

# Zement - Kalk - Stabilisierung von Böden

Karl Josef Witt

## 1 Einführung

Den Boden in seinen Eigenschaften gezielt zu verbessern, das war schon vor 5.000 Jahren ein Ziel der damaligen Baumeister. Wir sind diesem Ziel in den letzten Jahren mit den Methoden der flächigen Stabilisierung und der Tiefenverbesserung etwas näher gekommen. Gerade heute ist unter dem Begriff der Nachhaltigkeit unserer Bauwerke besonders im Verkehrswegebau die gezielte Beeinflussung der bodenmechanischen Eigenschaften verfügbarer Böden als Baustoff gefordert.

In den Empfehlungen und Richtlinien des Verkehrswegebbaus –Straße wie Schiene - wird zwischen Verbesserung und Verfestigung unterschieden [1]. Boden-*Verbesserung* zielt auf eine Optimierung der Einbaubedingungen und der Verdichtbarkeit. Die *Verfestigung* soll die Widerstandsfähigkeit und Tragfähigkeit von Böden erhöhen. In der Praxis des Erdbaus wird der Überbegriff *Stabilisierung* verwendet, es wird dabei immer eine gewisse Verfestigung erwartet. Dieser Effekt kann aber um Größenordnungen schwanken.

Zur flächigen Stabilisierung werden Branntkalk, Kalkhydrat, Zement und Mischbinder als Bindemittel verwendet. Hauptkriterium bei der Auswahl des geeigneten Bindemittels sind meist die Korngrößenverteilung und der Wassergehalt des Bodens. Empirische Anwendungsgrenzen werden daher oft in einem Korngrößendiagramm dargestellt (Bild 1). Besser wäre es aber, zunächst die Bauaufgabe und das Ziel der Stabilisierung zu definieren und dann zu prüfen, mit welchem Mittel und auf welches Maß die jeweiligen Eigenschaften und Bodenkorngrößen verbessert werden können. Hierzu sind der verfügbare Boden mit seinen Eigenschaften und die erdstatischen Anforderungen an das Bauwerk zu betrachten.

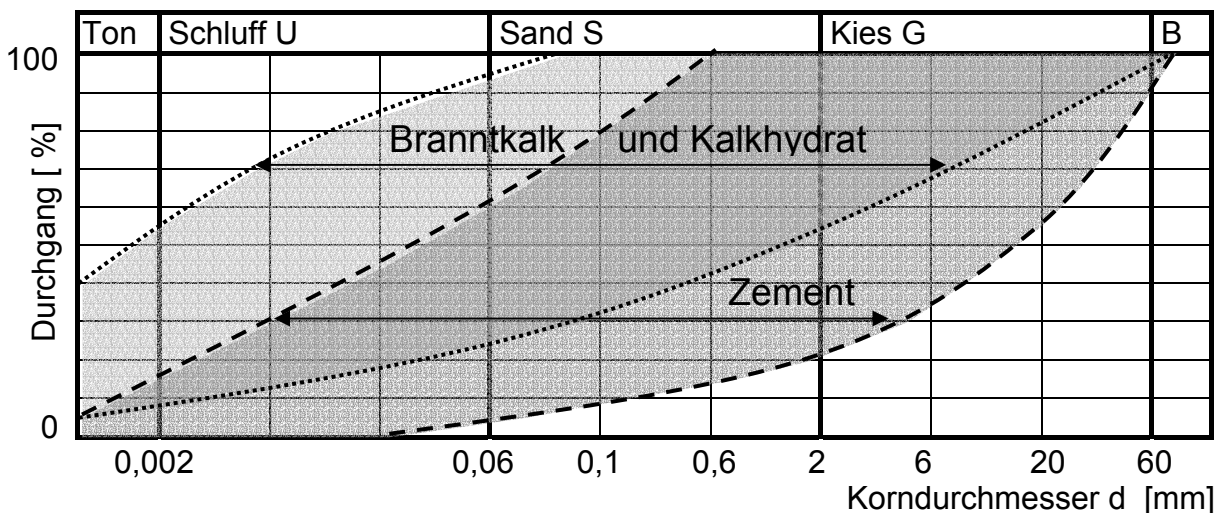


Bild 1: Empirische Anwendungsgrenzen der Bindemittel

Die Auswahl des optimalen Bindemittels und des Mischverfahrens soll sich nicht - wie praktiziert - nach Vorlieben, bauvertraglichen Zwängen oder Übertragungen aus zurückliegenden Baumaßnahmen richten. Wie bei sonstigen Baustoffen müssen zunächst die mechanischen Eigenschaften des stabilisierten Bodens, im wesentlichen die Scherfestigkeit, Steifigkeit, die Quell- oder Schrumpfeigenschaften oder die Beständigkeit definiert und festgelegt werden. Das verfügbare Ausgangsmaterial muss dann bodenmechanisch und mineralogisch untersucht und bewertet werden. Hiernach richten sich Art, Mittel und Rezeptur der Stabilisierung. Nur auf dieser Grundlage und mit diesem Verständnis lassen sich eine wirtschaftliche Planung und ein nachhaltiger Erfolg erreichen. Der Beitrag behandelt diese Grundlagen der flächigen Stabilisierung von Böden mit Bindemitteln. Die punktuelle Verbesserung von Böden mit Kalk-Zementsäulen ist nicht Inhalt dieses Beitrags. Hierzu wird auf [2] verwiesen.

## 2 Ausgangsmaterial Boden

Bei der flächigen Stabilisierung von Böden mit Bindemitteln liegt der Ausgangserdstoff als Drei-Phasen-Gemisch vor. Er besteht aus Feststoffteilchen, Porenwasser und Porenluft. Die Handhabbarkeit wie auch bodenphysikalische Eigenschaften dieser teilgesättigten Böden werden durch die Korngrößenverteilung, die Kornform, die Lagerungsdichte bzw. die Porosität, den Wassergehalt, die Saugspannung und durch die mineralogische Zusammensetzung bestimmt.

