

Erdbautechnische Eignung und Klassifikation von Böden mit Fremdbestandteilen und von Bauschutt

FA 5.145

Forschungsstelle: Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau (Prof. Dr.-Ing. N. Vogt)

Bearbeiter: Heyer, D. / Baumgärtel, T.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Oktober 2008

1 Aufgabenstellung

Aus wirtschaftlichen und umweltbezogenen Gründen (Beendigung der Deponierung von Abfällen, Reduzierung der Verfüllmöglichkeiten, Bevorzugung einer Verwertung) werden Recycling-Baustoffe, industriell hergestellte Gesteinskörnungen, Böden mit Fremdbestandteilen und Bauschutt als Baustoffe im Erdbau an Bedeutung gewinnen. Jedoch sind für die Beurteilung der erdbautechnischen und bodenmechanischen Eigenschaften der genannten Baustoffe verschiedene technische Fragen bisher nicht geklärt, sodass hierzu die ZTV E-StB nur allgemeine Vorgaben enthält.

Mit der vorliegenden Forschungsarbeit wurde die erdbautechnische Eignung von Böden mit Fremdbestandteilen und von Bauschutt untersucht, um deren Einsatz als Alternative zum Baustoff Boden bei der Erstellung von Erdbauwerken in technischer Hinsicht zu beurteilen und festzulegen, welche eventuell besonderen technischen Anforderungen an sie zu stellen sind. Anhand der Ergebnisse dieser Forschungsarbeit soll gegebenenfalls eine Eingliederung von Böden mit Fremdbestandteilen und von Bauschutt in das straßenbautechnische Regelwerk (TL BuB E-StB und ZTV E-StB) erfolgen. In die Untersuchungen wurden exemplarisch auch industriell hergestellte Gesteinskörnungen einbezogen, da diese sowohl separat im Erdbau Verwendung finden können als auch als Fremdbestandteile in Böden auftreten.

Für die Forschungsarbeit wesentlich ist die thematische Trennung von erdbautechnischen und umwelttechnischen Anforderungen. So wurden nur Stoffe betrachtet, deren Einsatz aus umwelttechnischen Gesichtspunkten zulässig ist bzw. deren diesbezügliche Eignung erwartet werden kann.

2 Untersuchungsmethodik

In einem ersten Schritt wurde untersucht, welche Fremdbestandteile in Böden vornehmlich zu erwarten sind und in welcher stofflichen Kennzeichnung Bauschutt im Wesentlichen auftritt. Es wurde auch beurteilt, ob maßgebliche Mengen bisher noch nicht rezykliert werden und daher ein zukünftiges Nutzungspotenzial erwarten lassen.

In einem zweiten Schritt wurden labortechnische Untersuchungen und Klassifikationen zur Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit an maßgeblichen Fremdbestandteilen und industriell hergestellten Gesteinskörnungen durchgeführt. Dieses Vorgehen beruhte auf dem Ansatz, dass sich die Dauerhaftigkeit von Bauwerken aus Böden mit Fremdbestandteilen, aus Bauschutt bzw. industriell hergestellten Gesteinskörnungen gegenüber dem Zustand nach der Errichtung insbesondere dann nachteilig verändern kann, wenn enthaltene Fremdbestandteile bzw. industriell hergestellte Gesteinskörnungen bei mechanischen und hydraulischen Be-

anspruchungen nicht dauerhaft fest sind. Als Analogiemodell diente das Verhalten der veränderlich festen Gesteine.

Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit wurde auf klassifizierende Versuche aus dem Fachgebiet der Boden- und Felsmechanik zurückgegriffen. Als geeigneter Laborversuch zum Erkennen und zur Beurteilung einer veränderlichen Festigkeit ist der Siebtrommelversuch nach TP BF-StB Teil C 20 etabliert.

