

Untersuchungen zum Reaktionsverhalten von Braunkohleflugaschen bei Bodenverbesserungen

FA 5.188

Forschungsstelle: ELE Beratende Ingenieure GmbH, Erdbau-
laboratorium Essen

Bearbeiter: Estermann, U. / Zapata, E.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digi-
tale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Januar 2020

1 Einleitung

Seit den 50er-Jahren des letzten Jahrhunderts werden im Erdbau Böden, die aufgrund ihrer natürlichen Eigenschaften nicht unmittelbar wieder eingebaut werden können oder an die besonderen Anforderungen zum Beispiel im Hinblick auf die Tragfähigkeit gestellt werden, mit Bindemitteln behandelt. Die Bodenbehandlungen mit den genormten Bindemitteln Kalk, Zement und hydraulischen Tragschichtbindern sind im Erdbau anerkannte Verfahren und werden im Straßenbau zur Verbesserung des Unterbaus und des Untergrunds eingesetzt. Durch die Bodenverbesserung der anstehenden Böden werden natürliche Rohstoffressourcen (zum Beispiel Kies und Sand) geschont.

Seit ca. 20 Jahren werden Gemische aus genormten Bindemitteln hergestellt und erfolgreich bei Bodenverbesserungen eingesetzt. Neben diesen Mischbindemitteln werden auch Gemische mit Zusatz von Braunkohleflugasche (BFA) oder auch "reine" BFA für die Bodenverbesserung im Erdbau angeboten. BFA fällt bei der Verbrennung von Braunkohle und gegebenenfalls Mitverbrennungsstoffen in Kohlekraftwerken mit Staubfeuerungen (Trockenfeuerungen) an. Es handelt sich um ein Kraftwerksnebenprodukt im Sinne der TL BuB E-StB 09. BFA enthält unter anderem Kieselsäure (Si_{02}) und freies Calciumoxid (CaO) als hydraulisch wirksame Komponenten. Grundsätzlich besitzen Braunkohleflugaschen die chemischen Voraussetzungen, allein oder im Zusammenwirken mit genormten Bindemitteln für eine Bodenverbesserung verwendet zu werden.

In Deutschland sind Kraftwerke in drei großen Braunkohlerevieren im Rheinland, in Mitteldeutschland und in der Lausitz in Betrieb. Der überwiegende Anteil der Braunkohleförderung erfolgt derzeit im Rheinischen Revier durch die RWE AG. Bekannt ist, dass die dabei anfallende BFA (im Gegensatz zur Steinkohleflugasche) je nach Gewinnungsstätte eine unterschiedliche chemische Zusammensetzung aufweist. Weiterhin beeinflussen die (kraftwerksabhängige) Aschezusammensetzung der Kohle, das Abbrandverhalten, die Verbrennungstemperatur und die Abkühlungsgeschwindigkeit die Wirkungsweise der Aschen. Diese Faktoren beeinflussen die Wassergehaltsreduzierung sowie die folgende Festigkeitsentwicklung der Boden-BFA-Gemische beziehungsweise der Boden-BFA-Bindemittel-Gemische erheblich. Der Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung der Gemische einerseits und des Anteils an freiem Calciumoxid und Si_{02} andererseits ist aktuell nicht bekannt. Zur Durchführung der

Untersuchungen stand BFA aus Kraftwerken aus dem Rheinland, aus Mitteldeutschland und aus der Lausitz zur Verfügung.

Gesamtziel des Vorhabens ist die grundlegende Untersuchung der Anwendungsmöglichkeiten von BFA als Bindemittel oder als Bindemittlersatz (zum Beispiel im Zusammenwirken mit genormten Bindemitteln) bei Bodenverbesserungen im Erdbau. Hierzu ist die Wirksamkeit von BFA auf die Wassergehaltsreduzierung, die Festigkeitsentwicklung und die Wasserempfindlichkeit in Abhängigkeit von unterschiedlichen Ausgangsböden der Bodengruppen UL, TM, SU*, GU* sowie der BFA-Zugabemengen im Vergleich zu genormten Bindemitteln zu untersuchen. Weiterhin ist die Umweltverträglichkeit des Boden-BFA-Gemischs abzuklären.

2 Vorgehensweise und Konzeption

Böden der Bodengruppen UL/TL stehen lokal oberflächennah in größeren Mengen (zum Beispiel Lösslehm) an und erfordern im Zusammenhang mit Erdbaumaßnahmen im Verkehrswegebau oft eine Bodenverbesserungsmaßnahme. Mittelplastische Tone der Bodengruppe TM können ebenfalls mit Bindemitteln verbessert werden, erfordern jedoch einen höheren Aufwand für das Einarbeiten der Bindemittel und das Homogenisieren des Boden-Bindemittel-Gemischs. In der Regel werden für diese Böden Bindemittel mit höherem Kalkanteil verwendet. Weiterhin ist vorgesehen, einzelne ausgewählte Versuchsreihen mit zwei gemischtkörnigen Böden der Bodengruppen SU*/ST* und GU/GU* durchzuführen.

Für die Versuchsreihe 1 wurde ein Lösslehm der Bodengruppe UL ausgewählt. Bodenmechanisch wird der Boden durch das Vorherrschen des Schluffkorns bei Tonkornanteilen zwischen 5 und 15 M.-% und wechselnden Feinsandanteilen oder Feinsandstreifen geprägt. Im Hinblick auf Erdbaumaßnahmen mit diesen Böden ist auf die geringe Plastizitätszahl I_p (Differenz zwischen Fließgrenze und Ausrollgrenze) hinzuweisen. In dem Fall kann I_p mit 3,6 bis 4,1 M.-% angegeben werden. Durch geringe Niederschlagsereignisse kann daher aus einem feinsandigen Grobschluff mit einer steifen bis halbfesten Konsistenz ein Grobschluff breiiger Konsistenz entstehen. Mit der Veränderung der Konsistenz ist – insbesondere bei zusätzlicher dynamischer Beeinflussung durch Baugeräte – immer auch ein Verlust der Scherfestigkeit und der Tragfähigkeit verbunden.

Die Versuchsreihe 2 wurde mit einem feinsandigen, stark schluffigen Ton der Bodengruppe TM ausgeführt. Der Tonkornanteil liegt relativ konstant bei 32,1 M.-%, der Schluffkornanteil schwankt in Grenzen zwischen 44,0 und 45,1 M.-%, das Sandkorn wurde mit 22,8 bis 23,9 M.-% ermittelt. Die Fließgrenze W_L des homogenisierten Materials liegt annähernd konstant bei 49,6 M.-%, die Ausrollgrenze W_p wurde zu 20,6 M.-% ermittelt, womit sich eine Plastizitätszahl I_p von 29,0 M.-% errechnet.

Bei dem für die Versuchsreihe 3 gewählten gemischtkörnigen Boden der Bodengruppe SU* handelt es sich um einen stark sandigen, tonigen, schwach kiesigen Schluff. Der Tonkornanteil schwankt in Grenzen zwischen 15,8 und 16,0 M.-%, der Schluffkornanteil liegt bei 19,2 M.-%, das Sandkorn wurde mit 56,0 bis 58,2 M.-% ermittelt, während der Kieskornanteil mit 6,7 bis 8,9 M.-% angegeben werden kann.

Bei der Auswahl des gemischtkörnigen Bodens der Bodengruppe GU* für die Versuchsreihe 4 war insbesondere darauf zu achten, dass das Größtkorn der Kieskornfraktion < 20,0 mm war, um den bisher verwendeten Versuchszyylinder für den Proctorversuch und die Probekörperherstellung mit einem Durchmesser von 100 mm weiter verwenden zu können. Vom Kornaufbau handelt es sich bei dem gewählten Boden um einen sandigen, stark kiesigen Schluff. Der Schluffkornanteil schwankt in Grenzen zwischen 34,0 und 37,0 M.-%, das Sandkorn wurde mit 20,0 bis 22,0 M.-% ermittelt und der Kieskornanteil liegt zwischen 41,0 und 46,0 M.-%.

Nach Auswahl der Versuchsböden wurden die Versuche am Boden-BFA-Gemisch beziehungsweise am Boden-Bindemittel-Gemisch durchgeführt.

Die Wahl der Zugabemenge der BFA erfolgte unter Berücksichtigung von Voruntersuchungen an der BFA. Danach wurden Zugabemengen von 4, 10 und 16 M.-% BFA für die Verbesserung der feinkörnigen Böden der Bodengruppe UL und TM untersucht. Außerdem wurden Versuche mit den zuvor genannten Zugabemengen der BFA aus der Lausitz und zusätzlicher Zugabe von 2 M.-% Kalk durchgeführt. Für die Wahl der notwendigen Bindemittelmenge für eine Bodenverbesserung mit Kalk (2, 3 und 4 M.-%) oder Zement (3, 4 und 6 M.-%) wurden dagegen Erfahrungen aus den Regelwerken (TP BF-StB Teil B 11.3) herangezogen.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse an den feinkörnigen Böden wurde jeweils eine Versuchsreihe an gemischtkörnigen Böden der Bodengruppe SU* und der Bodengruppe GU* durchgeführt. Hierbei wurde eine BFA-Zugabemenge von 5 M.-% je Revier zur Klärung der Übertragbarkeit der Ergebnisse untersucht. Vergleichende Versuche mit genormten Bindemitteln wurden bei diesen beiden Versuchsreihen nicht durchgeführt.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Wassergehaltsreduzierende Eigenschaften

Die wassergehaltsreduzierenden Eigenschaften von Kalk sind bekannt, hier wurden bei wesentlich geringeren Zugabemengen bei beiden untersuchten feinkörnigen Bodenarten die größten Wassergehaltsreduzierungen gemessen. Die Wassergehaltsveränderung durch die Zugabe von Zement fällt erwartungsgemäß gering aus. Die Verdichtbarkeit feinkörniger Böden (UL/TM) wird durch Zugabe kalkreicher BFA positiv verändert. Die Verbesserung ist bei leichtplastischen Schluffen/Tonen größer als bei mittelpplastischen Tonen. Die erforderlichen Zugabemengen

an BFA liegen allerdings deutlich über den Zugabemengen von Kalk. Für die Verbesserung der Verdichtbarkeit gemischtkörniger Böden können kalkreiche BFA angewandt werden. Allerdings ist der gewünschte Effekt der Wassergehaltsreduzierung in Abhängigkeit von dem feinkörnigen Anteil des Bodens nur gering. Böden der Bodengruppe SU* zeigen ein etwas günstigeres Verhalten als Böden der Bodengruppe GU*. Die kieselsäurehaltige BFA ist für die Bodenverbesserung an feinkörnigen Schluffen geeignet, vergleichsweise gute Ergebnisse werden in Kombination mit Kalk erzielt. Für Bodenverbesserungen von gemischtkörnigen Böden sollten BFA aus der Lausitz wegen der geringen Wirkung nicht verwendet werden.

3.2 Tragfähigkeit und Verformungsverhalten

Die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten von mit Bindemitteln behandelten Böden werden in Abhängigkeit von der Bindemittelzugabe erhöht beziehungsweise verbessert. Der Vergleich der Druckfestigkeiten der mit Kalk hergestellten Probekörper zeigt, dass die Probekörper aus den feinkörnigen Böden im Bereich der für das Boden-BFA-Gemisch aus der Lausitz gemessenen Größenordnung liegen. Die Probekörper aus Zement liegen jeweils deutlich über (Bodengruppe UL) oder im Bereich der höheren Druckfestigkeiten der BFA (Bodengruppe TM). Die an Probekörpern aus den gemischtkörnigen Böden der Bodengruppen SU* und GU* gemessenen Druckfestigkeiten liegen größenordnungsmäßig im Bereich der vergleichbaren Untersuchungen an den feinkörnigen Böden. Die mittleren, gemessenen Druckfestigkeiten an mit der BFA-Lausitz hergestellten Probekörpern zeigen nur eine geringe Nacherhärtung zwischen der 7-Tage-Festigkeit und der 28-Tage-Festigkeit, die Druckfestigkeiten liegen unterhalb der an den aus den kalkreichen BFA hergestellten Probekörpern. Eine Verbesserung des Verformungsverhaltens der BFA-behandelten feinkörnigen Böden ist grundsätzlich erkennbar, bei den gemischtkörnigen Böden ist dagegen keine Verbesserung im Sinne einer Erhöhung für die untersuchte BFA-Zugabe von 5 M.-% feststellbar.

3.3 Wasserempfindlichkeit

Durch die Zugabe von Bindemitteln kann die Wasserempfindlichkeit geeigneter Böden reduziert werden. Die Veränderlichkeit von Böden in Wasser lässt sich zum Beispiel nach DIN EN ISO 14689-1 durch Wasserlagerung bestimmen. Wird nach 24-stündiger Wasserlagerung keine oder nur eine oberflächliche Veränderung der behandelten Böden festgestellt, ist das Boden-Bindemittel-Gemisch nicht wasserempfindlich. In dem Fall wurde in Anlehnung an die TP BF-StB Teil B 11.3 eine 24-stündige Wasserlagerung an 27 Tage alten Probekörpern vor dem Druckversuch durchgeführt. Die mit Kalk als Bindemittel hergestellten Probekörper haben für die Bodengruppe UL die grundsätzliche Eignung bei geringem Festigkeitsabfall (ca. 10 bis 13 %) nachgewiesen, für die Bodengruppe TM ist der Nachweis nicht gelungen. Die Boden-Zement-Gemische haben einen

Festigkeitsabfall zwischen i.M. 35 % bei der Bodengruppe UL und 66 % bei der Bodengruppe TM nachgewiesen. Die meisten aus den feinkörnigen Böden UL und TM und BFA hergestellten Probekörper sind unter Wasser zerfallen, nur an den Probekörper der Bodengruppe UL mit BFA Mitteldeutschland konnten Druckfestigkeiten ermittelt werden. Der Festigkeitsabfall im Vergleich zu den 28 Tage im Feuchtraum gelagerten Probekörpern lag zwischen 23 und 42 %. An den aus der Bodengruppe UL und BFA+Kalk-Gemischen hergestellten Probekörpern lag der Festigkeitsabfall zwischen 42 und 46 %, bei der Bodengruppe TM sind die meisten Probekörper zerfallen. Die Untersuchungen an den gemischtkörnigen Böden haben mit Ausnahme der aus der Bodengruppe GU* und der BFA aus der Lausitz hergestellten Probekörper nach 24-stündiger Wasserlagerung messbare Ergebnisse nachgewiesen, allerdings schwankt der Festigkeitsabfall mit 20 bis 46 % gegenüber den 28 Tage alten Probekörpern zum Teil erheblich.

3.4 Umweltrelevante Veränderungen

Die Zugabe der BFA bewirkt umweltrelevante Veränderungen des Ausgangsbodens. Durch die Zugabe werden – wie auch bei genormten Bindemitteln – der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit deutlich erhöht. Bei den hier untersuchten Boden-BFA-Gemischen wurden im Eluat pH-Werte zwischen 8,8 bis 9,6 bei den feinkörnigen Böden (Zugabemenge 4 M.-%) und zwischen 9,5 und 10,5 bei den gemischtkörnigen Böden (Zugabemenge 5 M.-%) gemessen. Die elektrische Leitfähigkeit wurde in einer noch akzeptierbaren Größenordnung ermittelt. Weiterhin wurden bei diesen Zugabemengen in geringem Umfang Überschreitungen bei Schwermetallen im Feststoff oder im Eluat gemessen. Auffällig ist allerdings bei allen untersuchten Boden-BFA-Gemischen der hohe Sulfatgehalt im Eluat, der mit wenigen Ausnahmen oberhalb des Zuordnungswerts Z2 nach LAGA Boden für Sulfat liegt. Berücksichtigt man, dass alle chemischen Untersuchungen an Boden-BFA-Gemischen mit nur 4 bis 5 M.-% BFA-Zugabe durchgeführt wurden, ist bei bautechnisch erforderlichen, höheren Zugabemengen ein weiter erhöhter Sulfatgehalt zu erwarten.

4 Folgerungen und Empfehlungen

Die Untersuchungsergebnisse bestätigen, dass durch die Zugabe von BFA die Verdichtbarkeit leichtplastischer Böden (Bodengruppe UL, TL) verbessert werden kann. Für die Verbesserung von mittelplastischen Tonen der Bodengruppe TM sind BFA dagegen nur bedingt geeignet, ebenso ist bei gemischtkörnigen Böden der Bodengruppen SU* und GU* keine nennenswerte Verbesserung der Verdichtbarkeit nachweisbar. Um eine messbare Reduzierung des Wassergehalts zu erreichen, sind wesentlich höhere BFA-Zugabemengen erforderlich als beispielsweise bei Verwendung von Kalk.

Das Tragfähigkeits- und Verformungsverhalten von feinkörnigen Böden wird durch die Zugabe von kalkreicher BFA erhöht, bei

den gemischtkörnigen Böden ist eine geringere Verbesserung erkennbar. Die BFA aus der Lausitz zeigt auch hier nur ein geringes Verbesserungspotenzial.

Die aus feinkörnigen Böden der Bodengruppen UL beziehungsweise TM und BFA hergestellten Probekörper zerfallen überwiegend nach 27 Tagen Feuchtraumlagerung und einem Tag Wasserlagerung. Die Probekörper aus den gemischtkörnigen Böden können dagegen nach Wasserlagerung geprüft werden, zeigen allerdings einen teilweise erheblichen Festigkeitsabfall im Vergleich zu gleichalten, nicht unter Wasser gelagerten Proben. Damit ist das Boden-BFA-Gemisch wasserempfindlich und erfahrungsgemäß auch frostempfindlich. Diese Eigenschaft schränkt die Anwendung von BFA bei Bodenverbesserungen ein. Die aus den gemischtkörnigen Böden und BFA hergestellten Gemische sind überwiegend nicht wasserempfindlich, zeigen allerdings auch einen Festigkeitsabfall im Vergleich zu den nicht unter Wasser gelagerten Probekörpern.

Problematisch ist die umweltrelevante Veränderung der Ausgangsböden durch die Zugabe von BFA. Hier ist neben der bekannten Erhöhung des pH-Werts und einiger Schwermetallkonzentrationen insbesondere der Parameter Sulfat zu nennen, der selbst bei geringen Zugabemengen von 4-5 M.-% zu Überschreitungen der Zuordnungswerte Z2 der LAGA für Sulfat führt. Die Untersuchungen zeigen, dass für eine messbare Reduzierung der Wassergehalte und damit einer Verbesserung der Einbaubar- und Verdichtbarkeit größere Zugabemengen erforderlich sind, womit sich das Problem noch verschärft.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass kalkreiche BFA für Bodenverbesserungsmaßnahmen geeignet sind, allerdings werden größere Zugabemengen als bei vergleichbaren genormten Bindemitteln erforderlich. Weiterhin sind die mit BFA verbesserten Schichten vor Wasser zu schützen, da hierdurch ein Festigkeitsabfall bis zum Zerfall der behandelten Schichten beobachtet werden kann. Bei Bodenverbesserungsmaßnahmen mit BFA sind in jedem Fall auch umweltgeotechnische Randbedingungen zu beachten.