Meist werden gemischtkörnige oder feinkörnige Böden mit Bindemitteln stabilisiert, während grobkörnige mit herkömmlichen Verfahren verdichtet werden. Die Struktur des Bodens und dessen Mineralogie bestimmen wesentlich die chemischen und physikalischen Effekte einer Stabilisierung. Charakteristisch und mechanisch dominant sind daher die Schluff- und die Tonfraktion. Kenngrößen und Kriterium einer Anwendung sind neben der Korngrößenverteilung die plastischen Eigenschaften, das Wasserbindevermögen, das Quellvermögen, also jeweils Eigenschaften, die sich aus dem Aufbau der feinsten Partikel und aus den dort wirkenden Kräften und Mechanismen ergeben. Das unterschiedliche Verhalten von feinkörnigen Böden und deren spezifische Reaktionen mit den Bindemitteln erschließt sich nur über das Verständnis der Mineralogie [3, 4]. Die aus der Sedimentationsanalyse im Größenbereich bis zu 2  $\mu\text{m}$  festgestellten Partikel sind Aggregationen einzelner Tonblättchen, die je nach Mineral aus bis zu 80 Silikatschichten zusammengesetzt sind. Diese Schichten sind wiederum aus Tetraedern und Oktaedern aufgebaut. Je nach Abfolge unterscheidet man Zweischicht- und Dreischichtminerale sowie Mixed-Layers-Strukturen. Zwei- und Dreischichtminerale unterscheiden sich deutlich hinsichtlich der chemisch-physikalischen Eigenschaften, die sich wiederum in den kennzeichnenden bodenmechanischen Eigenschaften widerspiegeln. Zum einen wird dieses Verhalten durch die Bindekräfte zwischen den Schichten und Partikeln bestimmt, i. e. van der Waalskräfte, Wasserstoffbrückenkräfte und Dipol-Wechselwirkungen. Zum anderen wirkt die spezifische Oberfläche, die in der zweiten Potenz mit abnehmender Korngröße zunimmt, stark auf den Wasserhaushalt und auf das mechanische Verhalten ein. In Tabelle 1 sind für die klassischen Zwei- und Dreischichtminerale Kaolinit bzw. Montmorillonit typische bodenmechanische Kenngrößen, Strukturkennwerte sowie die Kationaustauschkapazität (KAK) gegenübergestellt. Die Streubreite lässt den großen Einfluss der Korngröße und des Mineralbestandes auf das bodenmechanische Verhalten solcher Böden erkennen.

		Kaolinit	Montmorillonit
Fließgrenze	$w_l$ [%]	70	190
Ausrollgrenze	$w_p$ [%]	30	50
Plastizität	$I_p$ [%]	40	140
Wasseraufnahme	$w_b$ [%]	60	200
Reibungswinkel	$\varphi'$ [°]	22	12
Kohäsion	$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	25	5
Schichtabstand	[nm]	0,7	1-2
Spez. Oberfläche	[m <sup>2</sup> /g]	25	600
KAK	[mmol(eq)/100g]	4	120

Tabelle 1: Mineralogisch beeinflusste Streubreite bodenphysikalischer Kenngrößen

Bei einer Änderung des Chemismus des Porenwassers und insbesondere bei der Einwirkung des Bindemittels können Austauschvorgänge der Zwischenschicht-Kationen die Wasserbindkapazität und die plastischen Eigenschaften des Bodens beeinflussen. Das Wasserbindvermögen der Tonmineralien ist maßgeblich verantwortlich für das Quell- und Schrumpfverhalten und für die plastischen Eigenschaften. Weitere Änderungen im bodenphysikalischen Verhalten können sich durch Mineralumbildungen bei der Verwitterung oder infolge mechanischer Einwirkung ergeben. Letztlich wirkt makroskopisch betrachtet im ungesättigten Boden eine Saugspannung, die je nach Wassergehalt in weiten Grenzen schwankt und einen entscheidenden Einfluss auf die Scherfestigkeit und Steifigkeit des Bodens ausübt.

All diese Prozesse kommen mit zunehmendem Feinteilgehalt des Bodens zum Tragen. Überwiegend quarzhaltige Böden wie schluffige Sande oder gar reine Sande und Kiese werden bei einer Bindemittelzugabe diesbezüglich kaum beeinflusst. Bei solchen Böden steht die Struktur und damit die Verdichtung im Vordergrund. Im Hinblick auf die Scherfestigkeit, die Steifigkeit und das Schrumpfverhalten natürlicher wie auch stabilisierter Böden ist die Verdichtung auf dem trockenen Ast der Proctorkurve in der Tendenz günstiger, während geringere Wasserdurchlässigkeiten -in Verbindung mit höheren Porenwasserdrücken- stets auf der nassen Seite des Proctorastes erreicht werden.

### 3 Wirkmechanismen der Bodenstabilisierung

#### 3.1 Boden und Zement

Zur Stabilisierung von Böden mit Zement werden überwiegend Portlandzemente eingesetzt, die zur gezielten Steuerung des Reaktionszeitpunktes auch hydrophobiert werden. Die Hauptkomponenten sind Trikalziumsilikat ( $C_3S$ ), Dikalziumsilikat ( $C_2S$ ), Trikalziumaluminat ( $C_3A$ ) und Tetraalkaliumaluminoferrit ( $C_4A$ ). In Kontakt mit dem Porenwasser findet eine rasche Hydratation dieser Komponenten statt, wobei hydratierte Kalziumsilikate, Kalziumaluminat und als Nebenkomponente Kalziumhydrat ( $Ca(OH)_2$ ) 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 dann im Boden Silikate und Aluminat aus den tonigen Partikeln bzw. aus den amorphen Ma-

terialien der Partikeloberfläche. Es finden weitere Reaktionen mit dem Kalzium statt, die zu Erhärtungsprozessen oder Strukturumbildungen der Bodenmatrix führen. Diese langsam ablaufenden Prozesse werden als puzzolanische Reaktionen zusammengefasst. Bild 2 zeigt eine Elektronenrasteraufnahme eines mit 4 % Zement vergüteten Lößlehms, 5 Tage nach Zumischen und Verdichten. Im Porenraum sind die Struktur des Skeletts aus Zementstein und die nadeligen Kristalle zu erkennen.

