Brandenburgische Geowiss. Beitr.	Kleinmachnow	2 (1995), 1	S. 113 – 129	10 Abb., 6 Tab., 3 Tafeln, 16 Lit.

Untergrundsanierung im Bereich ehemaliger Braunkohlenschachtanlagen in Brandenburg

JOACHIM TIEDEMANN & JÜRGEN KOPP

1. Einleitung

Der Braunkohlentagebau in Brandenburg läßt sich bis zum Beginn des 17. Jahrhunderts zurückverfolgen. Seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts fand er in ständig zunehmendem Maße statt, bis schließlich mit rund 100 Mio. t geförderter Braunkohle im Jahr 1989 (312 Mio. t im Gebiet der ehemaligen DDR) ein absolutes Maximum erreicht wurde.

Bis zu den heute praktizierten großtechnologischen Abbaumethoden wurden verschiedene Stadien der Braunkohlengewinnung durchlaufen. Wo die Flöze infolge eiszeitlich bedingter Deformation zu Sätteln oder Schuppen zusammengestaucht worden waren und deshalb bis an die Geländeoberfläche reichten, konnten sie anfänglich in einfachen obertägigen Gruben gewonnen werden. Waren diese Lagerstätten erschöpft, mußte der weitere Abbau den abtauchenden Flözen folgen; es entwickelte sich der untertägige Braunkohlenbergbau.

Der Braunkohle-Tiefbau erfolgte in den meisten Fällen nach dem Prinzip des Kammerpfeilerbruchbaus. Hierzu wurden Schächte in das Flöz abgeteuft, von denen ausgehend das Flöz durch ein Geflecht kleiner Stollen mit ca. 4 m^2 Ausbruchsquerschnitt, den sogenannten Vorrichtungsstrecken, erschlossen wurden. Die Vorrichtungsstrecken bildeten dabei Verschneidungen, Gabelungen und Schrägstrecken, die verschiedene Ebenen miteinander verbanden. Der eigentliche Abbau begann im schachtfernsten Bereich, indem Flözsegmente mit etwa $5 * 5$ m^2 Grundfläche und max. 4 m Höhe abgebaut wurden. Die Stützung des Hangenden erfolgte durch Holzausbau und zugleich durch die Kohle selbst, die in Pfeilern zwischen den Abbaukammern stehengelassen wurde. Nach abgeschlossenem Kohleabbau wurde das Holz wiedergewonnen, so daß die Kammern zeitverzögert oder spontan zusammenbrachen. Auf diese Weise überließ man den Bruchprozeß mit seinen nachteiligen Auswirkungen auf die Geländeoberfläche keiner ungewissen Zukunft. Vorrichtungs- und auch die größeren Förderstrecken wurden im allgemeinen nicht zu Bruch gebracht.

Diese Art der untertägigen Braunkohlengewinnung war bis in die 20er Jahre in Brandenburg weit verbreitet. Sie wurde nach dem ersten Weltkrieg infolge technischer Entwicklungssprünge der Tagebautechnik weitestgehend eingestellt.

2. Gefährdung der öffentlichen Sicherheit durch den alten Braunkohlen-Tiefbau

Die meisten der untertägigen Braunkohlengruben in Brandenburg mußten während der Betriebsphasen das Grundwasser absenken, das sie folglich nach ihrer Stillegung wieder überflutete. Dadurch wurde der meist hölzerne Ausbau der Vorrichtungsstrecke konserviert und behielt seine stützende Funktion.

Aus früheren statistischen Untersuchungen (FENK 1981) ist bekannt, daß der überwiegende Anteil solcher Ausbauten erst 80 bis 120 Jahre nach der Grubenstillegung versagt. Die dadurch im Hangenden initiierten Bruchprozesse stellen somit auch noch heute ein aktuelles Risiko dar. Tagesbrüche müssen jedoch nicht nur über offen gelassenen Vorrichtungsstrecken befürchtet werden, sondern auch über Abbaufeldern, wo insbesondere im Bereich der Abbauränder mit nicht zu Bruch gebrachten Kammern zu rechnen ist.

261 untertägige Bergbauobjekte sind in Brandenburg zur Zeit bekannt, die rund 640 km^2 des Landes betreffen, überwiegend forst- und landwirtschaftlich genutzte Flächen, aber auch überbautes Gelände und solches, das für eine Bebauung interessant ist.

Bei den hier dargestellten Bergbauobjekten handelt es sich im wesentlichen um solche, für die heute kein Rechtsnachfoger mehr greifbar ist. Verantwortlich für die Gewährleistung der öffentlichen Sicherheit ist deshalb das Land Brandenburg, und hier der Minister für Wirtschaft, Mittelstand und Technologie, der die anfallenden fachlichen Aufgaben wie

- Führung einer Objektdatei
- Gefährdungsabschätzung
- Prioritätenfestlegung für Sanierungsmaßnahmen
- Aufstellung von Sanierungskonzeptionen
- Ausschreibung von Sanierungsleistungen
- Überwachung von Sanierungsleistungen

dem Landesamt für Geowissenschaft und Rohstoffe übertragen hat.

3. Präventive Sanierungsverfahren

Die Aufgaben zur Gewährleistung der öffentlichen Sicherheit gegenüber den vom Altbergbau ausgehenden Gefahren umfassen die geotechnische Sanierung akuter Einbrüche der Geländeoberfläche (Tagesbrüche) und präventive Maßnahmen zur Verhinderung neuer Brüche.

Die Bruchprävention geht von einer Reihe durch die Praxis belegter Modellvorstellungen aus, die in Abb. 1 schematisch skizziert sind: Links in der Abbildung ist ein Bodenprofil dargestellt, das über einer offenen Vorrichtungsstrecke mit dem Flöz und dem Hangendton beginnt und sich dann über zwei Sandschichten, Geschiebelehm und eine weitere Sandschicht bis zur obersten Mutterboden- und Schluffschicht fortsetzt. Die Mächtigkeit des Geschiebelehms nimmt in der Abb. 1 von links nach rechts in dem gleichen Maße zu, wie die darunter befindliche Sandschicht abnimmt. Der Ruhewasserspiegel wird in der obersten Sandschicht angenommen.

Dargestellt sind ferner die Streckenverbrüche I, II und III, von denen sich die Brüche II und III über Streckenkreuzen bzw. -gabelungen ereignet haben sollen, während sich der links dargestellte Bruch I über einer einfachen Strecke befindet. Die unterschiedlichen Bruchfiguren entsprechen qualitativ den Erkenntnissen von FENK (1981), wonach die Kohäsion der bindigen und die Wassersättigung der nichtbindigen Böden darauf maßgeblich Einfluß nehmen.

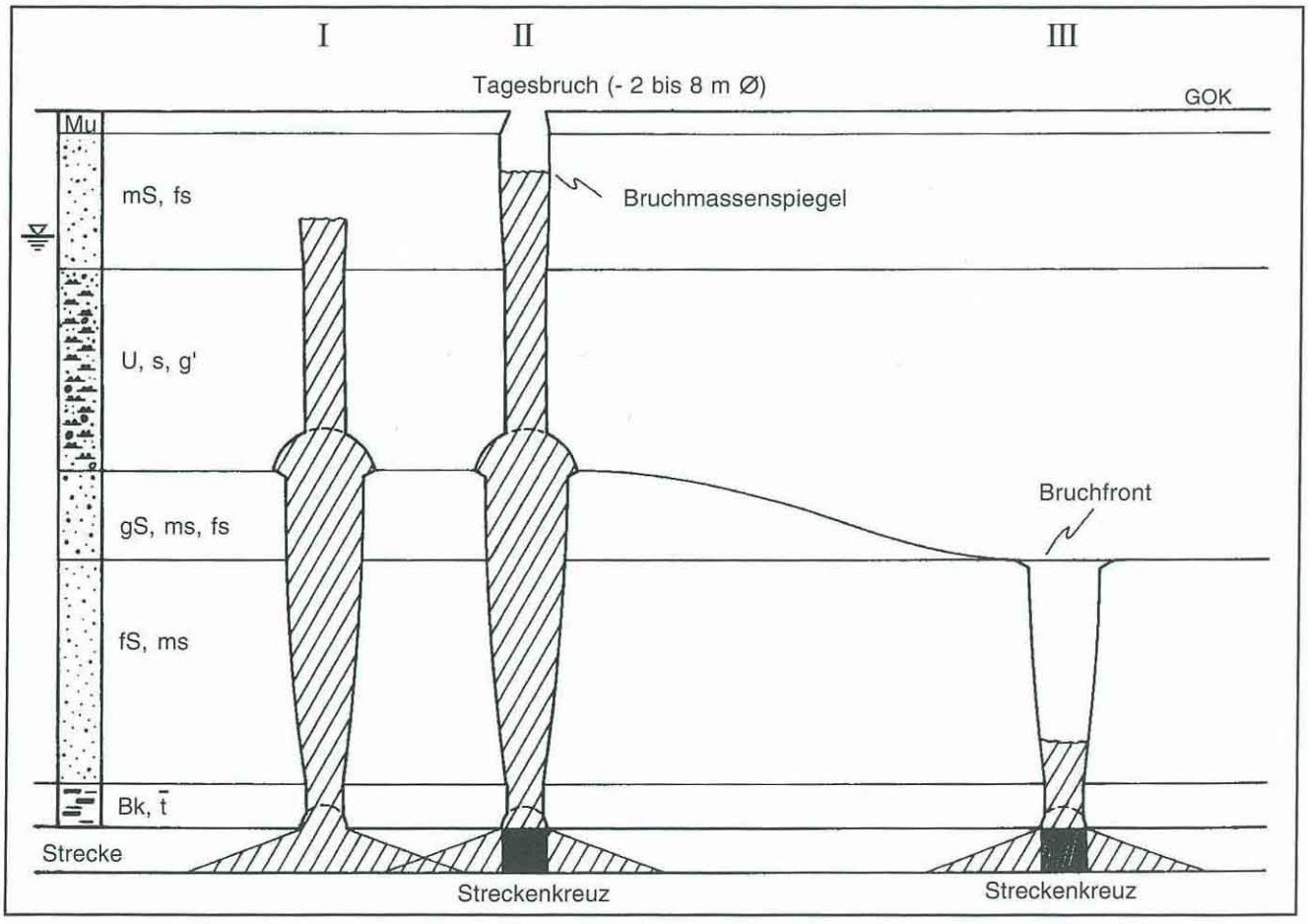
Entscheidend dafür, ob ein Bruch die Geländeoberfläche erreicht, ist der in den bergbaulichen Hohlräumen für die Bruchmassen zur Verfügung stehende Raum, das sogenannte Primärbruchvolumen. Da das Primärbruchvolumen im Bereich von Streckenkreuzen mit etwa 100 m^3 etwa drei Mal größer ist als im Bereich einzelner Strecken, erreichen bevorzugt die von dort ausgehenden Brüche die Geländeoberfläche. Gleiches gilt für offen gebliebene Abbaukammern.

