

## Ressourcenschonung – Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau

FA 5.166

Forschungsstellen: Technische Universität München, Zentrum Geotechnik (Prof. Dr.-Ing. N. Vogt)

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Fachbereich Geotechnik (Prof. Dr.-Ing. habil. J. Engel)

Hochschule Zittau/Görlitz, iTN – Institut für Verfahrensentwicklung, Torf- und Naturstoff-Forschung (Prof. Dr.-Ing. J. I. Schoenherr)

Bearbeiter: Heyer, D. / Vogt, S. / Birle, E. / Engel, J. / Henzinger, C. / Koukoulidou, A. / Huber, S. / Kupka, A. / Schönfelder, I. / Wolter, S. / Papakyriakopoulos, O. / Bagherpour, I. / Udmani, R. / Schoenherr, J. I.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: April 2017

### 1 Einleitung

Entsprechend dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) § 14 sollen bis 2020 mindestens 70 % der nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfälle einer Vorbereitung zur Wiederverwendung, dem Recycling oder einer sonstigen stofflichen Verwertung zugeführt werden. Es soll auf eine Deponierung (Verfüllung, Beseitigung) möglichst verzichtet werden.

Bei Betrachtung der nach Dehoust et al. (2008) im Beobachtungszeitraum 2002/2003 angefallenen Gesamtmenge an mineralischen Abfällen von 238 Mio. t (diese umfasst zusätzlich zum Bodenmaterial auch noch Aschen, Schlacken aus Steinkohle, HMVA, Metallschlacken sowie Bau- und Abbruchabfälle), ergibt sich dort bei Zuordnung der Verwendung im Tagebau zur Kategorie Beseitigung eine Gesamtrecyclingquote von etwa 53 %<sup>1</sup>.

Bezugnehmend auf das KrWG § 6 Abs. (2), Pkt. 2 ist unter anderem das "Maß der Schonung der natürlichen Ressourcen" bei der Bewertung einer Maßnahme zu berücksichtigen und nach § 8 Abs. (1) der hochwertigste Verwertungsweg zu wählen. So ergibt sich die Frage, ob durch die Erweiterung der technischen Möglichkeiten der hochwertigen Verwendung, also durch die Etablierung geeigneter Verfahren, nicht eine noch

<sup>1</sup> Die Zuordnung der von Dehoust et al. (2008) verwendeten Kategorie "Einsatz im Tagebau" zu "Beseitigung" oder "Recycling" ist für Boden und Steine bezogen auf das KrWG zwar eindeutig (sonstige stoffliche Verwertung, wenn als Ersatz für anderes Material), im Gesamtkontext aber streitbar. Der "Einsatz im Tagebau" ist in Dehoust et al. (2008) definiert als: Sicherung von Böschungen, Anlage und Unterhalt von Förder- und Verkehrswegen, Beeinflussung von geochemischen und hydrochemischen Vorgängen (Pufferung), Verfüllung, Oberflächenmodellierung sowie Restlöcher- und Haldengestaltung. Dabei werden hochwertige Verwertungswege wie zum Beispiel Sicherung von Böschungen und Verkehrswegebau gemischt mit geringwertigen Verwertungswegen wie Verfüllung oder Haldengestaltung, welche praktisch einer Beseitigung entsprechen.

höhere Quote der Wiederverwendung und des Recyclings vor allem von Bodenmaterial, aber auch von mineralischen Abfällen im Gesamten, mit dem Ziel der Schonung von Primärrohstoffen möglich ist.

Einen Großteil der bisher abgelagerten mineralischen Stoffe stellen organogene Böden beziehungsweise Böden mit organischen Bestandteilen, fein- und gemischtkörnige Böden mit geringer Konsistenz sowie Sekundärbaustoffe (RC-Baustoffe, Böden mit Fremdbestandteilen, industrielle Nebenprodukte) dar, da Vorbehalte gegenüber deren Verwendung im Erdbau bestehen.

Ziel dieses Forschungsprojekts war es, die Grundlagen für eine nachhaltige Materialverwendung im Erdbau für diese drei im Kontext der Ressourcenschonung maßgebliche Stoffgruppen zu erweitern und Vorbehalte abzubauen. Die Möglichkeiten und Grenzen zur Ausnutzung der jeweiligen Eigenschaften der Materialien und Möglichkeiten zur Verbesserung dieser Eigenschaften sollten aufgezeigt werden. Damit sollte letztlich ein Beitrag dazu geleistet werden, im Sinne einer nachhaltigen Materialverwendung den Verbrauch von Primärrohstoffen zu reduzieren und bisher abgelagerte mineralische Stoffe im Erdbau als wirtschaftliche und technisch sinnvolle Alternativen ins Spiel zu bringen.

### 2 Organogene Böden und Böden mit organischen Anteilen

#### 2.1 Untersuchungskonzept

Aus unterschiedlichen Regionen in Deutschland wurden Böden mit organischen Anteilen ausgewählt, an denen die systematischen Untersuchungen zum Einfluss des organischen Anteils auf die Verdichtungs-, Scherfestigkeits- und Verformungseigenschaften durchgeführt werden sollten. Zusätzlich wurde an einem der ausgewählten Böden mit besonders hohem organischem Anteil eben dieser Anteil stufenweise über Zugabe von Sand reduziert (künstliche Variation des organischen Anteils). Die so entstehenden Modellmischungen wurden auf ihre Verdichtungseigenschaften untersucht.

Da bekannt ist, dass der natürliche Wassergehalt solcher Böden aufgrund des hohen Anteils an organischer Substanz häufig über dem Proctorwassergehalt liegt, wurde untersucht, inwieweit eine Bindemittelzugabe zu einer Reduzierung des Wassergehalts und einer Verbesserung der Festigkeitseigenschaften führt. Die Untersuchungen wurden exemplarisch an einem Boden mit einem organischen Anteil von etwa 30 % durchgeführt. Als Bindemittel wurden Weißfeinkalk (CaO) und eine kalkreiche Braunkohlenflugasche aus Mitteldeutschland gewählt.

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse und der am Zentrum Geotechnik der TU München bereits vorliegenden Erkenntnisse wurde abschließend ein Bewertungsschema entwickelt, in dem Anhaltswerte für die bodenmechanischen Kennwerte in Abhängigkeit vom organischen Anteil eines Bodens angegeben sind. Dieses soll als Hilfestellung zur Abschätzung der bautechnischen Eignung solcher Materialien dienen und soll dazu beitra-

gen, dass diese öfter als bisher auch als Baustoff für Erdbauwerke in Betracht gezogen werden.

2.2 Beschreibung der Ergebnisse

2.2.1 Verdichtungseigenschaften

Fasst man die Erkenntnisse aus der Literatur und den eigenen Versuchen zusammen, so kann ein Zusammenhang zwischen dem organischen Anteil und dem optimalen Verdichtungswassergehalt eines Bodens bestätigt werden. Je höher der organische Anteil eines Bodens, desto niedriger wird die durch Verdichtung erzielbare Trockendichte und desto größer wird der optimale Verdichtungswassergehalt. Die Ergebnisse zeigen gleichzeitig, dass die Verdichtungscharakteristika (optimaler Wassergehalt und Trockendichte) aber nicht auf den Glühverlust als Indexwert allein reduziert werden können. Dieser beinhaltet allein zu wenig Information über die Eigenschaften eines Bodens.