Die Reaktion des Zementes im Boden ist sehr komplex und unterscheidet sich insbesondere bei der Mitwirkung von Tonpartikeln von der Zementhydratation im Beton. Kennzeichnend ist eine primäre Skelettbildung im Porenraum mit einer raschen und heftigen Erhöhung der Festigkeit. Der Sekundäreffekt bewirkt eine Stabilisierung und Verkittung der Bodenkörner oder Partikelaggregate, also eine bleibende Strukturänderung, die sich nur untergeordnet auf die Deformierbarkeit und stark auf den Wasserhaushalt auswirkt. Die primäre Reaktion wird über die Zementmenge und das verfügbare Porenwasser gesteuert, die sekundäre Reaktion ist dagegen von der Mineralzusammensetzung des Bodens abhängig.

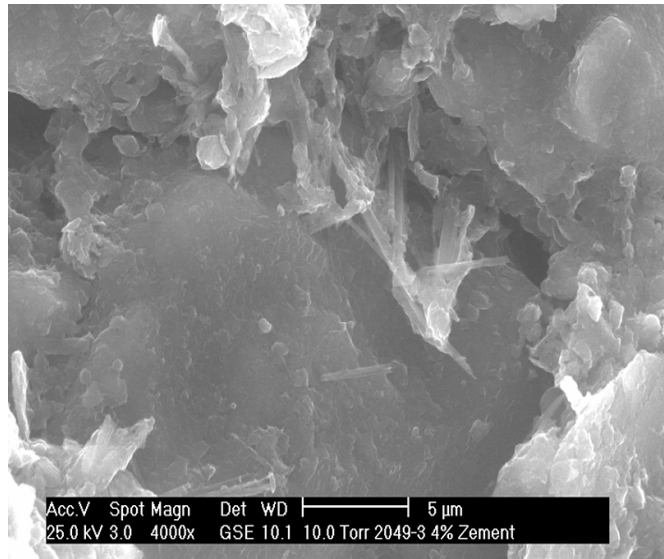


Bild 2: Bodenreaktion mit Zement, beginnendes Zementstein-Skelett im Porenraum

Die bodenmechanischen Kennwerte zementverfestigter Böden lassen sich nicht im Voraus berechnen. Für jede Anwendung sind Eignungsuntersuchungen erforderlich. Einflussfaktoren der Reaktion sind die Korngrößenverteilung und der Mineralbestand des Bodens, die Zementart und die Zementmenge, das Porenwasserdargebot, die Durchmischung, die Verdichtung und die Nachbehandlung. Tendenzielle Einflüsse werden im Folgenden aufgezeigt.

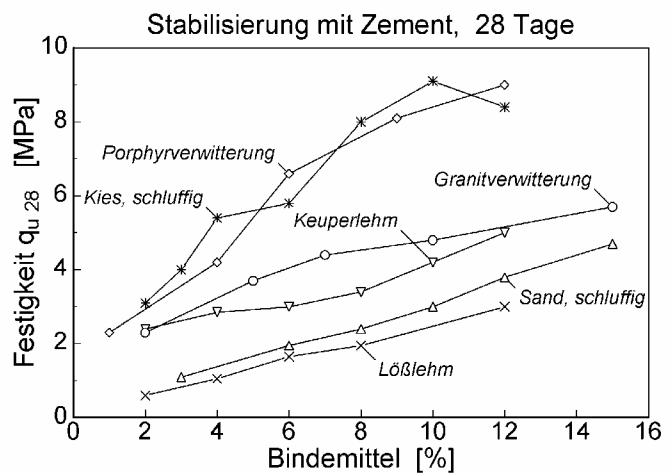


Bild 3: Zementmenge und einaxiale Druckfestigkeit

Bild 3 zeigt für ausgewählte unterschiedliche Böden den Zusammenhang zwischen einaxialer Druckfestigkeit (Zylinderdruckfestigkeit) nach 28 Tagen und der Zementmenge, bezogen auf die Trockenmasse. Ist zur Hydratation genügend Porenwasser verfügbar, steigt die Festigkeit nahezu proportional mit der Zementmenge an [5, 6]. In der Tendenz ist der Verfestigungseffekt in einer größeren Porenstruktur wie etwa in Kies oder Porphyrvwitterung stärker ausgeprägt als in einer feinporigen Struktur wie etwa in Löß oder gar Ton. Die Verdichtung ist immer festigkeitssteigernd. Generell gilt auch für die Bodenverfestigen mit Zement das

Abram'sche Gesetz, wonach der Festigkeitszuwachs unter sonst gleichen Bedingungen umgekehrt proportional zum Verhältnis Porenwasser / Zement ist. In organischen Böden wird die Zementreaktion durch die Huminsäuren behindert. Bei sulfat- (Gips) oder sulfidhaltigen (Pyrit) Böden wird die Festigkeitsentwicklung durch die Volumenzunahme während der Ettringitbildung gestört. Diese Beobachtungen werden auch in [6] bestätigt. Bildet sich das Ettringit vor der Verdichtung, wird lediglich das Bindemittel nicht optimal ausgenutzt. Nachträglicher Ettringitaufwuchs führt zu enormen Quelldrücken (bis 5 MPa) und i. A. Volumenvergrößerung und einer Zerstörung der Struktur.

Wie die 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 nichtbindigen 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 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.

