



DBU-Pilotprojekt

AZ:20949

Hochwasserschutz mittels BFA-Bindemittelwand in Deichkörpern

Herstellung von (Kern-)dichtungen für Deichkörper
aus Bindemitteln auf der Basis von
Braunkohlefilteraschen BFA mittels Grabenfrästechnik

Autoren: Ronald Grube, Frank Grote

Projektlaufzeit: 2004 - 2007



GEOTOP GbR

Gesellschaft für Baugrund- und Umweltuntersuchungen
Hönower Straße 35
10318 Berlin

Tel.: 030 / 9 22 11 363 Fax: 030 / 9 22 11 364

Inhaltsverzeichnis

1. Bedeutung der Kohle für die Eigenschaften der Asche.....	4
1.1 Definition Kohle.....	4
1.2 Entstehung der Kohle: Inkohlungsprozeß.....	5
1.3 Vergleich der Kohle verschiedener Lagerstätten.....	6
1.4 Verbrennungsprozeß und Aschebildung	7
2. Beschreibung der Eigenschaften der Ausgangsaschen.....	8
2.1 Physikalische Eigenschaften	11
2.2 Chemische Eigenschaften	12
2.3 Mineralische Eigenschaften.....	13
3. Bindemittelherstellung auf der Grundlage von DISPERSOPT.....	15
3.1 Grundlagen	15
3.2 Chemisch-physikalische Prozessabläufe	17
3.3 Bindemittelherstellung aus den Aschen des KW Lippendorf.....	18
4. Eigenschaften der hergestellten Bindemittel.....	19
4.1 Physikalische Eigenschaften	20
4.2 Chemische Eigenschaften und Umweltverträglichkeit.....	22
4.3 Mineralische Eigenschaften.....	24
4.4 Baustoffliche Eigenschaften	26
5. Erprobung der Einbautechnologie und weitere baustoffliche Eigenschaften der Bindemittel.....	28
5.1 Dichtwand	28
5.2 Wasserbecken.....	30
5.3 Weitere baustoffliche Eigenschaften der Bindemittel	31
6. Baustoffliche Eigenschaften von BFA-Beton.....	32
7. Eignung von BFA-Beton und Bindemittel-Suspensionen im Deichbau.....	34
8. Zusammenfassung und Ausblicke.....	35

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Mineralphasen der Filteraschen des KW Lippendorf	14
Abb. 2: Fließdiagramm zur Bindemittelherstellung	16
Abb. 3: Ansicht des Dispersoptreaktors	17
Abb. 4: Leitfähigkeitsentwicklung in Asche- und Bindemittel-Eluaten des KW Lippendorf	23
Abb. 5: Mineralphasen des Trockenbindemittels KW Lippendorf	25
Abb. 6: Mineralphasen des Bindemittels KW Lippendorf im abgebundenen Zustand	25
Abb. 7: Druck- und Biegezugfestigkeiten in Abhängigkeit von den A/W-Werten	26
Abb. 8: Zeitliche Änderung der Biegezugfestigkeiten	27

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1 Die mitteleuropäische Lagerstätte Weißelsterbecken

- Anlage 2 Eigenschaften der Aschen und Bindemittel des KW Lippendorf
 - Anlage 2.1 Physikalische Eigenschaften
 - Anlage 2.2 Chemische Eigenschaften
 - Anlage 2.3 Mineralische Eigenschaften
 - Anlage 2.4 REM-Aufnahmen und Durchlichtmikroskopie
 - Anlage 2.5 Baustoff-Parameter der Bindemittel

- Anlage 3 Dokumentation der Pilotbauwerke am Standort Beuna
 - Anlage 3.1 Errichtung der Dichtwand
 - Anlage 3.2 Geoelektrische Widerstandsmessungen in der Dichtwand
 - Anlage 3.2 Errichtung des Wasserbeckens

- Anlage 4 Weitere geotechnische und baustoffliche Eigenschaften des Bindemittels

- Anlage 5 geotechnische und baustoffliche Eigenschaften von „BFA-Beton“

- Anlage 6 Verwendungsmöglichkeiten von BFA-Bindemitteln als Suspension für den technischen Hochwasserschutz

1. Bedeutung der Kohle für die Eigenschaften der Asche

Die Eigenschaften des Ausgangsstoffes Braunkohle bestimmen neben verfahrensspezifischen Einflußgrößen bei der Verbrennung wesentlich die Eigenschaften der Braunkohlefilteraschen. In diesem Abschnitt wird ein kurzer Überblick über die Entstehung von Braunkohlelagerstätten und wirkende Einflußgrößen, die die unterschiedlichen Eigenschaften der Braunkohle verschiedener Lagerstätten bedingen, gegeben.

1.1 Definition Kohle

Kohle ist der zusammenfassende Begriff für alle kohlenstoffreichen festen Brennstoffe, die durch (thermische) Zersetzung (Verkohlung) organischer Stoffe entstanden sind (z.B. Holz - Kohle). Im eigentlichen Sinne bezeichnet man als Kohle die brennbaren Überreste von Pflanzen und anderen organischen Substanzen, die über das Stadium des Torfs in langen geologischen Zeiträumen durch den Vorgang der Inkohlung in braune bis schwarze Sedimentgesteine umgewandelt wurden. Der Begriff Kohle wird dabei dann verwendet, wenn der Gehalt an brennbarer Substanz mehr als 50% beträgt (www.n-h-a.de).

Nach Inkohlungsgrad (vgl. Punkt 1.2) und anderen Merkmalen läßt sich Kohle im Wesentlichen in folgende Gruppen einteilen:

Kohlearten	Elemente: Massenanteil [%]			Heizwert MJ (pro kg)
	C	H	O	
Torf	48-65	7	30	20
Braunkohle	60-70	5	25	27
Steinkohle	70-90	5	9	32
Anthrazit	90-99	3	4	36
Graphit	98-100	-	-	39

Tab. 1: Kohlearten, Quelle: www.n-h-a.de

Weitere Bestandteile der Kohle sind u.a. flüchtige Kohlenwasserstoffe, Schwefel- und Stickstoffverbindungen und zahlreiche Mineralien, die bei der Verbrennung der Kohle als Asche zurückbleiben.

1.2 Entstehung der Kohle: Inkohlungsprozeß

Eine vor mehreren Millionen Jahren existierende Vegetation unter Einfluß der unterschiedlichsten Faktoren bewirkte, daß die uns bekannten Kohleflöze entstehen und überdauern konnten.

Grundvoraussetzungen zur Kohleentstehung bildeten die Existenz reichhaltiger Vegetation, welche sich durch das allmähliche Absinken der Landschaft in Torfmoore umwandelte. Prozess: Feuchtwarme klimatischen Bedingungen bewirken ein üppiges Pflanzenwachstum. Ständiges Absterben und Nachwachsen der Pflanzen führen unter hohen Feuchtebedingungen zu einer mächtigen Akkumulation organischer Substanz und somit zur Entstehung von Torfmooren. Denn, infolge der herrschenden anaeroben Verhältnisse durch die ständige Wasserbedeckung des neu abgelagerten Pflanzenmaterials wird die anfallende organische Substanz nicht mikrobiell abgebaut und kann sich so in mehreren Schichten übereinander ablagern.

Aufgrund hoher Sedimentationsraten kam es im Laufe der Zeit zu einer luftdichten Abdeckung der Torfmoore mit Sedimenten und Schlamm (vgl. u.). Hohe Druck- und Temperaturverhältnisse lösten im Folgenden chemische Prozesse zur Umwandlung von Torf in Kohle aus. Der Umbildungsprozeß der fossilen pflanzlichen Stoffe erfolgte stufenweise in der Reihenfolge: Holz – Torf – Braunkohle, etc.. Pflanzen sind Lieferanten von Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel in der sich bildenden Kohle.

In die Moore wurden (und werden) Sande, Schluffe und Tone eingetragen. Je nach umgebendem Gestein oder Sediment sowie dem Transport der Partikel durch Wind oder durch (Fluß-/Brack-)Wasser werden verschiedene Metalle und Spurenelemente im Torf angereichert.

Im Moor können zusätzlich Kalziumkarbonat und Eisenminerale gebildet oder auch herausgelöst werden. Das hängt von den jeweiligen Lösungs- und Fällungsprozessen ab, die stark von Schwankungen des Grundwasserspiegels beeinflußt werden.

1.3 Vergleich der Kohle verschiedener Lagerstätten

Die mitteldeutsche Kohlenlagerstätte Weißelsterbecken, welche von der MIBRAG ausgebeutet wird, ist vor ca. 30 Mio. Jahren im Oligozän entstanden. Die Lagerstätte wird von Sedimenten der Trias (Buntsandstein und Muschelkalk) eingegrenzt. Sandige Beimengungen erhielt der abgelagerte Torf aus den Schichten des Buntsandsteins. Kalkige Ablagerungen stammen aus den Schichten des Muschelkalkes. Ansonsten ist diese Lagerstätte vorwiegend terrestrisch bis brackisch geprägt (vgl. Anlage 1.1).

Die Lausitzer und auch die Rheinische Kohle aus dem Miozän ist im Vergleich hierzu wesentlich sandiger und kalkärmer ausgebildet. Sowohl die Rheinische als auch die Lausitzer Kohle unterlag bei ihrer Entstehung dem Einfluß von Brackwasser und von Meereswasser.