Reicht dagegen das Primärbruchvolumen nicht aus, wie bei Bruch I dargestellt ist, dann holt der ansteigende Spiegel der gegenüber dem in situ befindlichen Lockergestein um den Faktor 1,02 bis 1,05 aufgelockerten Bruchmassen die Bruchfront ein. Der Bruch läuft sich dann im Gebirge tot.

Während die Bruchvorgänge in nichtbindigen Böden von ihrer Initiierung bis zu ihrem Ende nur wenige Sekunden oder Minuten benötigen, können Brüche von bindigen Schichten trotz ausreichenden Primärbruchvolumens auf Dauer oder vorübergehend aufgehalten werden. FENK

Abb. 1

Erdstatische Modelle für von untertägigen Strecken ausgehende Brüche in Abhängigkeit von Verfügung stehenden Primärbruchvolumen und der Schichtenabfolge (qualitativ nach FENK 1981)



(1981) führt solche Bruchunterbrechungen auf das in Abb. 2 dargestellte erdstatische Modell zurück. Demnach öffnet sich der von unten gegen eine bindige Schicht laufende Bruch kreiskegelförmig (Abb. 2 a). Infolge der Entlastung an der Liegendfläche gerät innerhalb der bindigen Schicht eine kugelsegmentförmige Fläche unter Zugspannung (Abb. 2 b). Überschreitet die entlastete Fläche einen kritischen Durchmesser D_{krit}, kommt es innerhalb der bindigen Schicht zur Festigkeitsüberschreitung und damit zum Übertritt des Bruches in diese Schicht.

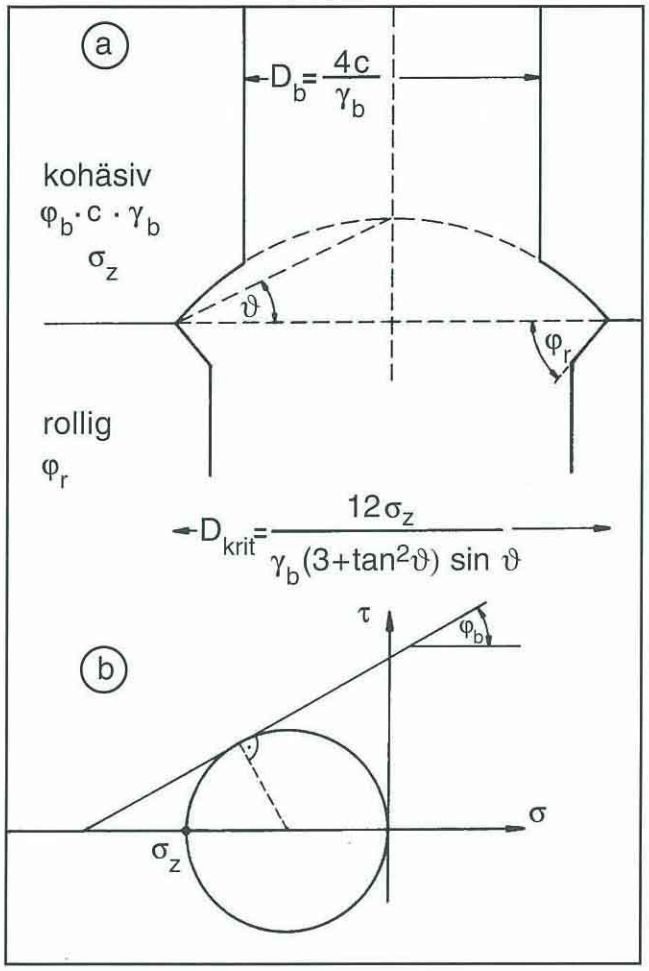


Abb.2
Erdstatisches Bruchmodell nach FENK (1981)

Während bindige Schichten mit geringer Mächtigkeit kreiskegelstumpfförmig vom aufdrängenden Bruch durchschlagen werden, können bindige Schichten mit großen Mächtigkeiten den Bruchprozeß auf unbestimmte Zeit unterbrechen.

Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge müssen präventive Sanierungsmaßnahmen zuerst untersuchen,

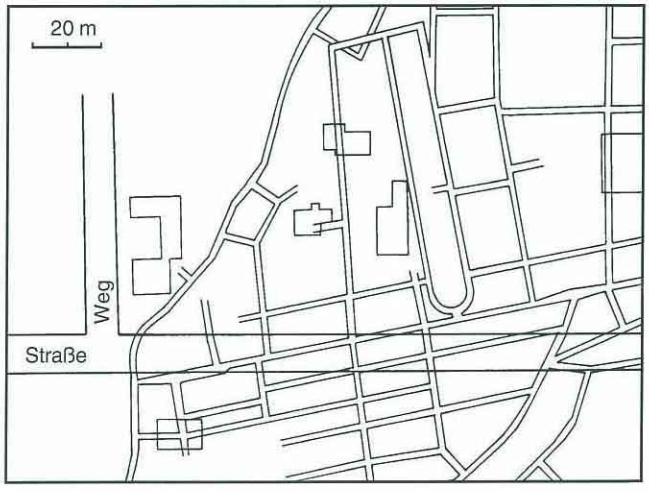
1. ob die zur Verfügung stehenden Primärbruchvolumina für ein Aufdringen von Brüchen bis zur Geländeoberfläche oder vorhandenen Gründungssohlen ausreichen,
2. ob der geologische Schichtenaufbau die zeitliche Verzögerung von Bruchprozessen wahrscheinlich macht, ob also mit "hängengebliebenen" Brüchen gerechnet werden muß.

Grundlagen für diese Abschätzungen bilden Kernbohrungen zur Ermittlung der Schichtenabfolge und die amtlichen Grubenrisse (Abb. 3). Stellt es sich im ungünstigsten Fall heraus, daß von allen Hohlraumtypen des Grubengebäudes Tagesbrüche ausgehen und eine vorhandene Bausubstanz (Gebäude, Verkehrswege, Leitungen) gefährden können, kann von folgenden Randbedingungen ausgegangen werden:

– Die Initiierung neuer Brüche kann nur durch eine Verpressung des Grubengebäudes, also eine Reduzierung des verfügbaren Primärbruchvolumens, dauerhaft verhindert werden.
– Die Verfüllung mit pumpbaren Suspensionen über Bohrungen initiiert kaum neue Brüche, belebt totgelaufene Brüche aber aufgrund von Verlagerungen der Bruchmassen in den Strecken durch den Suspensionsstrom.
– Wiederbelebte Brüche in sandigem Deckgebirge ohne mächtige bindige Schichten laufen spontan bis zur Geländeoberfläche durch.
– Totgelaufene und unter mächtigen bindigen Schichten "hängengebliebene" Brüche sind systematisch nicht zu lokalisieren und können auch nicht sicher als verpreßt durch die verwendete Suspension angesehen werden.
– Über Abbaufeldern muß insbesondere in den Randbereichen mit einzelnen offenen Abbaukammern gerechnet werden, die ebenfalls mit wirtschaftlichen Mitteln kaum lokalisierbar sind.

Zur Grubenverpressung besonders auch unter bebautem Gelände gibt es zur Zeit keine Alternative, da sonst die untertägigen bergbaulichen Hohlräume mit Sicherheit irgendwann kollabieren würden. Lediglich die mit der Verpressung einhergehende Wiederbelebung totgelaufener Brüche stellt eine zusätzliche Gefährdung der Geländeoberfläche dar. Da dieser Fall aber auf geologische Formationen mit geringen bindigen Schichtenanteilen beschränkt ist und fast zeitgleich mit der Verpressung ein-

Abb.3
Ausschnitt aus dem amtlichen Grubenriß einer Grube in Südbrandenburg



tritt, lassen sich zumindest Personenschäden durch vorübergehende Evakuierung mutmaßlich betroffener Gebäude ausschließen, Sachschäden dagegen nicht.

Als wesentlich unangenehmer müssen Gruben unter mächtigen bindigen Schichten gelten, da auch nach erfolgter Verpressung "hängengebliebene" Brüche offen sein und sich zeitlich unkalkulierbar weiter in Bewegung setzen können; ausgelöst etwa durch dynamische Lasteintragung oder Kriechvorgänge. Da man die zu erwartenden maximalen Tagesbruchdurchmesser annähernd vorausberechnen kann, lassen sich neue Gebäude durch Dimensionierung auf entsprechende Trag- und Freilagen konstruktiv sichern. Verkehrs- und Freiflächen können z.B. durch Geogitter bewehrt werden (GENSKE & LEPIQUE 1993). Ein unvermeidbares Restrisiko bleibt aber für die Altbebauung bestehen, zumal die Gründungskonstruktionen häufig kaum den normalen Baugrundbedingungen genügen.

4. Grubenverpressung

Die Grubenverpressung erfolgt in Brandenburg heute generell mittels bestimmter, eigenhydraulisch erhärtender Braunkohlenfilteraschen (BFA) über Bohrungen. Hierzu werden die BFA mit Silofahrzeugen von den entsprechenden Kraftwerken zur Verwendungsstelle transportiert. Dort werden sie in einem Durchlaufmischer mit Wasser versetzt und als Suspension entweder nahezu drucklos unter dem Freispiegelgefälle oder unter höherem Druck über Rohre von zwei Zoll Durchmesser in die bergbaulichen Hohlräume gepumpt. Hoher Verpreßdruck begünstigt die Verteilung der BFA-Suspension innerhalb des Grubengebäudes, wobei sie Bruchmassen durchdringen und in "hängengebliebene" Brüche aufsteigen kann. Nachteilig ist die Verlagerung vorhandener Bruchmassen und die damit verbundene Reaktivierung vorher bereits totgelaufener Brüche. Niedriger Verpreßdruck an den Einpreßstellen ist gebirgsschonender, bedarf aber einer größeren Anzahl von Einpreßstellen.

Neben der Ausbreitung der BFA-Suspension im Grubengebäude muß ihr bis zu mehreren Wochen dauernder Abbindeprozeß beobachtet werden. Die Ausbreitung der BFA kann über Beobachtungsbohrungen, darin durchgeführte Lotungen oder TV-Sondierungen verfolgt werden, während ihr Abbindezustand anhand gewonnener Bohrkerne überprüft werden muß. Angestrebt werden eine Mindestdruckfestigkeit der BFA von 0,5 MPa und eine Wasserdurchlässigkeit von 10^{-8} m/s. Problematisch bei der Verwendung von BFA als Verpreßmittel sind ihre heterogenen physikochemischen Eigenschaften, die nicht jede BFA für diesen Zweck als geeignet erscheinen lassen, sowie ihr Langzeitverhalten. Über diesbezügliche Zusammenhänge und Aspekte wird in den folgenden Kapiteln berichtet.