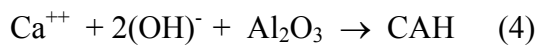
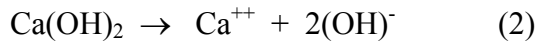
Die allgemeine Ansicht, dass sich mit Zement nur nichtbindige Böden verfestigen lassen, ist nicht richtig. Richtig ist, dass in nichtbindigen Böden wegen der größeren Härte der fixierten Körner und Kornaggregate und wegen der geringeren spezifischen Oberfläche sowohl die relative als auch die absolute Verfestigung bezogen auf die Zementmenge höher ist, als bei bindigen Böden. Eine relative Erhöhung der Festigkeit, Steifigkeit und Kohäsion lässt sich aber auch bei leicht- und mittelplastischen bindigen Böden und ebenso bei ausgeprägt plastischen Tonen erzielen. Während bei Sanden und Kiesen mit Bindemittelgaben von ca. 3 bis 5 % oft hinreichend hohe Festigkeiten erreicht werden, sind mit zunehmendem Feinstteilgehalt größere Zementmengen für den beabsichtigten Erfolg erforderlich. Bei ausgeprägt plastischen Tonen zeigen Zementgaben bis ca. 5 % nur vernachlässigbare geringe Effekte (inaktive Zone). Bei derart niedrigen Beimengungen bleibt die Bodenmatrix strukturbildend und ist mechanisch dominant. Größere Zementmengen bis ca. 20 % führen auch bei Tonen zu einer proportionalen Zunahme der Festigkeit, Steifigkeit und Kohäsion (aktive Zone). Eine weitere Erhöhung der Zementgehaltes erhöht dagegen nur noch stark unterproportional die Festigkeit (inerte Zone).

### **3.2 Boden und Kalk**

Bei der Kalk-Stabilisierung von Böden stehen die Prozesse *Entwässerung des Bodens*, *Aggregatbildung bindiger Bodenpartikel*, *Ionenaustausch* und *Puzzolanreaktionen* im Vordergrund. Als Langzeiteffekt kann auch eine Karbonatisierung auftreten. Zur Verbesserung kohäsiver Böden werden je nach gewünschtem Effekt Branntkalk -  $\text{CaO}$ , Kalkhydrat -  $\text{Ca(OH)}_2$  oder hydraulischer Kalk verwendet.

Branntkalk, auch Weißfeinkalk genannt, wird immer dann verwendet, wenn der Boden gleichzeitig entwässert werden soll. Beim Löschen wird ca. 300 g Porenwasser je kg Kalk gebunden. Einen stärkeren Einfluss auf die Entwässerung hat die Verdunstung von Poren-

wasser infolge Reaktionswärme und Belüften beim Einmischen. Als Faustformel kann davon ausgegangen werden, dass der Wassergehalt eines Bodens bei dem Einmischen des Branntkalkes um das gleiche prozentuale Maß abnimmt.



Das beim Löschen (Gl. 1) entstandene Kalziumhydroxid bzw. direkt eingemischtes Kalkhydrat dissoziiert in Wasser (Gl. 2), erhöht die Elektrolytkonzentration und den pH-Wert des Porenwassers, so dass sich  $\text{SiO}_2$  und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aus den Tonpartikeln und aus den Materialien der amorphen Oberfläche lösen. Die Effekte sind Ionenaustausch, Wasserstoffbrückenbildungen, und puzzolanische Reaktionen (Gl. 3 u. 4). Makroskopisch führt dies zu der gewünschten Verbesserung der bodenmechanischen Eigenschaften. Bild 4 zeigt eine REM-Aufnahme eines mit 4 % Kalkhydrat verbesserten Lößlehms. Es handelt sich um den gleichen Boden wie bei der in Bild 2 gezeigten Zementvergütung.

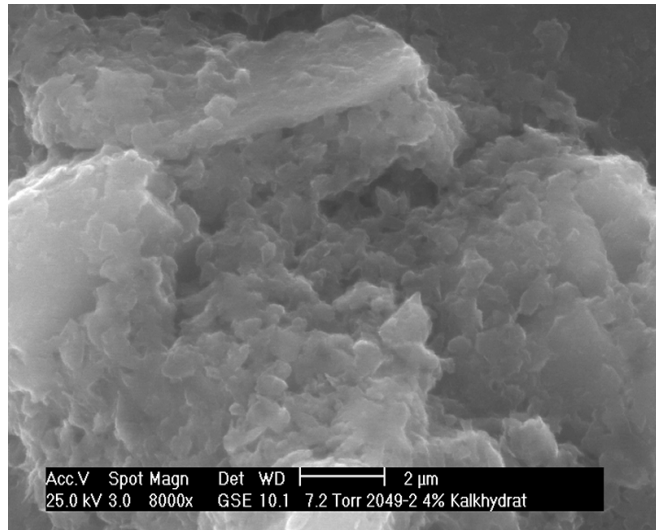


Bild 4: Bodenreaktion mit Kalkhydrat, gelartige Füllung im Porenraum

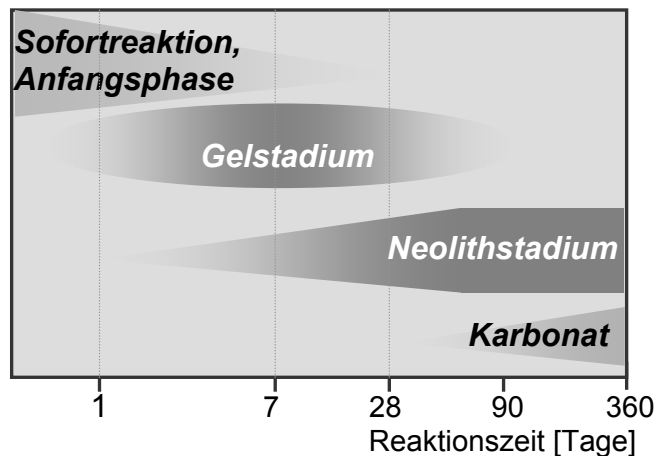


Bild 5: Zeitliche Abfolge der Reaktionsphasen

Die zeitliche Abfolge der einzelnen Effekte ist in Bild 5 dargestellt. Die Sofortreaktion ist durch die Änderung des Wasserhaushaltes, durch erhöhte Saugspannungen und durch eine Krümelbildung gekennzeichnet. Bereits in diesem Stadium setzt der Ionenaustausch ein, Natrium und andere Kationen werden durch Kalzium ersetzt. Infolge der Saugspannungen und der geänderten Partikelbindungen findet eine Strukturänderung statt: Schluff- und Tonpartikel aggregieren zu größeren Körnern. Bodenmechanisch hat dies eine Erhöhung der