Die polnische Kohle aus dem Konin-Becken ist im Miozän vor ca. 15 Mio. Jahren entstanden. Aufgrund der Nähe von Kalkmergel aus der Kreidezeit wurden in den Torfen kalkige Ablagerungen angereichert. Hinzu kommen sandige Einlagerungen von tertiären Sanden, die auch im Untergrund der Kohlen anstehen. Diese Lagerstätte ist als terrestrisch einzustufen.

Die Lagerstätte im Belchatow-Becken ist vom Alter mit denen im Konin-Becken vergleichbar. Aufgrund der tektonischen Struktur ist diese Kohlelagerstätte sehr tief (der tiefste Tagebau Europas). An der Peripherie der Kohlenflöze stehen Kalke der Kreidezeit an. Diese sind für Seekreide-Ablagerungen (Gyttja) unterhalb der Kohleflöze sowie für Kalkanreicherung innerhalb der Kohle verantwortlich. Darüberhinaus wurden nachweislich im großen Umfang aluminiumhaltige Silikate (Tonminerale) eingelagert - vermutlich aus abgetragenen Verwitterungsprodukten tertiären Ursprungs (Kaolin).

Das Turow-Becken als drittgrößtes Kohlerevier in Polen ist mit den Lausitzer Lagerstätten vergleichbar.

Die Lagerstätte Weißelsterbecken (MIBRAG) ist in Anlage 1 zusammen mit den Eigenschaften der Kohle dargestellt.

1.4 *Verbrennungsprozeß und Aschebildung*

Bei der Verbrennung der Braunkohle im Kraftwerk werden flüchtige Bestandteile ausgetrieben und Kohle zu Kohlendioxid, Schwefeldioxid und Stickoxiden verbrannt.

In vielen Kraftwerken wird Schwefeldioxid durch die Zugabe von Kalk chemisch gebunden (Entstehung von Anhydrit). Die aluminiumhaltigen und silikatreichen Tonminerale werden aufgeschmolzen. Dabei entstehen Glaspartikel, welche in Form von Hohlkugeln oder gefüllten Kugeln vorliegen. Aus Kalziumkarbonat entsteht Freikalk, die Eisenminerale werden ebenfalls oxidiert. Die Quarze werden zum Teil in Hochquarz (Tridymit) umgewandelt.

Mittels Elektrofilter wird die Flugasche, die aus der Brennkammer ausgetragen wird, häufig in drei Reinigungsstufen herausgefiltert. Die entsprechend der Filteranordnung bezeichneten Vor-, Mittel- und Nachreinigungsaschen werden meist auf getrennten Wegen in ein Auffangsilos gebracht. Die leichtesten Aschebestandteile finden sich in der 3. Filterstufe. Bei den Lippendorfer Flugaschen handelt es sich jedoch um eine Fraktion, welche im Verbrennungsprozeß von aufgemahlene Kohlen entstehen („Mühlenkesselverfahren“). Hier lassen sich lediglich die Aschen des Oberflözes von den Aschen des Unterflözes unterscheiden.

Je nach angereicherten Mineralen, Metallen und Spurenelementen im Ausgangsmaterial Kohle sowie je nach Filterstufe sind die Braunkohlefilteraschen von unterschiedlicher chemischer und mineralischer Zusammensetzung.

2. Beschreibung der Eigenschaften der Ausgangsaschen

Elektrofilteraschen aus der Kohleverbrennung lassen sich in drei Gruppen unterteilen:

Gruppe I:	Al-Si-Flugaschen (aus Steinkohleverbrennung)	$\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 > 2,0$ $\text{CaO} < 15 \%$
Gruppe II:	Si-Al-Flugaschen (aus Braunkohleverbrennung) (z.B. Rheinische + Lausitzer Asche)	$\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 < 2,0$ $\text{SO}_3 < 3 \%$ $\text{CaO} < 15 \%$
Gruppe III:	S-Ca-Flugaschen (aus Braunkohleverbrennung) (z.B. Mitteldeutsche + Mittelpolnische Asche)	$\text{SO}_3 > 3 \%$ $\text{CaO} > 15 \%$

Die Filteraschen der Gruppen I und II lassen i.d.R. erst durch CaO-Zugaben (z.B. in Form von Kalkzement) aktivieren. Diese eignen sich daher besonders als Zuschlagstoffe unter Ausnutzung ihrer puzzolanischen Eigenschaften oder für die Herstellung von Filterasche-Zement-Gemischen (FAZ). Aschen dieser beiden Gruppen unterscheidet man in schwach puzzolanisch, puzzolanisch und stark puzzolanisch.

Filteraschen der Gruppe III lassen sich in Abhängigkeit von deren Freikalk-Gehalten unterscheiden in:

sehr wenig und nicht aktive Aschen	$\text{CaO}_{\text{frei}} < 3,5 \%$
wenig aktive Aschen	$\text{CaO}_{\text{frei}} = 3,5 - 7 \%$
aktive Aschen	$\text{CaO}_{\text{frei}} = 7 - 14 \%$
sehr aktive Aschen	$\text{CaO}_{\text{frei}} > 14 \%$

Für Zuschlagstoffe oder in FAZ-Gemischen sind aktive, stark freikalkhaltige Filteraschen nicht geeignet. Dagegen sind sie für eine Verwertung durch ihre Verarbeitung zu Bindemitteln unter Verwendung des DISPERSOPT-Verfahrens (vgl. Punkt 3) besonders interessant.

Während des Verbrennungsprozesses werden Elektrofilteraschen in Feuerungsanlagen mittels Elektrofilter in drei Reinigungsstufen aufgefangen, die sich granulometrisch folgendermaßen unterscheiden:

- Z1 (Vorreinigung): < 40% sind < 0,075 mm,
spezifische innere Oberfläche nach BLAIN: < 150 m²/kg
- Z2 (Mittelreinigung): 40 - 75% sind < 0,075 mm,
spezifische innere Oberfläche nach BLAIN: 150 - 300 m²/kg
- Z3 (Nachreinigung): < 25% sind > 0,075 mm,
spezifische innere Oberfläche nach BLAIN: > 300 m²/kg

An den Ausgangsaschen wurden folgende physikalische Parameter ermittelt:

- Kornverteilung
- Schüttdichte
- Mineraldichte
- Glühverluste

Mittels Röntgenfluoreszenzanalyse wurde an den Aschen ein Metallscreening durchgeführt. Damit ließen sich u.a. baustofflich relevante Module ermitteln. In Asche-Eluaten wurden darüberhinaus Schwermetalle bestimmt, um Aussagen zur Verwertbarkeit bzw. Einbaubarkeit der Aschen gemäß den Richtlinien der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) treffen zu können.

Mittels Röntgendiffraktometrie (XRDA) wurden die Mineralphasen der Ausgangsaschen analysiert. Detailliertere Aussagen zur mineralogischen Zusammensetzung wurden mittels Rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen (REM) getroffen.

Die Kornverteilungsanalysen, welche mittels Laserbeugungsspektrometer (Mastersizer) in der Filteraschesuspension durchgeführt wurden (Verfahren: naß, Standard), geben weitere Aufschlüsse über die mineralogischen Zusammensetzungen. Folgende Minerale sind entsprechenden Körnungsspektren zuzuordnen:

Quarz, Mineralkonglomerate	50 - 200 µm
Alit (C ₃ S)	20 - 60 µm
Belit (C ₂ S)	10 - 30 µm
Anhydrit	meist < 10 µm
Aluminat(-ferrit)	< 10 µm
Freikalk	< 2 µm

Die Schüttdichten spiegeln die spezifischen Dichten der Aschepartikel sowie deren granulometrische Eigenschaften wider.

Die mittels Kapillarpyknometer ermittelten Korndichten der Braunkohlefilteraschen geben ebenfalls Anhaltspunkte über die mineralische Zusammensetzung:

Quarz	2,27 g/cm ³
Anhydrit	2,48 g/cm ³
CaO _{frei}	3,34 g/cm ³
Alit (C ₃ S)	3,13 g/cm ³
Belit (C ₂ S)	3,28 g/cm ³
C ₃ A	3,04 g/cm ³
C ₂ (AF)	3,76 g/cm ³

Aus der Allgemeinen Geochemie werden aus Glühverlusten bei speziellen Temperaturen folgende Regeln abgeleitet.

Temperaturbereich	Verbrennung von
bis 105°C	Porenwasser
bis 350°C	organischen Substanzen
bis 650°C	anorganischen Stoffen (z.B. Eisenhydroxide, Karbonate)
bis 1000°C	Kristallwasser

2.1 Physikalische Eigenschaften

Die Aschen aus dem KW Lippendorf wurden als Mischasche geliefert. Die Aschen entstehen bei der Kohleverbrennung im Mühlenkessel-Verfahren. Je nach Herkunft der Kohle, Unterflöz oder Oberflöz, ist die Asche wie folgt zu unterscheiden:

- Unterflözasche: A1 – L(MA)
- Oberflöz: A2 – L(MA).

Die Filteraschen des Unterflözes aus Lippendorf (A1-L(MA)) haben im Körnungsbereich von 40 - 50 μm ihr Maximum. Bei 150 μm sowie zwischen 0,3-0,4 μm (Freikalk) ist ebenfalls ein Peak (vgl. Anlage 2.1). Die Filteraschen des Oberflözes aus Lippendorf (A2-L(MA)) weisen bei einer Korngröße um 50 μm die höchste Konzentration auf (vgl.ebd.). Weitere Peaks sind analog zur Unterflözasche zwischen 0,3-0,4 μm (Freikalk) sowie 150 μm festzustellen.