5. Braunkohlenfilteraschen - Allgemeine Gesichtspunkte ihrer Entstehung und Verwendung

Bei der Energiegewinnung aus Braunkohlen werden in Deutschland jährlich mehrere Millionen Tonnen Braunkohlenfilterasche produziert. Sie fallen bei der Entstaubung der Rauchgase an den Elektrofiltern der Großkraftwerke an und stellen gelbe bis braune, trockene, feindisperse Pulver dar.

Das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) bezeichnet im § 5, Abs.1 sämtliche Stoffe, die bei der Energieumwandlung anfallen, als "Reststoffe". Im Fall einer wirtschaftlichen Verwertung sind sie als Wirtschaftsgut und im Fall einer Nichtverwertbarkeit als Abfall einzuordnen.

Die BFA, die in den Großkraftwerken der Niederlausitz und Mitteldeutschlands anfallen, weisen auf Grund ihrer physikochemischen Eigenschaften einen hohen Grad Verwendbarkeit auf und werden daher mit voller Berechtigung als Wirtschaftsgüter eingestuft. Neben ihrer seit Jahren erprobten Anwendung in der Land- und Forstwirtschaft – insbesondere bei der Rekultivierung von Braunkohlenkippen – sind BFA auch in der Bauindustrie und im Bergbau erfolgreich eingesetzt worden. Schwerpunkte bildet dabei ihre Verwendung als:

- Zuschlagstoff für verschiedene Betonsorten (insbesondere hydrotechnischem Beton)
- Zuschlagstoff für Zementmörtel bei Baugrund- und Bauwerkssanierungsmaßnahmen (Injektionen)
- Zuschlagstoff für "zu fette" Tone bei der Ziegelherstellung
- Versatzmassen im Bergbau zur Sanierung untertägiger Grubenbaue.

Die Verwertung von Reststoffen im Bergbau ist betriebsplanpflichtig. Der Betriebsplan hat alle Betriebsvorgänge von der Annahme der Reststoffe im Bergbaubetrieb über den Umgang mit ihnen bis zu deren Verwendung zu erfassen.

Die Prüfkriterien für den Betriebsplan ergeben sich dabei aus den §§ 55 und 48 des Bundesberggesetzes (BBergG). Hierbei sind, wenn auf Grund § 48 Abs. 2 BBergG bergrechtsexterne Belange (z. B. des Immissionsschutzes, §§ 22 ff. BImSchG) einzubeziehen sind oder nach § 1 UVP-V Bergbau ein Planfeststellungsverfahren durchzuführen ist, auch Belange des Umweltschutzes im Rahmen des Betriebsplanverfahrens zu berücksichtigen. Im übrigen sind ökologische Gesichtspunkte in besonderen umweltrechtlichen (z. B. wasserrechtlichen) Verfahren zu prüfen. Die Prüfung des Betriebsplanes hat auch die Langzeitsicherheit im Zusammenhang mit den Prüfkriterien eines späteren Abschlußbetriebsplanes nach § 55 Abs. 2 BBergG zu erfassen, wobei eine Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit in der Nachbetriebsphase ausgeschlossen werden muß. Ziel ist eine überwachungsfreie Nachbetriebsphase und damit die Erfüllung der Kriterien nach § 69 Abs. 2 BBergG – Ende der Bergaufsicht.

BFA weisen auf Grund ihrer spezifischen Eigenschaften eine einfache Handhabbarkeit auf, sind als Suspensionen transportierbar und pumpbar und sind infolge des permanenten Verbrennungsprozesses in den Großkraftwerken stets verfügbar.

Die Eigenschaften der BFA hängen im wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- vom Verbrennungsregime,
- von der Qualität der eingesetzten Braunkohlenrohstoffe,
- vom Grad der Zerkleinerung und Vermahlung,
- von der Wechselwirkung zwischen Asche und Brenngasen (Kohlenoxide, Wasserdampf, Luft, Schwefeloxide),
- von der Abkühlgeschwindigkeit,
- von der Art und Weise der Abscheidung an den Elektrofiltern und der Sammlung der Mischasche.

Werden BFA in den Grundwasserbereich eingebracht, ist neben der geotechnischen Eignungsprüfung auch eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) notwendig.

BFA können charakterisiert werden durch

- ihren mineralogischen Phasenaufbau → Vorfelduntersuchungen für die UVP,
- ihre Geochemie → Vorfelduntersuchungen für die UVP,
- ihre petrophysikalischen Kennwerte → Vorfelduntersuchungen für die Geotechnik.

Beim Vermischen mit Wasser binden BFA nach wenigen Tagen, teilweise auch erst nach zwei bis drei Wochen, ab und erhärten zu "BFA-Beton".

6. Mineralogie

6.1. Phasenbestand und Gefüge

Im Kap. 5 wurde bereits auf die Faktoren hingewiesen, die entscheidende Auswirkungen auf die Eigenschaften der BFA haben. Einen ganz wesentlichen Einfluß übt dabei die Verbrennungstemperatur aus. Während im Zuge von Sanierungsmaßnahmen einige Rheinbraun-Grubenkraftwerke auf das Verfahren der zirkulierenden atmosphärischen Wirbelschichten (ZWS) umgestellt worden sind, werden die Großkraftwerke der VEAG in der Lausitz weiterhin nach dem Mühlenfeuerungsverfahren (MF) betrieben. Auch die geplanten bzw. sich bereits im Bau befindlichen zwei 800 MW-Blöcke des Großkraftwerkes Schwarze Pumpe werden mit einer modernisierten Variante des Mühlenfeuerungsverfahrens betrieben werden.

Die Braunkohlenfilteraschen des ZWS- und des MF-Verfahrens unterscheiden sich erheblich in ihrer mineralogischen Zusammensetzung. Das ist vor allem auf die unterschiedlichen Verbrennungsparameter wie Temperatur, Verweildauer im Kessel usw. zurückzuführen. In den BFA des bei etwa 1200 °C ablaufenden MF-Verfahrens kommt es zur Anreicherung von Hochtemperaturphasen wie Brownmillerit und Gläsern. Demgegenüber enthalten die Aschen des ZWS-Verfahrens weder Gläser noch Brownmillerit. In Tabelle 1 sind die Mineralphasenunterschiede der BFA beider Verfahren wiedergegeben.

Beide BFA-Typen weisen ein typisches Einzelkorngefüge auf, zeigen bezüglich ihrer Oberflächenstruktur aber deutliche Differenzen. Während die ZWS-Aschen unter dem Rasterelektronenmikroskop ein rauhes und zerklüftetes Bild darbieten, erscheint das der MF-Aschen kugelig-glasartig bis kollomorph.

Dies trifft auch für die Mühlenfeuerungsaschen der Lausitzer Großkraftwerke Jänschwalde und Boxberg zu, wenn auch die kugelige Oberflächenstruktur nicht so stark hervortritt, wie es in der Literatur beschrieben wird (FABER u. a. 1992, KEYN u. a. 1985, ZSCHACH 1978). Die Tafelbilder 1 bis 6 spiegeln die beobachteten Verhältnisse wider.

In Tab. 2 sind die Mineralphasenanteile der Boxberger und Jänschwalder Braunkohlenfilterasche aufgeführt. Es handelt sich dabei um röntgendiffraktometrisch ermittelte Werte, wobei ein Phillips-Röntgendiffraktometer und ein Horizontalzählrohrgoniometer (HZG 4) eingesetzt wurden. Alle Messungen erfolgten mit CuK_{α}-Strahlung und 1 °/min. (Phillips-Röntgendiffraktometer: 5 °/min.) Winkelgeschwindigkeit. Die Auswertung wurde mittels ICPDS-Karte (Joint Commite on Powder Diffraktion Standards, Swarthimore, Pennsylvenia, USA) durchgeführt. Die Phasenanteile stellen Mittelwerte aus drei Messungen dar. Zuvor sind die Glasanteile in den Aschen mit dem Integrationsgerät ELTINOR 3 der Rathenower Optischen

Tab. 1
Mineralphasenbestand von Braunkohlenfilteraschen der Mühlen- und der Wirbelschichtfeuerung (FABER u. a. 1992)

Mineralbestand	Mühlenfeuerung trocken	Wirbelschichtfeuerung trocken
Hauptphasen	Freikalk (CaO) Anhydrit ($CaSO_4$) Quarz (SiO_2) Brownmillerit (Ca_2FeO_4)	Freikalk Anhydrit Quarz Illit (Al-Mg-Fe-Silikat) Mullit (Al-Silikat)
Nebenphasen	Periklas (MgO) Hämatit (Fe_2O_3) Glas	Calcit ($CaCO_3$) Hämatit Periklas

Tab. 2:
Mineralphasenanteile in Braunkohlenfilteraschen der Großkraftwerke Boxberg und Jänschwalde (KOPP & ADAM 1993)
n. n. – nicht nachweisbar

BFA-Hauptphasen (M-%)	Boxberg	Jänschwalde
Quarz SiO_2	15	25
Anhydrit $CaSO_4$	7	7
Brownmillerit (chemische Zusammensetzung siehe Text)	~ 45	~ 50
Freikalk CaO	2	5
Hämatit Fe_2O_3	3	3
Maghemit γ-Fe_2O_3	5	n.n.
Periklas MgO	2	n.n.
Glasphase + Organika	~ 20	~ 10
Kalifeldspat $KAlSi_3O_8$	1	n. n

