

## 8. Erdbaufachtagung

„Baugrundverbesserung und -verdichtung - Verfahren, Methoden,  
Materialien, Prüfungen“

---



„Wirkmechanismen und Effekte bei der  
Bodenstabilisierung mit Bindemitteln“

Referent	<b>Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt</b> Bauhaus-Universität Weimar Coudraystrasse 11 c 99421 Weimar  Tel.: 03643 584560 Fax: 03643 584564
Tagungsort	<b>Ramada Hotel Leipzig</b> Schongauer Straße 29 04329 Leipzig  Tel.: 0341 2540
Termin	<b>10. Februar 2012</b>
Leitung	<b>Dipl.-Ing. Ulrich Werner, MBA</b> Direktor Bauakademie Sachsen Neuländer Str. 29 01129 Dresden Tel.: 0351 795749713 Fax: 0351 795749719 info@bauakademie-sachsen.de

## **Notizen**

## **Notizen**

# Wirkmechanismen und Effekte bei der Bodenstabilisierung mit Bindemitteln

*Karl Josef Witt*

## 1. Einleitung

Unter dem Druck der Ressourcenschonung und mit dem Fortschritt der Fräs- und Verdichtungs-technologie tritt im Verkehrswegebau die Konditionierung natürlicher Böden und Recyclingmaterialien zunehmend in den Focus. Der Überbegriff *Bodenstabilisierung* wird allgemein als Behandlung von Böden mit Bindemitteln verstanden. Je nach angestrebtem Effekt unterscheiden die Regelwerke der FGSV eine Verbesserung und eine Verfestigung von Böden [1]. Werden gezielt die mechanischen Eigenschaften beeinflusst, z. B. die Frostsicherheit, spricht man gar von einer qualifizierten Bodenverbesserung, was nicht bedeuten soll, die konventionelle Bodenstabilisierung sei unqualifiziert.

Zur flächigen Stabilisierung werden Branntkalk, Kalkhydrat, Zement oder Flugasche als Bindemittel in den Boden eingefräst. Die Dosis wird in Eignungsuntersuchungen meist anhand von Festigkeitskriterien optimiert. Die Auswahl des Bindemittels richtet sich zunächst nach der Korngrößenverteilung und dem Wassergehalt des Bodens. Als empirische Anwendungsregel wird oft grobkörnigen Böden Zement als optimales Bindemittel zugeordnet, während für gemischt- und feinkörnige Böden Kalk empfohlen wird. Besser wäre es, die erdstatischen Anforderungen an das Bauwerk zu betrachten und den Boden dann unter Kenntnis der Dosis-Effekt Beziehung vor dem Hintergrund konkreter Ziele zu behandeln. Mögliche Ziele der Stabilisierung sind die Reduktion des Wassergehaltes, die Verbesserung der Verdichtbarkeit, die Immobilisierung von Schadstoffen, die Erhöhung des Frost- und Scherwiderstandes, die Verbesserung der Verformbarkeit und der Erodibilität.

Manche dieser Ziele werden vorzugsweise mit Kalken erreicht, bei anderen ist Zement das Mittel der Wahl. Besonders bei gemischt- und feinkörnigen Böden hat sich aber gezeigt, dass die optimale Lösung nicht mit *entweder-oder*, sondern mit einem *sowohl-als auch* erreicht wird. So ist die Anwendung von Mischbindern aus Kalk und Zement in der Baupraxis im Vormarsch. Zahlreiche Untersuchungen und Anwendungen an fein- und gemischtkörnigen Böden zeigen hervorragende Erfolge, die sogar einen Synergieeffekt beim Einsatz von Kalk/Zement-Gemischen als Bindemittel erwarten lassen. Zur Erklärung der oft überraschend guten Dosis-Effekt-Beziehung werden nachfolgend die Wirkmechanismen der Einzelkomponenten und ein Modell zur Erklärung des Synergieeffektes vorgestellt. Eine vertiefte Darstellung der Zusammenhänge findet sich in [2].

## 2. Wirkmechanismen Boden und Zement

Zur Stabilisierung von Böden mit Zement werden überwiegend Portlandzemente eingesetzt, die zur gezielten Steuerung des Reaktionszeitpunktes auch hydrophobiert werden. In Kontakt mit dem Porenwasser findet eine rasche Hydratation des Zementes statt, wobei hydratisierte Kalziumsilikate, Kalziumaluminat und als Nebenkomponente Kalziumhydrat ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) entstehen. Die ersten beiden Produkte bilden im Porenraum eine skelettartige Zementsteinmatrix, in der die Bodenpartikel bzw. Bodenaggregate fixiert und an der Bewegung behindert werden. Während der Hydratation des Zementes steigt der pH-Wert des Porenwassers stark an. Als sekundärer Effekt lösen sich im Boden Silikate und Aluminat aus den tonigen Partikeln bzw. aus den amorphen Materialien der Partikeloberfläche. Weitere Reaktionen, die zu Erhärtungsprozessen oder Strukturumbildungen der Bodenmatrix führen können, finden mit dem Kalzium und den Mineralen des Bodens statt. Diese langsam ablaufenden Prozesse werden als puzzolanische Reaktionen zusammengefasst. Abbildung 1 zeigt eine Elektronenrasteraufnahme eines mit 4 % Zement vergüteten Lösslehms, 5 Tage nach Zumischen und Verdichten. Im Porenraum ist die Struktur des Skeletts aus Zementstein mit den nadelartigen Kristallen zu erkennen, welche die Aggregate verbinden und gegeneinander aussteifen.