Die Verdichtungseigenschaften eines Bodens mit organischen Anteilen um 30 % wurden durch die Zugabe von Weißfeinkalk beziehungsweise Braunkohlenflugasche verbessert. Der Boden konnte durch die Zugabe beider Bindemittel noch deutlich oberhalb seines optimalen Verdichtungswassergehalts verdichtet werden.

2.2.2 Last-Verformungseigenschaften

Gemäß den durchgeführten Kompressionsversuchen wiesen die untersuchten Böden im verdichteten Zustand (ungesättigt) im Spannungsbereich zwischen 100 und 200 kN/m<sup>2</sup> Steifemoduln im Bereich zwischen 2,5 und 17 MN/m<sup>2</sup> auf. Die hohen Werte sind dabei tendenziell für die Böden mit geringen organischen Anteilen und die niedrigen Werte für die Böden mit hohen organischen Anteilen bis ca. 30 % zu erwarten. Die untersuchten Böden wiesen ausgeprägte Sekundärverformungen auf. Die aus den Verformungskurven bei einer Versuchsdauer von einem Tag abgeleiteten Kriechbeiwerte  $C_{\alpha}$  liegen für die gesättigten Proben zwischen 0,001 und 0,04 und nehmen dabei mit zunehmender Spannung und zunehmendem organischem Anteil zu.

Die Bodenbehandlung wirkte sich positiv auf das Last-Verformungs-Verhalten aus. Zwar wurde keine chemische Verfestigung im Sinne einer Erhärtung der Proben festgestellt. Die Steifigkeit des Materials ließ sich allerdings im Vergleich zum Boden ohne Behandlungsmaßnahme, vor allem durch die Zugabe von Weißfeinkalk, deutlich erhöhen.

2.2.3 Scherfestigkeit

Die hohe Duktilität der untersuchten Proben führte in der Regel zu hohen axialen Verformungen bei zunehmender Deviatorspannung im Triaxialversuch. Im Sinne einer Verformungsbeschränkung ist für solche Materialien die Festlegung einer Bruchstauchung sinnvoll. Die durchgeführten Triaxialversuche wurden bei einer axialen Stauchung von 4 % ausgewertet und zeigten bis auf Ausnahmen (bei Böden mit hohen Tonanteilen) keine dränierte Kohäsion und vergleichsweise hohe dränierte Reibungswinkel.

Die an den natürlichen Böden im verdichteten Zustand bestimmten Werte der undrännierten Scherfestigkeit wurden maßgeblich vom Spannungszustand beeinflusst (siehe Tabelle 1). Bei einem Seitendruck von 50 kN/m<sup>2</sup> wurden Werte der undrännierten Scherfestigkeit zwischen ca. 40 und 70 kN/m<sup>2</sup> ermittelt. Bei einem Seitendruck von 200 kN/m<sup>2</sup> dagegen lagen die Werte etwa zwischen 100 und 160 kN/m<sup>2</sup>. Die höheren Werte in den angegebenen Spannen sind dabei den Böden mit geringem organischem Anteil und die niedrigeren Werte den Böden mit höheren organischen Anteilen bis max. 30 % zuzuordnen.

Die im Rahmen der Untersuchung durchgeführten triaxialen Scherversuche wiesen nicht auf einen markanten Einfluss der Einbaubedingungen (zwischen  $D_{Pr} = 100\%$  und  $D_{Pr} = 97\%$  auf der nassen Seite) auf die Scherfestigkeit hin.

2.2.4 Druckfestigkeit behandelter Böden

Die Bodenbehandlung des Bodens mit etwa 30 % Organik mit Weißfeinkalk und Braunkohlenflugasche hatte im untersuchten Zeitraum keinen Einfluss auf die einaxiale Druckfestigkeit. Beide verwendeten Bindemittel führten beim untersuchten Boden in den zugegebenen Mengen nicht zu einer chemischen Verfestigung.

Tabelle 1: Anhaltswerte für bodenmechanische Kenngrößen von verdichteten Böden mit organischen Bestandteilen

organischer Anteil $V_{GI}$	typ. Bodenart nach DIN 18196	effektive Scherparameter		undrännierte Scherfestigkeit		Trockenwichte (verdichtet) $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Steifemodul (bei 100 kN/m <sup>2</sup> ) $E_s$ [MN/m <sup>3</sup> ]	Steifemodul (bei 200 kN/m <sup>2</sup> ) $E_s$ [MN/m <sup>3</sup> ]
		$\phi'$ [°]	$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$c_u$ bei $\sigma_3$				
				[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]			
<b>Gruppe 1</b> 5 bis 10 %	TA, TM, OT, OH	20 – 25	0 – 20	40 – 70 60 – 120	50 100	14 bis 18	5 bis 7	10 bis 17
<b>Gruppe 2</b> 10 bis 30 %	OT, OH	25 – 30	0 – 20	100 – 130 100 – 160	150 200	8 bis	2,5 bis 5	3 bis 10
<b>Gruppe 3</b> über 30 %	OT, HN, HZ	ohne Angabe						

Anm.:  
 - Werte beziehen sich auf etwa im Proctoroptimum verdichtete, wassergesättigte Proben  
 - Steifemodul  $E_s$  zwischen  $\sigma' = 100 - 200$  kPa bezogen auf die Zusammendrückung nach 1 Tag (Berücksichtigung gesättigter und ungesättigter Proben)

**Tabelle 2: Verwendbarkeit von organogenen Böden der Gruppen 1, 2 und 3 in Erdbauwerken mit unterschiedlichen Anforderungen sowie Einfluss einer Bodenbehandlungsmaßnahme auf die Bodeneigenschaften**

organischer Anteil $V_{GI}$	Verwendung in Erdbauwerken wie Schutzwällen und Geländemodellierungen			Wirksamkeit einer Bodenbehandlung mit Bindemitteln		
	Verdichtbarkeit	Scherfestigkeit	Verformungsverhalten	Verdichtbarkeit	Scherfestigkeit	Verformungsverhalten
<b>Gruppe 1</b> 5 bis 10 %	●	●	●	/ ● /	/ ● /	/ ● /
<b>Gruppe 2</b> 10 bis 30 %	●	●	○	/ ● /	/ ○ /	/ ● /
<b>Gruppe 3</b> über 30 %	○	○	○	/ ○ /	/ ○ /	/ ○ /

Anm.:

- ... Anforderungen können erfüllt werden
- ... niedrige bis sehr niedrige Anforderungen können erfüllt werden
- ... Anforderungen können nur unter Umständen (zum Beispiel sehr niedrige Anforderungen und hoher Zusatzaufwand) oder nicht erfüllt werden
- / ● / ... positiver Einfluss auf die Eigenschaften erwartbar
- / ○ / ... positiver bis neutraler Einfluss auf die Eigenschaften erwartbar
- / ○ / ... neutraler Einfluss auf die Eigenschaften erwartbar

### 2.3 Beurteilungsschema

Aus den durchgeführten Untersuchungen und bisherigen Erfahrungen an der TU München konnte eine Tabelle mit Anhaltswerten für bodenmechanische Kenngrößen von etwa im Verdichtungs optimum verdichteten Böden mit organischen Bestandteilen abgeleitet werden. Siehe dazu Tabelle 1.

