhängig sind und zum anderen durch die Wahl des Bindemittels beeinflusst werden. Dabei konnte bestätigt werden, dass eine Bindemittelstabilisierung mit Weißfeinkalk kritischer als mit Portlandzement ist, da größere Dehnungsbeträge gemessen wurden.



**Bild 2: Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Bindemittelgehalts (CEM I: Zementzugabe, WFK: Weißfeinkalkzugabe)**



**Bild 3:** Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts Probenmaterial 3 (WFK: Weißfeinkalk, CEM I: Portlandzement)

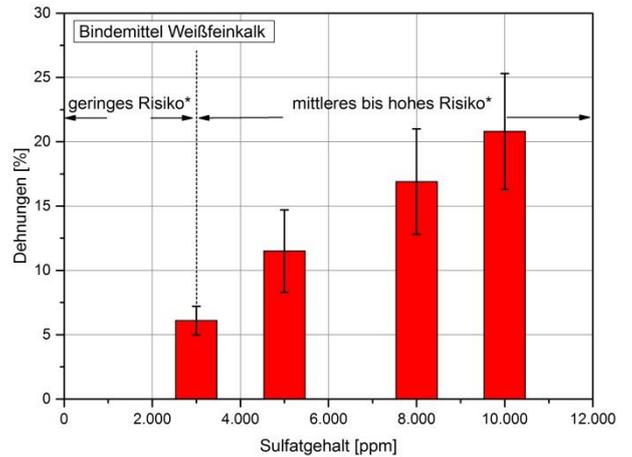


**Bild 4:** Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts Probenmaterial 4 (WFK: Weißfeinkalk, CEM I: Portlandzement)

- In allen Probenmaterialien konnte die Kristallisation von Ettringitmineralen über Röntgendiffraktometrie und Elektronenmikroskopaufnahmen bestätigt werden. Allerdings wurde der mineralogische Nachweis nur für Proben der Materialien 3 und 4 mit einer Zugabemenge von 10 000 ppm Sulfat exemplarisch erbracht.

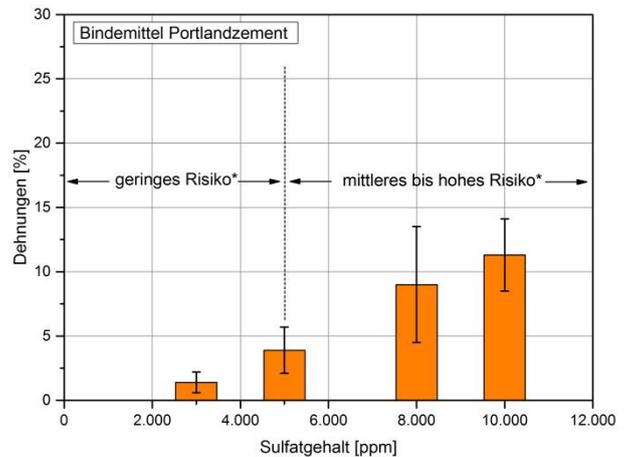
**Tabelle 1:** gemittelte Beträge der Dehnungen (in [‰]) infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts

Sulfatgehalt	3 000 ppm	5 000 ppm	8 000 ppm	10 000 ppm
4 % WFK	6,1 %	11,5 %	16,9 %	20,8 %
Standardabweichung	1,1 %	3,2 %	4,1 %	4,5 %
4 % CEM I	1,4 %	3,9 %	9,0 %	11,3 %
Standardabweichung	0,8 %	1,8 %	4,5 %	2,8 %
Mischbindemittel (Witt, 2011)	6 %	-	9 %	-



\* Risikobewertung abhängig von Anwendung

**Bild 5:** gemittelte Dehnungen in Abhängigkeit des Sulfatgehalts für kalkbehandelte Böden zur Risikobewertung



\* Risikobewertung abhängig von Anwendung

**Bild 6:** gemittelte Dehnungen in Abhängigkeit des Sulfatgehalts für zementbehandelte Böden zur Risikobewertung

### 3.3 Einaxiale Druckversuche

Als weitere experimentelle Untersuchungen wurden einaxiale Druckversuche am Probenmaterial 1 und 4 durchgeführt, um den Einfluss des Ettringittreibens auf die Langzeitfestigkeit bindemittelstabilisierter Böden zu untersuchen.

Probenmaterial 1 hat einen natürlichen Sulfatgehalt und wurde jeweils mit 4 % Portlandzement beziehungsweise 4 % Weißfeinkalk versetzt. Es konnte keine entfestigende Wirkung nach sechs Monaten Lagerung festgestellt werden. Die Druckfestigkeiten lagen deutlich höher als nach 28 Tagen.