μm	A1-L(MA)	A2-L(MA)
0,5	6	7
-1	1	2
-2	1	1
-4	3	3
-8	5	6
-16	10	10
-32	16	15
-63	19	18
-125	15	17
-250	14	15
-500	8	7
-700	0	0
-1000	0	0

Tab. 2: Kornverteilungen ("Siebdurchgänge") der Aschen aus Lippendorf

Folgende Schüttdichten und Mineraldichten wurden ermittelt:

Probenbezeichnung	Schüttdichte (g/cm^3)	Korndichte (g/cm^3)
A1-L(MA)	1,06	2,96
A2-L(MA)	1,23 - 1,36	2,76

Tab. 3: Schütt- und Korndichten der Lippendorfer Aschen

2.2 Chemische Eigenschaften

Die Aschen wurden mittels Röntgenfluoreszenzanalyse über ein Metallsceening analysiert. In Anlage 2.2. sind die chemischen Eigenschaften der Lippendorfer Aschen graphisch veranschaulicht. In Tabelle 4 finden sich die Hauptelemente der Aschen des Kraftwerkes Lippendorf.

Hauptelementgehalte der untersuchten Lippendorf-Aschen (Angaben in %)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₃
A1-L(MA)	17	11	3	7	52	10
A2-L(MA)	24	14	3	5	45	7

Tab. 4: Chemische Zusammensetzung der Aschen KW Lippendorf

Die SiO₂ - CaO - Al₂O₃ - Verhältnisse wurden für die Analytikdaten in einem "Zement-Dreieck" dargestellt (vgl. Anlage 2.2). Demnach liegen diese Aschen im Bereich von Portlandzementen. Aus den Hauptelementen lassen sich darüberhinaus verschiedene Module ableiten. Demnach sind die Aschen aus dem KW Lippendorf silikarm, aluminathaltig und alkaliarm ("NA-Zement"). Der CaO/ Al₂O₃ -Wert liegt oberhalb von 4. Im Unterschied zu den hier dargestellten Unterflözaschen weisen die Oberflözaschen einen etwas höheren SiO₂-Anteil auf.

	As	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	Cd	Hg
A1-L(MA)	1,0	24,0	44,0	22,0	18,0	23,0	2,5	b.d.l.
A2-L(MA)	12,9	58,4	46,6	31,2	10,0	11,6	b.d.l.	b.d.l.

Tab. 5: Schwermetallgehalte der Braunkohlefilteraschen des KW Lippendorf in ppm

Die Braunkohlefilteraschen aus Lippendorf liegen manchmal aufgrund von leicht erhöhten Cd- oder Cr-Gehalten im Feststoff (vgl. Tab. 5) oberhalb von Z.0 nach LAGA (Boden).

	F	Mn	Ba	Sr
A1-L(MA)	732	1453	2054	1238
A2-L(MA)		789	1496	1177

Tab. 6: Spurenelementgehalte der Braunkohlefilteraschen des KW Lippendorf in ppm

Die sehr hohen Barium-Gehalte (vgl. Tab. 6) bei mäßig hohen Mangangehalten sprechen für ein kalkreiches Liefergebiet, was sich auch in den hohen CaO-Gesamtgehalten ausdrückt. Offensichtlich sind Ablagerungen des Muschelkalkes (mittlere Trias) Hauptlieferant an Einträgen. Die hohen Strontium-Gehalte sind ebenfalls ein Zeichen für terrestrischen Einfluß. Die Fluor-Gehalte könnten ein Indiz auf zusätzliche brackische Einflüsse sein.

2.3 Mineralische Eigenschaften

Mittels Röntgen-Pulverdiffraktometrie (XRDA) wurden die mineralischen Anteile aus den Intensitäten der Gitterreflexe in den Braunkohlefilteraschen des KW Lippendorf (Unterflöz) ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 zusammengefaßt, als Kreisdiagramm in Abb.1 sowie in Anlage 2.3 graphisch veranschaulicht:

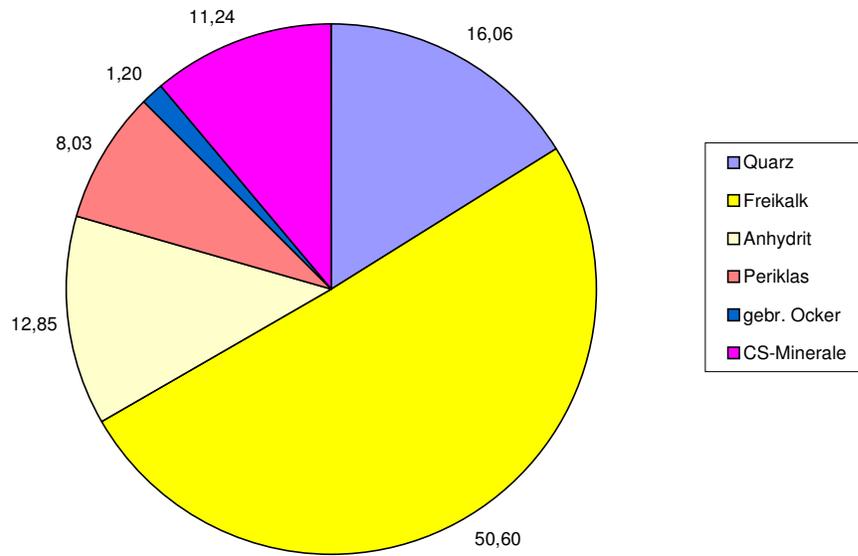
Minerale	A1-L(MA)	A2-L(MA)
Quarz	16,06	14,69
Freikalk	50,60	36,92
Anhydrit	12,85	18,32
Periklas	8,03	4,58
gebr. Ocker	1,20	0,74
CS-Minerale	11,24	27,14

Tab. 7: Mineralphasen der Aschen des KW Lippendorf (Anteile in %)

Etwa die Hälfte der Minerale der Aschen des Unterflözes wurde als Freikalk identifiziert (sehr aktiv!). Nur knapp über ein Viertel der Mineralphasen bestand aus Quarz. Periklas, Anhydrit und CS-Minerale (einschließlich Calcium-Aluminate) sind mit 8, 13 und 11 % ebenfalls stark vertreten (siehe Abb. 1).

Die Aschen des Oberflözes sind deutlich reicher an Gehlenit (wird den CS-Mineralen hinzugerechnet) und Anhydrit bei geringeren Freikalkgehalten (aktive bis sehr aktive Aschen).

Mineralphasen der Unterflözfilterasche A1-L(MA) KW Lippendorf



Mineralphasen der Oberflözfilterasche A2-L(MA) KW Lippendorf

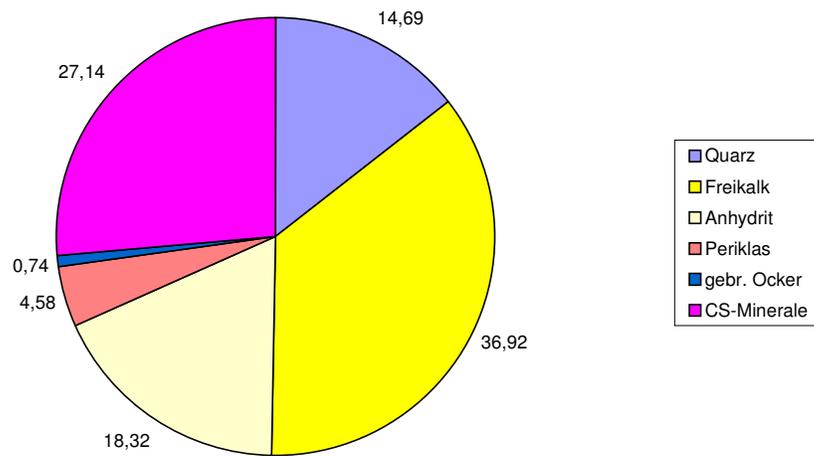


Abb. 1: Mineralphasen der Filteraschen des KW Lippendorf

3. Bindemittelherstellung auf der Grundlage von DISPERSOPT

Die unterschiedlichen mineralischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften der Braunkohlefilteraschen (Trockenaschen) erfordern für jedes Kraftwerk eine spezifisch zugeschnittene Behandlung dieser Reststoffe bei der Herstellung von Bindemitteln. Die IVU Ingenieurgesellschaft Verfahrens- und Umwelttechnik für komplexe Recyclinglösungen mbH hat ein Verfahren entwickelt, welches abwasser- und abproduktfrei in der Lage ist, die exothermen Vorgänge bei der Herstellung von BFA-Bindemitteln großtechnisch zu beherrschen.

3.1 Grundlagen

Mit dem FAR-DISPERSOPT-Verfahren ist es gelungen, eine Vielzahl von Prozesseinflussgrößen zu beherrschen und aus der Filterasche ein bauphysikalisch stabiles, reproduzierbares Endprodukt herzustellen. So stellt die FAR-Technologie unter Beweis, den Ascheverwertungsprozeß mit *Kraftwerksaschen verschiedener Herkunft und Beschaffenheit* auf der Basis vorgegebener und garantierter Qualitätsparameter betreiben zu können.

