

Dosis-Effekt-Beziehung bei der Bodenbehandlung mit Mischbindemitteln

Prof. Dr.-Ing. K. J. Witt & Dr. rer. nat. A. Damaschke

1 Einführung

Im modernen Erdbau leistet die gezielte Verwertung und effektive Bewirtschaftung von natürlichen Böden einen erheblichen Beitrag zur Ressourcenschonung und zur Energieeffizienz von Baumaßnahmen. Zur parameterspezifischen Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften von Böden, die im natürlichen Zustand als ungeeignet gelten, werden Bindemittel beigemischt. Dabei kommen Weißfeinkalk, Kalkhydrat, Zement oder Flugasche sowie Mischungen aus diesen Komponenten zum Einsatz. Je nach angestrebtem Effekt unterscheiden die Regelwerke der FGSV eine Verbesserung und eine Verfestigung von Böden [1]. Die zweckmäßige Dosis an Bindemittel wird dabei anhand von Festigkeitskriterien in Eignungsuntersuchungen im Labor ermittelt.

Empirische Anwendungsregeln ordnen grobkörnigen Böden hydraulische Bindemittel zu, vorzugsweise Zement. Diese Art der Behandlung zielt auf eine Bodenverfestigung, eine gezielte Steigerung der Steifigkeit, Bruch- und Scherfestigkeit sowie der Frostsicherheit. Für gemischt- und feinkörnige Böden wird dagegen Weißfeinkalk oder Kalkhydrat empfohlen. Hierbei steht eine Verbesserung der Handhabbarkeit und Verdichtbarkeit als Ziel im Vordergrund. Die unterschiedlichen Wirkmechanismen dieser Bindemittel im Boden sind qualitativ bekannt [2]. Da sich die Effekte quantitativ nicht zuverlässig prognostizieren lassen, wird die optimale Rezeptur anwendungsspezifisch in Eignungsprüfungen ermittelt, deren Durchführung in Technischen Prüfvorschriften für beide Gruppen von Bindemitteln beschrieben und geregelt ist [3, 4].

Bei Erdbaumaßnahmen des Verkehrswegebbaus werden in zunehmendem Maße Mischbindemittel aus Kalk und Zement eingesetzt, um die verschiedenen Reaktionen und Effekte synergetisch zu aktivieren. Das Mischungsverhältnis der Komponenten richtet sich nach der Korngrößenverteilung und nach den plastischen Eigenschaften des Bodens. In erster Näherung werden die in Tabelle 1 aufgeführten Mischungsverhältnisse den Bodengruppen zugeordnet, wobei die kalkdominierten Mischungen auf eine Verbesserung der Verdichtungseigenschaften des Bodens, die zementdominierten dagegen vorwiegend auf eine Verfestigung und Erhöhung der Frostbeständigkeit zielen. Ein Merkblatt der FGSV zur Anwendung von Mischbindern ist in 2012 erschienen [5]. Vorschriften zur Durchführung zweckmäßiger Eignungsuntersuchungen für die Applikation von Mischbindern sind in der Erprobung.

Tab. 1: Erfahrungswerte des Massenverhältnisses von Mischbindemitteln [2]

Bodengruppe	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 Behandlung										

Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, BASt, wurde an der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar, MFPA-Weimar, ein Forschungsprojekt zur Untersuchung der Eignung von Mischbindemitteln für Bodenverfestigungen durchgeführt [6]. Eines der Ziele dieses Projektes war die fachliche Begründung von zweckmäßigen Prüfverfahren bei Bodenverfestigungen mit Mischbindemitteln, die in den neuen TP BF-StB Teil B 11.1 (2012) „Eignungsprüfung bei Bodenverfestigungen mit Bindemitteln“ mit Berücksichtigung finden sollten. Neben der Qualität der eingesetzten Mischbindemittel (Verhältnis Kalk/Zement) war die zentrale Frage, welche Prüfverfahren und Bewertungskriterien für die Eignungsprüfung bei Bodenverfestigungen mit Mischbindemitteln angemessen sind.

Dieser Beitrag greift einige Ergebnisse dieser Untersuchungen auf, erläutert damit die Dosis-Effekt-Beziehung der Komponenten und Mischungen in unterschiedlichen Bodengruppen. Er versucht, die Möglichkeiten und Grenzen einer Bodenverfestigung mit den gängigen Mischbindemitteln auf der Basis von Kalk und Zement zu analysieren.

2 Wirkungsmechanismen und Effekte von Bindemitteln

Als Bindemittel werden heute überwiegend Zemente, hydraulische Boden- und Tragschichtbinder, Baukalke (Weißfeinkalk oder Kalkhydrat) sowie Mischbindemittel, eine Kombination aus hydraulischen Bindemitteln und Baukalen, verwendet. In der Wirkungsweise der Bindemittel im und mit dem Boden und somit auch in den erzielbaren Effekten bestehen grundlegende Unterschiede zwischen zementdominanten und den kalkdominanten Bindemitteln. Tabelle 2 gibt hierzu eine grobe Übersicht.