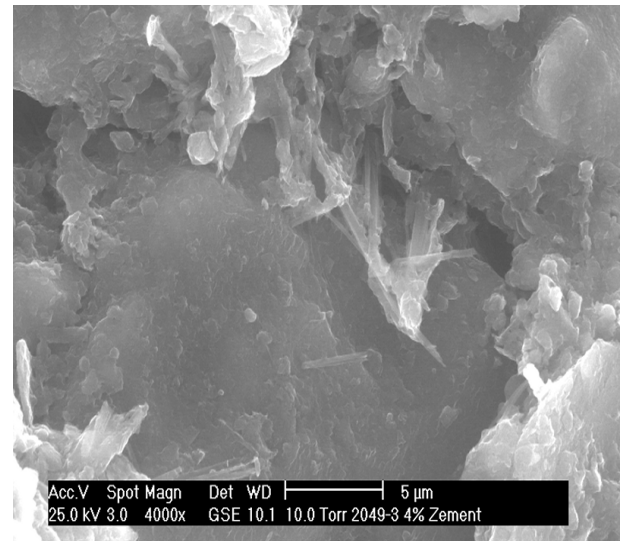


Abb. 1: Bodenreaktion mit Zement, Zementstein-Skelett im Porenraum

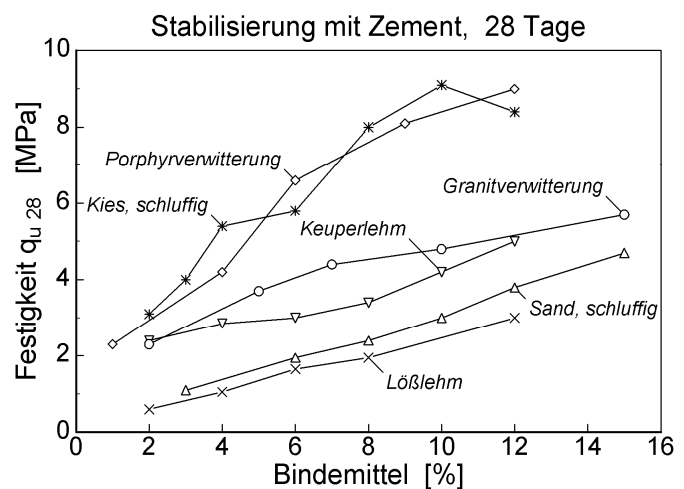


Abb. 2: Zementdosis und einaxiale Druckfestigkeit

Die Reaktion des Zementes im Boden ist sehr komplex und unterscheidet sich insbesondere bei der Mitwirkung von Tonmineralen von der Zementhydratation im Beton. Kennzeichnend ist die primäre Skelettbildung im Porenraum mit einer raschen und heftigen Erhöhung der Festigkeit des Bodens. Der Sekundäreffekt bewirkt eine Stabilisierung und Verkittung der Bodenkörner oder Partikelaggregate, also eine bleibende Strukturänderung, die sich stark auf den Wasserhaushalt auswirkt. Die primäre Reaktion wird durch das Porenwasser und durch das Verhältnis des hydratisierten Zementes zum Porenvolumen gesteuert.

Abbildung 2 zeigt exemplarisch für unterschiedliche Böden den Zusammenhang zwischen einaxialer Druckfestigkeit nach 28 Tagen und der applizierten Zementdosis, bezogen auf die Trockenmasse. Ist zur Hydratation genügend Porenwasser verfügbar, steigt die Festigkeit nahezu proportional mit der Zementdosis an [6, 7]. In der Tendenz ist der Verfestigungseffekt bei grober Porenstruktur und hoher Granulathärte, wie etwa im Kies oder in der Porphyerverwitterung, stärker ausgeprägt als in einer feinporig aggregierten Struktur wie etwa in Löss oder gar in Ton. In organischen Böden wird die Zementreaktion durch die Huminsäuren abgeschwächt.

Bei allen von uns bisher untersuchten Böden hat sich ein signifikanter Einfluss der Verdichtung gezeigt. Je höher das Verhältnis Zementmenge/Porenvolumen unter sonst gleichen Bedingungen ist, desto höher zeigt sich der Festigkeitszuwachs. Mit der Druckfestigkeit steigen auch der Steifemodul und die Kohäsion mit der Erstarrung des Zementleims rasch an und nehmen im Laufe des Abbindeprozesses noch weiter zu. Eine Auswertung zahlreicher Scherversuche verschiedener Eignungsuntersuchungen zeigt, dass der Reibungswinkel bei einer Zementstabilisierung nichtbindiger Böden nahezu unverändert bleibt, während er bei bindigen Anteilen nach längerer Liegezeit infolge Strukturänderung um wenige Grade ansteigen kann.

Die Erhöhung der Festigkeit, der Steifigkeit und der Kohäsion sind dem primären Effekt der Skelettbildung des Zementsteins zuzuordnen. Bei größeren Verformungen oder im Bruchzustand werden diese Brücken jedoch zerstört. Im Bruchzustand können dann lediglich die sekundären Effekte der puzzolanischen Reaktionen mobilisiert werden, die eine Strukturänderung mit nur geringer Festigkeitserhöhung der Bodenmatrix selbst bewirken. Es ist bisher noch nicht untersucht und offen, inwiefern in der Erdbaupraxis die applizierte dynamische Verdichtungsenergie den Abbindeprozess in den darunter liegenden Einbaulagen stört.

Die allgemeine Ansicht, dass sich mit Zement nur nichtbindige Böden verfestigen lassen, ist so nicht korrekt. Richtig ist, dass in nichtbindigen Böden wegen der größeren Granulathärte der fixierten Körner und Kornaggregate und wegen der geringeren spezifischen Oberfläche sowohl die relative als auch die absolute Verfestigung bezogen auf die Zementdosis höher ist, als bei bindigen Böden. Eine Erhöhung der Festigkeit, Steifigkeit und Kohäsion lässt sich aber auch bei fein- und gemischtkörnigen Böden bis hin zu ausgeprägt plastischen Tonen erzielen. Während bei Sanden und Kiesen mit einer Dosis von ca. 3 bis 5 % oft hinreichend hohe Festigkeiten erreicht werden, ist mit zunehmendem Gehalt an Feinteilen eine höhere Zementdosis für den beabsichtigten Erfolg erforderlich. Ausgeprägt plastische Böden zeigen bis zu einer Dosis von ca. 5 % nur vernachlässigbare geringe Festigkeitszunahmen. Die feinkörnige Bodenmatrix bleibt bei derart niedrigen Beimengungen mechanisch dominant. Eine Zementdosis von 15 bis 20 % führt jedoch auch bei Tonen zu einer proportionalen Zunahme der Festigkeit, Steifigkeit und Kohäsion, ist aber meist unwirtschaftlich.

Zur Prognose der Festigkeitsentwicklung unter konstanten Temperatur- und Feuchtebedingungen kann in erster Näherung Gleichung 1 herangezogen werden [3].

$$q_{u,t} = B^* \cdot \frac{V_{Zement}}{n \cdot V_{Boden}} = B^* \cdot \frac{m_Z \cdot \rho_d}{n \cdot \rho_Z \cdot m_B} = B^* \cdot \frac{M_Z(1-n) \cdot \rho_s}{n \cdot \rho_Z} \quad (1)$$

$B^*$  = materialspezifische Konstante, berücksichtigt Zementqualität, Temperatur, Wassergehalt, Mineralogie und spezifische Oberfläche des Bodens

$m_z$  = applizierte Zementmasse,  $m_B$  = Trockenmasse des Bodens

$M_z$  = Dosis Zement, bezogen auf Trockenmasse des Bodens

$\rho_d, \rho_z, \rho_s$  = Trockendichte Bodens, Korndichte Zement, Korndichte Boden

$n$  = Porenanteil des Bodens

Die Gleichung zeigt, dass die Festigkeitserhöhung unter sonst gleichen Bedingungen proportional zum Verhältnis aus Zementvolumen zu Porenvolumen ist. Für die Erdbaupraxis bedeutet dies, dass sich der Erfolg einer Zementgabe mit der Erhöhung des Verdichtungsgrades steigert. Ein weiterer Einflussfaktor ist der Wassergehalt des Bodens bei der Bindemittelapplikation und Verdichtung. Er bestimmt zum einen den Grad der Hydratation, zum andern die bei der Verdichtung erzeugte Porenstruktur.