In einem dritten Schritt wurden die erdbautechnischen Eigenschaften von Böden mit Fremdbestandteilen, die im Labor gezielt aus natürlichen Böden (GU, GT* und TL) und maßgeblichen Fremdbestandteilen (RC-Beton, Ziegelgranulat, einem Gemisch aus Mörtel/Putz und Porenbeton sowie HMVA) hergestellt wurden, sowie von Vorabsiebmaterialien aus der Bauschuttzubereitung untersucht. Das Untersuchungskonzept beinhaltete die Bestimmung der Korngrößenverteilungen, Proctorversuche, Bestimmung der Kornzertrümmerung infolge Verdichtung mit Proctorenergie, CBR-Versuche zur Beurteilung der Tragfähigkeit sowie exemplarische Triaxialversuche.

An einem Vorabsiebmaterial aus der Bauschuttzubereitung wurden Frost-Hebungsversuche durchgeführt, um zu beurteilen, inwieweit die Einteilung von Böden in die Frostempfindlichkeitsklassen nach den ZTV E-StB auch für diese Materialien zutreffend ist.

3 Untersuchungsergebnisse

Die Arten der Stoffe, die in Böden mit Fremdbestandteilen zu erwarten sind, sind nicht exakt zu quantifizieren. Es ist anzunehmen, dass sich Fremdbestandteile im Boden im Wesentlichen aus Bauschutt zusammensetzen. Weitere Bestandteile wie Aschen, Schlacken, Holz, Brandreste, Bitumen und Asphalt können ebenso, aber meist in geringeren Mengen enthalten sein.

Die Zusammensetzung von Bauschutt variiert in Abhängigkeit vom abgebrochenen Bauwerk und Abbruchverfahren. Die für einen Einsatz im Erdbau des Straßenbaus relevanten mineralischen Bauschuttbestandteile sind im Wesentlichen aus Beton, Mauerwerk und Mörtel/Putz zusammengesetzt. Demnach sind diese drei Stoffgruppen sowohl für die im Boden enthaltenen Fremdbestandteile als auch für aus Bauschutt bzw. daraus hergestellte RC-Baustoffe bestimmend.

Aus dem Bereich der industriell hergestellten Gesteinskörnungen sind Eisenhüttenschlacken, Stahlwerkschlacken, Hausmüllverbrennungsgasche, Schmelzkammergranulat und Gießereirestsande für einen Einsatz im Erdbau des Straßenbaus relevant. Insbesondere bei den Stahlwerkschlacken und den Gießereirestsanden werden aktuell noch größere Mengen deponiert, sodass ein entsprechendes Nutzungspotenzial möglich erscheint.

Die Ergebnisse der Siebtrommelversuche zeigten, dass die Versuchstechnik prinzipiell auch zur Untersuchung von Fremdbestandteilen und industriell hergestellten Gesteinskörnungen geeignet ist. Für eine erdbautechnische Klassifizierung ist aber eine ausschließliche Versuchsauswertung nach den Vorgaben der TP BF-StB Teil C 20 nicht ausreichend, da die eintretenden Veränderungen (Kornbruch, Zerfall in Zuschlagstoffe) nicht immer ausreichend erfasst würden und Fehlbeurteilungen möglich wären. Zur weiteren Differenzierung wurden Versuchsergebnisse herangezogen, die bei einer Versuchsdurchführung nach TP BF-StB Teil C 20 zwar erfasst aber bisher nicht strukturiert ausgewertet werden. So wurden der "Abriebwiderstand ΔI_{d2-6} " sowie die "Kornbindung" neu definiert. Anhand

dieses erweiterten Auswerteschemas wurden für Fremdbestandteile und industriell hergestellte Gesteinskörnungen die Veränderlichkeitsgruppen V0 bis V4 entwickelt:

- Fremdbestandteile und industriell hergestellte Gesteinskörnungen der Veränderlichkeitsgruppen V0, V1 und V2 (in dieser Forschungsarbeit waren dies: EOS, RC-Beton, Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton) weisen eine Verwitterungsbeständigkeit auf.
- Fremdbestandteile und industriell hergestellte Gesteinskörnungen der Veränderlichkeitsgruppe V3 können zerfallen, eine vollständige Entfestigung ist nicht zu erwarten (in dieser Forschungsarbeit waren dies: HMVA, Asphaltgranulat).
- Fremdbestandteile und industriell hergestellte Gesteinskörnungen der Veränderlichkeitsgruppe V4 (in dieser Forschungsarbeit waren dies Proben, die Mörtel und Putz enthielten) weisen ein äquivalentes Zerfallsverhalten zu veränderlich festen Gesteinen auf.