Soll die Verwendbarkeit solcher Böden in Erdbauwerken wie Schutzwällen und Geländemodellierungen (in Gruppe 1 möglicherweise sogar auch in Straßendämmen) in Abhängigkeit von den Anforderungen an das Bauwerk dargestellt werden, so kann dies nur qualitativ erfolgen. In Tabelle 2 wurde versucht, zusätzlich dazu auch die Eignung von Bodenbehandlungsmaßnahmen zur Verbesserung der Bodeneigenschaften aufzunehmen.

## 3 Fein- und gemischtkörnige Böden mit geringer Konsistenz

### 3.1 Untersuchungskonzept

Grundannahme für die Untersuchungen war, dass ein Ausgangsboden vor Ort mit zu hohem Wassergehalt vorliegt und ohne weitere Zusatzmaßnahme erdbautechnisch nicht verarbeitet werden kann. Durch Anwendung unterschiedlicher Verfahren sollten dann die Grenzen der Verwendbarkeit und Verbesserbarkeit unterschiedlicher Böden versuchstechnisch bestimmt werden. Als zu verbessernde Ausgangsböden wurden zwei feinkörnige Böden (TL und TA gemäß DIN 18196) und zwei gemischtkörnige Böden (ST\* und GU\* gemäß DIN 18196) ausgewählt. An diesen Ausgangsböden wurde exemplarisch untersucht, mit welchen Verfahren diese erdbautechnisch verwendbar gemacht werden können und welche Grenzen den angewandten Verfahren dabei innewohnen. Die dazu betrachteten Verfahren können entsprechend ihres Charakters zu folgenden zwei Kategorien zusammengefasst werden:

#### Verfahren zur direkten Verwendung

- Kassettenbauweisen
- Sandwichbauweisen

- Dauerhafte Verbringung des Materials in geotextile Schläuche (Verbleib des Materials im Schlauch)

#### Verfahren zur indirekten Verwendung

- Bodenverbesserung mit Bindemitteln
- Mechanische Bodenverbesserung
- Maschinentechnische Entwässerung
- Entwässerung in geotextilen Schläuchen
- Thermische Entwässerung (Trocknung)

Bei den Verfahren zur direkten Verwendung wird der weiche Boden im vorliegenden Zustand verwendet. Die Randbedingungen des Verfahrens müssen daher allgemein auf die Eigenschaften des jeweiligen zu nassen Bodens abgestimmt werden (zum Beispiel Umschließung des Materials in Kassetten zur Gewährleistung der Standsicherheit des Bauwerks).

Die Verfahren zur indirekten Verwendung umfassen unterschiedliche Möglichkeiten, um die mechanischen Eigenschaften eines zu nassen Bodens zu verbessern. Es wurden, von der nassen Seite der möglichen Wassergehalte kommend, gezielt auch innovative Verfahren zur Entwässerung ausgewählt, um nicht allein den Grenzen der Erdbaupraxis zu unterliegen. Diese Verfahren bilden die Grundlage, um im Anschluss die vor entwässerten Böden mit den konventionellen erdbautechnischen Verfahren zu verbessern und die Versuchsböden so für die Verwendung in Erdbauwerken nutzbar zu machen. Die Beurteilung der Verarbeitbarkeit erfolgt im Erdbau anhand jener Anforderungen, die sich aus der Handhabung (Lösen, Laden, Transport, Verdichtung) ergeben. Die Verwendbarkeit eines Materials als Baustoff entscheidet sich letztendlich aus den Anforderungen des damit zu errichtenden Bauwerks an Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit.

Für die Beurteilung der Untersuchungsergebnisse zur indirekten Verwendung wurde die Verdichtbarkeit als Maßstab für die Verarbeitbarkeit verwendet und die jeweilige Tragfähigkeit über Stempelleindringversuche (CBR) an den verdichteten Proben bestimmt. Die Beurteilung zur direkten Verwendbarkeit erfolgte anhand der anwendungsspezifischen Charakteristika.

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden in ein Schema eingearbeitet, in dem die unterschiedlichen Strategien zur direkten oder indirekten Weiterverwendung von zu nassen, fein- und gemischtkörnigen Böden abhängig von den Bodeneigenschaften bewertet sind.

### 3.2 Beschreibung der Ergebnisse

#### 3.2.1 Direkte Verwendung eines zu nassen Bodens in Sonderlösungen

Aus technischer Sicht ist die Verwendung in Kassettenbauweisen über den gesamten Wassergehaltsbereich für alle Böden möglich, da keine besonderen Anforderungen an die Eigenschaften des in den Kassetten eingeschlossenen Materials bestehen. Eine derartige Verwendung ist allerdings nur bei hohen Wassergehalten und flächigen Bauwerken sinnvoll. Der Materialaufwand an hochwertigen Stützmaterialien zur Gewährleistung der Standsicherheit in den Randbereichen der Kassetten muss aus wirtschaftlicher Sicht abgestimmt sein auf die darin befindliche Gesamtkubatur an nassem Boden. Die Entwässerungssetzungen des Bauwerks erhöhen sich mit steigendem Wassergehalt des dort eingebrachten nassen Bodens.

Auch die Verwendung von nassen Böden in geotextilen Schläuchen (dauerhafter Verbleib des Materials im Schlauch) stellt keine besonderen Anforderungen an das Material, die Form des Schlauches muss durch das Geotextil gewährleistet werden. Der Konsolidation des Materials entsprechende Setzungsbeträge sind zu erwarten.

Bei kleineren Bauwerken kann aus Platzgründen in der Regel nur Material verwendet werden, das mit seinen eigenen Schereigenschaften zur Standsicherheit des Bauwerks beiträgt. Deshalb erfordern Sandwichbauweisen bereits ein Mindestmaß an Scherfestigkeit des weichen Bodens. Es ist somit ein Verfahren, welches hauptsächlich bei Wassergehalten leicht oberhalb des Verdichtungsoptimums sinnvoll Anwendung finden kann. Die Grenze der technischen Machbarkeit einer Sandwichbauweise hängt aber insgesamt von vielen unterschiedlichen Faktoren ab.

#### 3.2.2 Indirekte Verwendung eines zu nassen Bodens mit erdbautechnischen Verfahren

Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen bestätigen die Angaben in ZTV E-StB, Kapitel 12.3.1, zu geeigneten Baustoffen für die Bodenbehandlung mit Bindemitteln. Dort werden unter anderem leicht plastische Tone (TL), Sand-Ton-Gemische (ST\*) und Kies-Schluff-Gemische (GU\*) als uneingeschränkt geeignete Bodengruppen angegeben. Ausgeprägt plastische Tone (TA) werden als bedingt geeignet ausgewiesen.