### 3. Wirkmechanismen Boden und Kalk

Bei der Kalk-Stabilisierung von Böden stehen die Prozesse *Entwässerung des Bodens*, *Aggregatbildung bindiger Bodenpartikel*, *Ionen-austausch* und *Puzzolan-Effekte* im Vordergrund. Als Langzeiteffekt kann auch eine Karbonatisierung auftreten, was jedoch für die Erdbaupraxis unbedeutend ist. Zur Verbesserung kohäsiver Böden werden je nach gewünschtem Effekt Branntkalk -  $\text{CaO}$ , Kalkhydrat -  $\text{Ca(OH)}_2$ , gelegentlich auch hydraulischer Kalk verwendet.

Das beim Löschen des Branntkalkes im Boden entstandene Kalziumhydroxid bzw. direkt eingemischtes Kalkhydrat dissoziiert im Porenwasser, erhöht dessen Elektrolytkonzentration und pH-Wert, so dass sich je nach Mineralbestand  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aus den Feststoffpartikeln und aus der amorphen Oberfläche lösen. Die Effekte sind Ionenaustausch, Wasserstoffbrückenbildungen und puzzolanische Reaktionen. Abbildung 3 zeigt eine REM-Aufnahme eines mit 4 % Kalkhydrat verbesserten Lösslehms. Es handelt sich um den gleichen Boden wie bei der in Abbildung 1

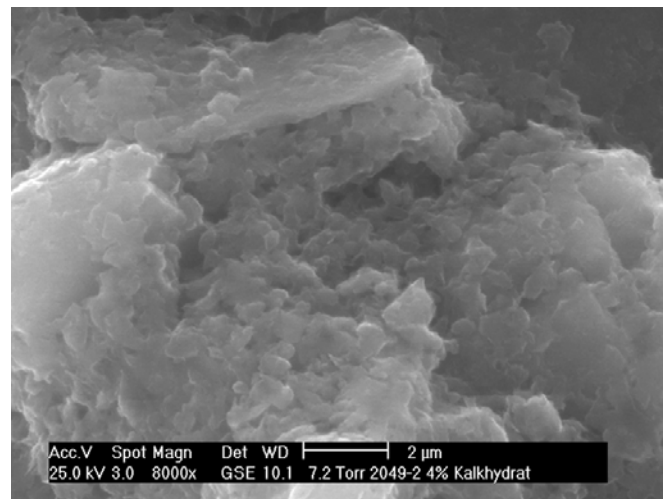


Abb. 3: Bodenreaktion mit Kalkhydrat, gelartige Füllung im Porenraum

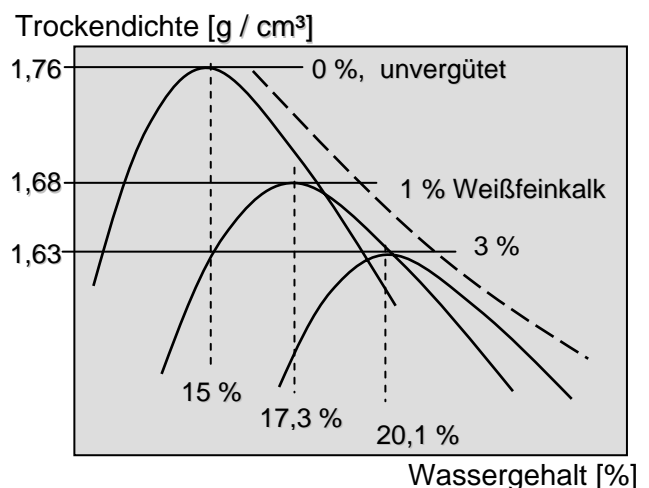


Abb. 4: Verlagerung der Proctorkurve

gezeigten Zementvergütung. Im Gegensatz zur Zementapplikation ist im Porenraum Kalkgel zu erkennen, das die Aggregatoberfläche überzieht und dort mit dem Boden reagiert.

Die Sofortreaktion des Kalkes ist durch die Änderung des Wasserhaushaltes, durch erhöhte Kapillarspannungen und durch eine Krümelbildung gekennzeichnet. Bereits in diesem Stadium setzt der Ionenaustausch ein. Natrium und andere Kationen werden durch Kalzium ersetzt. Infolge der erhöhten Kapillarspannungen und der geänderten Partikelbindung findet eine Strukturänderung statt: Schluff- und Tonpartikel aggregieren zu größeren Körnern. Bodenmechanisch hat dies eine Erhöhung der Ausrollgrenze  $w_P$ , eine Reduzierung der Plastizität  $I_P$  und damit eine Erhöhung der Konsistenzzahl  $I_C$  zur Folge. Gleichzeitig verschiebt sich die Proctorkurve eines kalkverbesserten Bodens zur nassen Seite hin, wie dies in Abbildung 4 schematisch dargestellt ist.

Die durch den pH-Wert bedingte anfängliche Aggregatbildung hängt in erster Linie vom Mineralbestand und vom Feinteilgehalt des Bodens sowie von der eingemischten Kalkmenge ab. Der Effekt ist bereits bei einer Dosis von 2 bis 3 % erschöpft. HILT U. DAVIDSON [4] geben eine empirisch abgeleitete Grenze der Kalkdosis  $M_{Ca}$  an, ab der keine weitere Erhöhung der Ausrollgrenze als Sofortreaktion zu erwarten ist (Gl. 2). Dieser Zusammenhang wird für Kalkhydrat näherungsweise durch die Auswertung anderer Literatur bestätigt. Eine zweite Grenze der Effektivität ist dort zu ziehen, wo durch die Kalkdosis keine weitere pH-Wert Erhöhung erzielt wird.

$$\text{Fixierungspunkt: } M_{Ca, opt} [\%] = 0,03 \times \text{Tongehalt} [\%] + 1,25 \% \quad (2)$$

Der Umfang des Ionenaustausches wird durch den Mineralbestand des Bodens, i. w. durch die Kationenaustausch-Kapazität (KAK) bestimmt. Puzzolanische Reaktionen des Kalkhydrates mit den Silikaten und Aluminaten beginnen in dem sog. Neolithstadium einige Tage nach der Hydratation und dauern bis zu 5 Jahren an. Die Silikate oder Aluminate füllen die Mittel- und Feinporen in den Aggregaten, führen durch die puzzolanischen Reaktionen zu einer Zementierung oder Verkittung der Bodenpartikel, zu einer Versteifung der Aggregate und damit zu einer Erhöhung der Festigkeit des Bodens. Diese hydraulischen