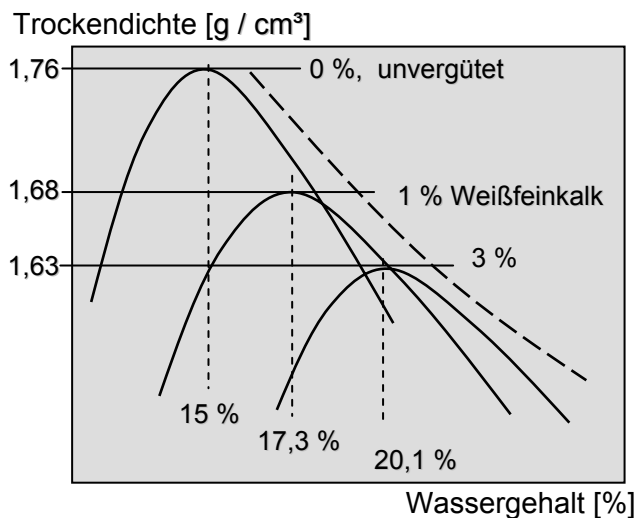


Bild 6: Verschiebung der Proctorkurve

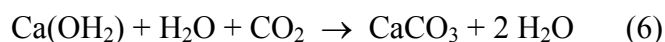
Ausrollgrenze  $w_p$ , eine Reduzierung der Plastizität  $I_p$  und damit eine Erhöhung der Konsistenzzahl  $I_C$  zur Folge. Gleichzeitig verschiebt sich die Proctorkurve eines kalkverbesserten Bodens zur nassen Seite hin, die Proctordichte nimmt ab, der optimale Wassergehalt zu, wie dies in Bild 6 schematisch für den untersuchten Lößlehm dargestellt ist. Die durch den pH-Wert bedingte anfängliche Aggregatbildung hängt in erster Linie vom Feinteilgehalt des Bodens und von der eingemischten Kalkmenge ab. Der Effekt ist bereits bei einer Kalkmenge von 2 bis 3 % erschöpft. Hilt u. Davidson [8] geben eine empirisch abgeleitete Grenze der Kalkmenge an, ab der keine weitere Erhöhung der Ausrollgrenze als Sofortreaktion zu erwarten ist. Dieser Zusammenhang wird für Kalkhydrat näherungsweise durch die Auswertung anderer Literatur bestätigt [7, 9].

$$\text{Fixierungspunkt: } M_{\text{Ca, opt}} [\%] = 0,03 \times \text{Tongehalt} [\%] + 1,25 \% \quad (5)$$

Die der Sofortreaktion folgenden Effekte des Ionenaustausches werden durch den Mineralbestand des Bodens, i. w. durch die Kationen-Austausch-Kapazität (KAK) bestimmt und setzen sich in dem Gelstadium fort. Puzzolanische Reaktionen des Kalkhydrates mit den Silikaten und Aluminaten beginnen in dem sog. Neolithstadium einige Tage nach der Hydratation und dauern 1 bis 5 Jahre an. Die Silikate oder Aluminate füllen gelartig den Porenraum, führen durch die puzzolanischen Reaktionen zu einer Zementierung oder Verkittung der Bodenpartikel und damit zu einer Erhöhung der Festigkeitseigenschaften des Bodens. Diese hydraulischen Reaktionen sind vergleichbar mit denen des Zementes, laufen aber um Größenordnungen langsamer ab. Der Erfolg hängt von der Kalkmenge und von der mineralogischen Zusammensetzung der Feinteile ab. Da die Mineralzusammensetzung i. A. nicht bekannt ist, lassen sich diese Effekte weder a priori prognostizieren noch durch Schnellversuche testen. Hierzu sind die in [1] beschriebenen Eignungsuntersuchungen erforderlich.

Findet aufgrund der mangelnden Reaktionsbereitschaft der Tonminerale keine Verfestigung statt, können hydraulische oder hochhydraulische Kalke verwendet werden. Diese enthalten bereits Bestandteile, die bei einer Reaktion mit dem Porenwasser zementähnlich erhärten und die Verkittung bewirken.

Als weiterer Langzeiteffekt wird in der Literatur die Karbonatisierung aufgeführt, die Reaktion des Kalkhydrats zu Kalziumkarbonat durch das Kohlendioxid der Bodenluft.



Diese Reaktion ist für baupraktische Zwecke eher nachteilig. Karbonatkristalle bilden sich vereinzelt ohne Verbund und führen an der Oberfläche von stabilisierten Schichten zu Entfestigungen. Bei überbauten Anwendungen ist dieser Langzeiteffekt unbedeutend, meist steht nicht genügend Bodenluft zur Verfügung.

Wie bei der Verfestigung mit Zement ist auch bei der Stabilisierung mit Kalk 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. Da die Reaktionen i. A. mit einer Volumenzunahme verbunden sind, kann es bei einer späteren Aktivierung unter zu geringem Überlagerungsdruck zu Hebungen und zu einer Zerstörung der Struktur kommen.

Bild 7 zeigt für verschiedene Böden den Einfluss der Rezeptur auf die Zylinderdruckfestigkeit (DIN 18 136) bei einer Stabilisierung mit Kalkhydrat. Die Druckfestigkeit nimmt in der Tendenz proportional mit der Bindemittelmenge zu. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Zementstabilisierung 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 bildet. Die Verfestigungseffekte sind fast ausschließlich auf die oben beschriebenen puzzolanischen Reaktionen zurückzuführen und finden in den Bodenaggregaten in Abhängigkeit des Mineralbestandes statt. Daher ist das erzielbare Ergebnis von Boden zu Boden recht unterschiedlich. Bei manchen Böden, wie z.B. Keuperlehm und Hanglehm des oberen Muschelkalkes, werden in dieser Darstellung auch typische Wellen beobachtet. Hierbei handelt es sich aber nicht um eine effektive Verringerung der Festigkeit bei steigendem Bindemittelgehalt, sondern um unterschiedliche Reaktionsgeschwindigkeiten.