Die Anwendungsgrenzen der untersuchten Methoden des Erdbaus (mechanische Bodenverbesserung, Bodenverbesserung mit Bindemitteln) liegen im plastischen Bereich eines Bodens (abhängig von den Eigenschaften des Bodens, des Zugabematerials und der Zugabemenge). Die nach ZTV E-StB zur Bodenbehandlung als uneingeschränkt geeignete Böden eingestuft, untersuchten Böden (TL, ST\* und GU\*) konnten mittels Bindemittelbehandlung bis zu ihrer Fließgrenze beziehungsweise

se bis zu etwa dem höchsten erwartbaren Wassergehalt<sup>2</sup> verbessert werden. Der Erfolg der Verbesserungsmaßnahmen am ausgeprägt plastischen Ton (TA) beschränkte sich auf den steifen Konsistenzbereich. Die Bodenverbesserung mit RC-Material führte beim ausgeprägt plastischen Ton (TA) zu keinem Erfolg, der leicht plastische Ton (TL) konnte damit bis in den weichen Konsistenzbereich verarbeitbar gemacht werden. Beim Boden TL wird auch erwartet, dass die erreichte Verbesserungswirkung durch höhere Zugabemengen auch noch weiter gesteigert werden kann.

#### 3.2.3 Indirekte Verwendung eines nassen Bodens durch maschinentechnische Entwässerung

Untersucht wurde die Entwässerung in Zentrifugen und in Kammerfilterpressen. Für die maschinentechnische Entwässerung muss der zu entwässernde Boden allgemein in pumpbarer<sup>3</sup> Form vorliegen. In der Erdbaupraxis bedeutet das, dass solchen Böden vor ihrer mechanischen Trocknung aus verfahrenstechnischen Gründen gegebenenfalls noch Wasser zugegeben werden muss. Die anschließende Entwässerung kann dann in der Regel aber nicht bis zu jenem Punkt erfolgen, an dem der Boden ohne weitere Maßnahme im Erdbau eingesetzt werden kann. Das Material muss im Anschluss entweder weiter getrocknet werden oder bei dem vorhandenen Wassergehalt mittels Bodenverbesserung erdbautechnisch verwendbar gemacht werden.

Die Entwässerung mittels Zentrifugen ist ein kontinuierliches Verfahren. Bei dem Verfahren spielen, neben den Eigenschaften der Böden selbst, vor allem zwei Faktoren eine Rolle: die Umdrehungszahl und die Zentrifugierdauer. Während die Umdrehungszahl (also der zur Entwässerung entwickelte Druckgradient im Porenwasser) einen zentralen Einfluss auf das Entwässerungsergebnis nimmt, zeigte sich die Zentrifugierdauer nach einem Mindestbetrag, wenn überhaupt, vorrangig bei niedrigen Umdrehungszahlen als relevanter Faktor. Der Durchsatz des untersuchten leicht plastischen Tons (TL) betrug etwa das Vierfache des Durchsatzes bei den Untersuchungen am ausgeprägt plastischen Ton (TA). Trotzdem konnten beide Böden bei den Versuchen im Technikumsmaßstab bis in ihren plastischen Bereich entwässert werden.

Die Entwässerung mittels Kammerfilterpressen lieferte insgesamt vielversprechende Ergebnisse, die durch die gängige Praxis in der Tonindustrie bestätigt werden. Dort werden auch ausgeprägt plastische Tone auf diese Weise entwässert. Über die Filter (Filterstabilität und hydraulische Wirksamkeit), die Filterkuchenstärke (Dränwege) und den Filtrationsdruck (Gradienten zur Entwässerung) kann das Verfahren gesteuert werden. Durchsatz und erreichbarer Wassergehalt sind so auf die Randbedingungen und Anforderungen abstimmbare. Die Versu-

<sup>2</sup> Es ist eine berechtigte Annahme, dass der Hauptteil des Wassers eines gemischtkörnigen Bodens vom Feinanteil gehalten wird. Wassergehalte oberhalb der Fließgrenze des Feinanteils werden unter üblichen Umständen mehr oder weniger schnell abgegeben (zum Beispiel durch Absetzen).

<sup>3</sup> Der dem Begriff "pumpbar" zuordenbare Wassergehalt eines Bodens liegt oberhalb der Fließgrenze, hängt aber genau genommen von den Randbedingungen der jeweiligen Pumpe ab. Oft wird mit einem Mehrfachen des Wassergehalts an der Fließgrenze gearbeitet.

che im Technikumsmaßstab haben zusammenfassend Folgendes gezeigt:

- Je feiner ein Boden, desto mehr Zeit (Energie) pro Mengeneinheit an Feststoff musste zur Entwässerung aufgewendet werden;
- Der Endwert der Entwässerung wurde beim leicht plastischen Ton nach etwa 15 Minuten, beim ausgeprägt plastischen Ton nach etwa dem 10-Fachen dieser Zeit erreicht;
- Der Ausgangswassergehalt der zu entwässernden Suspension spielte beim ausgeprägt plastischen Ton aufgrund der höheren Entwässerungszeiten eine untergeordnete Rolle, beim leicht plastischen Ton wurde bei niedrigeren Ausgangswassergehalten der Endwassergehalt schneller erreicht;
- Beide Böden konnten bis in den steifen Konsistenzbereich verbessert werden.

### 3.2.3 Indirekte Verwendung durch Trocknung

Die Trocknung des Materials durch Verdunstung von Wasser weist den weitesten Einsatzbereich auf. Das Wasser kann aus dem Boden, je nach den Randbedingungen des Verfahrens, beinahe zur Gänze entfernt werden. Praktisch relevante Faktoren (neben den Eigenschaften des Bodens selbst) sind Temperatur, Luftfeuchtigkeit (Luftwechsel) und die zur Verfügung stehende Oberfläche, an der Wasser verdunstet werden kann. Da feine Böden das Bodenwasser stärker binden als grobe und gleichzeitig deren ungesättigte Wasserleitfähigkeit kleiner ist, läuft die Trocknung unter sonst gleichen Bedingungen bei feinen Böden langsamer ab. Das bestätigen auch die durchgeführten Versuche. In vergleichenden Untersuchungen wurde der erhebliche Einfluss bereits kleiner Temperaturunterschiede und der Verdunstungsoberfläche auf den zeitlichen Verlauf der Verdunstung bestätigt. Gleichzeitig können feinkörnige Böden ungleich mehr Wasser speichern. So ist die zur Erreichung einer bestimmten Konsistenzänderung zu verdunstende Wassermenge bei plastischeren Böden größer als bei weniger plastischen Böden.

Die Trocknung von Bodenmaterial im Freien stellt (zumindest) ein zeit- und platzaufwendiges Verfahren dar, die Witterungsabhängigkeit macht es schwer kalkulierbar. Gleichzeitig ist die Trocknung im Freien und bei schönem Wetter energieeffizient. Trocknet man Boden maschinell, so sind entsprechende Energieaufwendungen nötig. Das Verfahren sollte vor allem zur Erweiterung der Reichweite von erdbautechnischen Methoden (Trocknung VOR Anwendung von Bodenverbesserungsmaßnahmen) und der maschinentechnischen Entwässerung (Trocknung NACH Anwendung einer maschinentechnischen Entwässerung) angewendet werden.

Die Entwässerung in geotextilen Schläuchen kann vor allem bei sehr nassen Böden angewendet werden. Bei ausreichendem Platz- und Zeitangebot könnte dieses Verfahren eine wirtschaftliche Alternative zur maschinentechnischen Entwässerung sein. Je nach gewährter Entwässerungszeit (Konsolidation unter Eigengewicht) kann auch hier der Boden bis in seinen plastischen Bereich entwässert werden. Es wird davon ausgegangen, dass die erreichbare "stichfeste Konsistenz" als Endwassergehalt bei der Entwässerung in geotextilen Schläuchen etwa am Übergang vom breiigen in den weichen Konsistenzbereich (Annahme:  $l_c \approx 0,5$ ) liegt. Das Verfahren ist gegebenenfalls mit anderen Verfahren zu kombinieren.

### 3.3 Strategien zur Weiterverwendung

Liegen fein- oder gemischtkörnige Böden mit zu hohen Wassergehalten vor, so können, je nach Wassergehalt, grundsätzlich mehrere Wege zum Ziel der erdbautechnischen Verwendbarkeit führen. Beispielhaft ist dies für den untersuchten, leicht plastischen Ton, wie in Bild 1 dargestellt.

Der tatsächliche Wassergehalt des Bodens sowie die bautechnischen und wirtschaftlichen Randbedingungen entscheiden im Einzelfall darüber, welches Verfahren oder welche Kombination aus Verfahren am einfachsten und wirtschaftlichsten zum Ziel der erdbautechnischen Verwertbarkeit führt. Dabei kann gelten: je feinkörniger ein Boden, desto schwieriger ist seine Verarbeitbarkeit erweiterbar und desto eher muss er bei höheren Wassergehalten über eine Entwässerung beziehungsweise Trocknung verarbeitbar gemacht werden.



**Bild 1:** Mögliche Einsatzbereiche unterschiedlicher Verfahren zur erdbautechnischen Verwendbarmachung eines leicht plastischen Tones (Ausgangsboden TL)

Tabelle 3: Strategien zur Weiterverwendung zu nasser fein- und gemischtkörniger Böden

Verwendung	Bodengruppe 1 Feinkörnige Böden, zur Behandlung <u>geeignete</u> Boden- gruppen nach ZTV E-StB (U, TL, TM)	Bodengruppe 2 Feinkörnige Böden, zur Behandlung <u>bedingt geeignete</u> Bodengruppen nach ZTV E-StB (TA)	Bodengruppe 3 Gemischtkörnige Böden, zur Behandlung <u>geeignete</u> Boden- gruppen nach ZTV E-StB (ST*, GU*)	Verwendungs- Gruppe bei sinngemäßer Anwendung des Verfahrens
<b>Direkte Verwendung</b>				
A Kassettenbauweise	●	●	●	AS2 / AV2
B Sandwichbauweise	○	○	○	AS1 / AV1-2
C Geotextile Schläuche (mit Verbleib im Schlauch)	●	●	k. A.	AS2 / AV2
<b>Indirekte Verwendung (Verbesserung der Materialeigenschaften)</b>				
D Bodenverbesserung mit Bindemitteln	●	○ bzw. ●	●	AS1 / AV1
E Mech. Bodenverbesserung mit RC-Körnungen	●	○	● bzw. ●	AS1 / AV1
F Maschinentechnische Entwässerung	●	●	k. A.	KOM
G Entwässerung in ge- otextilen Schläuchen	●	●	k. A.	KOM
H (Thermische) Entwässerung beziehungsweise Trocknung	●	●	●	AS1 / AV1
Anm. ○ ...Verfahren nur leicht über dem optimalen Verdichtungswassergehalt eines Bodens anwendbar. ● ...Verfahren bei $w > w_{Pr}$ (Bodenverhalten plastisch) anwendbar. ● ...Verfahren bei $w \gg w_{Pr}$ (Bodenverhalten flüssig) anwendbar. AS1 ...Anforderungen an die Standsicherheit können ab dem Einbau durch das Material selbst, IM RAHMEN SEINER EIGENSCHAFTEN, erfüllt werden. AS2 ...Anforderungen an die Standsicherheit können beim Einbau durch das Material selbst NICHT erfüllt werden. AV1 ...Anforderungen an die Verformung (Setzung) können durch das Material, IM RAHMEN SEINER EIGENSCHAFTEN, erfüllt werden. AV2 ...Anforderungen an die Verformung (Setzung) können durch das Material NICHT erfüllt werden. KOM ...von der nassen Seite kommend ist die Verbesserung der Materialeigenschaften bis in den Bereich $w > w_{Pr}$ möglich; das Verfahren ist in Kombination anzuwenden.				

In Tabelle 3 sind die Strategien zur Weiterverwendung von zu nassen fein- und gemischtkörnigen Böden zusammenfassend und vereinfacht abgebildet. Eingangsparmeter zur Anwendung der Tabelle ist der natürliche Wassergehalt des infrage stehenden Bodens ( $w$ ) im Vergleich mit seinem optimalen Verdichtungswassergehalt ( $w_{Pr}$ ). Welche Hinweise und Einschränkungen bei der Verwendung zu beachten sind, wird in der letzten Spalte "Verwendungs-Gruppe" beschrieben. Die darin angeführten Verwendungs-Gruppen lassen sich in die Kategorien Anforderungen an die Standsicherheit (AS1 und AS2) und Anforderungen an die Verformung (AV1 und AV2) einteilen. Die Gruppe KOM verweist darauf, dass das damit markierte Verfahren nur in Kombination mit einem anderen Verfahren zum Ziel der erdbautechnischen Verwertbarkeit eines zu nassen Bodens führt.

#### 4 Sekundärbaustoffe

##### 4.1 Untersuchungskonzept

Mit dem Ziel eines Beitrags zur weiteren Erhöhung der hochwertigen Verwertung von RC-Materialien im Erdbau, sollten vor allem Materialien untersucht werden, deren stoffliche Zusammensetzung (zum Beispiel aufgrund mangelnder Erfahrungen

zur Eignung) in der Regel zu ihrer Ablagerung führt. Es soll in Verbindung mit den Erkenntnissen von Baumgärtel et al. (2009) die Wissensgrundlage zur Eignung solcher Materialien bei der Verwendung im Erdbau erweitert werden. Ähnliches gilt für das Wissen zur bautechnischen Eignung von HMV-Aschen im Erdbau.

Untersucht wurden HMV-Aschen von zwei unterschiedlichen Herstellern, jeweils in zwei unterschiedlichen Körnungen. Bei der Auswahl der in den eigenen Untersuchungen zu verwendenden Recycling-Materialien aus Bauschutt wurde davon ausgegangen, dass RC-Baustoffe für den Erdbau insbesondere dann von wirtschaftlichem Interesse sind, wenn die Anforderungen des Straßenoberbaus gemäß TL Gestein-StB 04 nicht erfüllt werden, also hohe Anteile an Fremdbestandteilen und/oder Fremdstoffen enthalten sind. Beispielhaft und im Vergleich zu anforderungskonformen RC-Materialien wurden so Mischungen untersucht, deren Ziegelanteil die Anforderungen nach TL Gestein-StB 04 übersteigt. Außerdem wurden auch Mischungen mit nicht zulässigen Anteilen an Holz, Kunststoff und Polystyrolschaumkugeln in die Untersuchungen einbezogen.

Die Laboruntersuchungen an diesen Materialien umfassten Laboruntersuchungen zur Verdichtbarkeit, Tragfähigkeit (CBR),

Scherfestigkeit, dem Verhalten bei Frosteinwirkung und von sekundären Verfestigungsprozessen. Exemplarisch wurden großmaßstäbliche Untersuchungen zur Übertragbarkeit der in ZTV E-StB für natürliche Böden formulierten Kennwerte für indirekte Prüfmerkmale ( $E_{v2}$  und  $E_{vd}$ ) auf die Verdichtungskontrolle von RC-Materialien durchgeführt.