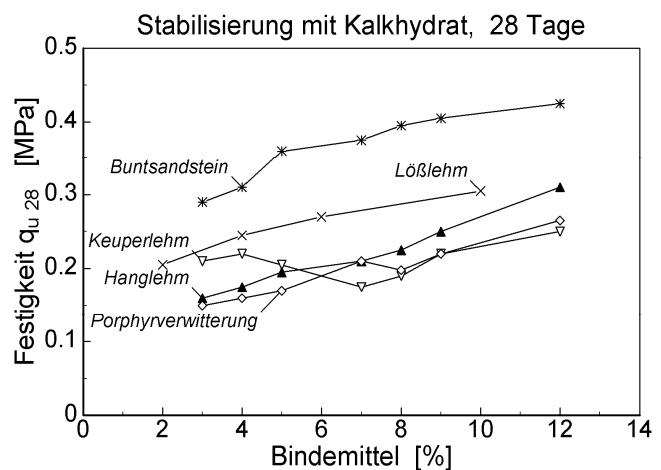


Abb. 5: Kalkdosis und Druckfestigkeit

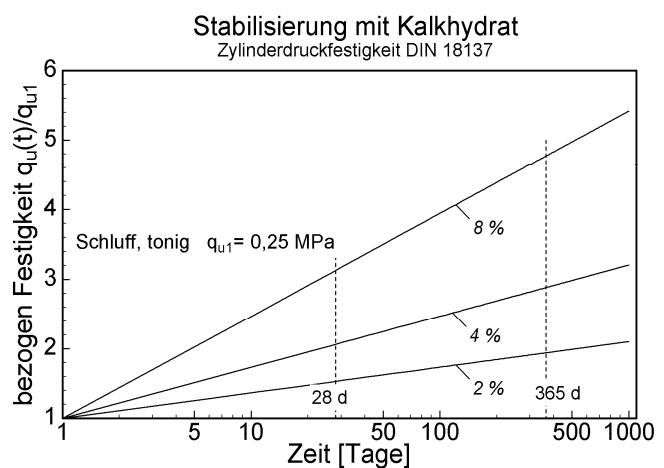


Abb. 6: Stabilisierung mit Kalkhydrat, Entwicklung der Druckfestigkeit



Reaktionen sind vergleichbar mit denen des Zementes, laufen aber um Größenordnungen langsamer ab. Der Erfolg hängt von der Dosis und von dem Mineralbestand der Feinteile des Bodens ab.

Wie bei der Verfestigung mit Zement ist auch bei der Kalkapplikation Porenwasser als Medium erforderlich. Während die Reaktionen des Zementes bei einem Wasserdefizit irreversibel stagnieren, werden die Hydratation des Kalziumoxids und die puzzolanischen Reaktionen des Kalkhydrates bei zu geringem Wasserangebot lediglich unterbrochen oder verzögert. Auch hier hat der Wassergehalt bei der Verdichtung einen signifikanten Einfluss auf die Porenstruktur und auf die erzielte Festigkeit.

Abbildung 5 zeigt für verschiedene Böden die Dosis-Effekt-Beziehung der einaxiale Druckfestigkeit (DIN 18 136) bei einer Stabilisierung mit Kalkhydrat. Die Druckfestigkeit nimmt in der Tendenz proportional mit der Dosis zu. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Zementstabilisierung (Abb. 2) ist das gesamte Niveau der erreichbaren Festigkeit im betrachteten Zeitraum jedoch um eine Größenordnung geringer. Dies erklärt sich aus den Reaktionsmechanismen des Kalkes, der kein starres Skelett im Porenraum aufbaut. Die Verfestigungseffekte sind fast ausschließlich auf die oben beschriebenen puzzolanischen Reaktionen zurückzuführen und finden überwiegend in den Bodenaggregaten und in den Fein- bis Mittelporen in Abhängigkeit des Mineralbestandes statt. Daher ist das erzielbare Ergebnis von Boden zu Boden recht unterschiedlich.

Die zeitliche Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit einer Kalkstabilisierung lässt sich mit Gl. 3 beschreiben. Der Zusammenhang kann für eine Prognose der Langzeiteffekte verwendet werden.

$$q_u(t_2) = q_u(t_1) + A^* \cdot M_{Ca} \cdot \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (3)$$

$q_u(t_i)$  = Einaxiale Druckfestigkeit zum Zeitpunkt  $t_i$  [MPa]

$A^*$  = bodenspezifische Aktivitätskonstante

$M_{Ca}$  = Kalkhydratdosis, bezogen auf die Trockenmasse [%]

Die Größe der Aktivitätskonstanten hängt stark von der Mineralogie des Bodens ab. Für einen tonigen Schluff der Bodengruppe UL-UM wurde der Zusammenhang in Abbildung 6 ausgewertet. Aus den Versuchsergebnissen wurde der Wert  $A^* = 0,02$  zurückgerechnet. Für einen Lösslehm ergab die Auswertung dieser Versuche  $A^* = 0,037$ . Der Wert lässt sich aus der Eignungsprüfung z. B. durch Vergleich der Festigkeiten nach z. B. 7 und 14 Tagen ermitteln. So kann Gl. (3) zur Prognose der Endfestigkeit verwendet werden. Bei den üblichen Kalkrezepturen des Erdbaus werden innerhalb eines Jahres gegenüber dem Ausgangszustand die 3 bis 5-fachen Zylinderdruckfestigkeiten erreicht. Eine ähnliche Langzeiterhöhung kann auch für die Entwicklung der Kohäsion erwartet werden.

#### 4. Synergieeffekt bei Kalk und Zement Applikation

Die bodenmechanischen Effekte einer Verbesserung und Verfestigung von Böden mit Zement und Kalk ergeben sich aus den unterschiedlichen Reaktionsmechanismen der Bindemittel mit der Bodenstruktur. Wird eine schnelle und hohe Verfestigung mit einer starken Zunahme der Parameter Druckfestigkeit und

Steifemodul bzw. Verformungsmodul benötigt, ist Zement das Bindemittel der Wahl. Im Porenraum zwischen den Körnern oder Aggregaten bildet sich mit Beginn der Erstarrung ein Zementsteinskelett, das mechanisch dominant ist. Nachteilig ist der hohe Zementbedarf bei feinkörnigen, mittel- bis ausgeprägt plastischen Böden, da mit zunehmendem Feinteilgehalt auch die spezifische Oberfläche zunimmt. Eine reine Zementapplikation ist bei gemischt- und feinkörnigen Böden bei einer erforderlichen Dosis > 10 % meist unwirtschaftlich.

Kalk zeigt dagegen bereits bei einer geringen Dosis eine signifikante Reaktion mit den aggregierten Feinteilen des Bodens, erzeugt aber nur eine moderate Stabilisierung der Bodenstruktur und damit nur eine moderate Erhöhung der Druckfestigkeit, Kohäsion und Steifigkeit. Durch die Aggregatbildung der Feinteile des Bodens bildet sich bodenphysikalisch eine bimodale Porenstruktur mit Grobporen im Größenbereich von ca. 10 bis 50  $\mu\text{m}$  (sog. Interaggregatporen) und Mittel- bis Feinporen innerhalb der Aggregate, die im Größenbereich < 1  $\mu\text{m}$  liegen (Intraaggregatporen).

Beide Reaktionsmechanismen können bei der Verwendung von Mischbindern aus Kalk und Zement aktiviert werden. Wenn es gelingt, einerseits die Feinteile zu Aggregaten zu binden und diese Aggregate langfristig zu verfestigen und andererseits die Aggregate in den Grobporen gegenseitig mechanisch zu stabilisieren, lassen sich beide mechanischen Effekte synergetisch zu überlagern. Die erste Aufgabe kann die Beimengung von Kalk leisten, die zweite bleibt dem Zement vorenthalten.

Mit Mischbindern, auf den Boden und die Bauaufgabe abgestimmte Mischungen aus Kalk und Zement, können die Vorteile beider Bindemittel genutzt werden. Der Kalk reduziert die Plastizität und bildet Feinteilaggregate, die sich mit der Zeit verfestigen. Der Zementstein stärkt rasch das Porengefüge durch ein Tragskelett.

In Anlehnung an [5] ist in Abbildung 7 ein Modell zur Erläuterung dieser synergetischen Wirkungsweise dargestellt. Während des Anfangsstadiums bildet sich im Porenraum ein Tragskelett, das jedoch wegen der dazwischen liegenden unverfestigten Aggregaten die Gesamtfestigkeit nur moderat erhöhen kann. Bodenaggregate und Tragskelett wirken synergetisch im Verbund, wenn die Eigenschaften der beiden Strukturkomponenten, Bodenaggregate und Skelett, hinsichtlich Trag- und Verformungsverhalten optimal abgestimmt sind, wenn die sich verfestigenden Aggregate das Skelett aussteifen, wie dies im unteren Teil der Prinzipskizze Abb.7 dargestellt ist.

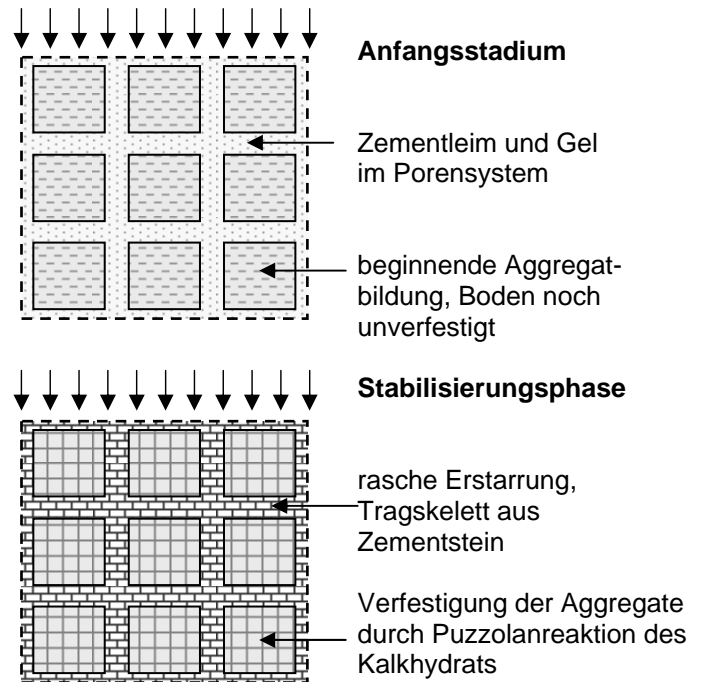


Abb. 7: Modell zur synergetischen Wirkungsweise von Mischbindern

Erfahrungswerte für optimale Mischungen aus Kalk und Zement sind in Tabelle 1 angegeben. Da sowohl die durch den Kalk hervorgerufene Bodenstruktur als auch die Puzzolan-Effekte stark von dem Mineralbestand und Wassergehalt des Bodens abhängen, können die Mischungsverhältnisse nur zur Orientierung verwendet werden. Die optimale Rezeptur muss anwendungsspezifisch aus einer Eignungsuntersuchung abgeleitet werden.

Tab. 1: Erfahrungswerte zur Stabilisierung mit Mischbinder

	GE - SE - GW - SW - GU - SU - GU* - SU* - UL - TL - UM - TM - UA - TA										
Kalk/Zement	0/100	→	20/80	→	30/70	→	50/50	→	70/30	→	80/20
	Dosis 2% - 6% , je nach Ziel der Stabilisierung										

In Tabelle 2 sind exemplarisch für einen Lösslehm der Bodengruppe TL Ergebnisse von Untersuchungen mit verschiedenen Bindemitteln gegenübergestellt [6, 7]. Die Prüfkörper wurden mit einem Verdichtungsgrad von  $D_{Pr} = 97\%$  unter Laborbedingungen hergestellt und nach 28 Tagen Feucht- bzw. Wasserlagerung untersucht. Die Steifemoduln sind für das Spannungsniveau von 200 und 400 kPa angegeben.

Erwartungsgemäß wurde mit Zement gegenüber der Stabilisierung mit Kalk eine deutlich höhere Druckfestigkeit erreicht. Der anfängliche Verbesserungsfaktor beträgt bei Kalk 2,5, bei Zement 10, bei Mischbinder 8,5. Bei den Parametern Kohäsion und Steifigkeit, den für Standsicherheits- und Verformungsnachweise relevanten Parametern, ist der Verbesserungseffekt des Zementes dem des Kalkes zwar immer noch überlegen, jedoch nicht so klar wie bei der Druckfestigkeit. Mit einem Mischbinder 70/30 (Kalk/Zement) wurden an diesem Boden die besten Ergebnisse erzielt. Der in Tabelle 2 dargestellte Verbesserungseffekt wurde in der Tendenz für eine Spannweite der Bindemittelgabe von 2% und 6% bestätigt. Zu Beachten ist, dass für die Parameter Steifigkeit und Kohäsion noch ein Langzeitanstieg bei der Verbesserung mit Mischbinder infolge Zunahme der granularen Festigkeit zu erwarten ist.