Aus den in [6 u. 8] beschriebenen Langzeituntersuchungen wie auch aus eigenen Eignungsversuchen zeigt sich, dass die Reaktionen der Boden-Kalk-Stabilisierung über einen langen Zeitraum andauern. Die Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit einer Kalkstabilisierung lässt sich mit Gl. 7 beschreiben.

$$q_u(t_2) = q_u(t_1) + A^* \cdot M_{Ca} \cdot \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (7)$$

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

$A^*$  = bodenspezifische Aktivitätskonstante  
 $M_{Ca}$  = Kalkhydratbeimengung, bezogen auf Trockenmasse [%]

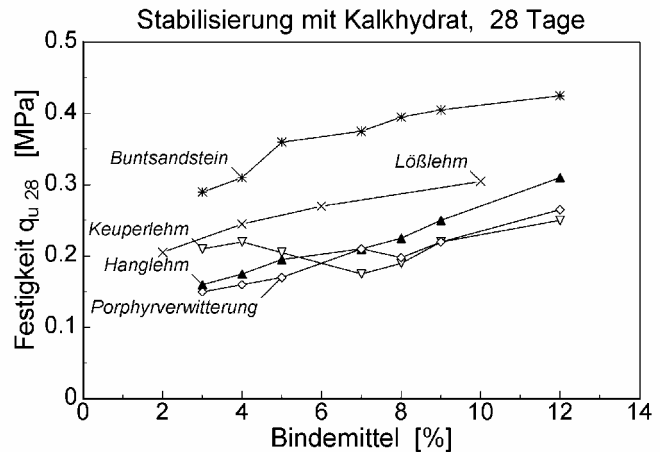


Bild 7: Kalkmenge und Druckfestigkeit

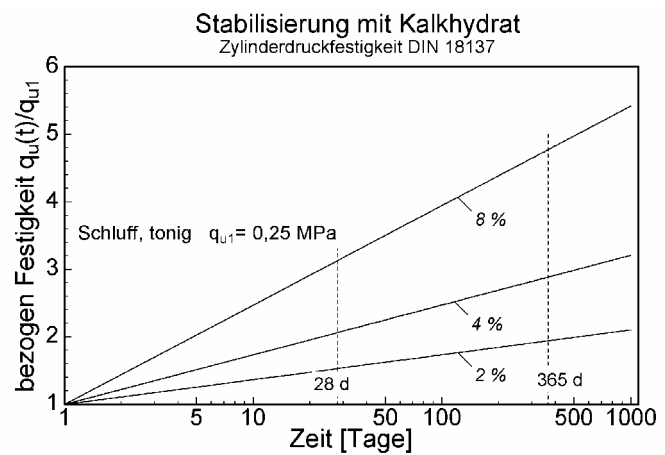


Bild 8: Stabilisierung mit Kalkhydrat, Entwicklung der Druckfestigkeit

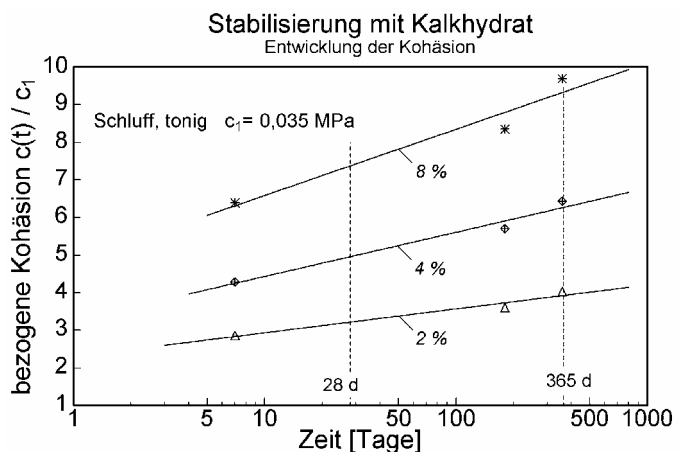


Bild 9: Stabilisierung mit Kalkhydrat, Entwicklung der Kohäsion



Der Zusammenhang kann für eine Prognose der Langzeiteffekte verwendet werden, die bodenspezifische Aktivitätskonstante  $A^*$  wird aus Eignungsversuchen, z. B. aus den Versuchen nach 7 und 28 Tagen, ermittelt. Der Wert hängt stark von der Mineralogie des Bodens ab. Weitere Einflussparameter sind die Eigenschaften des Bindmittels, die Temperatur und Lagerungsbedingungen sowie die anfängliche Verdichtung. Für einen tonigen Schluff der Bodengruppe UL-UM wurde der Zusammenhang in Bild 8 ausgewertet. Aus den Versuchsergebnissen wurde der Wert  $A^* = 0,02$  zurückgerechnet. Für einen Lößlehm ergab die Auswertung von Versuche  $A^* = 0,037$ . Bei den üblichen Kalkrezepturen des Erdbaus werden innerhalb eines Jahres gegenüber dem Ausgangszustand die 3 bis 5-fachen Zylinderdruckfestigkeiten erreicht.

Ähnliche Langzeiteffekte können auch für die Entwicklung der Kohäsion und der Steifigkeit vorausgesetzt werden. Bild 9 zeigt die zeitliche Entwicklung der in Rahmenscherversuchen ermittelten Kohäsion für einen tonigen Schluff. Versuchsergebnisse aus [9] wurden bei der Auswertung berücksichtigt. Auch bei einer Stabilisierung von fein- und gemischtkörnigen Böden mit Kalk nimmt hauptsächlich die Kohäsion zu, der Reibungswinkel wird nur wenig beeinflusst. Bei Tragfähigkeitsproblemen der Baupraxis ist dann zu prüfen, ob die Kohäsion zum benötigten Zeitpunkt hinreichen verbessert ist.