### 4.2 Beschreibung der Ergebnisse

#### 4.2.1 RC-Materialien mit und ohne Bodenanteile

In den eigenen Untersuchungen wurden unterschiedliche RC-Materialien auf die erdbautechnischen Eigenschaften untersucht. Dabei zeigten sich die Verdichtung und Tragfähigkeit für beide jeweils untersuchten Kornfraktionen (0/4 mm und 0/32 mm) nahezu unabhängig vom Wassergehalt.

Liegen im Recyclingmaterial nennenswerte Anteile an natürlichen Körnungen vor, so entscheidet die Art dieses Bodenanteils darüber, wie sich das Verhalten im Vergleich zum "reinen" RC-Material ändert. Grobkörnige Bodenanteile im RC-Material führen im Vergleich zum RC-Material ohne Bodenanteile in der Regel zu höheren erreichbaren Trockendichten und Tragfähigkeiten (CBR), gleichzeitig sinkt der optimale Verdichtungswassergehalt. Ist der Bodenanteil feinkörnig, so können im Vergleich zum RC-Material ohne Bodenanteile ebenfalls höhere Trockendichten erreicht werden. Je nach Anteil des feinkörnigen Bodens am RC-Material entwickelt sich allerdings eine ausgeprägte Abhängigkeit der Verdichtbarkeit und Tragfähigkeit vom Wassergehalt. Erfahrungen am Zentrum Geotechnik<sup>4</sup> zeigen in diesem Zusammenhang, dass die von natürlichen Böden bekannten Richtwerte für den Übergang zwischen tragender Feinkornmatrix und tragendem Grobkorngerüst (zum Beispiel Ostermayer, 1976) näherungsweise auch für RC-Materialien mit Bodenanteilen angewendet werden können. Die bautechnische Klassifizierung nach DIN 18196 ist somit auch für solche Materialien möglich. Dies spiegelt sich auch in den Untersuchungen von Baumgärtel et al. (2009) wieder, die die Beeinflussung der Eigenschaften von Böden durch Anteile an Fremdbestandteilen untersuchten<sup>5</sup>.

Die Überschreitung des in TL Gestein-StB zugelassenen maximalen Ziegelanteils um 10 % (zugelassen maximal 30 M.-%, hier untersucht 40 M.-%) ist aus Sicht der Verdichtung und Tragfähigkeit (CBR) als unkritisch zu bezeichnen. Auch in Verbindung mit nennenswerten Bodenanteilen wurde im Vergleich zum Verhalten von Materialien ohne Überschreitung des Kennwerts kein auffälliges Verdichtungs- und Tragfähigkeitsverhalten dokumentiert.

Die Überschreitung der zulässigen Fremdstoffanteile nach TL Gestein-StB beziehungsweise TL BuB E-StB führt vor allem bei

<sup>4</sup> FE 05.0183/2013/CGB "Belastbarkeit von eingeführten Volumen-% beziehungsweise Massen-%-Grenzen bei Bodenmaterial" im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen; Bericht noch nicht veröffentlicht (Henzinger et al., 2015).

<sup>5</sup> Baumgärtel et al. (2009) stellten eine unterschiedliche Beeinflussung des Materialverhaltens fest, je nach Feinkornanteil des Materials. Demnach beeinflussen Anteile an Fremdbestandteilen in feinkörnigem Material (Feinkornanteil insg.  $\leq 15\%$ ) das Materialverhalten auf andere Art als Fremdbestandteile in gemischt- und grobkörnige Materialien (Feinkornanteil insg.  $> 15\%$ ).

Fremdstoffen geringer Dichte zur signifikanten Abnahme der Tragfähigkeit. Bei Polystyrolschaumkugeln als Fremdstoff führte bereits ein Anteil im RC-Material von 0,2 M.-% zu einer stark negativen Beeinflussung der Eigenschaften.

Die Versuche zeigten für alle RC-Materialien und RC-Materialien mit Bodenanteilen meist nur untergeordnete Änderungen in der Körnungslinie durch Kornbruch bei der Verdichtung (maximal dokumentierte Erhöhung des Feinkornanteils etwa 4 %). Aus derzeitiger Sicht ist auch bei hohen Ziegelanteilen (hier 40 %) keine maßgebliche Änderung der Eigenschaften zu erwarten. Grundsätzlich ist aber mit steigendem Anteil von Material mit entsprechend niedriger Einzelkornfestigkeit im Gemisch durchaus mit Kornzertrümmerung durch Verdichtung zu rechnen.

Die Untersuchungen zur dränierten Scherfestigkeit bestätigen die bereits in der Literatur berichteten Eigenheiten solcher RC-Materialien. So sind in der Regel für die gebrochenen Körner unter Ansatz des Mohr-Coulomb-Kriteriums hohe Reibungswinkel und nennenswerte Werte für Kohäsion dokumentiert. Mit oder ohne Ansatz einer Kohäsion liegen die Werte für die dränierten Reibungswinkel durchwegs im Bereich von vergleichbaren natürlichen Körnungen. Ohne Bodenanteile liegen die dränierten Reibungswinkel (im Verdichtungsoptimum) im Bereich um 40°. Nennenswerte feinkörnige Bodenanteile im RC-Material liefern Werte, die niedriger liegen als jene des reinen RC-Materials.

Das untersuchte RC-Material aus Bauschutt (RC-Mix) zeigte in der Körnung 0/4 mm deutlich höhere Frosthebungen als in der Körnung 0/32 mm. Gleichzeitig fiel bei der feineren Körnung der CBR-Wert nach Befrostung im Vergleich zum Wert ohne Frostbeanspruchung um etwa die Hälfte ab, während für das gröbere Material im selben Vergleich sogar eine leichte Tragfähigkeitssteigerung (CBR) dokumentiert wurde. Eine Feuchtraumlagerung vor Befrostung der grobkörnigen Proben bewirkte eine weitere Zunahme der Tragfähigkeit (CBR) und eine leichte Abnahme der Frosthebung im Vergleich zu Proben ohne Feuchtraumlagerung. Nennenswerte Anteile an grobkörnigen Boden (hier Boden GW) im RC-Material der Körnung 0/32 mm führten zu niedrigeren Frosthebungen im Vergleich zu RC-Material ohne Bodenanteile, wobei auch eine deutliche Erhöhung der Tragfähigkeit (CBR) nach Befrostung dokumentiert werden konnte. Die Erhöhung der Tragfähigkeit der untersuchten groben RC-Materialien trotz der durch Befrostung bedingten Auflockerung ist derzeit nicht ausreichend untersucht.

Das Langzeitverhalten von RC-Materialien wurde mit Einaxialen Druckversuchen und Durchlässigkeitsversuchen am RC-Mix 0/32 mm nach unterschiedlicher Lagerungsdauer und bei verschiedenen Lagerungsarten untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass vor allem innerhalb der ersten Monate eine deutliche Verfestigung der verdichteten Proben stattfand, unabhängig davon, ob die Proben im Feuchtraum oder im Wasser gelagert wurden. Gleichzeitig konnte bei der Wasserlagerung eine Tendenz zur Verringerung der Durchlässigkeit über die Lagerungszeit festgestellt werden.