Die Verdichtungseigenschaften und die Tragfähigkeit von Böden mit Fremdbestandteilen sind von der Bodengruppe sowie der Art und Menge der Fremdbestandteile abhängig. Nach den Ergebnissen der Laborversuche ist für einen Anteil an Fremdbestandteilen von 50 M.-% zwischen grobkörnigen und gemischtkörnigen (Feinkornanteil $\leq 15\%$) Böden mit Fremdbestandteilen sowie gemischtkörnigen (Feinkornanteil $> 15\%$) und feinkörnigen Böden mit Fremdbestandteilen zu unterscheiden:

- Grobkörnige und gemischtkörnige (Feinkornanteil $\leq 15\%$) Böden mit Fremdbestandteilen
 - Bei einem Anteil an Fremdbestandteilen von 50 M.-% wurden sowohl die Verdichtungseigenschaften als auch die Tragfähigkeiten von den entsprechenden Eigenschaften der Fremdbestandteile bestimmt. Eine Vergleichbarkeit zu natürlichen grobkörnigen Böden war nur gegeben, falls die reinen Fremdbestandteile ähnliche Verdichtungseigenschaften wie natürliche Böden aufwiesen.
 - Bei 50 M.-% Ziegelgranulat bzw. 50 M.-% HMVA konnte jeweils keine eindeutige Proctorkurve ermittelt werden. Die Tragfähigkeiten bei diesen Böden mit Fremdbestandteilen waren unabhängig vom Einbauwassergehalt und der Einbautrockendichte gleich groß.
 - Die Tragfähigkeiten der grobkörnigen Böden mit Fremdbestandteilen waren gegenüber denen der reinen Fremdbestandteile als günstiger zu beurteilen, waren aber teils deutlich geringer als die vergleichbarer natürlicher mineralischer Böden.
 - Bei geringeren Anteilen an Fremdbestandteilen als den untersuchten 50 M.-% ist zu erwarten, dass sich die Eigenschaften von grobkörnigen Böden mit Fremdbestandteilen den Eigenschaften natürlicher mineralischer Böden vergleichbarer Bodengruppen angleichen.
 - Bei Verdichtung mit Proctorenergie trat überwiegend eine deutliche Kornzertrümmerung auf, was auf die Zertrümmerung der Fremdbestandteile zurückgeführt wurde.
- Gemischtkörnige (Feinkornanteil $> 15\%$) und feinkörnige Böden mit Fremdbestandteilen

- In der Regel wurden eindeutige Zusammenhänge zwischen Einbautrockendichten und Einbauwassergehalten ermittelt. Die Charakteristik der Ergebnisse der Proctorversuche war vergleichbar zu natürlichen mineralischen Böden. Der Einfluss der Fremdbestandteile war an der Größe der erreichbaren Proctordichten und Proctorwassergehalte erkennbar.
- Die Tragfähigkeit der gemischtkörnigen Böden mit Fremdbestandteilen war teils besser zu beurteilen als die vergleichbarer natürlicher Böden. Die grobkörnigen Fremdbestandteile führten bei feinkörnigen Böden zu einer mechanischen Bodenverbesserung.
- Die Scherfestigkeit gemischtkörniger Böden mit Fremdbestandteilen ist bei Fremdbestandteilen der Veränderlichkeitsgruppe V1 zumindest gleichwertig mit natürlichen Böden vergleichbarer Korngrößenverteilung. Bei Fremdbestandteilen geringerer Kornfestigkeit ist aber eine Verminderung der Scherfestigkeit nicht ausgeschlossen.
- Poröse Fremdbestandteile führen zu erhöhten Luftporenanteilen, wodurch die Anforderungen der ZTV E-StB an den Luftporenanteil bei fein- und gemischtkörnigen Böden eventuell nicht erfüllt werden können.
- Bei feinkörnigen Böden mit 25 M.-% Fremdbestandteilen wurde keine wesentliche Beeinflussung der Eigenschaften des Bodens TL durch die Fremdbestandteile festgestellt. Die Verdichtungseigenschaften und die Tragfähigkeiten waren typisch für bindige feinkörnige Böden.
- Kornzertrümmerungen der Fremdbestandteile bei Verdichtung mit Proctorenergie konnten nur bei feinkörnigen Böden mit Fremdbestandteilen nicht mehr eindeutig nachgewiesen werden.