Tab. 2: Reaktionen und Effekte einer Bodenbehandlung mit unterschiedlichen Bindemitteln [6]

	Zement	hydraulische Boden- und Tragschichtbinder	Baukalke	Mischbindemittel
Boden	Sand, Kies	Sand, Kies, Recyclingbaustoffe	Schluff, Ton	fein- und gemischt-körnige Böden
Wirkung	Sofortreaktion: Hydratation an der Luft und unter Wasser, große Steigerung der Festigkeiten	Sofortreaktion: Hydratation an der Luft und unter Wasser, große Steigerung der Festigkeiten	Sofortreaktion: Verringerung des Wassergehaltes, geringe Steigerung der Festigkeiten Langzeitreaktion: Karbonatisierung und Puzzolan-Reaktion der Tonminerale mit Festigkeitszunahme	Sofortreaktion: Verringerung des Wassergehaltes und Steigerung der Festigkeiten

Die Wirkungsweise des Weißfeinkalkes besteht in der unmittelbaren Verringerung des Wassergehaltes und in der Erhöhung des pH-Wertes eines Bodens. Infolge erhöhter Kapillarspannungen und geänderter Partikelbindung findet eine Strukturänderung der feinkörnigen Bodenmatrix statt, die sogenannte Krümelbildung. Bei einer Behandlung mit Kalkhydrat entfällt lediglich die Wassergehaltsreduktion, ansonsten handelt es sich um die gleichen Folgereaktionen. Das im Porenwasser dissoziierte Kalkhydrat und der erhöhte pH-Wert fördern Ionenaustausch, Wasserstoffbrückenbildungen und puzzolanische Reaktionen. Bodenmechanisch hat dies unmittelbar 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 bindigen Bodens zur nassen Seite hin. Für einen

ansonsten zu feuchten oder zu weichen bindigen Böden verbessert sich die Verdichtungsfähigkeit. Als Langzeiteffekt einer Kalkbehandlung kann in solchen Böden eine moderate aber stetige Zunahme der Steifigkeit, der Druckfestigkeit und der Kohäsion aufgrund von Puzzolanreaktionen erwartet werden. Bodenphysikalische Ursache ist eine Erhöhung der Granulatfestigkeit, weniger eine Fixierung der Aggregate in der Bodenstruktur.

Die für die Praxis der Bodenbehandlung relevanten physikochemischen Effekte einer Kalkbehandlung finden inner- und intergranular statt. Wesentlicher Einflussfaktor ist von Seiten des Bodens der Mineralbestand. Kalk ist als Bindemittel daher nur dann zielführend, wenn quantitativ und qualitativ ausreichend Tonminerale als Reaktionspartner zur Verfügung stehen. In bindigen Böden kann dies vorausgesetzt werden, in gemischtkörnigen sind die Effekte auf die bindigen Anteile des Gemisches begrenzt. In nichtbindigen Sedimentböden oder in grobklastischer Felsverwitterung kann das Potential von Kalk dagegen nicht aktiviert werden. Derartige Böden haben bereits eine hohe Granulatfestigkeit.

Bei einer Bodenbehandlung mit Zement findet im Kontakt mit dem Porenwasser eine rasche Hydratation statt, wobei hydratisierte Kalziumsilikate, Kalziumaluminat und als Nebenkomponente Kalziumhydrat entstehen. Die ersten beiden Produkte bilden im Porenraum eine skelettartige Zementsteinmatrix, welche die Bodenpartikel bzw. aggregierten Feinteile fixiert. Auch während der Hydratation des Zementes steigt der pH-Wert des Porenwassers stark an. Als sekundärer Effekt lösen sich im Boden Silikate und Aluminate aus der tonigen Matrix und aus der amorphen Partikeloberfläche. 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 auf den Wasserhaushalt auswirkt. Die primäre Reaktion wird durch das Porenwasser und durch das Verhältnis des hydratisierten Zementes zum Porenvolumen gesteuert. Da die Reaktionen im Wesentlichen auf den Porenraum begrenzt sind, haben neben der Dosis die Granulatfestigkeit und die Verdichtung des Bodens einen starken Einfluss auf den Festigkeitszuwachs.