An einem Lößlehm wurde in [7] mit verschiedenen Bindemitteln auch der Einfluss der Lagerung und des Verdichtungsgrades untersucht. Erwartungsgemäß werden bei Feuchtraumlagerung der Prüfkörper die besten Ergebnisse erzielt. Mit Beginn der Wasserlagerung wird die Aushärtung kurzfristig verzögert. Dieser Effekt wird auf die Änderung des pH-Wertes im Porengefüge zurückgeführt. Die Reaktion setzt sich aber auch bei kalkstabilisierten Prüfkörpern unter Wasser fort. Bei einer Variation des Verdichtungsgrades zeigte sich generell ein spröderes Bruchverhalten bei höheren Dichten. Während bei hydraulischen Bindemitteln ein deutlicher Anstieg der Druckfestigkeit mit dem Verdichtungsgrad gemessen wurde, zeigte sich bei den mit Kalk verbesserten Prüfkörper im untersuchten Bereich zwischen  $D_{Pr} = 95\%$  bis  $100\%$  kein signifikanter Einfluss des Verdichtungsgrades auf die Bruchfestigkeit. Weitere Ergebnisse dieser vergleichenden Untersuchung werden unten behandelt.

#### 4 Optimierung der Rezeptur

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 bildet sich mit Beginn der Erstarrung ein Zementsteinskelett, das mechanisch dominant ist. Nachteilig ist der hohe Zementbedarf bei feinkörnigen, hochplastischen Böden. Als Faustformel der Rezeptur für eine Verfestigung mit Zement werden in Tabelle 2 Erfahrungswerte angegeben. Mit hydrophobiertem Zement wird nach eigener Erfahrung die Kapazität der möglichen Stabilisierung besser genutzt.

GW - SW - GE - SE - GU - SU - GU* - SU* - UL - UM - TL - TM - TA
2 % → 4 % → 6 % → 8 % → > 15%

*Tabelle 2: Erfahrungswerte für Zementmengen zur Stabilisierung von Böden*

Beispielhafte Anwendungen einer Zementstabilisierung sind Tragschichten, von denen eine lastverteilende Wirkung oder eine geringe Zusammendrückung erwartet wird und Frostschutzschichten, deren Widerstandsfähigkeit erhöht werden soll. Zur Erhöhung der Scherfestigkeit ist eine Zementstabilisierung nur dann angeraten, wenn eine rasche Wirkung benötigt wird.

Steht die Bearbeitbarkeit des bindigen Bodens z.B. als Dammschüttmaterial oder zur Hinterfüllung von Widerlagern als Bauaufgabe an, ist i. a. eine moderate Erhöhung der Parameter Steifigkeit, Kohäsion und Widerstand gegen Witterungseinflüsse ausreichend. In diesem Fall ist eine Stabilisierung mit Weißfeinkalk (falls der Boden zu nass) oder mit Kalkhydrat zu empfehlen. Als Effekt bilden die Bodenpartikel Aggregate, die sich im Laufe der Zeit verfestigen und so die mechanischen Eigenschaften des Bodens bestimmen. Erfahrungswerte für Rezepturen sind in Tabelle 3 angegeben. Alle Angaben zur Rezeptur sind als Orientierung anzusehen und ersetzen nicht eine Eignungsprüfung nach [10 bzw. 11].

Verbesserung fein- und gemischtkörniger Böden	$w > w_{Pr}$	Weißfeinkalk	2 bis 3 %
	$w \leq w_{Pr}$	Kalkhydrat	2 bis 3 %
Verfestigung fein- und gemischtkörniger Böden	$w > w_{Pr}$	Weißfeinkalk	4 bis 8 %
	$w \leq w_{Pr}$	Kalkhydrat	4 bis 8 %
Verfestigung grob- und gemischtkörniger Böden	4 bis 12 %	hochhydraulischer Kalk	

Tabelle 3: Erfahrungswerte für Kalkmengen zur Stabilisierung von Böden

Mit Mischbindern, auf den Boden und die Bauaufgabe abgestimmte Mischungen aus Kalk und Zement, können die Vorteile beider Bindemittel genutzt werden. Der Zementstein stärkt rasch das Porengefüge durch ein Tragskelett. Der Kalk reduziert die Plastizität und bildet Partikelaggregate, die sich mit der Zeit verfestigen. In Anlehnung an [10] ist in Bild 10 ein Modell zur Erläuterung dieser synergetischen Wirkungsweise dargestellt. Bodenaggregate und Tragskelett wirken im Verbund, wenn die Eigenschaften der beiden Strukturkomponenten Bodenaggregate und Skelett hinsichtlich Trag- und Verformungsverhalten abgestimmt sind. Der Vorteil liegt im geringeren Bindemittelbedarf. Erfahrungswerte für optimale Mischungen sind in Tabelle 4 angegeben.

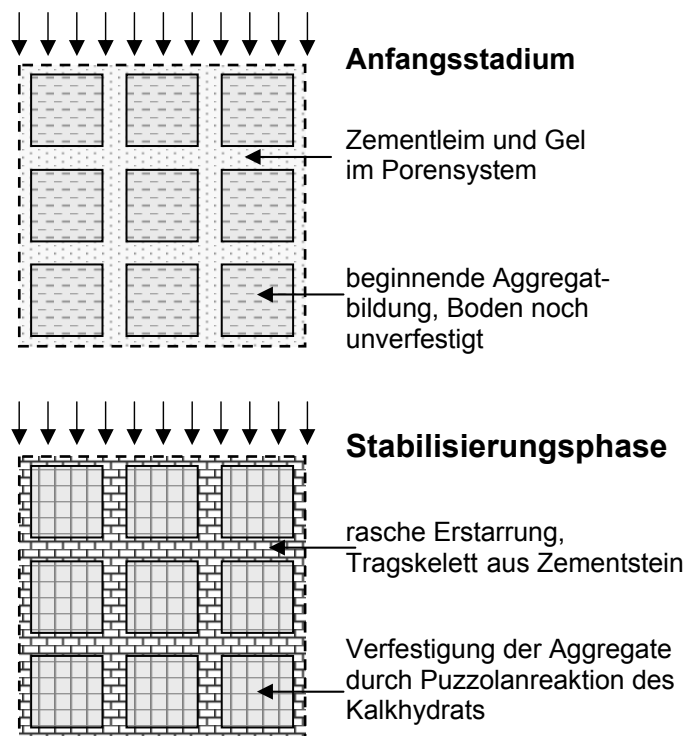


Bild 10: Modell zur synergetischen Wirkungsweise von Mischbindern

GE - SE - GW - SW - GU - SU - GU* - SU* - UL - TL - UM - TM - UA - TA											
Kalk/Zement	0/100	→	20/80	→	30/70	→	40/60	→	50/50	→	70/30
Menge 2% - 6% , je nach Ziel der Stabilisierung											