4 Erdbautechnische Anwendungsempfehlungen

4.1 Benennen, Beschreiben und Beurteilen von Böden mit Fremdbestandteilen und von Bauschutt

Die Benennung und Beschreibung von Böden mit Fremdbestandteilen, Bauschutt bzw. RC-Baustoffen und industriell hergestellten Gesteinskörnungen nach DIN EN ISO 14688-1 ist ebenso möglich und sinnvoll wie eine Klassifikation für bautechnische Zwecke nach DIN 18196.

Eine Unterscheidung zwischen Böden und Böden mit Fremdbestandteilen anhand des Anteils an Fremdbestandteilen von 50 M.-% ist eine praktikable und messtechnisch eindeutig bestimmbare Grenze.

Für eine Beurteilung der erdbautechnischen Eigenschaften von Böden mit Fremdbestandteilen und Bauschutt bzw. RC-Baustoffen ist die Kenntnis der stofflichen Kennzeichnung erforderlich. Die Anteile an Boden sowie die Anteile und die Arten an Fremdbestandteilen sind zu ermitteln. Der zulässige Anteil von Fremdstoffen ist zu begrenzen, wobei Fremdstoffe geringer Dichte von einer massebezogenen Begrenzung auszunehmen und stattdessen volumenbezogen zu begrenzen sind.

Zur Klassifizierung der Beständigkeit von mineralischen Fremdbestandteilen, Bauschutt bzw. RC-Baustoffen und industriell hergestellten Gesteinskörnungen gegen Verwitterung sind Siebtrommelversuche nach TP BF-StB Teil C 20 durchzuführen und entsprechend dem entwickelten Auswerteschema in die Veränderlichkeitsgruppen V0 bis V4 einzuteilen und zu beurteilen.

- Stoffe der Veränderlichkeitsgruppen V0, V1, V2 lassen eine Beständigkeit gegen Verwitterung annehmen. Einschränkungen der erdbautechnischen Eignung bestehen nicht.
- Stoffe der Veränderlichkeitsgruppe V3 können in beschränktem Umfang entfestigen. Die Anforderungen des straßenbautechnischen Regelwerks an veränderlich feste Gesteine sind jedoch nicht zu beachten.
- Stoffe der Veränderlichkeitsgruppe V4 weisen ein zu veränderlich festen Gesteinen äquivalentes Zerfallverhalten auf. Bei entsprechenden Stoffen sind die Anforderungen des straßenbautechnischen Regelwerks an veränderlich feste Gesteine zu beachten.
- Bei Stoffen der Veränderlichkeitsgruppen V0, V1, V2 und V3 können durch Fremdbestandteile verursachte Luftporenanteile $n_a > 12\%$ akzeptiert werden.
- Bei Stoffen der Veränderlichkeitsgruppe V4 sind die Anforderungen an den Luftporenanteil zu erfüllen.

Bei grob- und gemischtkörnigen Böden mit Fremdbestandteilen sowie bei Bauschutt bzw. RC-Baustoffen können die Eigenschaften einzelner Stoffe bestimmend für die ganze Probe werden. Unerwünschte Auswirkungen auf die Erstellung und die Dauerhaftigkeit von Erdbauwerken sind insbesondere dann nicht ausgeschlossen, wenn einzelne Stoffe während der Verdichtung stark zertrümmert werden, ein uneinheitliches Einbauverhalten aufweisen sowie vergleichsweise geringe Tragfähigkeiten und Scherfestigkeiten besitzen. Um die erdbautechnischen Eigenschaften grob- und gemischtkörniger Böden mit Fremdbestandteilen sowie die von Bauschutt bzw. RC-Baustoffen zu vergleichmäßigen, wird vorgeschlagen, die Anteile bestimmter Stoffe zu begrenzen und als Beurteilungskriterium die Ergebnisse der Siebtrommelversuche heranzuziehen. Eine Begrenzung sollte für Stoffe der Veränderlichkeitsgruppen V3 und V4 in Betracht gezogen werden:

- Stoffe der Veränderlichkeitsgruppe V3: maximal 25 M.-%
- Stoffe der Veränderlichkeitsgruppe V4: maximal 10 M.-%

Die Notwendigkeit einer Begrenzung der Stoffe der Veränderlichkeitsgruppen V0, V1 und V2 kann aus den durchgeführten Laborversuchen zu Tragfähigkeit und Scherfestigkeit nicht abgeleitet werden.