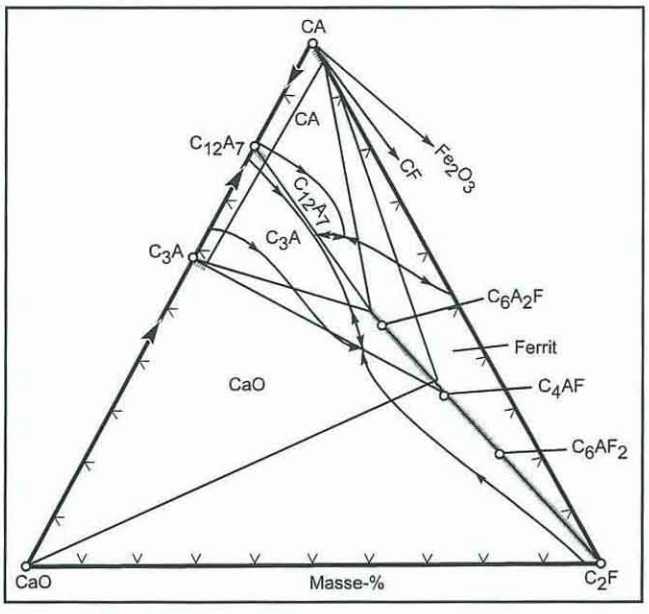
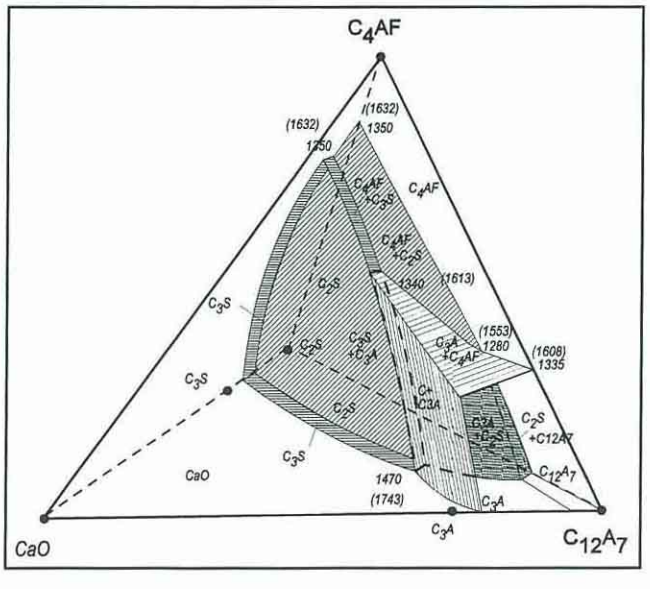


Abb.4
System CaO-CaO Al_2O_3-2 CaO* FeO nach NEWKIRK & THWAITE (1958), quergestrichelte Linien: Mischkristalle C-CaO, F-Fe_2O_3, A-Al_2O_3*

Werke an polierten Dünnschliffen bestimmt worden. Der mittlere Fehler der röntgendiffraktometrischen Bestimmungen wurde auf der Basis der Mehrfachbestimmungen mit ca. 15 % eingeschätzt.

Bei der Betrachtung der Mineralanteile fällt der hohe Anteil an Brownmillerit auf. Diese Verbindung ist eine Phase

Abb.5
Ausschnitt aus dem CAFS - System, der durch das System C-C_2S-$C_{12}A_7$-C_4AF charakterisiert wird (aus PETZOLD & HINZ 1978)



im Vierstoffsystem CaO - Fe_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2, das für die Zementchemie von großer Bedeutung ist. Es läßt Rückschlüsse auf die Lenkung des Brennprozesses zu und gibt einen Einblick in die physiko-chemischen Vorgänge bei der Schmelzenbildung. Genau genommen handelt es sich beim Brownmillerit um Mischkristalle innerhalb einer Mischkristallreihe zwischen den Verbindungen 2 CaO* Fe_2O_3(C_2F) und 2 CaO* Al_2O_3 (C_2A hypothetisch - bisher nicht nachgewiesen) als Endglieder, wobei vollständige Mischbarkeit entlang der Linie C_2F - C_2A bis etwa zur Zusammensetzung C_6A_2F besteht (siehe Abb. 4). Die Grenzzusammensetzung CaO* Al_2O_3* Fe_2O_3 (C_4AF) – der Tetrakalziumaluminatferrit – stellt dabei die eigentliche Mineralphase "Brownmillerit" dar. Für die genannten Verbindungen sind folgende Schmelztemperaturen ermittelt worden (SCHWARZSAID 1969):

2 CaO* Fe_2O_3	1449 °C	⇑
4 CaO* Al_2O_2 Fe_2O_3	1395 °C	Brownmilleritphasen
6 CaO* Al_2O_3 Fe_2O_3	1365 °C	⇓

Aus der Lage der Reflexe und ihren Intensitäten ist abzuschätzen, daß die Brownmilleritphase überwiegt, die als $Ca_2Fe_2O_4$ - Verbindung vorliegt. Aus Abb. 5 kann die Lage der Brownmillerritmischkristallphasen im CAFS-System genauer erfaßt werden.

6.2. Laborversuche zum Abbindeverhalten

BFA nehmen hinsichtlich ihres eigenhydraulischen Abbindeverhaltens eine Stellung zwischen Puzzolanen ein, die kein eigenhydraulisches Erhärten aufweisen und Bindemitteln, die eigenhydraulisch erhärten. Das Vermögen, eigenhydraulisch abzubinden, ist insbesondere eine Frage des Gehaltes an hydraulisch wirksamem CaO (sog. "Freikalk"). Dabei gilt es jedoch zu beachten, daß der chemische Analysenwert für CaO meistens nicht mit dem Gehalt an hydraulisch wirksamem CaO identisch ist.

Jedes hydraulische Bindemittel benötigt eine bestimmte Menge an Wasser, um die diesbezüglich wirksamen Phasen in ihre Hydrate zu überführen. Gleiches trifft, entsprechend dem oben dargelegten Anteil an hydraulisch wirksamen Mineralen, auch auf die BFA zu, wobei Hydration bedeutet, Wasser chemisch und kristallographisch zu binden ("Kristallwasser"). Die dazu notwendige Wassermenge wird durch den Wasser-Zement-Quotienten (W/Z) ausgedrückt. Ein W/Z von 0,26 bedeutet z.B., daß 26 ml Wasser notwendig sind, um 100g Zement in die feste Hydratform zu überführen. Um jedoch die Pumpfähigkeit eines Zement-Wasser-Gemisches zu gewährleisten, muß das W/Z-Verhältnis deutlich erhöht werden. Da sich mit steigendem Wasserzusatz aber anderseits die physikalischen und chemischen Eigenschaften des BFA-Gesteins verschlechtern, muß der W/Z-Quotient optimiert werden.

Im Rahmen der durchgeführten Laborversuche mit Braunkohlenfilteraschen beider Kraftwerke ist ein W/Z von 0,6 verwendet worden. In Tabelle 3 sind auch die Mineralphasenanteile aufgeführt, die nach 20 Tagen Erhärtung im BFA-Beton neu hinzugetreten sind.

Tab. 3
Mineralphasen im BFA-Beton
n.n. – nicht nachweisbar

BFA-Beton Hauptphasen (M-%)	Boxberg	Jänschwalde
Quarz SiO_2	15	25
Anhydrit $CaSO_4$	~ 1	~ 1
Brownmillerit $Ca_2FeO_4/Ca(Al,Fe)O_7$	~ 30	~ 35
Freikalk CaO	n.n.	n.n.
Hämatit Fe_2O_3	n.n.	n.n.
Maghemit γ-Fe_2O_3	n.n.	n.n.
Periklas MgO	n.n.	n.n.
Glasphase + Organika	~ 20	~ 10
Kalifeldspat $KAlSi_3O_8$	n.n.	n.n.
neu hinzugetretene Phasen		
Gips $CaSO_4 * 2\ H_2O$	5	8
Ettringit $CaO * Al_2O_3 * 3\ CaSO_4 * 32H_2O$	~ 5	~ 23
Portlandit $Ca(OH)_2$	2	2
Goethit a-FeOOH	~ 8	3
Calcit $CaCO_3$	7	~ 10
nicht identifizierbare Phasen	~ 7	~ 4

Vereinfacht betrachtet laufen bei der eigenhydraulischen Erhärtung der BFA folgende Reaktionen ab:

1. Anhydrit + H_2O ⇒ Gips
2. Freikalk + H_2O ⇒ Portlandit
3. Brownmillerit + H_2O ⇒ Portlandit + Goethit
4. Portlandit + CO_2 ⇒ Calcit

Reaktion 4 läuft nur ab, wenn Luft ungehindert an der Umsetzung teilhaben kann, da eine andere CO_2-Quelle nicht zur Verfügung steht. Die Reaktionen verlaufen exotherm und unter Volumenzunahme (siehe Kap. 7.).

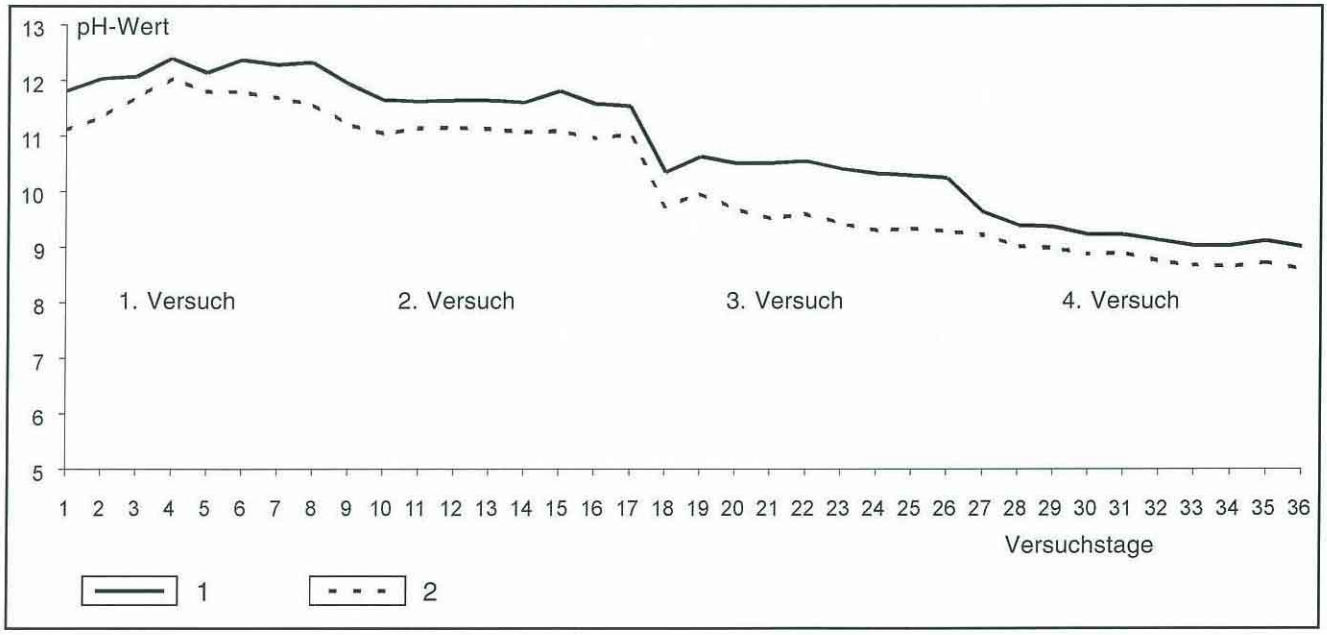
In Wirklichkeit sind die Mineralumsetzungsvorgänge wesentlich komplexer, wie die Bildung von Ettringit in Tabelle 3 andeutet. Um einer Klärung näher zu kommen, wurden sogenannte "Teebeutel-Tests" nach HEITFELD u.a. (1985) durchgeführt. Dabei sind jeweils 100 g BFA-Beton der Kraftwerke Jänschwalde und Boxberg in Filterpapier eingeschlossen, in einem Standgefäß mit einem Liter Wasser "ausgelaugt" worden. In Abständen von 8-10 Tagen wurden die Proben entnommen, im Achatmörser wieder aufgemahlen und erneut in Wasser "ausgelaugt". Dieses Verfahren ist insgesamt 60 Tage lang wiederholt worden. Gleichzeitig wurde der pH-Wert im Eluat gemessen. In Abb. 6 ist die pH-Wert-Entwicklung für die erste Versuchsperiode von 36 Tagen dargestellt. Der pH-Wert pegelte sich dann bis zum Ende der Meßzeit ziemlich konstant bei etwa 7 ein.