Das Probenmaterial 4 wurde mit definierten Mengen an Sulfat und mit jeweils 4 % Portlandzement beziehungsweise 4 % Weißfeinkalk versetzt. Bei den kalkbehandelten Proben wurde ein Einfluss festgestellt: Nach 28 Tagen ergab sich mit zunehmendem Sulfatgehalt der Probe eine höhere einaxiale Druckfestigkeit, was auf die primär stabilisierende Wirkung des Ettringits zurückzuführen ist. Nach sechs Monaten ergab sich mit zunehmendem Sulfatgehalt allerdings eine geringere Festigkeitszunahme. Je größer der Sulfatgehalt, umso geringer war der Festigkeitsgewinn nach sechs Monaten.

#### 4 Grundlagen einer Prüfvorschrift

Das Ziel der Forschungsarbeit war die Entwicklung eines praxistauglichen Prüfverfahrens als Grundlage für eine zu erarbeitende Prüfvorschrift. Hierzu sollten Kenngrößen und Richtwerte zur Beurteilung des Risikos von Treiberscheinungen durch Ettringitbildung bei der Bindemittelbehandlung von sulfathaltigen Böden identifiziert werden. Dies wurde zum einen über eine umfassende Literaturstudie und zum anderen durch Laboruntersuchungen erreicht.

##### 4.1 Kritische Einflussgrößen

Es sind verschiedene Randbedingungen bekannt, die die Bildung von Ettringitkristallen begünstigen. In den experimentellen Untersuchungen wurden nun der Einfluss der Art des Zuschlagstoffs und des Sulfatgehalts untersucht.

##### 4.1.1 Bindemittelart

Besonders kritisch erscheint nach Keller et al. (2002) die Bodenbehandlung mit Weißfeinkalk von verwitterten, gipshaltigen Böden. Wird stattdessen Zement verwendet, so verringert sich das Schadensrisiko.

Diese Beobachtungen konnten bestätigt werden. In Tabelle 1 beziehungsweise in den Bildern 5 und 6 sind die Dehnungen infolge Ettringitbildung in Abhängigkeit des Sulfatgehalts und der Bindemittelart angegeben. Bei Verwendung von Weißfeinkalk zeigten sich deutlich größere Dehnungen. Es ist daher ratsam, in Böden mit einem kritischen Sulfatgehalt generell auf eine Bindemittelbehandlung mit Weißfeinkalk zu verzichten.

##### 4.1.2 Sulfatgehalt

Die Versuche zeigen unabhängig von der Gesteins- beziehungsweise Bodenart und unabhängig von der Bindemittelart einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen dem Sulfatgehalt und den Hebungen infolge von Ettringitneubildung.

Basierend auf den in den Versuchen gewonnenen Versuchsergebnissen können die in Tabelle 1 (beziehungsweise Bilder 5 und 6) angegebenen Bandbreiten für die in Abhängigkeit vom Sulfatgehalt zu erwartenden Hebungen für eine Risikobewertung herangezogen werden.

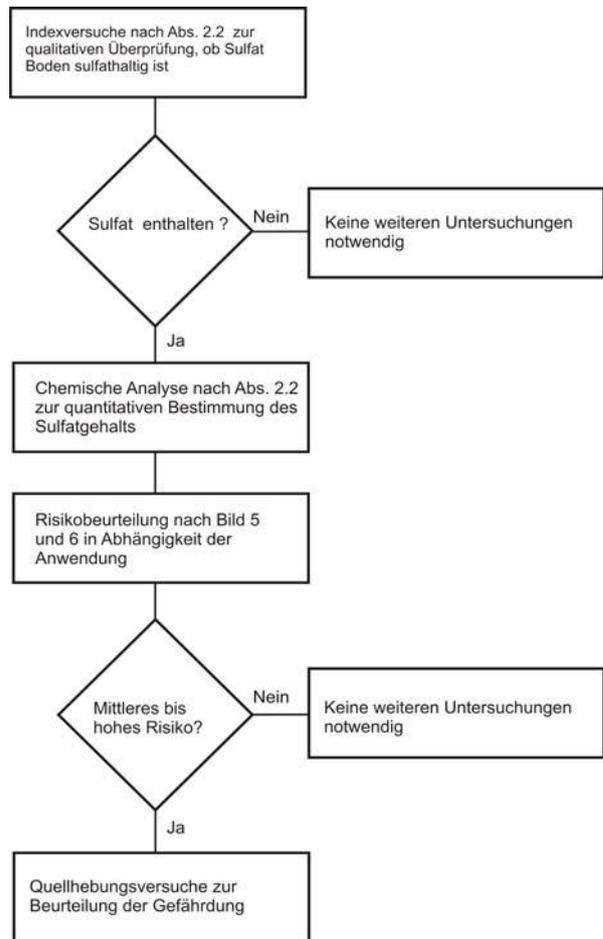
##### 4.2 Prüfverfahren zur Ermittlung des Quellpotenzials

Grundsätzlich kann zur Abschätzung des Schadensrisikos nach dem Ablaufplan in Bild 7 vorgegangen werden.

Zur ersten groben Abschätzung der Quellgefährdung können neben der optischen Prüfung auf Gips oder Anhydrit der Salzsäuretest, der Aceton-Test, der Bariumchlorid-Test, der Test der elektrischen Leitfähigkeit, des pH-Werts und des Sulfatgehalts im Eluat (LAGA M20 TR Boden) durchgeführt werden. In Harris (2002) sind diese qualitativen Feldversuche näher beschrieben. Die Versuche wurden im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts nicht untersucht und können daher nicht bewertet werden.

Mittels mineralogischer Untersuchungen (zum Beispiel 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 aufwendig sind. Hier empfehlen sich die in Harris (2002) beschriebenen chemischen Analysen.

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



**Bild 7: Ablaufplan zur Abschätzung des Schadensrisikos**

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens konnten nur wenige der vielen Randbedingungen, die die Kristallisation von Ettringitmineralen begünstigen, untersucht werden. Der Einfluss bestimmender Faktoren wie zum Beispiel die Porenstruktur, der Verdichtungsgrad, die Umgebungstemperatur, der Bindemittelgehalt, der Dolomit-Gehalt, der Einfluss eines Frost-Tau-Wechsels und auch die Anwendbarkeit der Indexversuche zur qualitativen Sulfatbestimmung im Feld, konnten nicht untersucht und bewertet werden, sodass hier weiterer Forschungsbedarf besteht.

## 5 Literaturverzeichnis

- DIN 18196:2011-05: Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke.
- DIN 4030-2:2008: Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase – Teil 2: Entnahme und Analyse von Wasser und Bodenproben.
- DIN EN ISO 10304-1:2009: Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von gelösten Anionen mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie – Teil 1: Bestimmung von Bromid, Chlorid, Fluorid, Nitrat, Phosphat und Sulfat.
- HARRIS, P. (2002): Laboratory and Field Procedures for Measuring the Sulfate Content of Texas Soil. Develop Guidelines and Procedures for Stabilisation of Sulfate Soils. Report 4240-1, Texas Transportation Institute.
- HUNTER, D. (1988): Lime-Induced Heave In Sulfate-Bearing Clay Soils. J. Geotech. Engrg, 150-167.
- KELLER, P., MOSTHOF, A., LAPTEV, V., GILDE, S. (2002): Gipskeuper: Baugrundrisiken durch die Bildung von Etringit/Thaumasit.
- LAGA M20 TR (2004): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen, Teil III: Probenahme und Analytik. Technische Regeln, Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20.
- LITTLE, D., NAIR, S., & HERBERT, B. (2010): Addressing Sulfate-Induced Heave in Lime Treated Soils. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 110-118.
- MITCHELL, J. K. & DERMATAS, D. (1992): Clay soil heave caused by lime-sulfate reactions. ASTM Symposium in Innovations and Users of lime. San Francisco.
- PAUL, A. (1986): Empfehlung Nr. 11 des Arbeitskreises 19 – Versuchstechnik Fels – der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V., Quellversuche an Gesteinsproben. Bautechnik Heft 3, 100-104.
- PETRY, T. M. & LITTLE, D. N.. (1992): Update on sulfate-induced heave in treated clays: Problematic sulfate levels. Transportation Research Record, 51-55.
- STARK, J. & WICHT, B. (2001): Dauerhaftigkeit von Beton: der Baustoff als Werkstoff. Basel: Birkhäuser Verlag.
- TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, (2005): Guidelines for Treatment of Sulfate Rich Soils and Bases in Pavement Structures.
- THURO, K. (1993): Der Pulver-Quellversuch – ein neuer Quellhebungsversuch. Geotechnik 16, Heft 3, S.101-106
- TIDWELL, L. & McCALLISTER, L. (1997): Double Lime Treatment to Minimize Sulfate-Lime Induced Heave Expansion in Expansive Clays. US Army Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- UNI EN 1744-1: Tests for chemical properties of aggregates – Part 1: Chemical analysis.
- WITT, K. J. (2012): Wirkmechanismen und Effekte bei der Bodenstabilisierung mit Bindemitteln. 8. Erdbaufachtagung