Unterschiede in der Zusammensetzung der Filteraschen ergeben sich beispielsweise aus der Kohlequalität. Es können aber auch durch die verschiedenen Verbrennungsverfahren, Kessellast und integrierte Entschwefelungsverfahren starke Schwankungen in den Eigenschaften auftreten.

Um diese Probleme zu lösen, musste die Anlage ein *dynamisches, flexibles, steuer- und regelbares System* ergeben. Verfahrensgrundlage ist daher eine *Quasikonstanthaltung des Verarbeitungswirksamkeitsystems*, einer in langjähriger Forschungsarbeit entwickelten Verfahrenstechnologie.



Abb. 2: Fließdiagramm zur Bindemittelherstellung

Mit Hilfe einer *Prozessnassentstaubungsanlage* werden Dampf- und Staubemissionen *im geschlossenen Kreislauf* niedergeschlagen und somit erneut dem Prozess zugeführt. Darüber hinaus ist die Anlage mit einem Reinigungs- und Oberflächenwasserrückgewinnungssystem ausgestattet. Das technische Verfahren ist unter allen Betriebsbedingungen *abwasser- und abproduktfrei*, so dass keine externe Brauchwasserführung erforderlich ist.

Schwerpunkt dieser Technologie ist die Temperatursteuerung unterschiedlich verlaufender exothermer Prozesse in speziell entwickelten dynamischen Elementen. Gleichzeitig ermöglicht die verfahrensspezifische Charakteristik den Verzicht auf die üblicherweise problematische Messung chemischer Einflußgrößen (wie bspw. bei Freikalk gegeben).

3.2 Chemisch-physikalische Prozessabläufe

Im Rahmen einer Anregungsmischstufe und dem sich anschließenden kontrollierten Reaktionsablauf werden katastrophale Temperatur- und Volumenexpansionsprozesse beherrscht. Die ersten mineralogischen Umwandlungsprozesse innerhalb des Dispersortreaktors sind Umsetzungen von CaO (Freikalk) zu $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Dieser stark exotherme Prozess wird durch Zufuhr von Fremdluft bei einem optimalen (experimentell ermittelten) Wasser-Asche-Verhältnis großtechnisch kontrolliert. Ohne Kontrolle dieser Prozesse würden hydrothermische Spannungen innerhalb der Asche zu strukturellen Störungen während des Abbindeprozesses führen, so dass keine unterwasserlagerungsbeständigen Bindemittel hergestellt werden könnten.



Abb. 3: Ansicht des Dispersortreaktors

Nach ca. 7 Stunden Reaktzeit beginnt im Substrat die *Bildung von Ettringiten*, einer Mineralphase, die dem Bindemittel eine große *Stabilität bzw. Festigkeit* verleiht. Die Nadelförmigkeit der Ettringite wirkt wie die Armierung im Stahlbeton.

Nach Zwischenlagerung und Endaufarbeitung in einem Hochleistungsintensivzwangsmischsystem entsteht ein thixotropes, *im LKW-Kipper transportables Endprodukt*. Die vollständige hydraulische Erhärtung des FAR-Dispergates erfolgt dann am jeweiligen Einbauort. Weiterhin besteht die Möglichkeit, das silolagerungsfähige Trockenbindemittel in der Nähe vom Einbauort in einem Zwangsmischer aufzubereiten.

3.3 Bindemittelherstellung aus den Aschen des KW Lippendorf

Bezüglich der Behandlung von Lippendorf-Aschen ist entscheidend, ob diese aus dem Unterflöz oder aus dem Oberflöz der Kohlelagerstätte Profen gewonnen werden, da die Ausgangsaschen jeweils in ihren Eigenschaften variieren. Die Unterflözaschen reagieren aufgrund extrem hoher Freikalkgehalte besonders stark und müssen daher während der Behandlung durch Fremdluftzufuhr gesteuert werden. Dagegen ist bei der Bindemittelherstellung aus Oberflözaschen lediglich auf einen optimalen Anmischwassergehalt zu achten. Die optimalen Anmischwassergehalte der Aschen KW Lippendorf aus beiden Flözen liegen bei ca. 24 %.

Die Bindemittel des KW Lippendorf wurden mit einem Wasserzusatz von 24 Gew.-% hergestellt, wobei der Gewichtszuwachs der Trockenbindemittel bezogen auf deren Schüttdichte ca. 17 % betrug. Die Hydratationswärme des Bindemittels aus Aschen des Unterflözes betrug in der ersten Serie ca. 100°C. In der anschließenden Serie wurde die Hydratationswärme durch Fremdluftzufuhr bei 70°C gehalten. Die Hydratationswärme des Bindemittels aus Aschen des Oberflözes (B2-L(MA)) betrug 70°C.

- **B1:** Bindemittel aus Filteraschen Unterflöz
- **B2:** Bindemittel aus Filteraschen Oberflöz

Bei der Herstellung von Prüfkörpern wurden folgende Wassermengen hinzugefügt:

- B1-L(MA)-1/1:A/W = 5,45 w = 18,3 % schwach thixotrop
- B1-L(MA)-1/2:A/W = 5,114 w = 19,6 % thixotrop
- B1-L(MA)-1/3:A/W = 4,75 w = 21,1 % steif
- B1-L(MA)-1/4:A/W = 4,50 w = 22,2 % weich-steif
- B1-L(MA)-1/5:A/W = 4,00 w = 25,0 % weich (Fließgrenze)
- B1-L(MA)-1/6:A/W = 3,50 w = 28,6 % breiig

- B2-L(MA)-1/5:A/W = 4,0 w = 25,0 % weich (Fließgrenze)
- B2-L(MA)-1/6:A/W = 3,5 w = 28,6 % breiig

4. Eigenschaften der hergestellten Bindemittel

An den Trockenbindemitteln wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Kornverteilungsanalysen
- Schüttdichten
- Korndichten
- Glühverluste
- Metallscreening RFA
- Umweltverträglichkeiten
- Mineralphasen-Untersuchungen XRDA
- REM-Aufnahmen

Nach der Herstellung von Prüfkörpern wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Druckfestigkeit
- Biegezugfestigkeit
- Rohdichte
- Gesamtporenvolumen
- Wassereindringtiefe
- Hydraulische Durchlässigkeit
- Umweltverträglichkeit
- Mineralphasen XRDA
- REM-Aufnahmen
- Durchlichtmikroskopie

4.1 Physikalische Eigenschaften

Die Bindemittel aus den Filteraschen Unterflöz des KW Lippendorf (B1-L(MA)-1) haben ihr Maximum bei 50 μm , gefolgt von einem Peak bei ca. 300 μm . Bei ca. 0,2 und 0,8 μm sind ebenfalls erhöhte granulometrische Anteile festzustellen. Dagegen verschwinden die Anteile bei 0,3-0,4 μm der Ausgangsasche (Freikalk) (vgl. Tab. 24 sowie Abb. 2.1). Die Bindemittel aus Oberflöz-Aschen (B2-L(MA)-1) weisen ebenfalls bei einer Korngröße um 50 μm die höchste Konzentration auf. Im Unterschied zu Bindemittel 1 sind im Bindemittel 2 keine weiteren Peaks bei höheren Korngrößen festzustellen. Analog zu B1-L(MA)-1 gehen die Feinanteile im Bindemittel 2 im Vergleich zur Ausgangsasche zurück.

μm	B1-L(MA)-1	B2-L(MA)-1
0,5	3	4
-1	1	1
-2	1	1
-4	2	1
-8	5	3
-16	9	10
-32	14	20
-63	18	26
-125	14	23
-250	15	11
-500	15	1
-700	3	0
-1000	0	0

Tab. 8: Kornverteilungen ("Siebdurchgänge") der Bindemittel KW Lippendorf

Folgende Schüttdichten und Mineraldichten wurden ermittelt:

Probenbezeichnung	Schüttdichte (g/cm^3)	Korndichte (g/cm^3)
B1-L(MA)-1	0,97	2,56
B1-L(MA)-1/2	-	2,38
B2-L(MA)-1	1,13	2,65
B2-L(MA)-1/2	-	2,55

Tab. 9: Schütt- und Mineraldichten der Bindemittel B1 KW Lippendorf

Die Korndichte des abgebundenen Bindemittels liegt nahe der Mineraldichte von Portlandit ($\rho_{\text{K(Portlandit)}} = 2,23 \text{ g}/\text{cm}^3$).

Anhand der Korndichten ρ_K können bei bekannten Rohdichten ρ_d der abgebundenen Bindemittel die Gesamtporenvolumina GPV berechnet werden:

$$GPV = 100 * (1 - \rho_d / \rho_K)$$

Im thixotrop hergestelltem Material B1-L(MA)-1/2 wurde eine Rohdichte von 2,337 g/cm³ erzielt. Das Gesamtporenvolumen beträgt demnach lediglich ca. 2 %. Aus der zweiten Versuchsserie mit Steuerung der Hydratationswärme wurden lediglich thixotrope Prüfzylinder hergestellt. Die erste „überhitzte“ Serie zeigte an einigen Körpern Haar-Risse und wurde deshalb nicht weiter berücksichtigt.

Im „weich“ hergestellten Material B2-L(MA)-1/2 wird von einem mittleren Gesamtporenvolumen von ca. 25 % ausgegangen. Schwankungen treten besonders hinsichtlich des Anteils an Poren in Gläsern auf. Bei den „breiig“ hergestellten Materialien kann die Gesamtporosität auf bis zu 30 % steigen.