Bei der Verdichtungskontrolle von RC-Materialien im Feld ist darauf zu achten, dass der Nachweis des Verdichtungserfolgs über indirekte Prüfmerkmale mit der statischen Lastplatte aus derzeitiger Sicht analog zur Kontrolle natürlicher Böden gemäß

ZTV E-StB 09 erfolgen kann. Bei der Anwendung des Leichten Fallgewichtsgeräts zur Verdichtungskontrolle ist auch für grobkörnige RC-Materialien ein von natürlichen Böden abweichendes Verhältnis zwischen  $E_{vd}$  und  $D_{Pr}$  zu erwarten. Die Übertragung der Richtwerte für grobkörnige Böden gemäß ZTV E-StB 09 auf grobkörnige RC-Materialien (gleicher Bodengruppe nach DIN 18196) wird auf Basis der Versuchsergebnisse nicht empfohlen.

#### 4.2.2 Hausmüllverbrennungsasche

Beide untersuchten HMV-Aschen wiesen keine typischen Verdichtungskurven auf, der Verdichtungserfolg zeigte sich nahezu unabhängig vom Wassergehalt. Die Ergebnisse weisen allerdings auf die möglichen Unterschiede der erdbautechnischen Eigenschaften solcher Produkte hin. So wies HMVA A nach Verdichtung trotz sehr ähnlicher Körnung allgemein niedrigere Trockendichten und Tragfähigkeiten auf als HMVA B. Der Grund für die Unterschiede ist derzeit nicht geklärt. Insgesamt führte bei beiden Aschen jeweils die gröbere Körnung zu höheren Trockendichten und Tragfähigkeiten. Die verarbeitbaren Wassergehalte liegen dabei allerdings niedriger als bei den feineren Körnungen.

Jene Asche, die in den Verdichtungsversuchen die höheren Trockendichten und Tragfähigkeiten aufwies (HMVA B), zeigte keine Änderung der Kornverteilungslinie durch Verdichtung. Bei der zweiten Asche (HMVA A) hingegen wurde bei den untersuchten Körnungen (0/4 mm und 0/32 mm) maximal eine Erhöhung des Anteils < 2 mm um etwa 6 % und eine maximale Erhöhung des Feinkornanteils von etwa 4 % dokumentiert. Die Dimension der Kornzertrümmerung lässt eine grundlegende Änderung des bautechnischen Verhaltens durch Kornbruch bei Verdichtung allerdings nicht erwarten, das Material bleibt gut abgestuft.

Durch die Befrostung mit und ohne vorangegangene Feuchtraumlagerung wurde die Tragfähigkeit der Proben nicht maßgeblich beeinflusst. Die dokumentierten Werte für die Frosthebung befinden sich in derselben Größenordnung wie jene des RC-Materials.

Aus den Ergebnissen von Versuchen zur einaxialen Druckfestigkeit an den zwei ausgewählten Versuchsaschen war zu entnehmen, dass sich sowohl die Durchlässigkeit als auch die Druckfestigkeit im Laufe einer Wasser- beziehungsweise Feuchtraumlagerung ändern können. Die beiden Effekte sind markant bei derselben Asche jeweils als Anstieg beider Werte (Druckfestigkeit und Durchlässigkeit) über die Zeit dokumentiert, während die andere Asche nur sehr untergeordnete Änderungen im zeitlichen Verlauf aufweist.

### 4.3 Die Ergebnisse im Kontext des straßenbautechnischen Regelwerks

#### 4.3.1 Vorgaben der ZTV E-StB 09

Das erdbautechnische Regelwerk der FGSV trennt die Baustoffe Boden, Boden mit Fremdbestandteilen und RC-Baustoff. Die Trennung erfolgt anhand des Anteils an Boden und mineralischen Fremdbestandteilen.

Insgesamt zeigt sich das Verhalten von Gemischen aus Boden und mineralischen Fremdbestandteilen vom jeweiligen Mischungsverhältnis dieser Bestandteile abhängig. Eine scharfe Grenze, ab der die bautechnischen Eigenschaften eindeutig von einem bestimmten Bestandteil dominiert werden, konnte in den Versuchen nicht bestätigt werden. Aus dem bautechnischen Verhalten der untersuchten RC-Materialien und Mischungen mit Boden konnte zusammenfassend nicht die Notwendigkeit einer allgemeingültigen Grenze zwischen jenen im Regelwerk definierten Baustoffen abgeleitet werden. Dies wurde auch in den Versuchen von Henzinger et al. (2015) bestätigt, die zur Beschreibung des bautechnischen Verhaltens die Klassifizierung solcher Materialien gemäß DIN 18196 als ausreichend erachten.

Die Verwendung von HMV-Aschen ist nach den Vorgaben der ZTV E-StB nur für bestimmte Anwendungen vorgesehen. Grundsätzlich zeigen die Untersuchungen, dass HMV-Aschen durchaus hochwertige bautechnische Eigenschaften in Bezug auf Verdichtbarkeit, Tragfähigkeit und Potenzial zur Nachverfestigung aufweisen. Der Aufschluss dieses Materials aus planmäßig durchströmten Bauteilen (Filter- und Sickerschichten) nach ZTV E-StB wird durch die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse gleichzeitig bestätigt (Änderung der Durchlässigkeit mit steigendem Alter).

#### 4.3.2 Vorgaben der TL BuB E-StB 09

Die TL BuB E-StB regeln im Rahmen des Regelwerks der FGSV die Anforderungen an Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus. Unter anderem sind darin Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von Material der Kategorie "Boden mit Fremdbestandteilen" und von "Rezyklierten Baustoffen" festgelegt. Die Beschränkungen umfassen für beide Materialgruppen jeweils einen maximal zulässigen Anteil an Ausbauasphalt (< 10 M.-%) und einen maximal zulässigen Anteil an Fremdstoffen wie Holz, Gummi, Kunststoffen und Textilien (< 0,2 M.-%).

Die eigenen Versuche bestätigen grundsätzlich das in TL BuB E-StB gewählte Vorgehen ohne Beschränkung der mineralischen Fremdbestandteile (exkl. Ausbauasphalt). Weder aus der Literatur noch aus den Ergebnissen der eigenen Versuche konnte für hohe Anteile des mineralischen Fremdbestandteils Ziegel grundsätzlich eine mangelnde Eignung abgeleitet werden. Andere Fremdbestandteile wie Kalksandstein oder Porenbeton wurden nicht untersucht. Bezieht man sich allerdings auf die Arbeit von Baumgärtel et al. (2009), bestehen im Allgemeinen keine verwitterungsbedingten Einschränkungen an die erdbautechnische Eignung solcher Materialien. Wie bereits durch Baumgärtel et al. (2009) vorgeschlagen, kann der möglichen Kornzertrümmerung durch den Verdichtungsprozess bei der Eignungsprüfung dadurch begegnet werden, dass die Beurteilung der Frostempfindlichkeit des jeweiligen Materials gemäß den ZTV E-StB (Klassifikationsmerkmale werden aus der Korngrößenverteilung abgeleitet) anhand einer zuvor verdichteten Probe erfolgt. Für mineralische Fremdstoffe mit niedriger Partikelfestigkeit wie Mörtel und Putz schlagen Baumgärtel et al. (2009) im Gemisch mit gemischt- und grobkörnigen Böden eine Beschränkung auf einen Anteil von maximal 10 M.-% vor.