Bei einer Applikation von Mischbindemitteln kann sich der Effekt einer Verbesserung oder Verfestigung von Böden synergetisch aus den unterschiedlichen Reaktionsmechanismen der beiden Bindemittelarten mit der Bodenstruktur ergeben. Die Aggregation und Festigkeitserhöhung der Feinteilmatrix wird durch die Kalkreaktion gefördert. In einem feinkörnigen oder feinteilreichen gemischtkörnigen Boden bildet sich dabei bodenphysikalisch eine bimodale Porenstruktur mit Grobporen im Größenbereich von ca. 10 bis 50 μm (sog. Inter-Aggregatporen) und Mittel- bis Feinporen innerhalb der Aggregate, die im Größenbereich $< 1 \mu\text{m}$ liegen (Intra-Aggregatporen). Die Zementreaktion erzeugt dann mit Beginn der Erstarrung ein Zementskelett in den Grobporen, eine Fixierung der Aggregate. Da der Anteil, die Plastizität und die Mineralogie der Feinteile von Boden zu Boden ebenso stark schwankt wie die Aggregation und die Porenstruktur des aufbereiteten und verdichtenden Boden-Bindemittel-Gemisches, lässt sich der Verbesserungs- und Verfestigungserfolg nur qualitativ prognostizieren und muss wie für die getrennte Bindemittelgabe auch bei einer Applikation von Mischbindemitteln durch Eignungsuntersuchungen getestet werden. Die Abgrenzung geeigneter Versuchsmethoden war wesentlicher Inhalt des oben aufgeführten Forschungsprojektes.

3 Experimentelle Untersuchungen

Die Reaktionsmechanismen und Effekte der Mischbindemittel wurden exemplarisch an einem gemischtkörnigen und einem feinkörnigen Boden untersucht. Als Vertreter der gemischtkörnigen Böden wurde ein weitgestufter schluffiger, stark kiesiger Sand ausgewählt, der hinsichtlich der Bodengruppe im Grenzbereich GU/SU einzustufen ist (als GU klassifiziert). Dieser Boden ist durch eine Struktur aus Sand und Kies gekennzeichnet, in die der Schluff- und Tonanteil eingebettet ist. Die Feinteile sind mechanisch nicht dominant. Der Vertreter der feinkörnigen Böden war ein toniger, feinsandiger Schluff der Bodengruppe TL. Die Korngrößenverteilungen, die plastischen Eigenschaften (bei GU bezogen auf die Feinteile) und die Verdichtungskennwerte sowie die einaxiale Druckfestigkeit q_u der mit $D_{Pr} = 100\%$ verdichteten Proben sind Abb. 1 zu entnehmen.

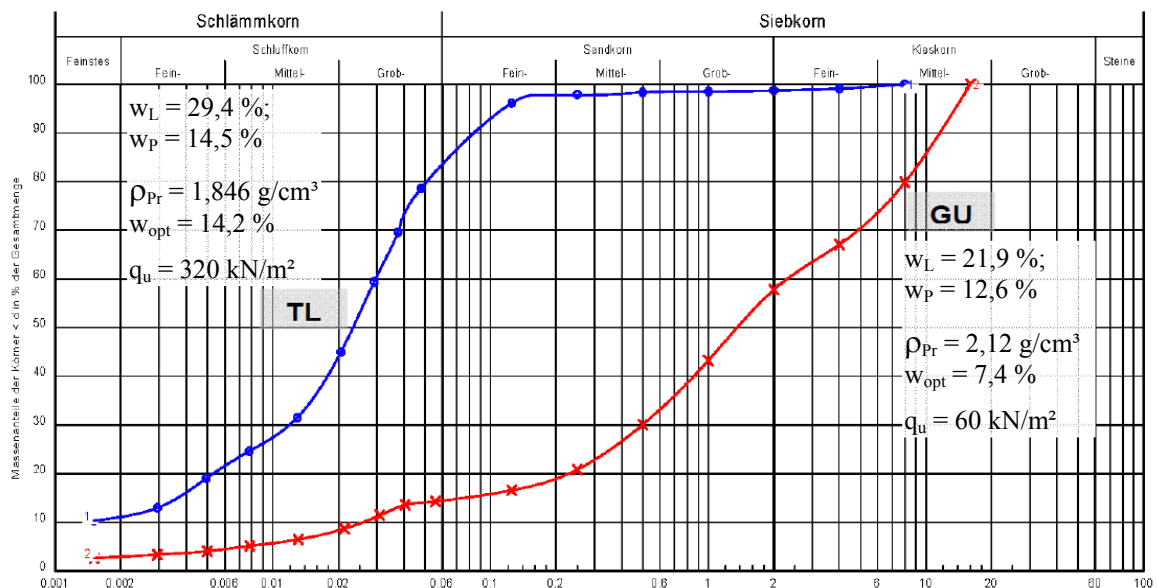


Abb. 1: Korngrößenverteilung und Charakterisierung der untersuchten Böden GU und TL [6]

Als Bindemittel wurde ein Portlandzement CEM I 32,5 R der Dornburger Zement GmbH und Co. KG sowie ein Weißfeinkalk CL 90 Q der Fels-Werke GmbH (Harz-Kalk) verwendet. Für die Herstellung der Mischbindemittel wurden der Kalk und der Zement in den Massenverhältnissen (Kalk/Zement) 70/30, 50/50, 30/70 gemischt. Zum Vergleich wurden Proben mit reinem Kalk (100/0) und reinem Zement (0/100) aufbereitet und untersucht. Die Bindemittel wurden in den Dosierungen 4%, 7% und 10% bezogen auf die Trockenmasse den Böden beigemischt. Aus den Boden-Bindemittel-Gemischen wurden nach der Reaktionszeit von 4 h (reiner Kalk 6 h; reiner Zement 1h) bei dem jeweiligen optimalen Wassergehalt Probekörper mit einfacher Proctordichte $D_{Pr} = 100\%$ hergestellt. Die Proben wurden nach der jeweiligen Prüfvorschrift gelagert.