Da Fremdbestandteile in feinkörnigen Böden die geotechnischen Eigenschaften des feinkörnigen Bodens in der Regel nicht verschlechtern und bei steigenden Anteilen sogar zu einer mechanischen Bodenverbesserung führen, ist für Böden dieser Bodengruppen keine Beschränkung in Abhängigkeit der Veränderlichkeitsgruppe vorgesehen.

Die Beurteilung der Frostempfindlichkeit von Böden mit Fremdbestandteilen sowie RC-Baustoffen sollte nach den Vorgaben der ZTV E-StB erfolgen.

4.2 Einbau, Verdichtung und Tragfähigkeit

Die Zusammensetzung von Bauschutt variiert in Abhängigkeit vom abgebrochenen Bauwerk und Abbruchverfahren. Da folglich die granuläre und stoffliche Kennzeichnung von Bauschutt verschieden ist, ist eine qualifizierte Verwendung im Erdbau in der Regel nur nach vorheriger Aufbereitung (z. B. Sortieren – Sieben – Brechen) möglich. Selbiges gilt für großformatige (Steine und Blöcke) Fremdbestandteile in Böden.

Die Verwendung von Böden mit Fremdbestandteilen, RC-Baustoffen bzw. Bauschutt und industriell hergestellten Gesteinskörnungen im Erdbau bedingt eine Eingliederung in das straßenbautechnische Regelwerk. So sind die Anforderungen der ZTV E-StB an den Verdichtungsgrad D_{pr} und je nach Bodengruppe an den Luftporenanteil n_a einzuhalten. Hierzu sind folgende stoffspezifische Eigenschaften zu beachten:

- Die Durchführung und die Ergebnisse von Proctorversuchen werden von der stofflichen Kennzeichnung von Böden mit Fremdbestandteilen, von Bauschutt bzw. RC-Baustoffen und industriell hergestellten Gesteinskörnungen beeinflusst. Je nach Stoffart und enthaltener Menge kann die Bestimmung der Proctordichte nach DIN 18127 nicht immer möglich sein. Die bei Verdichtung erreichbaren Einbautrockendichten sind dann keine Funktion des Wassergehalts. Die Festlegung eindeutiger Verdichtungsanforderungen entsprechend den Vorgaben der ZTV E-StB ist dann nicht möglich. Für die Verwendung entsprechender Stoffe im Erdbau wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen: Bei eindeutiger Herkunft, gleichmäßigen und dauerhaft ähnlichen Eigenschaften ist die Spannweite der im Proctorversuch erreichbaren Trockendichten anzugeben. Die Verdichtungsanforderungen sind dann auf diese Trockendichten (z. B. Mittelwert) zu beziehen.
- Die Anforderungen an den maximal zulässigen Luftporenanteil $n_a = 12\%$ bei feinkörnigen und gemischtkörnigen Böden (Feinkornanteil $> 15\%$) kann bei porösen und hohlraumreichen Fremdbestandteilen unter Umständen nicht eingehalten werden. Diese höheren Luftporenanteile wären aber kein Nachweis unzureichender Verdichtung, sondern eine stoffspezifische Eigenschaft des Bodens mit Fremdbestandteilen. Zur erdbautechnischen Beurteilung ist in diesen Fällen die Dauerhaftigkeit der relevanten Fremdbestandteile zu beachten, welche durch Siebtrommelversuche nach TP BF-StB Teil C 20 und dem neu entwickelten Auswerteschema (Ermittlung der Veränderlichkeitsgruppen V0 bis V4) zu beurteilen wäre: