

---

# Untersuchungen zum Reaktionsverhalten von Braunkohleflugaschen bei Bodenverbesserungen

---

Fachveröffentlichung der  
Bundesanstalt für  
Straßenwesen

---

# Untersuchungen zum Reaktionsverhalten von Braunkohleflugaschen bei Bodenver- besserungen

---

von

Ulrich Estermann, Evelin Zapata  
ELE Beratende Ingenieure GmbH, Erdbaulaboratorium Essen

---

## Impressum

Fachveröffentlichung zu Forschungsprojekt: 05.0188  
Untersuchungen zum Reaktionsverhalten von Braunkohleflugaschen bei Bodenverbesserungen

Fachbetreuung:  
Michael Bürger

Referat:  
Nachhaltigkeit, Ressourcenschutz und Erdbaustoffe im Straßenbau

Herausgeber:  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

<https://doi.org/10.60850/fv-s-05.0188>

Bergisch Gladbach, Juli 2024

Zu diesem Forschungsprojekt werden nur die Kurzfassung und der Kurzbericht veröffentlicht. Die Langfassung des Schlussberichts kann auf Anfrage an [verlag@bast.de](mailto:verlag@bast.de) zur Verfügung gestellt werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben. Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

## Kurzfassung

Bodenbehandlungen mit den genormten Bindemitteln Kalk, Zement und hydraulischen Tragschichtbindern sind anerkannte Verfahren im Erdbau und werden im Straßenbau zur Verbesserung des Unterbaus und des Untergrundes eingesetzt. Durch die Bodenverbesserung der anstehenden Böden werden natürliche Rohstoffressourcen (z. B. 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 eingesetzt. 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 u.a. Kieselsäure ( $\text{SiO}_2$ ) und freies Calciumoxid ( $\text{CaO}$ ) als hydraulisch wirksame Komponenten. Grundsätzlich besitzen BFA die chemischen Voraussetzungen, um alleine oder im Zusammenwirken mit genormten Bindemitteln für eine Bodenverbesserung verwendet zu werden.

Ziel des Vorhabens war die grundlegende Untersuchung der Anwendungsmöglichkeiten von BFA als Bindemittel oder als Bindemittlersatz (z.B. im Zusammenwirken mit Kalk) bei Bodenverbesserungen im Erdbau. Hierzu wurde die Wirksamkeit von BFA verschiedener Kohlereviere auf die Wassergehaltsreduzierung, die Festigkeitsentwicklung und die Gebrauchstauglichkeit in Abhängigkeit von unterschiedlichen Bodengruppen (UL, TM, SU\*, GU\*) sowie BFA- Zugabemengen im Vergleich zu genormten Bindemitteln untersucht. Weiterhin wurde die Umweltverträglichkeit des Boden-BFA-Gemisches abgeklärt.

Die vorliegenden 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 der feinkörnigen Böden wird durch die Zugabe von kalkreicher BFA erhöht, bei den gemischtkörnigen Böden ist eine geringere Verbesserung erkennbar. Die kieselsäurehaltige BFA aus der Lausitz zeigt diesbezüglich ebenfalls nur ein geringes Verbesserungspotential.

Die aus der BFA und den feinkörnigen Bodengruppen UL bzw. TM hergestellten Probekörper zerfallen überwiegend nach 27 Tagen Feuchtraumlagerung und einem Tag Wasserlagerung. Damit ist das Boden-BFA-Gemisch wasserempfindlich und erfahrungsgemäß auch frostempfindlich. Diese Eigenschaft schränkt die Anwendung von BFA bei Bodenverbesserungen ein, da entsprechende Maßnahmen zum Schutz gegen Oberflächenwasser bei der Herstellung erforderlich sind. 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.

Durch die Zugabe von BFA sind umweltrelevante Veränderungen der Ausgangsböden feststellbar. Neben der bekannten Erhöhung des pH-Wertes und einiger Schwermetalle ist insbesondere der Parameter Sulfat zu nennen, der selbst bei geringen Zugabemengen von 4 bis 5 M.-% zu

Überschreitungen der Zuordnungswerte Z2 der LAGA für Sulfat führt. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass für eine messbare Reduzierung der Wassergehalte und eine Verbesserung der Einbaubarkeit und Verdichtbarkeit größere Zugabemengen erforderlich sind, womit sich das Thema der Umweltverträglichkeit mit Bezug auf Sulfat noch verschärft.

## **Abstract**

### **Investigations on the reaction behaviour of lignite fly ashes during soil improvements**

The treatment of soils using the standard binders lime, cement and hydraulic base course binders are recognised methods in earthworks and are used in road construction to improve the base structure and subsoil. Improvements to the existing soil enable conservation of natural raw materials such as gravel and sand.

For around 20 years, mixtures of standardised binders have been produced and used successfully for ground improvements. In addition to these binder mixtures, mixtures containing added lignite fly ash (LFA) or just 'pure' LFA for use in earthworks for ground improvement. LFA is a product of lignite and possibly other combustible substances used in pulverised coal-fired furnaces (dry-bottom). This is a power plant by-product as defined by the 2009 edition of the Technical Conditions of Delivery for Soils, Earths and Construction Materials Relating to the Earthworks of Road Engineering. LFA includes components such as silica ( $\text{SiO}_2$ ) and free lime ( $\text{CaO}$ ) that have a hydraulic effect. Lignite fly ash generally possesses the chemical properties required to improve soils on its own or in combination with standardised binders.

The objective of this project was to thoroughly study the potential applications of LFA as a binder or substitute binder (e.g. in conjunction with lime) for the purpose of ground improvement in earthworks. To this end, the effect of LFA of several regions on reduced water content, strength development, deformation behaviour and water sensitivity depending on the various soil groups (UL, TM,  $\text{SU}^*$ ,  $\text{GU}^*$ ) was studied, as were LFA amounts to be added in comparison to standardised binders. The environmental compatibility of the soil/LFA mixture was also examined.

These study results confirm that the addition of LFA can improve the compressibility of mildly plastic soils (soil groups UL, TL). However, LFAs are only suitable to a limited degree for improving clays of medium plasticity in the soil group TM, and no noteworthy improvement in compressibility can be found in mixed-grain soils in the soil groups  $\text{SU}^*$  and  $\text{GU}^*$ . To achieve a quantifiable reduction in water content, much greater amounts of LFA must be added than would be the case for lime, for example.

The load-bearing capacity and deformation behaviour of fine-grained soils improves following the addition of lime-rich LFA, whereas the improvement is less pronounced with mixed-grain soils. The LFA containing silica from Lusatia only exhibits low potential for improvement under these conditions.

The samples made of LFA and the fine-grained soil groups UL and TM largely disintegrate after 27 days of moisture chamber storage and after one day of water immersion. This means that the soil/LFA mixture is water-sensitive and – based on experience – also sensitive to frost. This property limits the potential application for LFA in ground improvement, as corresponding measures to protect against surface water are required during creation. The mixtures made from mixed-grain

soils and LFA are largely not water-sensitive, but do also exhibit a decline in strength compared to samples not subjected to prolonged immersion in water.

The addition of LFA and the resultant change in the unprocessed soil has a demonstrable environmental impact. In addition to the aforementioned increase in pH value and the presence of some heavy metals, the presence of sulphates is of particular note, exceeding the Z2 allocation values of the LAGA rules even with minimal additions of just 4 – 5% of mass. These studies show that large amounts of additive are required for a measurable reduction in water content to improve integrability and compressibility, which further exacerbates the environmental impact with reference to sulphate.

## Kurzbericht

# Untersuchungen zum Reaktionsverhalten von Braunkohleflugaschen bei Bodenverbesserungen

## 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 besondere Anforderungen z.B. 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 Untergrundes eingesetzt. Durch die Bodenverbesserung der anstehenden Böden werden natürliche Rohstoffressourcen (z.B. 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 u.a. Kieselsäure ( $\text{SiO}_2$ ) und freies Calciumoxid ( $\text{CaO}$ ) als hydraulisch wirksame Komponenten. Grundsätzlich besitzen Braunkohleflugaschen die chemischen Voraussetzungen, alleine oder im Zusammenwirken mit genormten Bindemitteln für eine Bodenverbesserung verwendet zu werden.

In Deutschland sind Kraftwerke in 3 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 Steinkohlenflugasche) 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 bzw. der Boden-BFA-Bindemittel-Gemische erheblich. Der Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung der Gemische einerseits und des Anteils an freiem Calciumoxid und  $\text{SiO}_2$  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 (z.B. 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-Gemisches abzuklären.

## 2 Vorgehensweise und Konzeption

Böden der Bodengruppen UL/TL stehen lokal oberflächennah in größeren Mengen (z.B. Lösslehm) an und erfordern im Zusammenhang mit Erdbaumaßnahmen im Verkehrswegebau oft eine Bodenverbesserungsmaßnahme. Mittelplastischen 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-

Gemisches. In der Regel werden für diese Böden Bindemittel mit höherem Kalkanteil verwendet. Weiterhin ist vorgesehen, einzelne ausgewählte Versuchsreihen mit 2 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. Im vorliegenden 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 Versuchszylinder 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 bzw. am Boden-Bindemittel-Gemisch durchgeführt.