Tab.2: Stabilisierung eines Lösslehms mit verschiedenen Bindemitteln,  $D_{Pr} = 98\%$ , 28d

	$\rho_{Pr}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$q_u$ [MPa]	$E_{S,200/400}$ [MPa]	$\varphi'$ [°]	$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]
<b>Lösslehm unvergütet</b>	1,78	0,10	9/18	28,0	23
<b>Weißfeinkalk, 4 %</b>	1,70	0,25	24/39	30,4	115
<b>Zement, 4 %</b>	1,80	1,02	38/56	32,0	138
<b>Mischbinder 70/30, 4 %</b>	1,69	0,85	39/65	30,4	190

## 5. Bewertung von Sulfatreaktionen Boden-Bindemittel

Die Anwendung kalziumbasierter Bindemittel hat bei der Stabilisierung sulfathaltiger Böden immer wieder zu spektakulären Schadensfällen geführt. Einige jüngere Beispiele aus dem mitteldeutschen Raum sind in [8] beschrieben und analysiert. Sulfatträger im Boden ist meist natürlicher Gips (Calciumsulfat  $\text{Ca}[\text{SO}_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) untergeordnet aber auch Eisen(II)-sulfat als Verwitterungsprodukt von Pyrit. In Recyclingmaterialien resultiert die Sulfatbelastung meist aus Putzen, Gipsplatten, Ziegeln und Anstrichen.

Bei der Sulfatreaktion bilden sich Ettringit- und Thaumasit-Minerale im Porenraum, was zu einer Zerstörung der Bodenstruktur führen kann. Der Aufwuchs von Ettringit kann mit einer erheblichen Volumenzunahme verbunden sein, dem Quellen des Bodens in der Größenordnung bis zu 30 %. Die Treibwirkung beruht dabei auf der Volumenvergrößerung des Hydrogels. Die Ettringitnadeln in den Poren zählen zu sekundären Effekten. Thaumasit entwickelt nur einen geringen Quelldruck und wirkt daher nur wenig volumenexpansiv. Dieses Mineral mindert jedoch die Festigkeit des verbesserten Bodens, insbesondere dann, wenn es sich als Umwandlungs- oder Zerfallsprodukt aus dem Ettringit bildet.

Ettringit, chemisch  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ , ist ein komplexes Mineral, das als Reaktionsprodukt mit dem Calcium und den Aluminaten des Bodens entstehen kann. Das Mineral bildet sich im Porenraum eines mit Bindemitteln stabilisierten Bodens unter sehr begrenzten physikochemischen und hydrothermalen Bedingungen. Vereinfacht kann der Aufwuchs als Reaktion des Sulfates mit den aus dem Boden unter hohem pH-Wert freigesetzten Aluminaten und dem freien Calcium angesehen werden, das aus dem Bindemittel, aus event. vorhandenem Gips oder aus dem natürlichen Boden bereit gestellt wird. Neben dem Sulfatgehalt des Porenwassers ist somit die Verfügbarkeit bzw. ein Überschuss an Aluminaten erforderlich. Wasser wird zum einen in erheblichem Umfang für die Reaktion, zum anderen für die Lösung des Sulfates bei gipshaltigen Böden sowie für den konvektiven und diffusiven Transport des Sulfates benötigt. Als weitere Bedingungen sind ein stark basisches Milieu mit  $\text{pH} > 10,5$  zur Freisetzung der Aluminate und eine Temperatur  $T < 20^\circ\text{C}$  für die Reaktion erforderlich. Aus Laboruntersuchungen ist bekannt, dass insbesondere bei Temperaturen  $T < 15^\circ\text{C}$  Ettringit im Zuge des Alterns zu Thaumasit reagiert, wenn bei einem Sulfatüberschuss Sauerstoff zur Verfügung steht, wie das bei periodischem Entwässern und Bewässern des Bodens der Fall sein kann. Dies führt nach vorangegangenem Quellen bei einem mechanisch belasteten Boden zu einer allmählichen Festigkeitsabnahme und damit zu Eigensetzungen.

Die physikalischen und mineralogischen Zusammenhänge des Ettringitaufwuchses sind in der Betontechnologie reichlich erforscht [9]. Für die Bodenreaktionen liegen derzeit keine quantitativen Prognosemethoden und keine standardisierten Strategien der Gefahrenabwehr vor. Qualitativ lassen sich einzelnen Einflussfaktoren jedoch bewerten.

### **Mineralbestand**

Das Bindemittel, Kalk wie Zement, führt im Boden zu einer starken Erhöhung der Alkalität. Bei pH-Werten ab  $> 9$  werden Silikate und Aluminate aus dem Mineralbestand der Feinkornfraktionen des Bodens, im Wesentlichen aus der Tonfraktion  $< 2 \mu\text{m}$ , freigesetzt. Je nach Verhältnis der Silikate zu den Aluminaten begünstigt dies die Bildung von Ettringit, wenn in dem Boden ein Wasserüberschuss vorhanden ist oder

Wasser nachgeführt wird, z. B. durch Infiltration von Niederschlagswasser. Bei einem molaren Verhältnis  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 > 1$  bilden sich der Literatur zufolge primär die Monosulfate, welche zum Ettringitaufwuchs benötigt werden. Ein Silicatüberschuss begünstigt dagegen eher die Bildung von Trisulfaten bzw. Calciumsilikathydraten (CSH-Phasen), was zur Verfestigung beiträgt und die Ettringitbildung mindert. Insofern ist der Anteil und der Mineralbestand der Feinteilfraktion mit entscheidend. Tendenziell haben kaolinitische (nicht quellfähige) bindige Böden gegenüber smektitischen (quellfähigen) Böden einen größeren Bestand an Aluminaten und haben somit unter sonst gleichen Bedingungen ein höheres Potential für einen schädigenden Ettringitaufwuchs.

### **Temperatur**

Die Temperatur hat einen starken Einfluss auf die Reaktionsmechanismen. So ist zur Ettringitbildung in kaolinitischen wie in smektitischen Böden vor allem eine Bodentemperatur im Intervall von 10°C bis 20°C günstig, während darüber und darunter eher weniger treibende Minerale gebildet werden.

### **Sulfatgehalt und Porenwasser**

Der kritische Sulfatgehalt eines Bodens ist immer in Relation zu dessen Feinteil- und speziell zum Tongehalt zu sehen. In der Literatur werden sehr unterschiedliche kritische Sulfatkonzentrationen bezüglich des Quellens infolge Ettringitaufwuchs genannt. Bei geringen Tongehalten (< 10 %) ist generell mit einer nur geringen Gefährdung zu rechnen. Wegen der absolut geringen Menge an freisetzbaren Aluminaten werden mit verschiedenen Bindemitteln in solchen Böden Hebungen erst bei relativ hohen Sulfatgehalten oberhalb von > 1 % genannt [10]. Bei stark schluffigen und tonigen Böden können je nach Bindemitteldosierung und Mineralbestand der Feinteile bereits bei Sulfatgehalten > 0,3 % Quelleffekte auftreten. Bei geringeren Sulfatgehalten wurden zwar Festigkeitsverluste, jedoch kaum Quellhebungen beobachtet.