Anhand der Glühverluste (vgl. Anlage 2.1) lassen sich Indize für die vorhandenen Mineralphasen und der Einbindung von Wasser gewinnen. Bei 105°C entweicht Porenwasser. In den Bindemitteln des KW Lippendorf waren ca. 4,5 % Porenwasser enthalten (bei den Ausgangsaschen war Porenwasser vernachlässigbar). Bei 350°C werden Hydroxylgruppen zerstört, die sich insbesondere in den Portlanditen befinden. Der Gewichtsverlust der Lippendorf-Bindemittel betrug 3,2 % (in den Ausgangsaschen ebenfalls vernachlässigbar). Sulfate (z.B. Ettringit) werden bei ca. 650°C zerstört. Der Gewichtsverlust der Lippendorf-Bindemittel betrug 5,7 % (die der Aschen ca. 0,2 %). Kristallwasser wurde in den Lippendorf-Bindemitteln nicht nachgewiesen (kein weiterer Glühverlust bei 1050°C).

4.2 Chemische Eigenschaften und Umweltverträglichkeit

Die chemischen Hauptelemente der Bindemittel des KW Lippendorf sind analog zu den Ausgangsaschen durch sehr hohe CaO-Anteile bei sehr geringen SiO₂-Anteilen gekennzeichnet. Die Aluminiumgehalte sind mit ca. 11 % vergleichsweise hoch, ebenso die Magnesiumgehalte mit ca. 7 % und die Sulfatgehalte mit ca. 10 %.

Das Bindemittel des KW Lippendorf hat im Feststoff einen etwas höheren Anteil an Quecksilber und Cadmium, als der Richtwert nach LAGA für den Einbau in Trinkwasserschutzzonen vorsieht (vgl. Tab. 26).

Parameter in mg/kg TS	B1-L(MA)	Bewertung nach LAGA
MKW	35,2	Z.0
EOX	<0,3	Z.0
PAK	n.b.	Z.0
Arsen	14	Z.0
Blei	15,7	Z.0
Cadmium	2,51	Z.1.2 (Boden), sonst >Z.0
Chrom-gesamt	65,7	Z.1.1 (Boden)
Kupfer	29,2	Z.0
Nickel	29,2	Z.0
Quecksilber	0,569	Z.1.1 (Boden)
Zink	90,6	Z.0

Tab. 10: Schadstoffgehalte im Feststoff

Meist wird für die baustoffliche Nutzung ausschließlich das Eluatkriterium herangezogen. Demnach liegen alle Werte unterhalb von Z.0 (vgl. Tabelle 27 sowie Anlage 2.2).

Parameter in µg/l	B1-L(MA)-1/2	Bewertung nach LAGA
pH-Wert	10,3	Z.0
El. Leitfähigkeit (µS/cm)	238	Z.0
Chlorid	<2	Z.0
Sulfat	5,8	Z.0
Arsen	<5	Z.0
Blei	<2	Z.0
Cadmium	<0,2	Z.0
Chrom-gesamt	<5	Z.0
Kupfer	<5	Z.0
Nickel	<15	Z.0
Quecksilber	<0,2	Z.0
Zink	<20	Z.0

Tab. 11: Eluatgehalte des Bindemittels KW Lippendorf

Um die Umweltverträglichkeit gegenüber dem Schutzgut Grundwasser auch während des Abbindens bewerten zu können, wurden Elutionsversuche an frisch angerührtem Bindemittel in einer Zeitreihe zur Beobachtung der Veränderungen während des Abbindens durchgeführt. In den Eluaten wurden pH-Werte, die elektrischen Leitfähigkeiten sowie die Anionen bestimmt. Folgende Zeitreihen wurden gewählt: 0-1 h, 1-2 h, 2-4 h, 4-8 h, 8-24 h, 1-7 Tage. Parallel wurden die Untersuchungen an der Lippendorfer Ausgangsasche durchgeführt. In nachfolgender Abbildung wird der zeitliche Verlauf der Eluatgehalte sowie der elektrischen Leitfähigkeiten in den Ausgangsaschen und in den Bindemitteln dargestellt.

Nachfolgend ist der zeitliche Verlauf der Leitfähigkeitsentwicklungen in den Aschen-Eluaten (A1) und Bindemittel-Eluaten (B1) dargestellt:

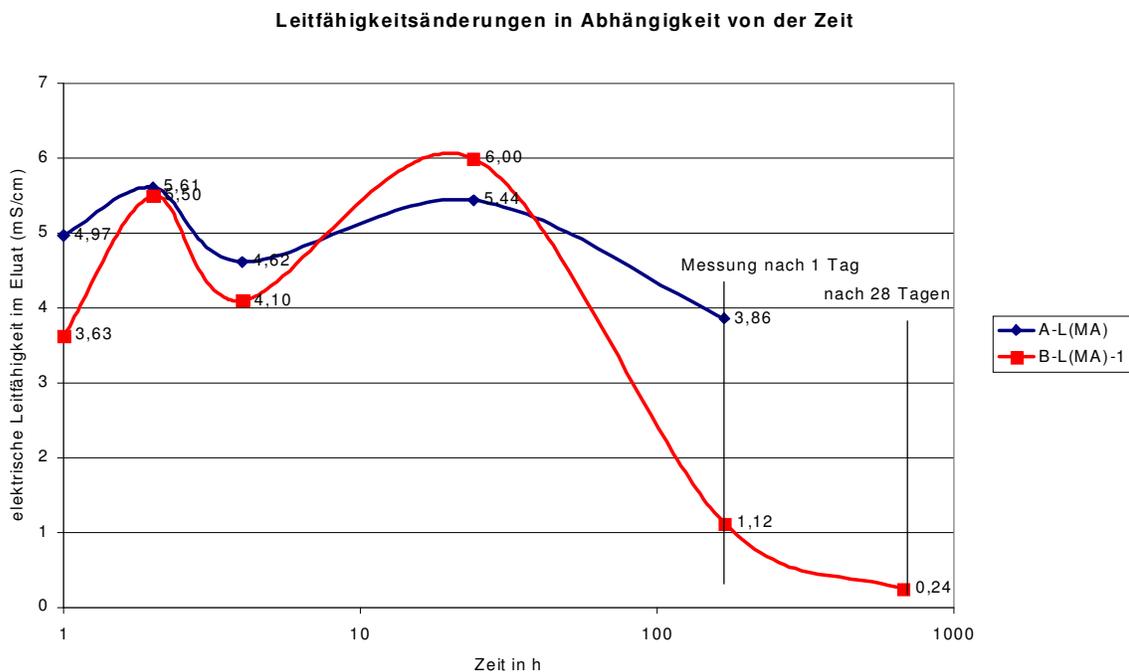


Abb. 4: Leitfähigkeitsentwicklung in Asche- und Bindemittel-Eluaten des KW Lippendorf

Wie aus der Abbildung 4 hervorgeht, nehmen die elektrischen Leitfähigkeiten und Sulfatgehalte in den Bindemitteluaten deutlich schneller ab, als in den Eluaten der Ausgangsaschen. Bereits nach einem Zeitraum von 1 bis 7 Tagen wird in den Bindemitteluaten der Leitfähigkeits-Grenzwert Z.1.1 nach LAGA unterschritten, während die Leitfähigkeiten in der Asche immer noch oberhalb des Zuordnungswertes Z.2 sind.

Die Grenzwerte für RC-Baustoffe 2 nach TL RC-ToB werden bei den Bindemitteln und den Aschen von vornherein unterschritten (Sulfat < 600.000 µg/l, elektrische Leitfähigkeit < 250 mS/cm). Die "Gesamtfracht" an freigesetzten Sulfationen beträgt nach 7 Tagen Reaktionszeit mit destilliertem Wasser im Bindemittel ca. 3 mg/kg.

4.3 Mineralische Eigenschaften

Wie nachfolgende Tabelle 28 veranschaulicht, werden die Freikalke der Ausgangsasche des KW Lippendorf A1-L(MA) im Trockenbindemittel B1-L(MA)-1 zum größten Teil in Portlandit umgesetzt. Ein geringerer Anteil dient der Bildung von Ettringiten. Bei Anmischen des Trockenbindemittels mit Wasser wird unter Verbrauch von Anhydrit zusätzlich Ettringit gebildet (vgl. auch Anlage 2.3). Anhydrit wird außerdem anscheinend in ein Calcium-Silicium-Sulfat umgewandelt.

	A1-L(MA)	B1-L(MA)-1	B1-L(MA)-1/2
Quarz	16,06	15,63	16,03
Portlandit		39,06	37,82
Anhydrit / Ca-Si-Sulfat	12,85	17,19	8,33
Ettringit		3,13	8,65
Periklas	8,03	9,38	10,58
gebr. Ocker	1,20	0,31	0,32
CSH-Minerale		15,31	18,27
CS-Minerale	11,24		
Freikalk	50,60		

Tab. 12: Vergleich der Mineralphasen in den Asche- und Bindemitteln des KW Lippendorf

Der Freikalk der Ausgangsasche wird größtenteils in Portlandit umgewandelt. Verfahrenstechnisch bedingt wird die Asche bei hohen Luftfeuchtigkeiten bereits mit Portlandit-Anteilen geliefert.

Die CS-Minerale bzw. die CSH-Minerale (Calciumsilicathydratgele) enthalten neben „Larnit“-ähnlichen Mineralphasen auch Calcium-Aluminate / Calcium-Aluminathydrate. Magnesium ist fast ausschließlich an Periklas gebunden. Die Bindemittel der Aschen des Oberflözes haben gegenüber denen des Unterflözes höhere Anteile an Quarz auf Kosten der übrigen Mineralphasen – insbesondere Portlandit.

Mineralphasen des Trockenbindemittels B1-L(MA)-1

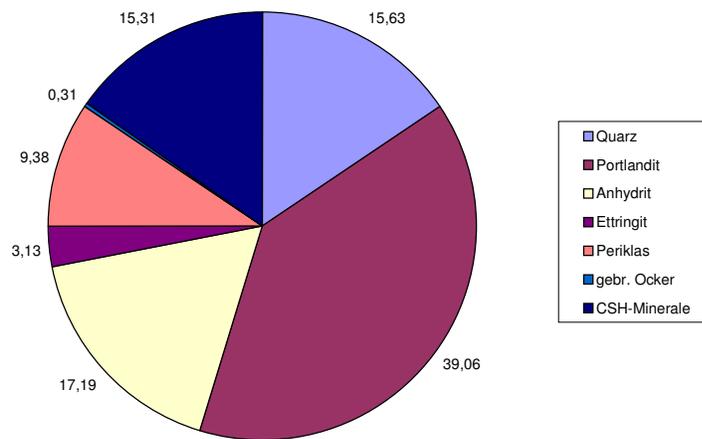


Abb. 5: Mineralphasen des Trockenbindemittels KW Lippendorf

Mineralphasen des Bindemittels (fest) B1-L(MA)-1/2

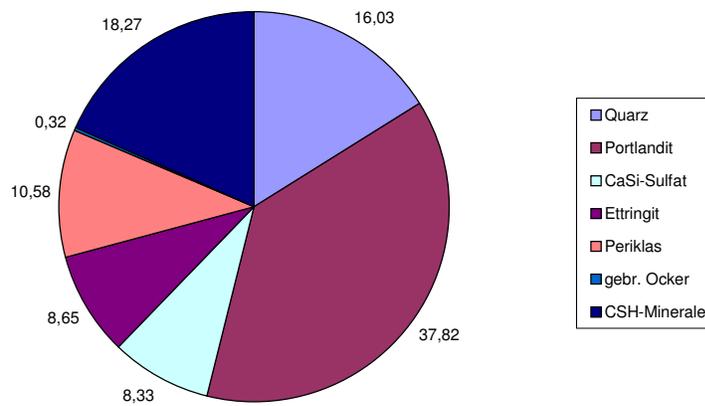


Abb. 6: Mineralphasen des Bindemittels KW Lippendorf im abgebundenen Zustand

Die Einbettung der Quarze in einer stark Portlandit-haltigen Matrix zeigt sich besonders gut in den durchlicht- und rasterelektronischen Aufnahmen (Anlage 2.4).

4.4 Baustoffliche Eigenschaften

Die ersten beiden thixotrop hergestellten zylindrischen Prüfkörper aus den Bindemitteln der Unterflözaschen hatten eine Druckfestigkeit β_{c100} von ca. 55 N/mm² \pm 8 % (vgl. Anlage 2.5). Die Biegezugfestigkeiten betragen i.d.R. ca. 20 % der Druckfestigkeiten. Die „weich“ hergestellten zylindrischen Prüfkörper aus den Bindemitteln der Oberflözaschen hatten eine mittlere Druckfestigkeit β_{c100} von ca. 14 N/mm² - dies entspricht ca. einem Viertel der thixotropen Prüfkörper. Die Würfeldruckfestigkeiten β_{w200} lagen bei ca. 11 N/mm². Die Biegezugfestigkeiten der „weich“ hergestellten Stäbe lagen im Mittel bei 3,1 N/mm².

Bei den „breiig“ hergestellten Prüfkörpern liegen die Biegezug- und Druckfestigkeiten ca. um den Faktor 2 bis 3 niedriger als bei den „weich“ hergestellten Materialien.

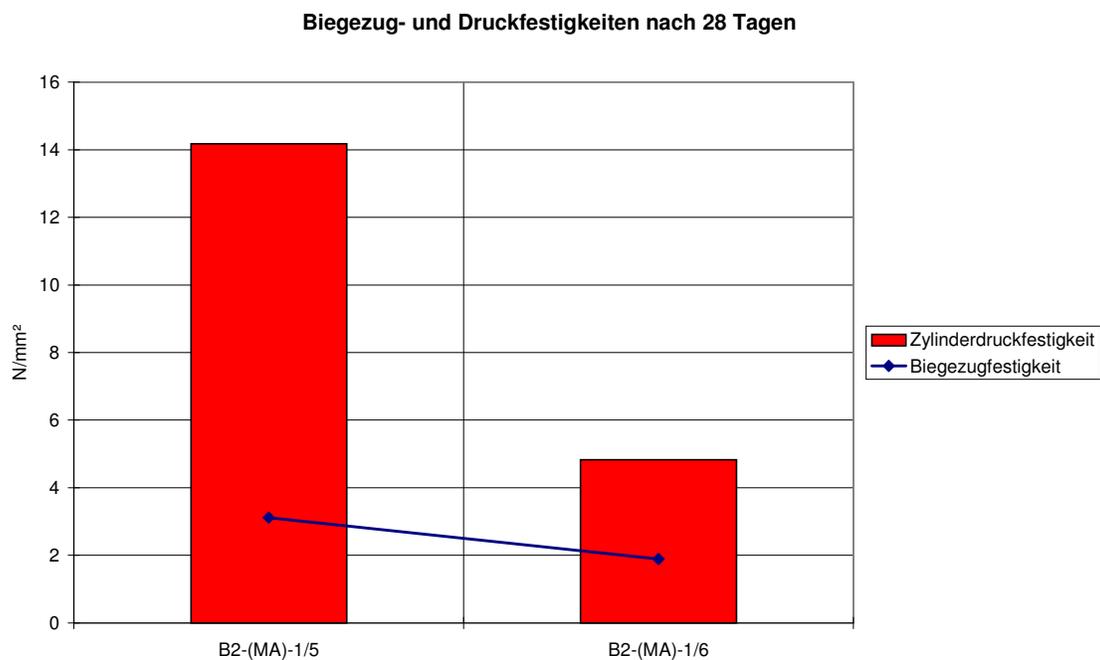


Abb. 7: Druck- und Biegezugfestigkeiten in Abhängigkeit von den A/W-Werten

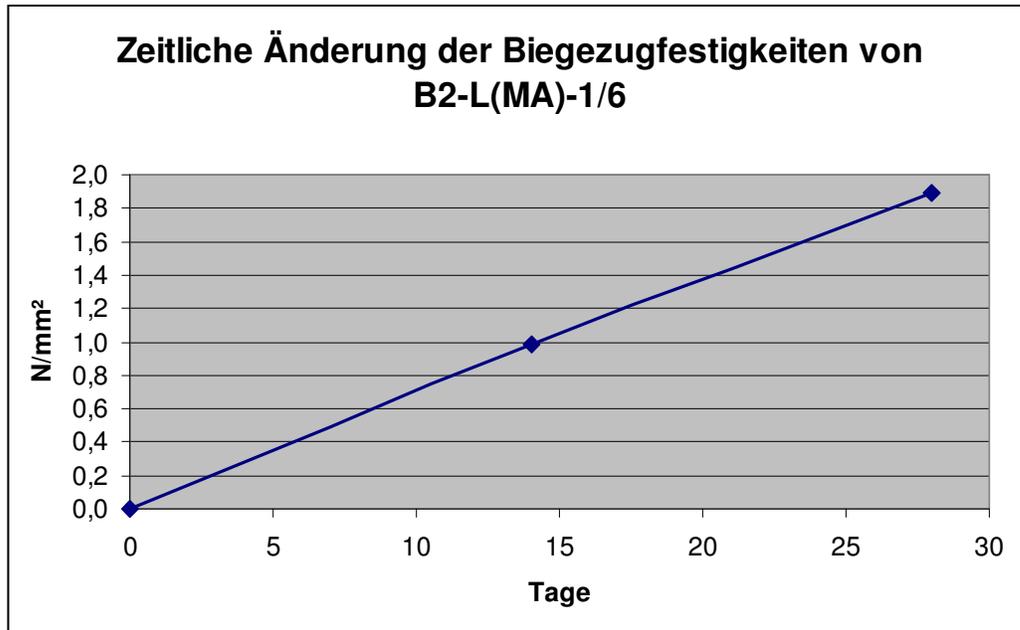


Abb. 8: Zeitliche Änderung der Biegezugfestigkeiten

Anhand der zeitlichen Änderung der Biegezugfestigkeiten wird deutlich, daß das Abbinden und Verfestigen der Bindemittel noch lange anhalten wird. Es stehen noch Prüfungen der Druckfestigkeiten nach 90 Tagen aus.

Bei den „breiig“ hergestellten Prüfbalken wurden neben der Biegezugfestigkeit auch die Spaltzugfestigkeit geprüft. Diese lag bei ca. 1 N/mm².

An einem thixotrop hergestellten Prüfzylinder wurde die hydraulische Durchlässigkeit ermittelt. Diese lag bei ca. $1 \cdot 10^{-11}$ m/s. An einem „breiig“ hergestellten Prüfzylinder sind Durchlässigkeitsversuche in der Triaxialzelle noch nicht abgeschlossen. Es ist jedoch damit zu rechnen, daß der k_f -Wert mindestens unterhalb von 10^{-10} m/s liegen wird.

Insgesamt ist festzuhalten, daß thixotrop eingebaute Bindemittel bessere baustoffliche Eigenschaften haben, als „breiig“ (pumpfähig) eingebaute. Jedoch sind auch die pumpfähigen Bindemittel von ausreichend guter baustofflicher Qualität. Es ist dabei festzuhalten, dass es einen Grenzwassergehalt gibt, da sonst ein Nachtreiben der Bindemittel nicht vollständig auszuschließen ist.

5. Erprobung der Einbautechnologie und weitere baustoffliche Eigenschaften der Bindemittel

Im Industriepark von Beuna ist vom 15.04.04 bis 18.04.04 die Modellanlage, bestehend aus den beiden Objekten Vertikaldichtwand mit geoelektrischen Meßsonden und Wasserbecken errichtet worden. An der Durchführung des Projektes waren die GEOTOP GbR, IVU GmbH und MBV GmbH beteiligt.

An den Demonstrationsobjekten sind alle Bedingungsparameter hinsichtlich Druck-, Biegezugfestigkeit, Wasserundurchlässigkeit, etc. im praktischen Bezug simuliert worden.

In Vorbereitung des Modellversuchs sind folgende Arbeiten durchgeführt worden: Einmessen der Lage der Objekte, Herstellung der Schalung für das Wasserbecken, Baustellensicherung, Transport der Fräse und des Schleppverbau sowie die Herstellung des Bindemittels.

5.1 Dichtwand

Im Rahmen eines Modellversuchs am Standort Beuna wurde die Einbautechnologie erprobt. Mittels mobiler Grabenfräs-Schlitzwand-Technik wurde eine Vertikaldichtwand 6,0 m lang, 3,0 m tief, 0,66 m breit in den Untergrund eingebaut.

Der Verfahrensablauf des Modellversuchs kann wie folgt beschrieben werden:

Im ersten Schritt wurde mit der Fräse (vgl. Anlage 3) ein Grabenstück von ca. 3 m Länge ausgebildet. Anschließend wurde der Schleppverbau mit einem Radlader in den Graben eingelassen und an die Fräse angeschlossen.

Während der Herstellung des restlichen Grabenteilstücks wurden die seitlichen Grabenwandungen durch den "mobilen Schleppverbau", welcher an der Grabenfräse befestigt war und synchron mit dieser mitgeführt wurde, vor dem Einsturz gesichert. Zeitgleich zum Fräsvorgang wurde das angelieferte Bindemittel-Substrat mit einem Radlader in den ausgehobenen Graben eingefüllt.

Unmittelbar nach Fertigstellung der Dichtwand wurden 4 geoelektrische Meßsonden, 2,2 m tief und ein Meßpegel, 2,7 m tief im Abstand von je 1 m eingebaut.

Nachdem das Bindemittel abgebunden war, wurden in Meßpegelnähe ein Sickerschurf und ein Beobachtungsschurf (50 cm x 50 cm x 50 cm) für den Dichtigkeitsnachweis durch Infiltrationsversuche angelegt.

Der Bauablauf ist in der Fotodokumentation in **Anlage 3** des Berichtes dargestellt.

Innerhalb der Dichtwand sind über einen Zeitraum von 20 Tagen Versuche zum Nachweis der Dichtigkeit des Materials durchgeführt worden. Für diese Versuche wurden in der Bauphase ein Meßpegel direkt in die Wand eingelassen sowie 2 Schürfe an der Wand, zur Versickerung und Beobachtung, angelegt. Bisher wurden keine Infiltrationen in die Dichtwand festgestellt.

Während der Bauphase wurden Sonden zur Durchführung von geoelektrischen Messungen in die Dichtwand eingesetzt.

Der Einbau der Bindemittel sowie das unterirdische Abbindeverhalten ist mit geophysikalischen Messungen (geoelektrisches Monitoring mittels Gleichstromverfahren in Wenner-Anordnung) begleitet worden. Änderungen im elektrischen Widerstandsverhalten sind durch elektrische Sonden erfaßt worden. Während des Abbindens der Bindemittel nehmen die elektrischen Widerstände stetig zu. Die gemessenen Anfangswiderstände (0,5 Tage nach Einbau) sind mit feuchten Sanden vergleichbar. Nach 8 Wochen waren die elektrischen Widerstände so hoch, daß keine Ströme mehr meßbar waren.

5.2 Wasserbecken

Zum Nachweis der Wasserdichtheit des Materials ist außerdem ein Wasserbecken aus BFA-Bindemitteln, 3 m lang x 2 m breit x 1,50 hoch, fugenlos ausgeführt worden. Bodenplatte und Seitenwände wurden 30 cm stark ausgebildet.

Nachdem das Bindemittel abgebunden war, 10 Tage nach Ausführung des Beckens, wurde mit Tracer markiertes Wasser eingefüllt.

Neben dem Nachweis der Dichtheit des Bindemittels soll anhand dieses Objektes die hohe Belastbarkeit von Dichtwänden gegenüber Biegezugkräften demonstriert werden.

Das Ergebnis ist in der Fotodokumentation in Anlage 3 des Berichtes dargestellt.

Das Wasserbecken ist 10 Tage nach seiner Ausführung mit Wasser befüllt worden.

Die Dichtheitsprüfung des Beckens erfolgt über eine visuelle Kontrolle von Wasseraustritten an den Seitenwandungen und an der Bodenplatte. Bei der Sichtkontrolle wird insbesondere den Anschlußstellen zwischen Bodenplatte und Wandungen große Aufmerksamkeit geschenkt. Im Beobachtungszeitraum von 20 Tagen nach Befüllung des Beckens konnten keine Wasseraustritte und damit keine Undichtigkeiten festgestellt werden.

5.3 Weitere baustoffliche Eigenschaften der Bindemittel

An insgesamt 3 zylinderförmigen Prüfkörpern wurden Frost-Tau-Beständigkeiten (2 x 7 Zyklen) untersucht. Der Abrieb betrug am Ende im Mittel jeweils 0,4 g / m² (vgl. **Anlage 4**). Demzufolge kann den Materialien eine sehr hohe Frost-Tau-Beständigkeit bescheinigt werden.

An folgenden Prüfkörpern wurden darüberhinaus die Druckfestigkeiten ermittelt (siehe **Anlage 4**):

Bindemittel-Prüfkörper B2-L(MA)-1/6 KW Lippendorf nach 200 Tagen:

- Würfeldruckfestigkeit $\beta_{D,W150} = 18,9 \text{ N/mm}^2$
- Zylinderdruckfestigkeit $\beta_{D,C100} = 19,8 \text{ N/mm}^2$

Zusätzlich wurden Kohäsion und Reibungswinkel an den Bindemitteln gemessen, da diese für den Einbau besonders interessant sind. Die Reibungswinkel lagen jeweils zwischen 35 und 39°, die Kohäsion lag bei 7,5 kN/m² im thixotropen Material und bei 2,4 kN/m² im weich breiigen Material (vgl. **Anlage 4**). Durch Vibration während des Einbaus können die Wandkohäsionskräfte um ca. 2/3 reduziert werden, während sich die Reibungskräfte kaum verändern.

Für die technische Anwendung der Bindemittel ist sowohl unter baustofflichen als auch unter ökonomischen Gesichtspunkten eine Mischung mit sandigen Substraten als Stützkorn sinnvoll, was zu weiteren Untersuchungen führte.

6. Baustoffliche Eigenschaften von BFA-Beton

An folgenden Bindemittel-Sand-Gemischen wurden baustoffliche Untersuchungen durchgeführt:

- Bindemittel-Sand-Gemisch BL-S-1, Mischungsverhältnis 3 : 7, 12 % Wasser
- Bindemittel-Sand-Gemisch BL-S-2, Mischungsverhältnis 1 : 1, 15 % Wasser
- Bindemittel-Sand-Gemisch BL-S-3, Mischungsverhältnis 1 : 1, 25 % Wasser

Bei einem Gewichtsanteil von 70 % Sand am Gesamtgemisch entspricht der Reibungswinkel etwa dem des reinen Bindemittels, während die Kohäsion auf ca. 0,5 kN/m² zurückgeht. Erhöht sich der Bindemittelanteil auf 50 %, so wirken bei 15 % Wassergehalt Kohäsionskräfte von ca. 3 - 4 kN/m². Bei höheren Wassergehalten sinken die Kohäsionen etwas.

Die Steifemodule E_s liegen im Bindemittel-Sand-Gemisch BL-S-1 nach deren Verdichtung im frischen Zustand bei 140 - 180 MN/m², im Bindemittel-Sand-Gemisch BL-S-2 bei ca. 120-125 MN/m². Nach einem Tag Aushärtung erhöhen sich die Steifemodule der Probe BL-S-1 auf ca. 300 MN/m², während die Probe BL-S-2 Steifemodule von über 400 MN/m² aufweist.

Bei höheren Wassergehalten ist aufgrund der weichen Konsistenz keine weitere Verdichtungsfähigkeit nachweisbar. Dafür erfolgt bereits gravitativ eine Selbstverdichtung. Während bei den geringeren Wassergehalten die Aushärtung so schwach ist, daß keine Druckfestigkeiten im baustofflichen Sinne ermittelt werden können, ist bei den höheren Wassergehalten ein Abbindeprozeß zu sehen. Nach ca. 24 Stunden wird eine halbfeste bis feste Konsistenz erreicht.

Insgesamt zeigt sich bereits im frischen Zustand, daß das Einbringen von BFA-Bindemittel stabilisierend auf eng gestufte Sande einwirkt. In Sand-Schluff-Gemischen ist ähnliches zu erwarten.

Nach einer Aushärtzeit von 28 Tagen wurden an Probekörpern BL-S-3 (im Prüfprotokoll genannt: B2-L(MA)-Sand) Biegezug- und Druckversuche durchgeführt - mit folgenden Ergebnissen (vgl. Anlage 5):

	Biegezugfestigkeit (N/mm ²)	Würfel-Druckfestigkeit (N/mm ²)	Zylinder-Druckfestigkeit (N/mm ²)
BL-S-3	0,58	2,01	2,5

Tab. 13: Baustoffliche Eigenschaften (Festigkeiten) von „BFA-Beton“

Nach dem vollständigen Aushärten der Materialien werden die Biegezug- und Druckfestigkeiten ca. das 4- bis 5-fache gegenüber dem 28-Tage-Test betragen.

An den Bindemittel-Sand-Gemischen BL-S-3 wurden die hydraulischen Durchlässigkeiten in der Triaxialzelle gemessen. Die hydraulischen Durchlässigkeiten betragen:

- $4 \cdot 10^{-9}$ m/s nach 28 Tagen
- $1 \cdot 10^{-9}$ m/s nach ca. 50 Tagen
- $5 \cdot 10^{-10}$ m/s nach ca. 70 Tagen (siehe **Anlage 5**)

Die starke Abnahme der hydraulischen Durchlässigkeiten spiegeln den Abbindeprozeß wider. In den Porenraum hinein wachsen zunehmend CSH-Phasen, die dem Material außerdem zunehmende Festigkeiten verleihen.

7. Eignung von BFA-Beton und Bindemittel-Suspensionen im Deichbau

Als Füllmaterial ist „BFA-Beton“ sowohl aus ökonomischer als auch aus baustofflicher Sicht besser als Füllmaterial geeignet, als reines BFA-Bindemittel. Das Mischungsverhältnis Bindemittel : Sand darf im „BFA-Beton“ nicht kleiner sein als 1 : 1. Für den Einbau des "BFA-Betons" ist eine "weiche Konsistenz" empfehlenswert, da mit geringeren Wassergehalten keine Selbstverdichtung zu erzielen ist. Für die Herstellung eines "BFA-Betons" in einem Betonmischwerk ist folgende Rezeptur anzuwenden:

- 4 t BFA-Trockenbindemittel einblasen
- 2 m³ Wasser hinzugeben
- Herstellung einer Bindemittelsuspension (Mischzeit ca. 20 Minuten)
- 4 t Bausand 0-2A hinzugeben
- Herstellung des "BFA-Betons" mit einer Mischzeit von mind. 1 h

Der "BFA-Beton" kann anschließend mit "offenen" LKW's an den Einbauort geliefert werden, der maximal 50 km entfernt sein sollte. Dort ist der "BFA-Beton" in entsprechende Schlitze – zum Beispiel hergestellt mittels mobiler Grabenfräs-Schlitzwand-Technologie - mittels Greifer- oder Löffelbagger bzw. Radlader einzubringen. Zusätzlich kann das Material durch leichte Vibration oder stampfend nachverdichtet werden - ist jedoch nicht zwingend erforderlich.

Der Einbau von BFA-Bindemitteln kann auch mittels mixed-in-place-Verfahren erfolgen (z.B. mittels Fräs-Misch-Injektion FMI oder über Bohrschneckenverfahren, vgl. **Anlage 6**). Hierzu ist eine BFA-Bindemittel-Suspension im Mischungsverhältnis Bindemittel zu Wasser von 2 : 1 herzustellen, die anschließend zum Einbauort gepumpt werden kann. Dort erfolgt das Einmischen in die Bodenmatrix, wobei der Bindemittel-Anteil möglichst bei 50 % liegen sollte.

8. Zusammenfassung und Ausblicke

Anhand der Untersuchungen sind folgende Schlußfolgerungen zulässig:

Die Durchführung des Modellversuchs hat aufgezeigt, dass die konzipierte mobile Grabenfräs-Schlitzwand-Technologie in der Praxis prinzipiell funktioniert. Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Einsatzfähigkeit des Verfahrens durch die Reichweite der Grabenfräse (Frästiefe: 3,50) und des Schleppverbaus begrenzt wird. Dementsprechend eignet sich die mobile Grabenfräs-Schlitzwand-Technologie vornehmlich für Deichstandorte, an denen relativ geringe Tiefen bis zu den tragfähigen Schichten durch Vertikaldichtwände überbrückt werden müssen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden verschiedene Standorte untersucht. Dabei zeigte sich jedoch, dass Vertikalabdichtungen auf Grund der sehr aufwändigen Planfeststellungsverfahren sowie der ökonomischen Rahmenbedingungen auf längeren Strecken selten gefragt ist (z.B. Neuzeller Niederung oder Grimma). Wo ein solcher Bedarf vorhanden ist, fehlt es dagegen oft an den Rahmenbedingungen für die Befahrbarkeit durch schwere Technik (z.B. Wustrauer Rhin). Die größte Nachfrage an Vertikaldichtwänden besteht meist bei kleineren Deichabschnitten im Bereich von Schwachstellen reliktscher Niederungsbereiche.

Die Untersuchungen am "Lödderitzer Forst", welche hier als repräsentatives Beispiel erwähnt werden sollen, verdeutlichen, daß der Einbau von vertikalen Dichtwänden im Bereich der erkundeten hydromorphen Böden zur Ertüchtigung der geplanten Deiche einen wichtigen Beitrag leisten könnten. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Breite der "Schwachstellen" ist jedoch der Einsatz der "mobilen Grabenfräs-Schlitzwand-Technologie" verhältnismäßig teuer. Alternativ hierzu könnten relativ kostengünstig die "Schwachstellen" mit 2 m tief einbindenden Dichtwänden überbrückt werden, wobei die Schlitze mit Greiferbaggern errichtet werden können. Durch die seitliche Einbindung in den anstehenden Auelehm würden die Deichlasten in die stabileren Randbereiche der Dichtwand verlagert werden.

Eine Unterspülung der Deiche kann im Falle eines Hochwasserereignisses nicht vermieden werden. Das Einbringen von zwei parallelen Dichtwänden würde jedoch

- die Aufweichung der hydromorphen Böden im Untergrund minimieren,
- eine rückschreitende Erosion unterbinden,
- in diesem Zusammenhang die Gefahr von landseitigen Böschungsrutschungen eindämmen,
- die Standsicherheit des Deichkörpers deutlich erhöhen.

In Schlitzte, die mittels „mobiler Grabenfräs-Schlitzwandtechnologie“ oder anderer Verfahren errichtet wurden, ist die Befüllung mit „BFA-Beton“ – einem Gemisch aus BFA-Bindemitteln und Sand – sinnvoll. Der Einsatz von BFA-Beton stellt eine alternative Lösung zur Spundwand dar, die an verschiedenen Standorten (insbesondere der Elbe und der Mulde) angewandt werden könnte. Das Vorhalten einer Abfülleinrichtung für Trockenbindemittel würde die Effektivität stark erhöhen, da dann auch eine Mischung des „BFA-Betons“ in externen Mischanlagen für Beton erfolgen könnte. Darüber hinaus könnte auch der „BFA-Beton“ durch insitu-Mischverfahren (FMI- oder Bohrschneckenverfahren) hergestellt werden, was den Einsatz auch für größere Tiefen erlaubt.

Der Einfluß der BFA-Bindemittel auf das gesamte hydraulische System ist aufgrund der geringen Einbindung der Dichtwände als geringfügig einzuschätzen. Zusätzliche Stoffeinträge in das Grundwasser durch die BFA-Bindemittel sind nicht zu erwarten. Kurzzeitig führen im Bereich der Bindemittel freie Sulfate zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit. Mit dem Abbinden werden jedoch die Sulfate unter Bildung von Ettringit mineralisch gebunden. Hydrogencarbonate werden durch das Bindemittel nicht freigesetzt, da im Gegensatz zu Kalken und Zementen kaum Hydrogencarbonat vorhanden ist. Schwermetalle sind in Eluaten bereits bei den Trockenbindemitteln nicht nachweisbar.

Der Einfluß auf Flora und Fauna kann folgendermaßen beschrieben werden:

Aufgrund der Festigkeit des BFA-Betons ist im Bereich der Dichtwände eine wühlende Tätigkeit von Mäusen, Maulwürfen etc. ausgeschlossen. Ebenso ist kein Wachstum von Pflanzenwurzeln in die Dichtwandbereiche möglich. Aus der Sicht des Hochwasserschutzes ist das ein wünschenswerter Begleiteffekt. Auf dem Deichkörper ist ein Baumbewuchs sowie die Errichtung von unterirdischen Gangstrukturen durch Bodenwühler nicht erwünscht.