Die Wahl der Zugabemenge der BFA erfolgte unter Berücksichtigung von Voruntersuchungen an der BFA. Danach wurden Zugabemenge 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 vorliegenden Ergebnisse untersucht. Vergleichende Versuche mit genormten Bindemitteln wurden bei diesen beiden Versuchsreihen nicht durchgeführt.

### **3 Untersuchungsergebnisse**

#### **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 mittelplastischen 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 kieselensäurehaltige 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.

### Tragfähigkeit und Verformungsverhalten

Die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten von mit Bindemitteln behandelten Böden werden in Abhängigkeit von der Bindemittelzugabe erhöht bzw. 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 Bodengruppe 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 Probekörper 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.

### Wasserempfindlichkeit

Durch die Zugabe von Bindemitteln kann die Wasserempfindlichkeit geeigneter Böden reduziert werden. Die Veränderlichkeit von Böden in Wasser lässt sich z.B. 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. Im vorliegenden 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 z.T. erheblich.

### 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 Zuordnungswertes 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 vorliegenden Untersuchungsergebnisse bestätigen, dass durch die Zugabe von BFA die Verdichtbarkeit leichtplastischer Böden (Bodengruppe UL, TL) verbessert werden kann. Für die Verbesserung von mittelplastische 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 Verbesserungspotential.

Die aus feinkörnigen Böden der Bodengruppen UL bzw. 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-Wertes 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 vorliegenden 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.

## Summary Report

# Investigations on the reaction behaviour of lignite fly ashes during soil improvements

## 1 Foreword

Since the 1950s soils handled in earthworks have been treated with binders where these soils cannot be directly reintroduced due to their natural properties or where specific requirements (such as bearing capacity) apply. The treatment of soils using the standard binders lime, cement and hydraulic base course binders are recognised methods in earthworks and are used in road construction to improve the base structure and subsoil. Improvements to the existing soil enable conservation of natural raw materials such as gravel and sand.

For around 20 years, mixtures of standardised binders have been produced and used successfully for ground improvements. In addition to these binder mixtures, mixtures containing added lignite fly ash (LFA) or just 'pure' LFA for use in earthworks for ground improvement. LFA is a product of lignite and possibly other combustible substances used in pulverised coal-fired furnaces (dry-bottom). This is a power plant by-product as defined by the 2009 edition of the Technical Conditions of Delivery for Soils, Earths and Construction Materials Relating to the Earthworks of Road Engineering. LFA includes components such as silica ( $\text{SiO}_2$ ) and free lime ( $\text{CaO}$ ) that have a hydraulic effect. Lignite fly ash generally possesses the chemical properties required to improve soils on its own or in combination with standardised binders.

In Germany, there are currently three major lignite regions in the Rhineland, Central Germany and Lusatia with corresponding power plants in operation. Most lignite is currently mined by RWE AG in the Rhine Mining Region. It is known that the chemical composition of the LFA produced as a result of this can vary depending on where it is mined from (unlike black coal fly ash). Also, the (power plant-specific) composition of the coal ash, the combustion behaviour, the combustion temperature and the cooling speed of the ash all have an influence over the effect. These factors significantly influence how water content is reduced and affect the subsequent strength development of soil/LFA mixtures or soil/LFA/binder mixtures. The relationship between the mixture composition and the share of free lime &  $\text{SiO}_2$  is currently unknown. For the performance of the studies, LFAs from the power plants in Rhineland, Central Germany and Lusatia were available.

The general objective of this project is to thoroughly study the potential applications of LFA as a binder or substitute binder (e.g. in conjunction with standardised binders) for the purpose of ground improvement in earthworks. To this end, the effect of LFA on reduced water content, strength development and water sensitivity depending on the various raw soils from the soil groups UL, TM, SU\*, GU\* are to be studied, as are LFA amounts to be added in comparison to standardised binders. The environmental compatibility of the soil/LFA mixture must also be examined.

## 2 Methodology & study design

Soils in the UL/TL soil groups are located close to the surface in larger quantities (e.g. loess loam) and often required ground improvement measures when performing earthworks for road construction purposes. Clays of medium plasticity in the TM soil group may also be improved using binders, but require greater effort to integrate the binder and to homogenise the soil/binder mixture. Lime-rich binders are generally used for such soils. Selected series of tests on two mixed-grain soils in the SU\*/ST\* and GU/GU\* soil groups are also planned.

For test series 1, a loess loam from the UL soil group has been selected. In terms of mechanical properties, the soil is characterised by the predominance of silt grain with clay grains accounting for between 5 % and 15 % of mass and alternating strips or fractions of

fine-grained sand. For the purposes of earthworks with this soil, the low plasticity index  $I_p$  (difference between liquid limit and plastic limit) is of particular note. In this case, an  $I_p$  of 3.6 to 4.1 % of mass can be stated. Limited precipitation events may therefore result in a fine-sandy, coarse silt with a stiff to semi-solid consistency to become a coarse silt of papescient consistency. Such a change in consistency always – especially when subjected to additional dynamic forces from construction machinery – results in a loss of shear strength and load-bearing capacity.

Test series 2 was performed on a fine-sandy, heavily silty clay in the TM soil group. The clay grains were relatively consistent at 32.1 % of mass, while the silt grains varied between 44.0 % and 45.1 % of mass, with sand grains being identified as 22.8 % to 23.9 % of mass. The liquid limit  $W_L$  of the homogenised material was almost constant at 49.6 % of mass, while the plastic limit  $W_P$  was found to be 20.6 % of mass, with a calculated plasticity index  $I_p$  of 29.0 % of mass.

The mixed-grain soils in the SU\* soil group selected for test series 3 are a highly sandy, argillaceous, slightly gravelly silt. The share of clay grain varies mildly between 15.8 % and 16.0 % of mass, while the silt grains account for 19.2 % of mass, sand grains were found to represent 56.0 % to 58.2 % of mass, and the gravel grains represented 6.7 % to 8.9 % of mass.

When selecting the mixed-grain soil from the soil group GU\* for test series 4, particular note had to be paid to ensuring that the largest grain in the gravel grain fraction was < 20.0 mm to enable the continued use of the test cylinder used to date for the Proctor compaction test and for the production of the sample with a diameter of 100mm. The grain structure of the selected soil is that of a sandy, heavily gravelly silt. The silt grain fraction varied slightly between 34.0 % and 37.0 % of mass, the sand grain fraction was found to be between 20.0 % and 22.0 % of mass, and the gravel grain fraction was between 41.0 % and 46.0 % of mass.

After selection of the test soils and determination of the basic parameters, the tests were performed on the soil/LFA mixture or soil/binder/LFA mixture.

The amount of LFA added was determined on the basis of prior studies conducted on the LFA. Added quantities of LFA of 4, 10 and 16 % of mass were then studied regarding improvements in fine-grained soils in the soil groups UL and TM. Tests were also performed on the aforementioned LFA from Lusatia with lime added amounting to 2 % of mass. Regarding the choice of the required amount of binder for ground improvements using lime (2 %, 3 % and 4 % of mass) or cement (3 %, 4 % and 6 % of mass) on the other hand, experience from regulations (TP BF-StB Part B, 11.3).

Taking in account the results for the fine-grained soils, one test series was performed on mixed-grain soils in the soil group SU\* and one test series was performed on the soil group GU\*. The addition of LFA amounting to 5 % of mass for each region to establish the applicability of the provided results was studied here. Comparative studies were not performed with standardised binders in these two test series.

### 3 Study results

The water-reducing properties of lime are known; in this case, the largest water content reduction was measured with much lower additions to both of the fine-grained soil types being studied here. The change in water content resulting from the addition of cement was low as expected. The compressibility of fine-grained soils (UL/TM) is positively changed by adding lime-rich LFA. The improvement is more pronounced with slightly plastic silts/clays than with clays of medium plasticity. The amount of LFA that needs to be added far exceeds the required addition of lime, however. To improve the compressibility of mixed-grain soils, lime-rich LFA can be used. However, the desired water-reducing effect is low, depending on how large the share of fine-grained soil is. Soils in the SU\* soil group exhibit somewhat superior properties than soils in the soup group GU\*. LFA containing silica is suitable for ground improvements where soils with fine-grained silts are concerned, and comparably good results are achieved in combination with lime. For mixed-grain soils, LFA from Lusatia

should not be used due to the minimal effect.

The load-bearing capacity and deformation behaviour of soils treated with binders are enhanced and improved respectively depending on how much binder is added. The comparison of the compressive strength of samples created with lime shows that the samples from the fine-grained soils exhibit equivalent measurements to those of the soil/LFA mixture from Lusatia. The samples with cement far exceed the higher compressive strengths of LFA (UL soil group) or are equivalent to them (TM soil group). The compressive strength values measured on samples from mixed-grain soils in the SU\* and GU\* soil groups are of a similar magnitude to comparable studies on fine-grained soils. The average compressive strength measurements on samples produced from LFA/Lusatia only exhibit mild further hardening between the 7-day strength and 28-day strength values, while the compressive strength values are below those of the samples produced from the lime-rich LFA. There is generally an apparent improvement in the deformation behaviour of fine-grained soils treated with LFA, while mixed-grain soils exhibit no identifiable improvement in terms of an increase for the tested LFA addition of 5 % of mass.