In den eigenen Untersuchungen zur Beeinflussung der erdbautechnischen Eigenschaften von Gemischen mit unterschiedli-

chen Anteilen an Fremdstoffen konnte gezeigt werden, dass der im Regelwerk formulierte, maximal zulässige Anteil an Fremdstoffen von 0,2 M.-% eine teils problematische, teils aber auch konservative Grenze darstellt. Für Fremdstoffe sehr niedriger Dichte (wie zum Beispiel Polystyrolschaumkugeln) ist bereits bei einem Anteil von 0,2 M.-% eine deutliche Beeinflussung von Verdichtung und Tragfähigkeit zu erwarten. Für Fremdstoffe höherer Dichte (wie hier zum Beispiel Kunststoffgranulat) wurde auch bei höheren Anteilen nur eine untergeordnete Beeinflussung festgestellt. Nach Baumgärtel et al. (2009) sollte die Vorgabe der TL BuB E-StB zur Beschränkung des Fremdstoffanteils, vor allem von Fremdstoffen geringer Rohdichte, bezogen auf den Volumenanteil erfolgen. Im Kontext der Ergebnisse der eigenen Untersuchungen und in Anlehnung an Baumgärtel et al. (2009) wird vorgeschlagen, zusätzlich zur bereits bestehenden Begrenzung (0,2 M.-%) den maximal zulässigen Anteil an Fremdstoffen im Gemisch für Fremdstoffe mit Dichten  $< 0,05 \text{ g/cm}^3$  auf 10 Vol.-% zu beschränken.

Die Vorgaben der TL BuB E-StB in Bezug auf Hausmüllverbrennungsaschen können aus derzeitiger Sicht nur bestätigt werden. Außerdem unterstreichen die Tendenzen zur Änderung der Durchlässigkeit mit der Zeit die Relevanz der Forderung der TL BuB E-StB nach Raumbeständigkeit der Aschen.

#### 4.3.3 Beurteilungsschema für Recyclingmaterialien mit und ohne Bodenanteile

Im "Merkblatt über die Verwendung von Boden ohne und mit Fremdbestandteilen im Straßenbau" (M BomF, Ausgabe 2015) ist der Einfluss von Fremdbestandteilen auf die bautechnischen Eigenschaften unterschiedlicher Böden hauptsächlich auf Grundlage der Erkenntnisse von Baumgärtel et al. (2009) beschrieben. Das Vorhandensein einer scharfen Grenze zwischen Boden mit Fremdbestandteilen und RC-Baustoffen konnte in den eigenen Untersuchungen und jenen von Henzinger et al. (2015) aus bautechnischer Sicht nicht bestätigt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass mit zunehmendem Anteil des RC-Materials am Gemisch das Verhalten fortschreitend dominant wird. Aus derzeitiger Sicht können daher die im Merkblatt M BomF dargestellten Tabellen auf Gemische aus Böden und RC-Materialien für verallgemeinert werden. Das vom natürlichen Boden einer Körnung abweichende bautechnische Verhalten eines Gemischs aus Boden und RC-Material ergibt sich damit allgemein aus den Unterschieden der Eigenschaften der einzelnen Bestandteile und deren Anteil an der Gesamtkörnung. Auf eine Quantifizierung der Beeinflussung wie in den Tabellen des M BomF sollte deshalb wohl verzichtet werden.

## 5 Schlussfolgerungen

Die erarbeiteten Ergebnisse unterstreichen das Potenzial von Böden mit organischen Bestandteilen, von weichen fein- und gemischtkörnigen Böden und Sekundärbaustoffen für die Verwendung im Erdbau. Die Entscheidung, ob und wie die beschriebenen Materialien im konkreten Fall eingesetzt oder einsetzbar gemacht werden können, ist letztlich eine Einzelfallentscheidung. Dem Bauherrn und Planern sollte mit der vorliegenden Auswertung, Zusammenfassung und Interpretation aber ein nützliches Werkzeug für eine erste Abschätzung einiger wichti-

ger bautechnischer Eigenschaften und Hinweise für Anwendungsbereiche und Grenzen unterschiedlicher Verfahren zur Verwendbarmachung zur Verfügung gestellt werden.

Ohne Einschränkungen haben Erdbaustoffe die Anforderungen der Bauwerke zu erfüllen, zu deren Erstellung sie verwendet werden. Doch vor allem die vielen unterschiedlichen Zwecke, zu denen Erdbauwerke errichtet werden, erlauben oft erst die notwendige Flexibilität, um mit den Eigenschaften von Böden mit organischen Anteilen umzugehen. Eine technische Rechtfertigung, solche Materialien mit organischen Anteilen bis etwa 30 % von der Eignung für grundsätzlich alle Anwendungen auszuschließen, wurde in dieser Untersuchung nicht gefunden.

Die Untersuchungen zur Verwendbarmachung unterschiedlicher fein- und gemischtkörniger Böden haben verdeutlicht, dass bereits heute die technischen Möglichkeiten bestehen, Böden unterschiedlichster Eigenschaften in ihrem gesamten Plastizitätsbereich beziehungsweise bei hohen Wassergehalten für den Erdbau verwendbar zu machen. Eine Änderung der wirtschaftlichen Randbedingungen kann letztlich dazu führen, dass das derzeit in hoher Menge abgelagerte Bodenmaterial auf diese Weise einer hochwertigen Verwertung zugänglich gemacht wird.

Auch der Verwendung von Sekundärbaustoffen, wie RC-Baustoffen, RC-Baustoffe mit Bodenanteilen und/oder mineralischen Fremdbestandteilen sowie HMV-Aschen im Erdbau ist aus bautechnischer Sicht sinnvoll. Bei vielen Eigenschaften bestehen deutliche Ähnlichkeiten der Sekundärbaustoffe zu natürlichen Böden. Mit Vorsicht ist vor allem bei RC-Materialien mit Fremdstoffen niedriger Dichte und bei HMV-Aschen vorzugehen, die noch nicht ausreichend lang abgelagert wurden (Nachweis der Volumenbeständigkeit) und deutlich mit dem Bodenwasser reagieren. Bei solchen Materialien können sich die Eigenschaften nachträglich auch nachteilig ändern.

## 6 Literatur

Baumgärtel, T.; Heyer, D.; Vogt, N. (2009): Erdbautechnische Eignung und Klassifikation von Böden mit Fremdbestandteilen und von Bauschutt. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 1020, Herausgeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.

Dehoust, G.; Küppers, P.; Gebhardt, P.; Rheinberger, U.; Hermann, A. (2008): Aufkommen, Qualität und Verbleib mineralischer Abfälle – Endbericht. *Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes*. Öko-Institut e. V. Darmstadt.

Henzinger, C.; Barka, E.; Birle, E.; Heyer, D. (2015): Belastbarkeit von eingeführten Volumen-%- beziehungsweise Massen-%-Grenzen bei Bodenmaterial. *Forschungsbericht zu FE-Nr. 05.0183/2013/CGB im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur*, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, noch nicht veröffentlicht.

Ostermayer, H. (1976): Das Verhalten gemischtkörniger Böden im einachsigen Formänderungszustand. *Mitteilungen*

aus dem Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität München.  
Diss. Technische Universität München, München.