In der Praxis wird zur Beurteilung einer Gefährdung überwiegend der Sulfatgehalt des Bodens oder der des Eluats herangezogen [DIN 4030]. Für den Quellprozess maßgebend ist der Sulfatgehalt im Porenwasser, der sich u. a. aus der Löslichkeit des Sulfatträgers ergibt. Mit dem durchsickernden Wasser bilden die wasserlöslichen Teile von Gips freie Calcium-Kationen  $\text{Ca}^{2+}$  und Sulfat-Anionen  $[\text{SO}_4]^{2-}$ . Unter sonst gleichen Milieubedingungen nimmt das Quellmaß mit dem Sulfatgehalt nahezu proportional zu. Der größtmögliche Sulfatgehalt im Porenwasser gipshaltiger Böden kann stöchiometrisch abgeschätzt werden.

### **Bindemittel**

Die Frage, ob die Quellung infolge Ettringitaufwuchs eher durch Zement oder eher durch Kalk begünstigt wird, wird in der Literatur meist nicht korrekt beantwortet. Feinkörnige Böden werden vorzugsweise mit Kalk oder Mischbinder behandelt, gemischt- und grobkörnige dagegen eher mit Zement. Daraus wird häufig geschlossen, Kalk bewirke das höhere Quellpotential. Hinzu kommt, dass zementstabilisierte Böden eine höhere Festigkeit haben, so dass ein nur geringer Quelldruck eines Ettringitaufwuchses nicht zur Volumenexpansion ausreicht. Tatsächlich sind aber der Gehalt an Tonmineralen, die Porenstruktur

und das chemische Milieu maßgebend. In der Tendenz nimmt der kritische Sulfatgehalt mit zunehmendem Tonanteil des Bodens ab.

### ***Verdichtung und Überlagerungsdruck***

Die schädliche Volumenzunahme infolge Ettringitaufwuchs findet in den Poren des Bodens statt. Daher steigt das Quellrisiko mit dem erzielten Verdichtungsgrad des Bodens. Eine Verdichtung auf der nassen Seite der Proctorkurve wie auch eine sehr hohe applizierte Verdichtungsenergie im Feld führen insgesamt zu kleineren, in ihrer Größe weniger streuenden Poren. Dies begünstigt die Quellgefährdung. Dem ist allerdings entgegenzusetzen, dass sich mit der Verdichtung der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert verringert und die Kapillarspannung ansteigt, was zu einem schlechteren konvektiven Transport des Sulfates führt.

Der Überlagerungsdruck wirkt grundsätzlich dem Quellen entgegen. Bei günstigen Bedingungen für einen Ettringitaufwuchs entstehen aber sehr hohe Quelldrücke bis in die Größenordnung von mehreren Megapascal. Ein Überdrücken derart hoher Quelldrücke ist i. A. in Erdbauwerken nicht gegeben.

### ***Experimentelle Untersuchung und Bewertung***

Die grundlegende Gefährdung kann bei Kenntnis des Bodens, der Sulfatbelastung des Porenwassers und des Bindemittels auf der oben zusammengefassten empirischen Grundlage objektspezifisch in die Klassen „unkritisch“, „gering“, „mittel“ und „hoch“ eingestuft werden. In Anlehnung an die eigene Erfahrung aus Untersuchungen an der Materialforschungs- und -prüfanstalt Weimar an der Bauhaus-Universität Weimar (MFPA Weimar) und an Regelwerke anderer Ländern kann zur Ersteinschätzung die Gefährdung nach Tab. 3 klassifiziert werden. In dieser groben Einteilung sind aber immer Unsicherheiten enthalten. Einen Überblick und Vergleich derzeitiger internationaler Regelwerke und Empfehlungen findet sich in [8] und [11].

*Tab.3: Vorschlag von Gefährdungsklassen zur Ersteinschätzung*

<b>Kriterium</b>	<b>Gefährdung</b>	<b>Empfehlung</b>
Leitfähigkeit < 200 µS/cm Sulfat < 3.000 ppm (<0,3 %), Tongeh. < 10%	unkritisch	keine weiteren Untersuchungen
Sulfat 3.000 bis 5.000 ppm (0,3 – 0,5 %)	gering - mittel	Quellversuche
Sulfat > 5.000 bis 8.000 ppm (0,5 – 0,8 %)	mittel – hoch	Quellversuche
Sulfat > 8.000 ppm (> 0,8 %)	hoch	Stabilisierung kritisch

Eine erste Orientierung über den Grad der Mineralisierung gibt die elektrische Leitfähigkeit des Bodensättigungsextraktes. Zur weiteren Bewertung ist dann der Sulfatgehalt im Porenwasser oder im Boden quantitativ zu bestimmen. Eine französische Norm beschreibt eine geeignete Methode zur Schnellbestimmung des Sulfatgehaltes im Feld [12].

Bei einer mittleren bis hohen Gefährdung sollten zur verlässlichen Prognose qualifizierte Quellversuche an bindemittelbehandelten Proben und an Referenzproben sowie eine quantitative Mineralanalyse des Ausgangsbodens durchgeführt werden. Zusätzlich zum Sulfatgehalt des Porenwassers sollte der Sulfatträger (i. W. Gips) quantitativ bestimmt werden.

Zur quantitativen Ermittlung des Quellmaßes werden Freiquellversuche nach der Empfehlung Nr.11 des AK 19 der DGGT durchgeführt [13], jedoch nicht im Ödometer, sondern an Probekörpern mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Höhe von mindestens 5 cm. Die Proben werden in Zylindern eingebaut, bei Temperaturen unter 20° C in einem Wasserbad gelagert, das idealerweise den gleichen Sulfatgehalt haben sollte wie das Porenwasser. Damit wird ein Gradient in der Sulfatkonzentration vermieden. Wichtig ist, dass die in Zylinder eingebauten Proben mit dem Fuß im Wasser stehen und regelmäßig von oben mit dem Wasser beträufelt werden, so dass immer ein leichter Überstau auf der Probe vorhanden ist. Messgröße ist das Maß der axialen Hebung über der Zeit.

Wird in Freiquellversuchen eine Volumenzunahme nachgewiesen, kann der Quelldruck durch die aufwändigeren Quelldruckversuche nach [13] ermittelt werden. Zusätzlich sollten frische und gequollene Proben durch eine quantitative Mineralanalyse und REM-Aufnahmen auf Ettringit untersucht werden.

Die Bewertung der Ergebnisse und die Empfehlung eventueller Strategien zur Minderung der Gefährdung erfordert Expertenrat. Als Minderungsstrategien kommen grundsätzlich die Reduktion oder Vermeidung des Ettringitaufwuchses, dessen Beschleunigung und Vorwegnahme oder der Verzicht auf eine Bodenbehandlung mit herkömmlichen Bindemitteln in Betracht. Darüber hinaus sind auf dem Markt Spezialbindemittel mit höherer Sulfattoleranz zur Minderung des Quellpotentials verfügbar, deren Wirksamkeit aber zuvor in vergleichenden Quellversuchen am jeweiligen Boden nachgewiesen werden sollte.

Eine Vermeidung des Ettringitaufwuchses kann durch eine pH-Wert-Kompensation, besser aber durch Schutzmaßnahmen erreicht werden, welche die periodische Durchfeuchtung und Durchsickerung weitestgehend unterbinden. Steht kein Sickerwasser zur Verfügung stagniert die Reaktion. Der Verdichtungsgrad sollte in diesem Fall an der Untergrenze der Anforderung liegen, der Luftporengehalt dagegen an der Obergrenze.

Bei der gegenteiligen Strategie kann der Ettringitaufwuchs durch lose Aufhaldung des mit Kalk vorbehandelten Bodens, eventuell in Verbindung mit einer Aluminiumgabe  $[Al(OH)_3]$ , vorweggenommen werden. Ist grundsätzlich Quellpotential vorhanden und sind die Milieubedingungen günstig, findet die wesentliche Reaktion innerhalb von Wochen statt. Durch eine Beprobung können der Prozess beobachtet und der Fortschritt bewertet werden. Der Boden kann anschließend ggf. weiter mit Zement verfestigt und eingebaut werden. Bei dieser Strategie sind die eventuelle spätere Umwandlung von Ettringit in Thaumazit und der damit verbundene Festigkeitsverlust zu beachten.

## 6. Zusammenfassung

Bei der Bodenstabilisierung erfordert ein optimaler Einsatz von Bindemitteln die Kenntnis der Boden-Bindemittel-Reaktion. Zusammenfassend beeinflusst Kalk im Wesentlichen die Plastizität des Bodens, führt zu einer Aggregatbildung der Feinteile und erzeugt je nach Mineralbestand eine Erhärtung der Aggregate durch puzzolanische Reaktionen. Aus einem feinkörnigen Boden wird quasi ein gemischtkörniger, wobei es sich dann bei der Grobfraction nicht um singuläre Körner, sondern um Feinteilaggregate handelt, die langfristig versteifen. Zement dagegen wirkt überwiegend im groben Porenraum, stabilisiert die Bodenstruktur durch ein Skelett aus Zementstein. Er wirkt nicht in, sondern auf der Oberfläche der Aggregate und Partikel. Bei gemischtkörnigen und feinkörnigen Böden bietet sich an, durch Mischbinder beide Effekte zu nutzen um so bei einer relativ geringen Dosis an Bindemittel hohe Zunahmen der Strukturfestigkeit des Bodens zu erreichen.

Die Behandlung sulfathaltiger Böden mit Bindemitteln ist grundsätzlich mit einer Quellgefährdung verbunden. Dies gilt für die Bindemittel Zement, Kalk und Mischbinder in gleichem Maße. Im Porenwasser verfügbare Sulfate, wie sie durch natürlichen Gips oder in Verwitterungsprodukten des Keupers vorkommen, können unter günstigen Milieubedingungen zu einem Ettringitaufwuchs führen. Das schädigende Phänomen ist aus der Betontechnologie bekannt und weitestgehend erforscht. Zur Prognose dieser Prozesse im Boden und zur Einschätzung der Quellgefährdung ist zunächst der Sulfatgehalt des Porenwassers zu betrachten. Übersteigt diese ein kritisches Maß von ca. 3.000 ppm (0,3 %) sind zur quantitativen Beurteilung des Quellpotentials spezielle Laborversuche, bei nachgewiesenem Quellen auch eine Mineralanalyse erforderlich. Zur zusammenfassenden Bewertung der Quellgefährdung infolge von Sulfatreaktionen sind die Ergebnisse der chemischen Analysen und der Laboruntersuchungen zusammen mit den mechanischen und hydraulischen Bedingungen im Erdbauwerk zu betrachten.

## Literatur

- [1] FGSV: Merkblatt über Bodenverfestigung und Bodenverbesserung mit Bindemitteln; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln; Ausgabe 2004(FGSV 551)
- [2] WITT, K.J.: Zement-Kalk-Stabilisierung von Böden. Geotechnikseminar Weimar 2002. In Schanz, Witt (Hrsg.): Schriftenreihe Geotechnik, Heft 7, S. 1-12
- [3] CONSOLI, N., C. ET AL.: Key Parameters for Strength Control of Artificially Cemented Soils. ASCE J. Geotechn. , Geoenviron Engrg, Feb. 2007, pp 197-205
- [4] HILT, G. H. U. DAVIDSON, D. T.: Lime fixation in clayey soils, Bulletin No. 262, Highway Research Board, Washington DC, 1960, pp 99-138
- [5] BERGADO, D. T. ET AL.: Soft ground improvement in lowland and other environments. Chapter 6. ASCE Press, New York, 1996
- [6] HEILEK, M.: Verfestigung von Böden mit Bindemitteln; Systematische Auswertung regionaler Erfahrungen. Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar, Professur Grundbau, 2000
- [7] WEBER, A.: Verformungs- und Festigkeitseigenschaften von verbessertem Lösslehm. Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar, Professur Grundbau, 2001
- [8] SCHREBER, M.: Bauen von bindemittelstabilisierten Erdkörpern für Hochgeschwindigkeitstrassen der Deutschen Bahn in Gebieten mit gipshaltigen Böden. Diplomarbeit Studien-



gang Bauingenieurwesen HTWK Leipzig, 2011

- [9] STARK, J. & WICHT B.: Dauerhaftigkeit von Beton. Birkhäuser Verlag, Basel 2001
- [10] RAJASEKARAN, G: Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays. Technical note, Ocean Engineering 32 (2005) 1133-1159
- [11] HARRIS, P., SEBESTA, S. & VON HOLDT, J.: Sulfate Heave on Texas Highways: Reducing the Odds of Pavement Failure. Proc. 2nd Int. Symp. TREMTI, paper C142, Paris, 2005
- [12] NORMALISATION FRANCAISE: XP P 18-581, 10/1997: Granulats, Dosage rapide des sulfates solubles dans l'eau
- [13] PAUL, A.: Empfehlung Nr. 11 des Arbeitskreises 19 – Versuchstechnik Fels – der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V. Quellversuche an Gesteinsproben. Bautechnik 3/1986, S. 100-104