The addition of binders allows the water sensitivity of suitable soils to be reduced. The susceptibility of soils to change in water can be determined for example by means of immersion in water in accordance with DIN EN ISO 14689-1. If there is no change or only a superficial change to the treated soils after 24 hours of water immersion, the soil/binder mixture is not water-sensitive. In this case a 24-hour water immersion test was performed on 27-day-old samples prior to pressure testing on the basis of the TP BF-StB, Part B, 11.3. The samples prepared using lime as a binder were generally proven to be suitable for the UL soil group with minimal strength reduction (approx. 10 % to 13 %), while such proof was not given for the TM soil group. The soil/cement mixture exhibited a decline in strength of between 35 % for the UL soil group and 66 % for the TM soil group on average. Most of the samples produced from the fine-grained soils UL and TM and LFA disintegrated under water immersion; compressive strength was only found in the samples in the UL soil group with Central Germany LFA. The decline in strength compared to samples stored for 28 days in the moisture chamber was between 23 % and 42 %. For the samples produced from soil-LFA+lime mixtures and the UL soil group, the decline in strength was between 42 % and 46 %, while in the TM soil group most of the samples disintegrated. With the exception of the samples produced from the GU\* soil group and the LFA from Lusatia, the tests on the mixed-grain soils provided measurable results after 24 hours of water immersion, although the variation in the strength degradation between 20 % and 46 % compared to the 28-day-old samples is substantial in some cases.

The addition of LFA causes changes to the unprocessed soil that are of concern for the environment. As with standardised binders, the addition of LFA causes the pH value and electrical conductivity to increase substantially. With the soil/LFA mixtures studied here, pH values of between 8.8 and 9.6 were measured in the eluate of the fine-grained soils (added amount 4 % of mass) and between 9.5 % and 10.5 % in the eluate of the mixed-grain soils (added amount 5 % of mass). The electrical conductivity was still of a tolerable magnitude. Moreover, with these additive quantities, mild excesses of heavy metals were measured in the solids or in the eluates. Of particular concern, however, is the high sulphate content in the eluates of all of the studied soil/LFA mixtures, which with few exceptions exceeded the Z2 allocation value under the "LAGA Boden" technical rules. Taking into account that all chemical studies performed on soil/LFA mixtures only had LFA added to the amount of 4 % to 5 % of mass, an even higher sulphate content is to be expected where greater amounts are added if required for construction purposes.

## 4 Summary

These study results confirm that the addition of LFA can improve the compressibility of mildly plastic soils (soil groups UL, TL). However, LFAs are only suitable to a limited degree for improving clays of medium plasticity in the soil group TM, and no noteworthy improvement in compressibility can be found in mixed-grain soils in the soil groups SU\* and GU\*. To achieve a quantifiable reduction in water content, much greater amounts of LFA must be added than would be the case for lime, for example.

The load-bearing capacity and deformation behaviour of fine-grained soils following the addition of LFA is higher with lime-rich LFAs, whereas the improvement is less pronounced with mixed-grain soils. The LFA from Lusatia also only demonstrates low potential for improvement under these conditions.

The samples made of LFA and the fine-grained soil groups UL and TM largely disintegrate after 27 days of moisture chamber storage and after one day of water immersion. While the samples made of mixed-grain soils can be tested after water immersion, they do exhibit in some cases a substantial decline in strength compared to samples of similar age that have not been subjected to prolonged immersion in water. This means that the soil/LFA mixture is water-sensitive and – based on experience – also sensitive to frost. This property limits the potential application for LFA in ground improvement. The mixtures made from mixed-grain soils and LFA are largely not water-sensitive, but do also exhibit a decline in strength compared to samples not subjected to prolonged immersion in water.

The environmental impact of the change in the unprocessed soil resulting from the addition of LFA is problematic. Of note here is the aforementioned increase in pH value and the presence of some heavy metals, and in particular the presence of sulphates, which exceed the Z2 allocation values of the LAGA rules even with minimal additions of just 4 – 5% of mass. These studies show that large amounts of additive are required for a measurable reduction in water content to improve integrability and compressibility, which further exacerbates the problem.