Tabelle 4: Erfahrungswerte zur Stabilisierung mit Mischbinder

In Tabelle 5 sind beispielhaft für einen Lößlehm der Bodengruppe TL Ergebnisse einer Untersuchung mit verschiedenen Bindemitteln gegenübergestellt. 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 Belastungsstufen von 200 und 400 kPa angegeben.

	$\rho_{Pr}$ [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 30/70, 4 %</b>	1,69	0,85	39/65	30,4	190

Tabelle 5: Stabilisierung eines Lößlehms mit verschiedenen Bindemitteln,  $D_{Pr} = 97\%$ , 28d

Erwartungsgemäß wurde mit Zement gegenüber der Stabilisierung mit Kalk eine deutlich höhere Druckfestigkeit erreicht. Bei den Parametern Kohäsion und Steifigkeit, den für Tragfähigkeits- und Verformungsnachweise relevanten Parametern, ist der Verbesserungseffekt des Zementes dem des Kalkes zwar immer noch überlegen, jedoch nicht so klar wie bei der Zylinderdruckfestigkeit. Mit einem Mischbinder 70/30 (Kalk/Zement) wurden an diesem Boden die besten Ergebnisse erzielt. Der in Tabelle 5 dargestellte Verbesserungseffekt der einzelnen Parameter wurde in der Tendenz für die untersuchte Spannweite der Bindemittelgabe von 2 % und 6 % bestätigt.

Diese Effekte lassen sich mit den oben beschriebenen Reaktionsmechanismen und dem in Bild 10 dargestellten Modell erklären. Eine quantitative Übertragung auf andere Böden ist jedoch nicht möglich. Bei der Anwendung von Mischbindern gilt wie bei der Kalkstabilisierung, dass der Erfolg entscheidend von dem Mineralbestand des Bodens abhängt. Darüber hinaus lautet die Bauaufgabe nicht, eine möglichst hohe Verbesserung der Bodenkenngrößen zu erreichen. Vielmehr sollen verfügbare Böden parameterspezifisch so konditioniert werden, dass die Anforderungen an Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit in allen Bau- und Betriebsphasen des Erdbauwerkes sichergestellt sind. Dies erfordert neben der Kenntnis der Böden und deren Verhalten die Definition der Bauaufgabe unter Berücksichtigung aller baubetrieblicher Zwangspunkte. Technisch und wirtschaftlich lassen sich im bodenmechanischen Labor für nahezu alle Böden optimale Rezepturen - Bindemittel und Mengen - finden, wenn die erforderliche Zeit in den Projektablauf eingeplant wird. Unsere laufende Forschung zielt auf die beiden derzeitigen Hauptdefizite, auf eine Verbesserung der Vorhersage der Eigenschaften unter Berücksichtigung des Mineralbestandes und auf eine Beschleunigung der Eignungsuntersuchungen durch unterstützende zerstörungsfreie Schnelltests.

## 5 Literatur

- [1] FGSV: Merkblatt für Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. Köln, 1997
- [2] Scholz-Solbach, K : Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen tiefgründiger Bodenverbesserungen mit Kalk-Zementsäulen. In Schanz, Witt (Hrsg.): Schriftenreihe Geotechnik, Heft 7, 2002
- [3] Hartge, K. H. u. Horn, R.: Einführung in die Bodenphysik. 3. Aufl. 1999. Spektrum Akademischer Verlag Thieme, Stuttgart Enke, 1999
- [4] Hiltmann, W. u. Stribny, B.: Tonmineralogie und Bodenphysik. Springer Verlag, Berlin, 1998
- [5] Heilek, M.: Verfestigung von Böden mit Bindemitteln; Systematische Auswertung regionaler Erfahrungen. Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar, Professur Grundbau, 2000
- [6] Bergado, D. T. et al.: Soft ground improvement in lowland and other environments. Chapter 6. ASCE Press, New York, 1996
- [7] Weber, A.: Verformungs- und Festigkeitseigenschaften von verbessertem Lößlehm. Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar, Professur Grundbau, 2001
- [8] Hilt, G. H. u. Davidson, D. T.: Lime fixation in clayey soils, Bulletin No. 262, Highway Research Board, Washington DC, 1960, pp 99-138
- [9] Jessberger et al.: Verfestigung und Verbesserung feinkörniger Böden mit Kalk im Ingenieurbau. Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau TIS 7 (1988), S. 380- 384
- [10] FGSV: TP BF-StB, Teil B 11.1, Eignungsprüfungen bei Bodenverfestigungen mit Zement, Technische Prüfvorschriften, 1986
- [11] FGSV: TP BF-StB, Teil B 11.5, Eignungsprüfungen bei Bodenverbesserungen und Bodenverfestigungen mit Feinkalk und Kalkhydrat, Technische Prüfvorschriften, 1991
- [12] Saitoh, S. et al.: Hardening of soil improvement by deep mixing method, Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Helsinki, 1985, pp. 947-950

### Zitat des Beitrags

**Witt, K.J., 2002:** Zement-Kalk-Stabilisierung von Böden. Geotechnikseminar Weimar 2002, In Schanz, Witt (Hrsg.): Schriftenreihe Geotechnik, Heft 7, S. 1 – 12. Bauhaus-Universität Weimar Universitätsverlag,

### Anschrift des Verfassers

Univ. Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt  
Professur Grundbau  
Bauhaus-Universität Weimar  
Coudraystr. 11c  
99425 Weimar  
email: kj.witt@uni-weimar.de