An jeweils 3 Proben wurde nach 28 Tagen Wasser/Feuchtraumlagerung die Einaxiale Druckfestigkeit nach DIN 18136 ermittelt. Gesonderte Proben wurden zuvor einer Frostprüfung unterzogen (12 Frost/Tau Zyklen).

Während der Feuchtraumlagerung wurden an ausgewählten Proben regelmäßig Ultraschallmessungen durchgeführt. Für jedes Boden-Bindemittel-Gemisch wurden die gemessenen Wellengeschwindigkeiten im Verlauf der Aushärtung ermittelt. Der Zusammenhang zwischen der Wellengeschwindigkeit

und der Einaxialen Druckfestigkeit (Bruchspannung) wurde durch Kalibrierung hergestellt. Mit dieser Technik ist es möglich, bereits nach wenigen Tagen Lagerung eine zuverlässige Prognose der Festigkeitsentwicklung zu geben.

4 Dosis-Effekte-Beziehung der Boden-Bindemittelgemische

Erwartungsgemäß führt eine Beimischung von Kalk dosisabhängig zu einer Erhöhung des optimalen Wassergehaltes und bewirkt eine geringere Proctordichte. Die Proctorkurve verlagert sich durch die Kalkgabe nahezu proportional zur applizierten Dosis in Richtung eines Bodens mit erhöhter Plastizität. So ergibt die Dosis von 10% CL90 einen Anstieg des optimalen Wassergehaltes von ca. $\Delta w = 5\%$ (GU) bzw. 7% (TL). Mit der applizierten Kalkdosis verbessert sich so die Verarbeitbarkeit und Verdichtbarkeit beider Böden. Der damit verbundenen Verringerung der Proctordichte steht eine proportional erhöhte Porosität gegenüber, die bei einer 10% Kalkdosis bei beiden Böden nahezu $\Delta n = 10\%$ beträgt. Bodenphysikalisch ist das mit der geänderten Struktur, i. W. durch den erhöhten Anteil der intergranularen Makroporen zu erklären. Der Anteil des Zementes hat auf die Proctordichte wie auch auf den optimalen Wassergehalt nur einen geringen Einfluss. Die Änderung der Proctorwerte der mit Mischbindemitteln behandelten Böden wird fast ausschließlich von der absoluten Kalkdosis bestimmt.

Der Effekt der applizierten Dosis Bindemittel auf die einaxiale Druckfestigkeit der 28 Tage alten Prüfkörper $q_{u,28d}$, ist in den Abb. 2 (GU) und Abb. 3 (TL) für die beiden Bindemittel und die getesteten Mischungen dargestellt. Das obere Diagramm zeigt jeweils die Ergebnisse nach Feuchtraumlagerung der Prüfkörper, das untere Diagramm dagegen die Druckfestigkeit von Prüfkörpern, die 12 Frost-Tau-Zyklen ausgesetzt wurden. Die unbehandelten und mit reinem Kalk behandelten Prüfkörper wurden überwiegend durch die Frostbeanspruchung so stark zerstört, dass sie anschließend nicht getestet werden konnten.

Die Diagramme zeigen zwei grundlegende Dosis-Effekte: (i) die Druck-

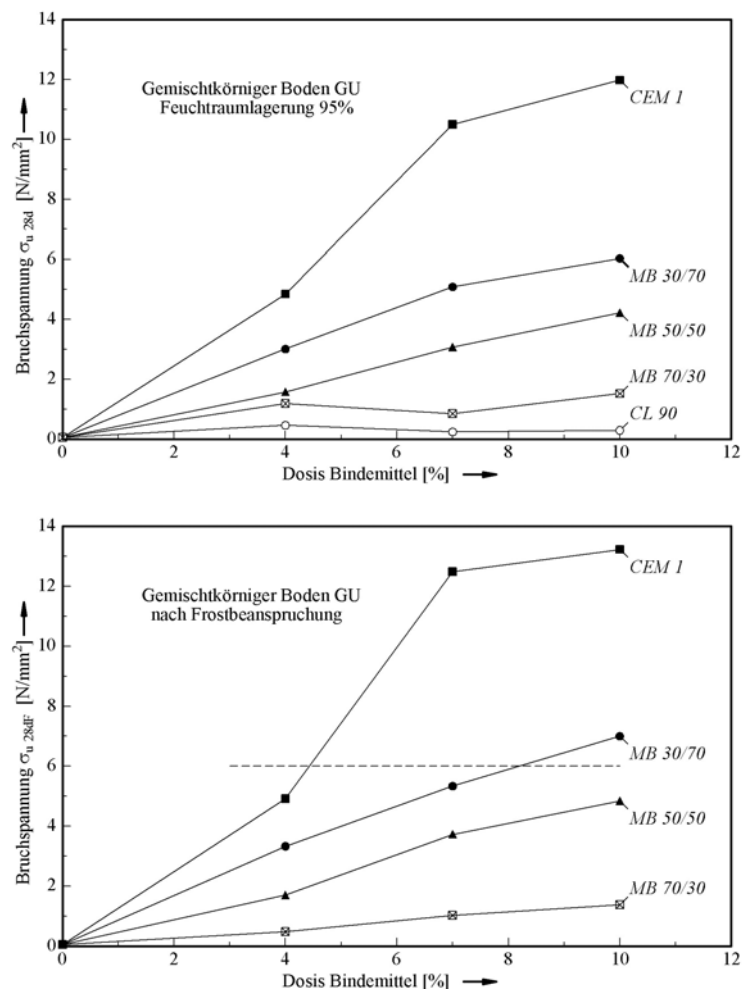


Abb. 2: Einaxiale Druckfestigkeit $q_{u,28d}$ in Abhängigkeit der Bindemitteldosis, gemischtkörniger Boden GU. Oben Feuchtraumlagerung, unten nach Frostbeanspruchung

festigkeit steigt bei jedem der untersuchten Bindemittel nahezu proportional mit der Dosis an und (ii) die Erhöhung der Festigkeit wird im Wesentlichen durch den Massenanteil des Zementes gesteuert.

Bei dem gemischtkörnigen GU-Boden bewirkt eine reine Kalkgabe selbst bei hoher Dosis keinen Verfestigungseffekt. Bereits ein geringer Zementanteil im Bindemittel (MB 70/30) bewirkt dagegen einen deutlichen Festigkeitszuwachs. Ab einem Zementanteil von 50% (MB 50/50) werden sehr hohe Druckfestigkeiten erzeugt. Das Kriterium einer Bodenverfestigung mit hydraulischen Bindemitteln nach ZTVE-StB 09, Abschnitt 12.4.2.1 ($q_{u,28d} \geq 6 \text{ N/mm}^2$, $\Delta L \leq 1 \%$), wird in diesem Boden mit reinem Zement und mit dem Mischbindemittel 30/70 erreicht. Bezogen auf den Zementanteil erfordert die Erfüllung dieses Kriterium einen Anteil von ca. 60% Zement.

Diese Ergebnisse erklären sich aus der typischen Korngrößenverteilung dieses Bodens mit dem relativen geringen Feinteilgehalt, der in die grobkörnige Bodenstruktur eingelagert ist. Das Bindemittel wirkt mechanisch nur auf die tragende Kornstruktur indem es die Körner in ihrer Lage fixiert. Diesen Effekt kann nur der Zement leisten. Die moderate Verfestigung der in die Porenstruktur eingelagerten Feinteile durch den Kalk hat dagegen nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Festigkeitserhöhung.

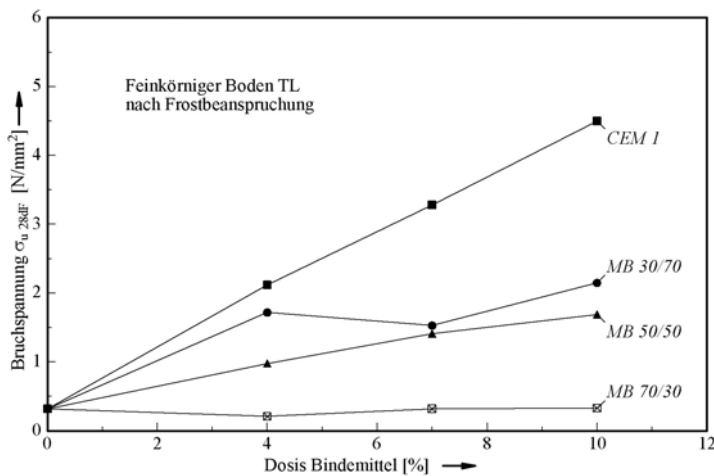
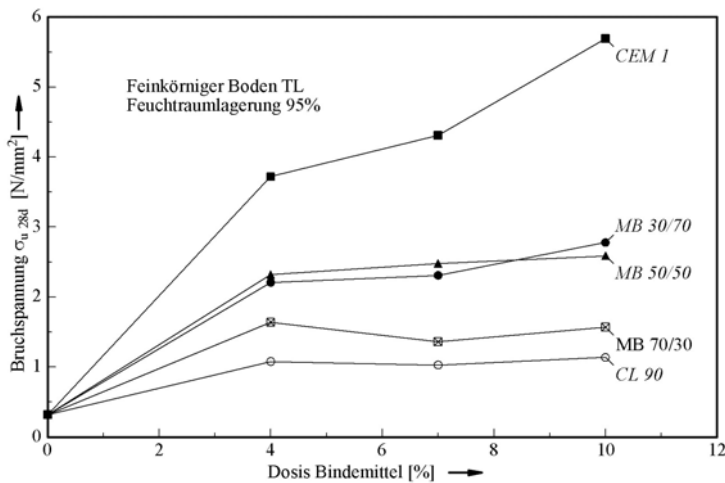


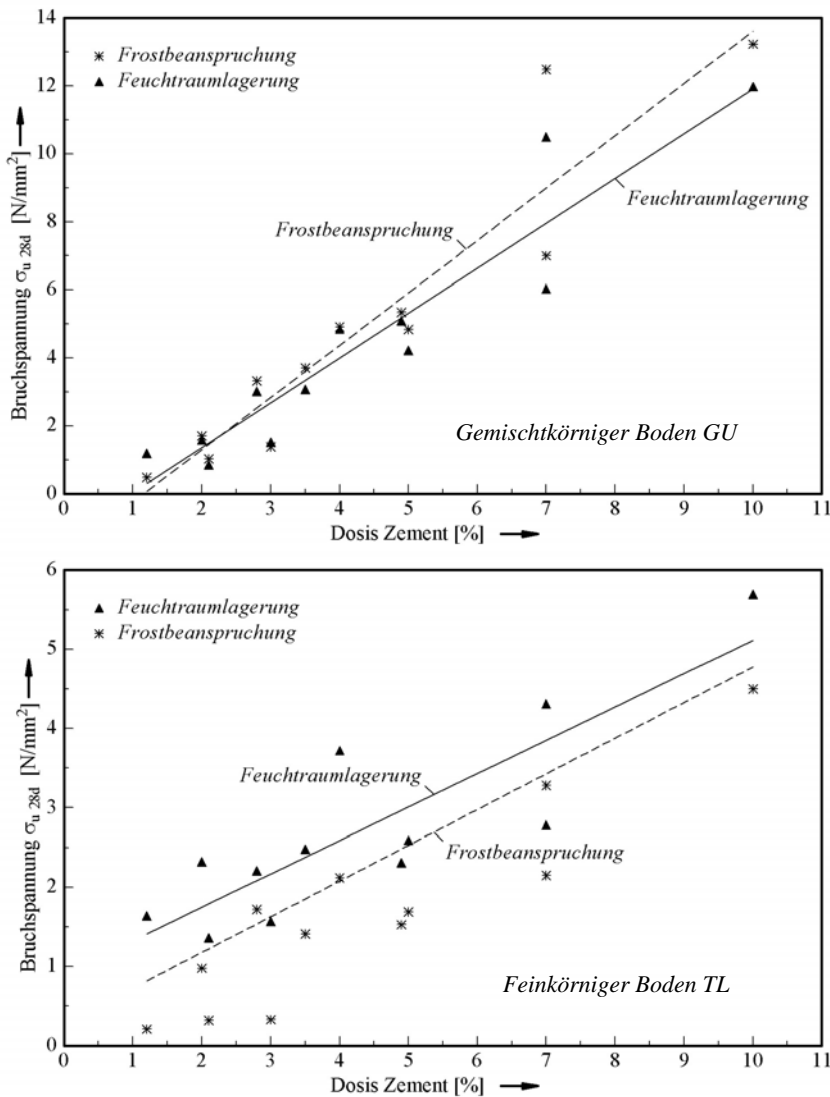
Abb. 3: Einaxiale Druckfestigkeit $q_{u,28d}$ in Abhängigkeit der Bindemitteldosis, feinkörniger Boden TL. Oben Feuchtraumlagerung, unten nach Frostbeanspruchung

Auch in dem feinkörnigen Boden bewirkt der Zementanteil im Bindemittel den Festigkeitszuwachs gegenüber dem unbehandelten Boden. Im Gegensatz zu dem gemischtkörnigen Boden ist hier jedoch bereits durch die geringe pure Kalkdosierung ein Festigkeitszuwachs um den Faktor 3 innerhalb der Reaktionszeit von 28 Tagen festzustellen. Aus den Ultraschallmessungen kann für diesen Boden als Effekt der Puzzolanreaktionen ein weiterer Anstieg der Festigkeit bis zu einem Gesamtfaktor von 5 bis 6 innerhalb eines oder mehreren Jahres prognostiziert werden, so dass bei einer 4% Kalkdosierung durchaus einaxiale Bruchfestigkeiten in der Größenordnung 2 N/mm^2 erwartet werden können. Höhere Festigkeiten kann eine pure Kalkapplikation jedoch in derart feinkörnigen Böden nicht bewirken [2]. Bei der Applikation von Mischbindemitteln konnte dagegen auch hier eine proportional zum Zementgehalt zunehmende einaxiale Druckfestigkeit nach-

gewiesen werden. Die absoluten Werte liegen aber deutlich unterhalb der an gemischtkörnigem Boden erreichbaren Verfestigung.

Der festigkeitsmindernde Effekt einer Frostbeanspruchung ist auch in dem feinkörnigen Boden bei der puren Kalkapplikation wie auch bei schwach dosierter Mischung so stark, dass die für eine Bodenverfestigung mit Baukalken nach ZTVE-StB 09, Abschnitt 12.4.2.2 geforderten Werte ($q_{u,28d} \geq 0,2 \text{ N/mm}^2$) nicht erfüllt werden.

Der zusammenfassende Vergleich der oben beschriebenen experimentellen Untersuchungen zeigt die Dosis-Effekt-Beziehung von Mischbindemitteln klar auf. Mit der Komponente Kalk wie auch mit einer geringen Zementdosierung im Mischbindemittel lässt sich in grob- und gemischtkörnigen Böden kein signifikanter Festigkeitszuwachs, in feinkörnigen dagegen ein geringer Zuwachs der einaxialen Druckfestigkeit bis zum 5-fache Wert des unbehandelten Bodens erreichen. Die Aufgabe des Kalkes kommt im Wesentlichen der Handhabbarkeit, der Verdichtbarkeit und der Steuerung des Wassergehaltes bei zu feuchtem Ausgangsboden zu. Eine starke Zunahme der einaxialen Druckfestigkeit, wie dies für eine Bodenverfestigung erwünscht wird, ist allein dem Zementanteil im Bindemittel zuzuordnen. Der Effekt des Zementes ist umso stärker, je höher die Granulathärte der die Bodenstruktur bildenden Körner oder Aggregate ist. Die Diagramme in Abb. 4 verdeutlichen dies für die beiden untersuchten Böden.



Die beiden Diagramme zeigen die einaxiale Druckfestigkeit der Prüfkörper nach einer Reifezeit von 28 Tagen in Abhängigkeit des absoluten Zementanteils in der Trockenmasse des Bodens. Der Anteil des Kalkes ist in dieser Darstellung vernachlässigt, da dieses Bindemittel nur untergeordnet diesen Kennwert beeinflusst.

Die beiden Diagramme zeigen die einaxiale Druckfestigkeit der Prüfkörper nach einer Reifezeit von 28 Tagen in Abhängigkeit des absoluten Zementanteils in der Trockenmasse des Bodens. Der Anteil des Kalkes ist in dieser Darstellung vernachlässigt, da dieses Bindemittel nur untergeordnet diesen Kennwert beeinflusst.

Abb. 4: Einaxiale Druckfestigkeit $q_{u,28d}$ in Abhängigkeit der Zementdosis bezogen auf die Trockenmasse des Bodens. Oben Boden GU, unten TL

Im gemischtkörnigen Boden, oberes Diagramm, zeigt sich

proportional zur Dosierung ein starker Anstieg. Der Bruchwert von $q_{u,28d} \geq 6 \text{ N/mm}^2$ wird etwa ab einer Zementdosis von 5,5 % erreicht. Zwischen Prüfkörpern, die nur eine Feuchtraumlagerung erfahren haben und solchen, die Frost-Tau-Wechseln unterzogen wurden, besteht kein signifikanter Unterschied.

Am feinkörnigen Boden, unteres Diagramm, ist zwar die gleiche Tendenz zu erkennen, der Festigkeitszuwachs ist aber bezogen auf die Dosierung des Zementes deutlich geringer. Die Frostbeanspruchung mindert die einaxiale Druckfestigkeit nahezu gleichmäßig auf ca. 70% ab. Dies ist auf eine Zerstörung eines Teils der insgesamt schwachen Zementierung der Aggregate zurückzuführen. Aufgrund bodenmechanischer Überlegungen liegt nahe, dass ein vergleichbarer Effekt auch infolge dynamischer Einwirkung durch die Verdichtung während des Abbindprozesses im Feld einstellt. Untersuchungen hierzu liegen bisher nicht vor.

Die Streubreite der Dosis-Effekt-Beziehung in der Darstellung Abb. 4 ist auch auf die unterschiedlichen Reaktionszeiten zwischen Herstellung des Boden-Bindemittel-Gemisches und dessen Verdichtung bei einer puren Zementapplikation (1h) und der Applikation von Mischbindern (4h) zurückzuführen. Eine frühere Verdichtung der mit Mischbindern behandelten Böden hätte zu etwas höheren Festigkeiten und einer noch klareren Korrelation zwischen absolutem Zementsanteil und erzielter Verfestigung geführt.

5 Zusammenfassung

An zwei typischen Böden des Erdbaus, einem gemischtkörnigen der Bodengruppe GU und an einem feinkörnigen der Bodengruppe TL, wurden im Auftrag der BAST in der MFPA-Weimar umfangreiche experimentelle Untersuchungen zur Dosis-Effekt-Beziehung von Mischbindemitteln aus Kalk und Zement durchgeführt. Das Forschungsprojekt zielte auf neue Erkenntnisse bei der Zuordnung der Prüfverfahren und Prüfvorschriften bei der Anwendung von Mischbindemitteln zur Verfestigung von Böden.

Durch die Applikation von purem Weißfeinkalk und Mischbindemitteln wurde der Wassergehalt proportional zur Dosis des Kalkes reduziert. Die Verdichtungseigenschaften haben sich in beiden Böden in Richtung eines höheren optimalen Wassergehaltes und geringerer Proctordichte verlagert.

Im feinkörnigen Boden konnte durch die Kalkapplikation eine geringe Zunahme der einaxialen Druckfestigkeit um einen Faktor 2 bis 3 erreicht werden. Im gemischtkörnigen Boden hatte der Kalk keinen Einfluss auf die Festigkeitserhöhung. Ein signifikanter Zuwachs der Druckfestigkeit kann allein dem Zementgehalt zugesprochen werden. In beiden Böden zeigte sich ein linearer Zusammenhang zwischen Zementdosis und Festigkeitszunahme. Graduell ist dieser Effekt jedoch im feinkörnigen Boden vergleichsweise geringer.

In Hinblick auf die Eignungsprüfung von mit Mischbindemitteln behandelten Böden nach ZTV E-StB 09, Abschnitt 12.4.2.1, wurden die Anforderungen an eine Bodenverfestigung nur bei der Behandlung des Bodens GU mit Mischbinder Kalk/Zement = 30/70 erfüllt. Die Interpolation der Ergebnisse führt auf eine erforderliche absolute Zementdosis von ca. 6 % bezogen auf die Trockenmasse des Bodens. Die Anforderung an mit Baukalken verbesserte Böden nach ZTV E-StB 09, Abschnitt 12.4.2.2, wur-

den bei beiden untersuchten Böden durch Zugabe von 4 / 7 / 10 % Mischbindemittel 70/30, 50/50, 30/70 erfüllt.

In den experimentellen Untersuchungen wurde die Druckfestigkeit bei einem Probalter von 28 Tagen betrachtet. Zusätzlich wurde durch Ultraschallmessungen der Verlauf der Verfestigung erfasst und eine Funktion für die Prognose der langfristigen Festigkeitszunahme hergeleitet. Grundsätzlich sind bei ausreichendem Mineralbestand des Bodens und einer Bodenstruktur, in der die aggregierte Feinteilkomponente mechanisch beteiligt ist (Feinteilgehalt > 30 %) durch Puzzolanreaktion über den Zeitraum von Jahren weitere Festigkeitszunahmen zu erwarten. Dieser, i. W. aus der Kalkapplikation resultierende Effekt ist zwar quantitativ nicht mit der Verfestigungswirkung des Zementes zu vergleichen, stellen aber insbesondere in Hinblick auf Standsicherheits- und Verformungsfragen einen signifikanten Zuwachs des Scherparameters Kohäsion und der Steifigkeit dar.

7 Dank

Die Autoren bedanken sich bei der Bundesanstalt für Straßenwesen für die finanzielle Förderung des Forschungsprojektes FE 05.0164/2011/FGB „Untersuchung der Eignung von Mischbindemitteln für die Bodenverfestigung“ durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

8 Literatur

- [1] FGSV Merkblatt über Bodenverfestigung und Bodenverbesserung mit Bindemitteln; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln; Ausgabe 2004(FGSV 551)
- [2] WITT, K. J., 2012. Wirkmechanismen und Effekte bei der Bodenstabilisierung mit Bindemitteln. Vorträge zur 8. Erdbaufachtagung Leipzig, Bauakademie Sachsen, S. 181-194
- [3] FGSV Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau Teil B 11.1 – Eignungsprüfungen für Bodenverfestigungen mit hydraulischen Bindemitteln (TP BF-StB B 11.1), 2005
- [4] FGSV Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau Teil B 11.5 – Eignungsprüfung bei Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat (TP BF-StB B 11.5), 1991
- [5] FGSV Merkblatt zur Herstellung, Wirkungsweise und Anwendung von Mischbindemitteln, 2012
- [6] MFPA-Weimar / Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung / BAST: FE 05.0164/2011/FGB - Untersuchung der Eignung von Mischbindemitteln für Bodenverfestigungen. Schlussbericht 12/2012,

Anschrift der Autoren

Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt, Bauhaus-Universität Weimar, Coudraystraße 11c, 99423 Weimar.
kj.witt@uni-weimar.de

Dr. rer. nat. Anja Damaschke, Materialforschungs- und -prüfanstalt Weimar an der Bauhaus-Universität Weimar, Coudraystraße 9, 99423 Weimar
Anja.damaschke@mfpa.de