Zur Beurteilung des weiteren Umsetzungs- und Lösungsverhaltens der einzelnen Phasen in der sich nun wieder verfestigenden Probe wurde die Reflexintensität (I/I_0 in %) ausgewählter Minerale gegenüber der Abbindezeit (in Tagen) aufgetragen. Auf die Darstellung der chemisch inerten Mineralphasen Quarz und Hämatit wurde verzichtet sowie auf die stark untergeordnet auftretenden Phasen Periklas und Kalifeldspat.

Das Verhalten dieser Mineralphasen in Abhängigkeit von der Abbindezeit zeigt die Abb 7.

Der Abbau von Brownmillerit und Portlandit verläuft in den ersten 30 Tagen schnell, verlangsamt sich dann aber. Dagegen geht der Abbau von Gips in den ersten 30 Tagen

Abb.6
Entwicklung des pH-Wertes von BFA-Beton in Abhängigkeit von der Zeit
1 – Jänschwalde, 2 – Boxberg



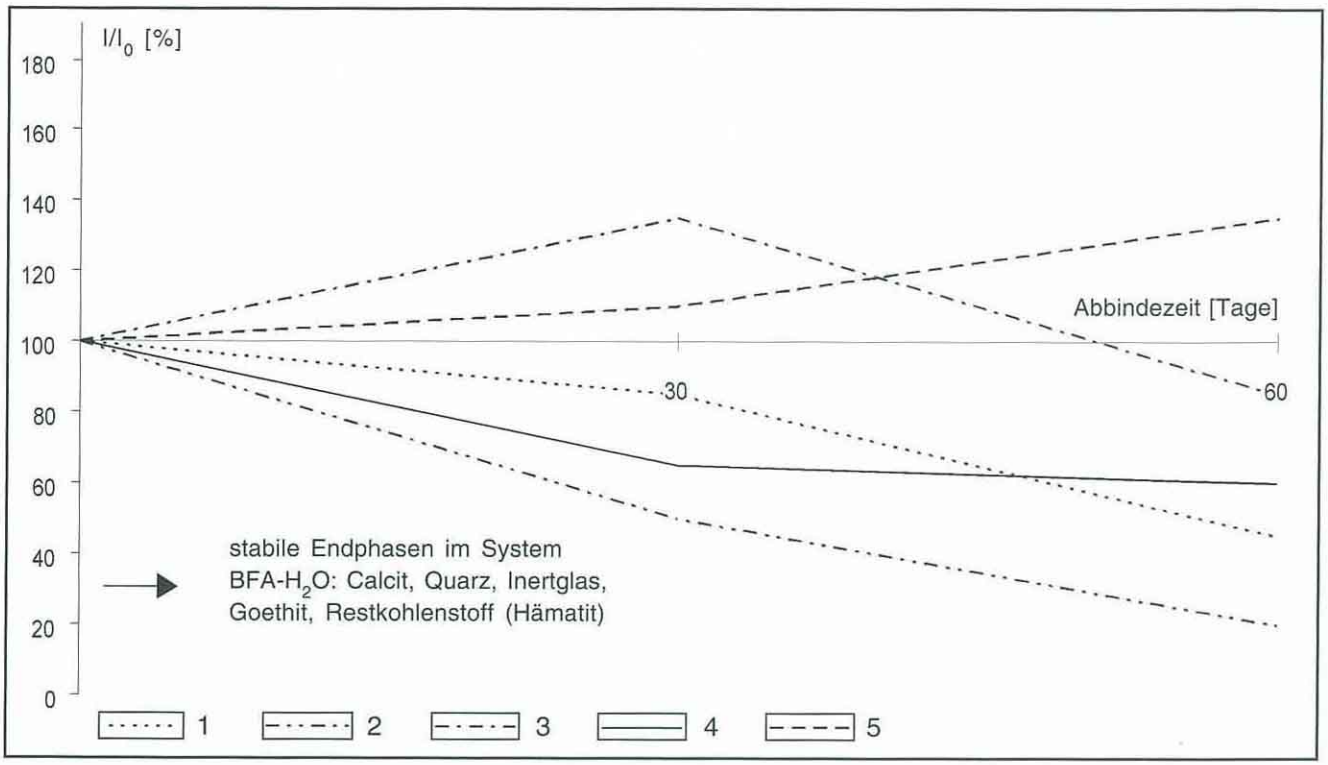


Abb. 7
Umsetzungs- bzw. Lösungsverhalten wichtiger Mineralphasen im BFA-Beton
1 – Gips, 2 – Portlandit, 3 – Ettringit, 4 – Brownmillerit, 5 – Calcit

recht langsam voran, beschleunigt sich aber in der zweiten Hälfte der Versuchsserie deutlich. Der Calcitanteil scheint sich etwa umgekehrt proportional zum Portlandit zu verhalten.

Besonders interessant ist das Verhalten des Ettringits. Während er in den ersten 30 Tagen eine starke Zunahme in der Probe anzeigt, gehen die Ettringitphasenanteile danach wieder stark zurück.

Die mineralogischen Phasenanalysen haben gezeigt, daß für die Umsetzungsvorgänge im System BFA-Wasser Komponenten verantwortlich sind, deren Wechselverhalten im System CaO-$CaSO_4$-Al_2O_3-H_2O erklärt werden kann. Dieses quaternäre System das von D'ANS & EICK (1959) untersucht worden ist, zeigt welche Mineralphasen bei 20 °C existent sind. Daraus ergibt sich, daß das Existenzfeld des Ettringits einer dünnen Scheibe gleicht, die zwar einen großen Bereich einnimmt – aber nur unter wohl definierten Bedingungen.

Nach OTTEMANN (1951) wird in diesem System die Bildung bestimmter Mineralphasen deutlich vom pH-Wert kontrolliert. Ettringit ist danach nur im pH-Bereich zwischen 10,8 - 12,5 als feste Phase stabil:

pH-Wert	Phasen
0 - 4	Al in Lösung
4 - 9	$Al(OH)_3$
9 - 10,8	Al in Lösung
10,8 - 12,5	Ettringit ($3\ CaO * Al_2O_3 * 3\ CaSO_4 * 32\ H_2O$)
12,5 - 13,4	Monosulfat ($3\ CaO * Al_2O_3 * CaSO_4 * 12\ H_2O$)
13,4 - 14	Monohydroxid ($3\ CaO * Al_2O_3 * Ca(OH)_2 * 12\ H_2O$)

Vergleicht man nun die Entwicklung der Ettringitphasenanteile mit der Entwicklung des pH-Wertes in Abb. 6, so wird der Abbau des Ettringits bei einem pH-Wert < 10,8 verständlich.

Als stabile Endphasen der mineralogischen Umbildungsvorgänge im System Asche - Wasser können daher Quarz, Inertglas, Eisenhydroxid, Calcit, Restkohlenstoff und möglicherweise auch Hämatit vorausgesagt werden (KOPP & ADAM 1993).

Eine zeitliche Prognose über den Eintritt dieses Zustandes ist relativ schwer anzugeben. Dabei spielt der pH-Wert der natürlichen Wässer eine große Rolle. Mit einiger Sicherheit sind 1-2 Jahre für den Ablauf der Umbildungsvorgänge anzusetzen.

6.3. ESMA[1]- Untersuchungen an Gläsern

Im Kap. 6.1. wurde bereits auf die relativ hohen Glasanteile in den Jänschwalder und Boxberger BFA hingewiesen. Sie sind eine Folge des bei Temperaturen zwischen 1 100 °C und 1 200 °C ablaufenden Mühlenfeuerungsverfahrens.

Durch SCHREITER (1968) und ZSCHACH (1978) wurden umfangreiche Untersuchungen an Gläsern verschiedener BFA durchgeführt. Danach sind folgende mineralogischen und chemischen Daten für Gläser aus BFA charakteristisch:

[1] ESMA Elektronenstrahlmikroanalyse

Glasphase ⇒ HCl - löslich → Aktivglas
⇒ HCl - unlöslich → Inertglas

Aktivglas: Ca-Mg-Al-Fe - Silikat
farblose, gelbe und braune Glaskugeln
$\varnothing$ = 0,1 - 40 µm, seltener bis 100 mm
jedoch auch unregelmäßig geformte Aggregate
Lichtbrechung: $n_{Dmin.} = 1,6$**
$n_{Dmax.} = 1,7$**
(** selten kleinere und größere Werte)
saure Gläser: (SiO_2-reich) - relativ niedrige Lichtbrechung
basische Gläser: (Ca- und Fe-reich) - relativ hohe Lichtbrechung
Dichte: 2,4 - 3,4 g/cm³

Inertglas: Kieselglas bzw. Al - Silikatglas
drei unterschiedliche Phasen
farblose, gelbe und braune Glaskugeln
$\varnothing_{max.}$ = 30 µm
xenomorphes, trübes Glas
xenomorphes Glas in Verwachsung mit Kohlenstoff
Lichtbrechung: $n_D < 1,5$!

Die Gläser aus den Aschen beider Kraftwerke wurden mittels energiedispersiver ESMA untersucht. Die Auswertung erfolgt als "standardlose Analyse", wobei Abweichungen zwischen 5 und 10 % auftreten können.

Es zeigte sich danach, daß hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung zwei Gruppen zu unterscheiden sind, deren Werte jeweils relativ wenig streuen (Abb. 8). Die erste Gruppe besteht im wesentlichen aus SiO_2 und Al_2O_3 sowie geringen Gehalten an Fe_2O_3, CaO sowie Alkalien und stellt das Inertglas dar. Die zweite Gruppe zeigt ein etwas stärkeres Variieren der SiO_2-CaO-MgO-Al_2O_3-Gehalte. Sie dürften den Aktivglasanteil bilden. Interessant ist, daß in beiden Gruppen erhebliche TiO_2-Gehalte auftreten können (bis 6%). Diese relativ hohen Gehalte sind meistens an Verwachsungen mit Ilmenit gebunden.

Die relativ hohen TiO_2-Anteile in den Gläsern und in den Aschen insgesamt könnten mit der Verwitterung der tertiären Basalte der Lausitz in Verbindung stehen, die hinsichtlich ihrer Ti-Führung dafür prädestiniert erscheinen.

Im polierten Dünnschliff sind nach den aufgeführten mineralogischen Daten beide Glastypen relativ sicher zu unterscheiden. Die Anteile Inertglas/Aktivglas scheinen verteilt zu sein.

Morphologisch variieren beide Glassorten sehr stark. Es treten unabhängig vom Typ kugelige und völlig unregelmäßige Formen auf. Besonders fallen Inertglasverwachsungen mit Restkohlenstoff auf, die bis zu 2 mm Länge erreichen und dabei oftmals bohnenförmig gekrümmt erscheinen.

Daneben tritt Rutil (TiO_2) in Form roter Kugeln öfter in Erscheinung. Interessant ist, daß auch das Aktivglas erst relativ spät an der eigenhydraulischen Umsetzung der BFA teilnimmt. So konnte im BFA-Beton beider Großkraftwerke nach 20 Tagen Erhärtung ein Rückgang des Aktivglasanteils um erst etwa 20 % festgestellt werden.

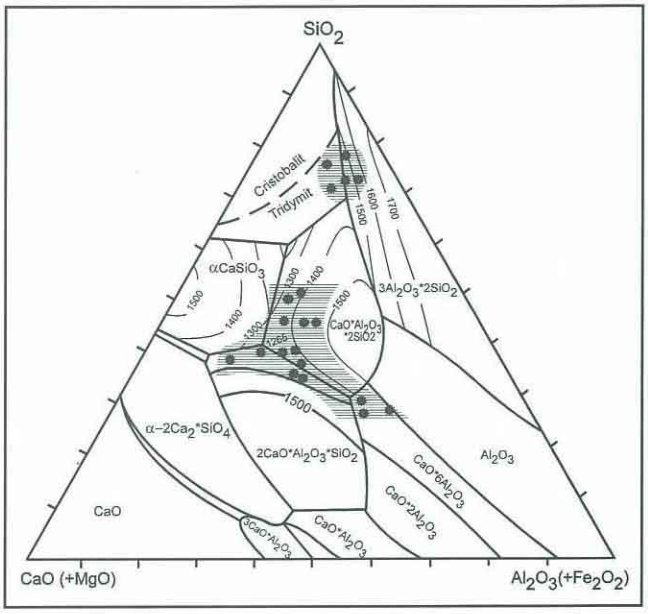


Abb.8
System CaO-Al_2O_3-SiO_3; Lage der ESMA-Meßwerte an Inert- und Aktivgläsern der Kraftwerke Jänschwalde und Boxberg

Im Tafelanhang sind rasterelektronenmikroskopische Abbildungen typischer Glasphasen bzw. Glasphasenverwachsungen in den Bildern 1 bis 4 widergegeben. Dagegen zeigen die lichtoptischen Bilder 5 und 6 typische Kohlenstoff-Inertverwachsungen von etwa 20 mm Länge auf.

7. Petrophysik

Sämtliche petrophysikalischen Untersuchungen wurden nach den geltenden DIN-Vorschriften durchgeführt. Lagen diese nicht vor, wurden andere bewährte Standards angewandt.

7.1. Sedimentations- und Quellvermögen

Infolge des Dichteunterschiedes zwischen den Aschepartikeln mit ~2,6 g/cm³ und Wasser tendieren die Feststoffe zum Absetzen, wobei überschüssiges Transportwasser "aufrahmt". Wie bereits im Kap. 6.2. dargelegt, sollte auch im Interesse einer möglichst geringen Sedimentation das W/Z-Verhältnis minimal gehalten werden.

Der Eintritt von Wasser in das Kristallgitter der hydraulisch wirksamen Minerale bedingt eine Volumenzunahme, also eine Raumvergrößerung bzw. Quellung. Wird diese allseitig behindert, wie z.B. in einem geschlossenen Hohlraum, so wird der mit einer Quellung verbundene Porositätszuwachs herabgesetzt und das BFA-Gestein wird deutlich fester. Infolge der Ausbildung eines dichten Gelgerüstes können die hydraulisch wirksamen Minerale nicht quantitativ abgebunden werden. Treten später einmal im Gestein Risse als Folge von Beanspruchungen auf, so kann bei Wasserzutritt die Hydration erneut einsetzen und einen Selbstheileffekt bewirken. Ein derartiger Prozeß

muß demzufolge die Verbandsfestigkeit des BFA-Gesteins weiter steigern.

Für Jänschwalder und Boxberger BFA wurden maximale Volumenzunahmen von 3,6 % ermittelt, wobei der Quellungsprozeß nach 7-10 Tagen abgeschlossen war.

7.2. Festigkeitsverhalten

Auf den Zusammenhang zwischen der Vollständigkeit des ablaufenden oder bereits abgelaufenen Hydrationsprozesses und der Festigkeit des BFA-Betons wurde in den vorherigen Abschnitten hingewiesen. Hieraus wird ersichtlich, daß die Endfestigkeit unter Umständen erst nach Monaten erreicht wird und ohne Begrenzung des Quellvermögens Festigkeitseinbußen eintreten müssen. Aus den Darlegungen wird ferner deutlich, daß ein Mangel an Wasser den Aushärtungs- und Verfestigungsprozeß unterbricht.

Die einaxiale Druckfestigkeit des BFA-Betons, wie er zum Beispiel bei der Sanierung der Schachtanlage "Centrum" bei Schenkendorf verwendet wurde, entwickelte sich bis zum 45. Tag schnell und blieb danach relativ konstant. Die Abb. 9 gibt die Entwicklung wieder.

7.3. Durchlässigkeit und Eluation

Ziel der Durchlässigkeitsversuche war die Ermittlung der k-Werte von Laborproben aus BFA-Beton in Abhängigkeit von der Zeit, dem hydraulischen Gefälle und dem Überlagerungsdruck.

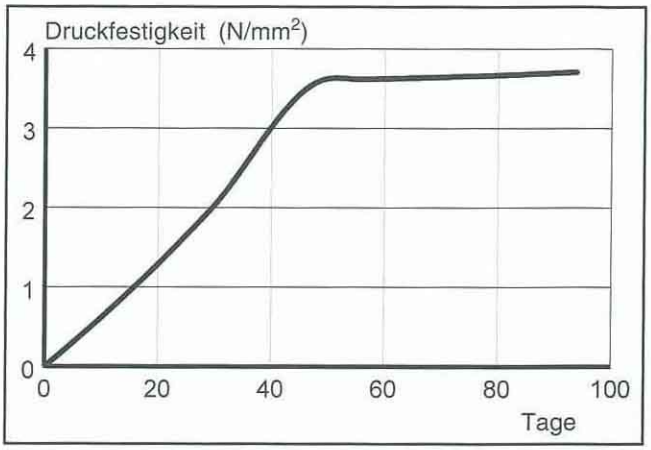
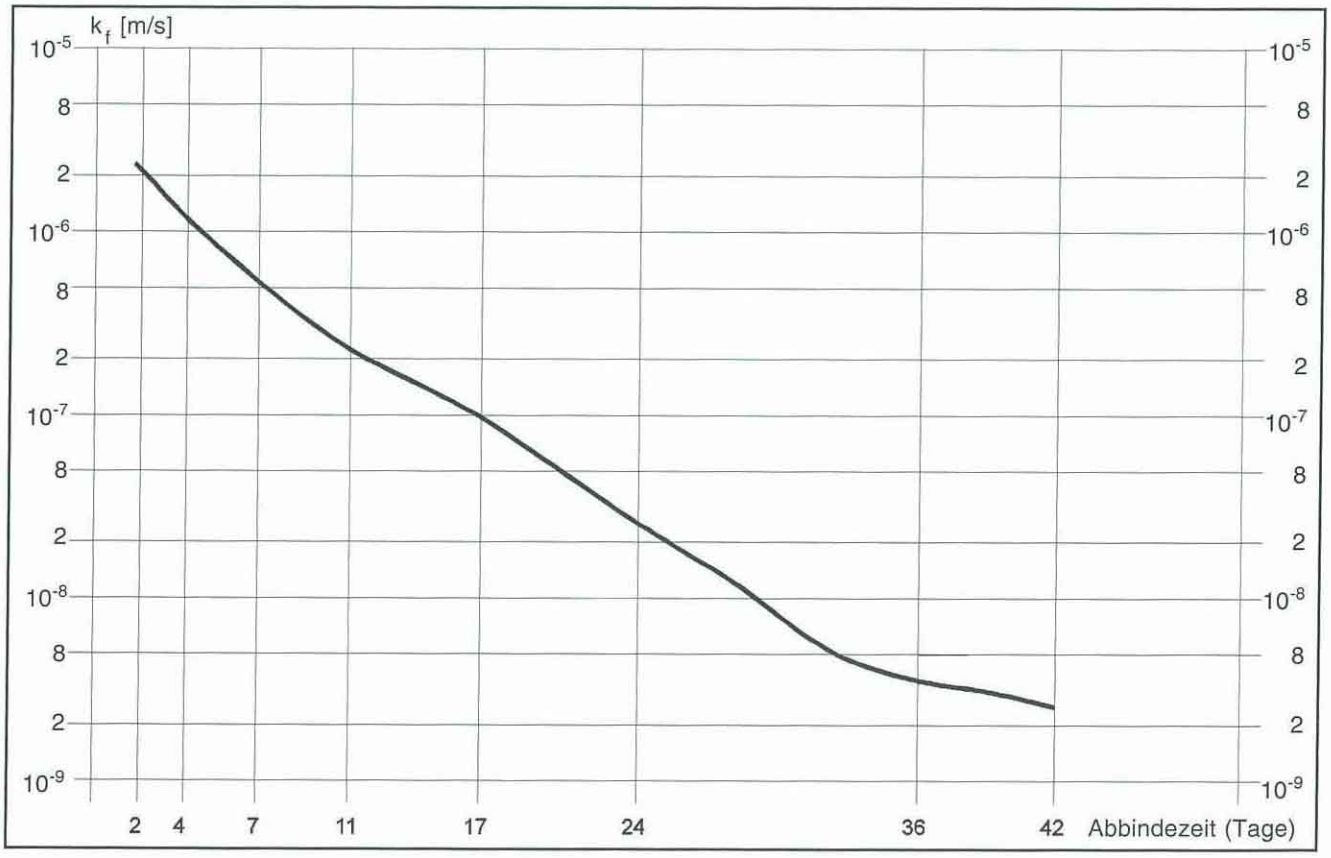


Abb.9
Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit von BFA-Suspension mit W/Z = 0,6 im Laborversuch (BFA Jänschwalde : BFA Boxberg = 9:1)

Aus den vorliegenden Untersuchungsergebnissen ist eine klare Beziehung zwischen der zeitlichen Verfestigungsentwicklung und dem Durchlässigkeitsverhalten erkennbar (Abb.10). Obwohl bisher noch keine Langzeit-Eluationsversuchsergebnisse an Brandenburger BFA vorliegen, sollte auch eine deutliche Beziehung zwischen den Durchlässigkeitsverhalten und der Eluierbarkeit von chemischen Elementen (insbesondere sind hier die Schwer-

Abb. 10
Entwicklung der Wasserdurchlässigkeit eines BFA-Betons



metalle und einige Anionenkomplexe, wie SO_4^{2-}, von Interesse) angenommen werden.

Durchlässigkeitsmessungen an BFA-Betonproben der Kraftwerke Schwarze Pumpe, Klingenberg und Vetschau belegen ebenfalls den eindeutigen Zusammenhang zwischen einem schnellen Abbindevorgang und der Eluierbarkeit der Proben. Kam es nicht zu einem schnellen Erhärten des BFA-Betons, konnte das infolge von Eluationsvorgängen sogar zu deutlichen Permeabilitätsvergrößerungen und damit auch Durchlässigkeitserhöhungen führen.

Im Ergebnis der Durchlässigkeitsuntersuchungen läßt sich folgendes aussagen:

1. Nach abgeklungener Verfestigung ergaben sich für den BFA-Beton Durchlässigkeitswerte von etwa $2{,}5 * 10^{-9}$ m/s.
2. Gegenüber einer angenommenen Durchlässigkeit des umgebenden känozoischen Deckgebirges von etwa 10^{-4} m/s wirkt der BFA-Betonkörper als ein ausgeprägter Stauer.
3. Trotz der sehr geringen Durchlässigkeit ist eine gewisse "Auswaschung" des BFA-Betons über einen längeren Zeitraum hin betrachtet möglich. Die bisherigen Erfahrungen zeigen aber, daß dieser Effekt von untergeordneter Bedeutung ist.

In Abbildung 10 ist die im Laborversuch ermittelte Wasserdurchlässigkeit von BFA-Beton dargestellt.

8. Geochemie

8.1. Hauptkomponenten

Die Hauptkomponenten der chemischen Vollanalysen sind in Tabelle 4 aufgeführt. Sie belegen die relativ geringen Unterschiede zwischen den BFA beider Großkraftwerke. Dies hat hauptsächlich seine Ursache darin, daß seit 1990 nur noch hochwertige Teile der Braunkohlenflöze gewonnen werden.

8.2. Spurenelemente

In den Tab. 5 und 6 sind die Spurenelementanalysen für BFA, BFA-Beton und BFA-Beton nach 30 Tagen "Auslaugung" im Wasser der Kraftwerke Jänschwalde und Boxberg zusammengefaßt. Insgesamt belegen die Werte einerseits die primär niedrigen Gehalte an Schwermetallen und andererseits das geringe Eluationsvermögen, was im Kap. 7 bereits angedeutet worden ist. Von den Schwermetallen sind lediglich Titan und Strontium in erhöhten Konzentrationen vorhanden. Interessant sind auch die Spalten BFA-Beton und BFA-Beton (30 Tage Auslaugung). Sie zeigen, daß sich Calcium, Eisen, Strontium und Barium mobil verhalten und aus dem System abwandern.

Tab. 4
Chemische Hauptkomponenten der BFA-Mischaschen Boxberg und Jänschwalde

Durchschnittswerte [M.-%]	Boxberg	Jänschwalde
SiO_2	67,9	64,3
Al_2O_3	6,2	10,0
Fe_2O_3	10,8	6,1
CaO	8,0	11,3
MgO	2,8	1,9
Na_2O	0,25	0,5
SO_3	1,5	3,0
K_2O	0,55	1,24
Glühverlust	2,3	0,83
Summe	100,3	99,17

Die Titanwerte sind indifferent: Im BFA-Beton Jänschwalde verringert sich ihr Anteil signifikant gegenüber der BFA. Im BFA-Beton-Boxberg nimmt der Titangehalt gegenüber der BFA zu. Letzeres ist mit Sicherheit ein Probenahmeeffekt, da dem System von außen nichts zugeführt wurde. Die schweren Titanminerale Ilmenit und Rutil verteilen sich nicht homogen im Beton, sondern neigen zur Segregation und können bei der Probenahme den dargelegten Effekt ergeben.

9. Zusammenfassung

In Brandenburg sind zur Zeit 261 stillgelegte untertägige Braunkohlengruben bekannt. Die Strecken und vereinzelte Abbaukammern sind auch heute zum großen Teil noch intakt. Durch potentielle, von diesen Hohlräumen ausgehende Tagesbrüche besteht eine permanente Gefährdung der öffentlichen Sicherheit. Zur Vermeidung solcher Brüche werden die bergbaulichen Hohlräume mit selbst abbindender Braunkohlenfilterasche (BFA) verpreßt.

Basierend auf mineralogischen, petrophysikalischen und geochemischen Untersuchungen wurden die geotechnische Eignung und Umweltverträglichkeit von BFA im Hinblick auf ihre Verwendung bei der Sanierung von Schächten des Braunkohlenaltbergbaus geprüft.

Im Zusammenhang damit sind die mineralogische Phasenzusammensetzung und verschiedene petrophysikalische Eigenschaften der BFA bzw. des BFA-Betons der Lausitzer Kraftwerke Jänschwalde und Boxberg bestimmt worden. Die Hydratisierungsreaktionen der verschiedenen Minerale wurden unter Laborbedingungen getestet.

In Übereinstimmung mit diesen Ergebnissen ist die Verwendung von BFA der o.g. Kraftwerke als Versatzmaterial für die Sanierung untertägiger Braunkohlenschachtanlagen aus geotechnischer Sicht geeignet und unter ökologischen Aspekten unbedenklich.

Summary

In Brandenburg at present 261 closed underground brown coal mines are known. Most of the galleries and isolated underground chambers to date still are intact. Due to the possibility of surface cuts starting from collapsed underground cavities the public is exposed to danger. In order to prevent the roofs from flaking the galleries are grouted with self setting brown coal filter ashes.

On the basis of mineralogical, petrophysical and geochemical investigations the geotechnical suitability and the enviromental compatibility of brown coal filter ashes was

lfd. Nummer	Bestandteile	Einheit	BFA Mischasche	BFA Beton	BFA Beton (30 Tage Auslaugung)
1	K_2O	mg/kg	9940,0	9290,0	7740,0
2	CaO	mg/kg	212830,0	136840,0	120920,0
3	TiO_2	mg/kg	8060,0	6080,0	5900,0
4	V	mg/kg	43,5	66,4	75,6
5	Cr	mg/kg	63,5	62,1	58,2
6	MnO	mg/kg	1500,0	795,0	721,0
7	Fe_2O_3	mg/kg	116540,0	73210,0	66280,0
8	Co	mg/kg	40,8	34,5	36,0
9	Ni	mg/kg	24,0	32,5	29,6
10	Cu	mg/kg	12,9	16,2	18,0
11	Zn	mg/kg	45,5	45,4	45,7
12	Ga	mg/kg	13,7	14,9	13,1
13	Ge	mg/kg	1,7	1,6	1,8
14	As	mg/kg	17,4	19,1	16,0
15	Se	mg/kg	< 0,9	< 0,9	< 0,9
16	Br	mg/kg	2,1	< 0,9	< 0,9
17	Rb	mg/kg	44,1	48,3	42,1
18	Sr	mg/kg	2120,0	1500,0	1250,0
19	Y	mg/kg	27,1	27,7	25,9
20	Zr	mg/kg	364,0	290,0	263,0
21	Nb	mg/kg	24,7	21,3	20,7
22	Mo	mg/kg	7,2	6,2	4,3
23	Ag	mg/kg	< 0,7	< 0,7	< 0,7
24	Cd	mg/kg	< 0,5	< 0,5	< 0,5
25	In	mg/kg	< 0,9	< 0,9	< 0,9
26	Sn	mg/kg	3,8	3,6	3,2
27	Sb	mg/kg	1,9	< 1,0	2,1
28	Te	mg/kg	< 1,2	< 1,2	< 1,2
29	J	mg/kg	< 2,5	< 2,5	< 2,5
30	Cs	mg/kg	< 3,0	< 3,0	< 3,0
31	Ba	mg/kg	382,0	340,0	332,0
32	La	mg/kg	37,2	34,6	33,0
33	Ce	mg/kg	73,7	69,0	64,5
34	Ta	mg/kg	< 10,0	< 10,0	< 10,0
35	W	mg/kg	< 5,0	< 5,0	< 5,0
36	Hg	mg/kg	< 1,7	< 1,7	< 1,7
37	Tl	mg/kg	< 1,7	< 1,7	< 1,7
38	Pb	mg/kg	19,2	18,9	20,8
39	Bi	mg/kg	< 1,7	< 1,7	< 1,7
40	Th	mg/kg	8,9	12,3	10,8
41	U	mg/kg	7,5	10,5	11,6

Tab. 5 Spurenelemente Jänschwald

studied as refill materials to measures of sanitation of old coal mines.

In this context the mineralogical phase compostion and different petrophysical propertys of the brown coal filter ashes and – concrete of the Lusation power stations Jänschwalde and Boxberg were investigated. The hydratation reaction of different minerals were examined under laboratory conditions.

In accordance with these results, the use of brown coal filter ashes from Jänschwalde and Boxberg as refill materials for the sanitation of old underground coal mines is from geotechnical point of view desirable and under ecological aspects completely harmless.

lfd. Nummer	Bestandteile	Einheit	BFA Mischasche	BFA Beton	BFA Beton (30 Tage Auslaugung)
1	K_2O	mg/kg	7530,0	8500,0	7990,0
2	CaO	mg/kg	192700,0	130760,0	118690,0
3	TiO_2	mg/kg	5630,0	12120,0	11290,0
4	V	mg/kg	74,5	110,0	113,0
5	Cr	mg/kg	67,6	100,0	94,0
6	MnO	mg/kg	1950,0	861,0	828,0
7	Fe_2O_3	mg/kg	194630,0	77080,0	74550,0
8	Co	mg/kg	28,0	32,8	15,6
9	Ni	mg/kg	22,5	57,7	54,8
10	Cu	mg/kg	29,0	38,5	41,9
11	Zn	mg/kg	35,6	56,9	58,7
12	Ga	mg/kg	12,6	21,5	22,3
13	Ge	mg/kg	1,7	2,2	1,9
14	As	mg/kg	26,0	26,3	26,3
15	Se	mg/kg	< 0,9	< 0,9	<0,9
16	Br	mg/kg	8,9	4,1	1,5
17	Rb	mg/kg	40,2	53,0	52,3
18	Sr	mg/kg	1850,0	1290,0	1180,0
19	Y	mg/kg	25,0	33,5	32,1
20	Zr	mg/kg	151,0	349,0	339,0
21	Nb	mg/kg	19,5	45,1	42,7
22	Mo	mg/kg	11,2	7,1	8,0
23	Ag	mg/kg	< 0,7	< 0,7	< 0,7
24	Cd	mg/kg	< 0,5	< 0,5	< 0,5
25	In	mg/kg	< 0,9	< 0,9	< 0,9
26	Sn	mg/kg	4,5	5,9	5,6
27	Sb	mg/kg	2,0	2,3	< 1,0
28	Te	mg/kg	< 1,2	< 1,2	< 1,2
29	J	mg/kg	< 2,5	< 2,5	< 2,5
30	Cs	mg/kg	4,5	7,3	6,7
31	Ba	mg/kg	867,0	399,0	406,0
32	La	mg/kg	41,9	50,7	42,3
33	Ce	mg/kg	84,0	93,1	85,7
34	Ta	mg/kg	< 10,0	< 10,0	< 10,0
35	W	mg/kg	< 5,0	5,4	< 5,0
36	Hg	mg/kg	< 1,7	< 1,7	< 1,7
37	Tl	mg/kg	< 1,7	< 1,7	< 1,7
38	Pb	mg/kg	21,2	29,5	28,0
39	Bi	mg/kg	< 1,7	< 1,7	< 1,7
40	Th	mg/kg	11,6	17,7	13,0
41	U	mg/kg	9,6	16,8	<2,0

Tab. 6 Spurenelemente Boxberg

10. Literatur

D'ANS, J. & H. EICK (1953): Das System $CaO-Al_2O_3-CaSO_4-H_2O$ bei 20 °C. - Zement-Kalk-Gips **6**, S. 302 - 311

FABER, W., LAMBERTZ, J., PÄFFGEN, H.-P. & N. MÖHLENBRUCH (1992): Verwendung von Braunkohlenflugaschen als Kalkdünger. - Braunkohle, 1-2, S. 25-30

FENK, J. (1993): Eine Theorie zur Entstehung von Tagesbrüchen über Hohlräumen im Lockergebirge. Freiberger Forschungshefte A 639, 138 S., Leipzig

GENSKE, D. & M. LEPIQUE (1993): Einsatz von geokunststoffbewehrten Gründungspolstern in Tagesbruchgebieten. - Geotechnik Sonderheft zur 9. Nationalen Ingenieurgeologie in Garmisch-Partenkirchen, S. 135-146 Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Essen

HEITFELD, K. H., MARAVIĆ, H. V. & D. SCHUMACHER (1985): Abschlußbericht über das Forschungsvorhaben: Hydrogeologische Beurteilung der Auswirkungen von Braunkohlenkraftwerksaschedeponien bei Anwendung eines Verfahrens zur

Verfestigung dieser Aschen durch Wasserzugabe. - Bericht des Lehrstuhls für Ingenieur- und Hydrogeologie der RWTH, 159 S., unveröff., Aachen

KEYN, J., SCHREITER, P., SANSONI, G. & M. WERNER (1985): Zum Phasen- und Gefügeaufbau von Braunkohlenfilteraschen im Feinstkornbereich. - Silikattechnik **36,** 11, S. 341-343

KOPP, J. & K. ADAM (1993): Mineralogisch-geochemische Untersuchungen an Braunkohlenfilteraschen und Braunkohlenfilteraschenbeton zur Sanierung untertägiger Braunkohlenschachtanlagen im Land Brandenburg. - Ber. d. Dtsch. Min. Gesellsch. Beiheft zum European Journal of Mineralogy **5**, S. 11-12

KOPP, J. TIEDEMANN, J., A. SIMON, A. & C. HILLE (1995): Geotechnische Eignungsprüfung an Braunkohlenfilteraschen der Kraftwerke Jänschwalde und Boxberg zur Sanierung der Braunkohlenschachtanlage "Centrum" bei Schenkendorf. – In: Handbuch der Braunkohlenflugaschen-Verwertung. - Wesseling (RWE-Gesellschaft für Forschung und Entwicklung mbH) (im Druck)

NEWKIRK & THWAITE (1969): Einheimische Rohstoffe für Silikatbeton. - Baustoffindustrie **12**, S. 6-9

OTTEMANN, J (1951): Untersuchungen zur Kenntnis der hydraulischen Erhärtung von Braunkohlenaschen. - Mitteilungen aus den Laboratorien des Geologischen Dienstes Berlin, Heft 3, S. 1-16

SCHREITER, P. (1968): Zum Phasenaufbau von Braunkohlenfilteraschen. - Silikattechnik **19**, 11, S. 358-361

PETZOLD, A. & W. HINZ (1978): Silikatchemie. 219 S., Leipzig (VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie)

SCHWARZSAID, M. (1969): Silikatschwerbeton. - Baustoffindustrie **12**, S. 64-67

TIEDEMANN, J. & M. KOPF (1993): Untergrundsanierung im Bereich eines Erschließungsgebietes bei Berlin. - Geotechnik Sonderheft zur 9. Nationale Tagung Ingenieurgeologie in Garmisch-Patenkirchen 1993; S. 203-210

WERNER, M., ADAM, K. & P. SCHREITER (1988): Die chemische Zusammensetzung der Glasphase und quantitative Phasenbestände von Flugaschen braunkohlenbefeuerter Großkessel. - Silikattechnik **39**, 8, S. 263-266

Rasterelektronenmikroskopische und lichtoptische Abbildungen von Glasphasen bzw. Glasphasenverwachsungen mit anderen Mineralen im polierten Dünnschliffen von BFA der Kraftwerke Jänschwalde und Boxberg

Tafel 1 (S. 127)

Bild 1 Verwachsung von Aktivgläsern (Punkte 2 und 3) mit Magnetit
Bild 2 Verwachsung von Aktivglas (Punkt 6) und Ilmenit (Punkt 7) mit einem Quarzkorn

Tafel 2 (S.128)

Bild 3 Inertglassaum an einem Quarzkorn
Bild 4 TiO_2-reiche Inertglashohlkugel

Tafel 2 (S. 129)

Bild 5 Kohlenstoff-Inertglas-Verwachsung × Nic, Vergr. 250 ×
Bild 6 gleiches Bild, wie oben ½½ Nic, Vergr.: 250 ×

Mitteilung aus dem Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg No. 33

Anschrift der Autoren:
Privat Dozent Dr. J. Tiedemann; Dr. J. Kopp
Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg
Stahnsdorfer Damm 77
14532 Kleinmachnow

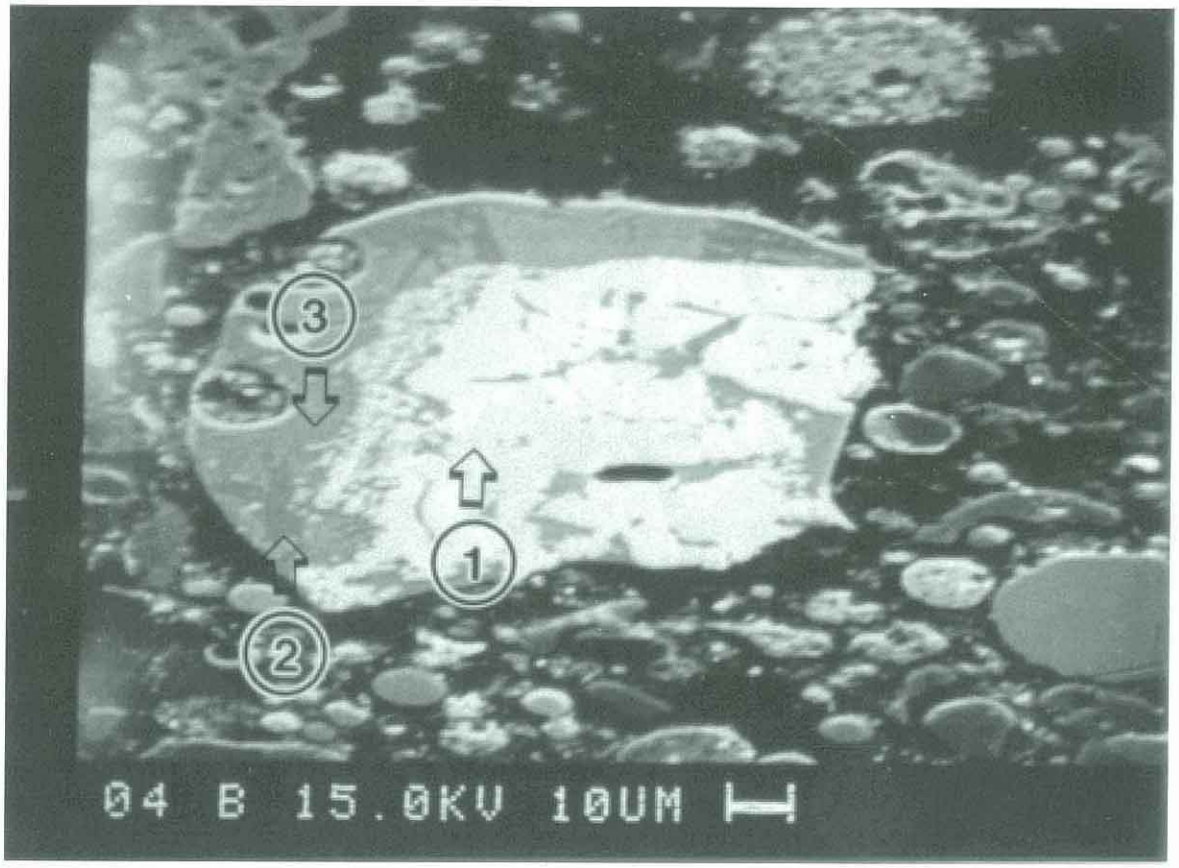


Bild 1

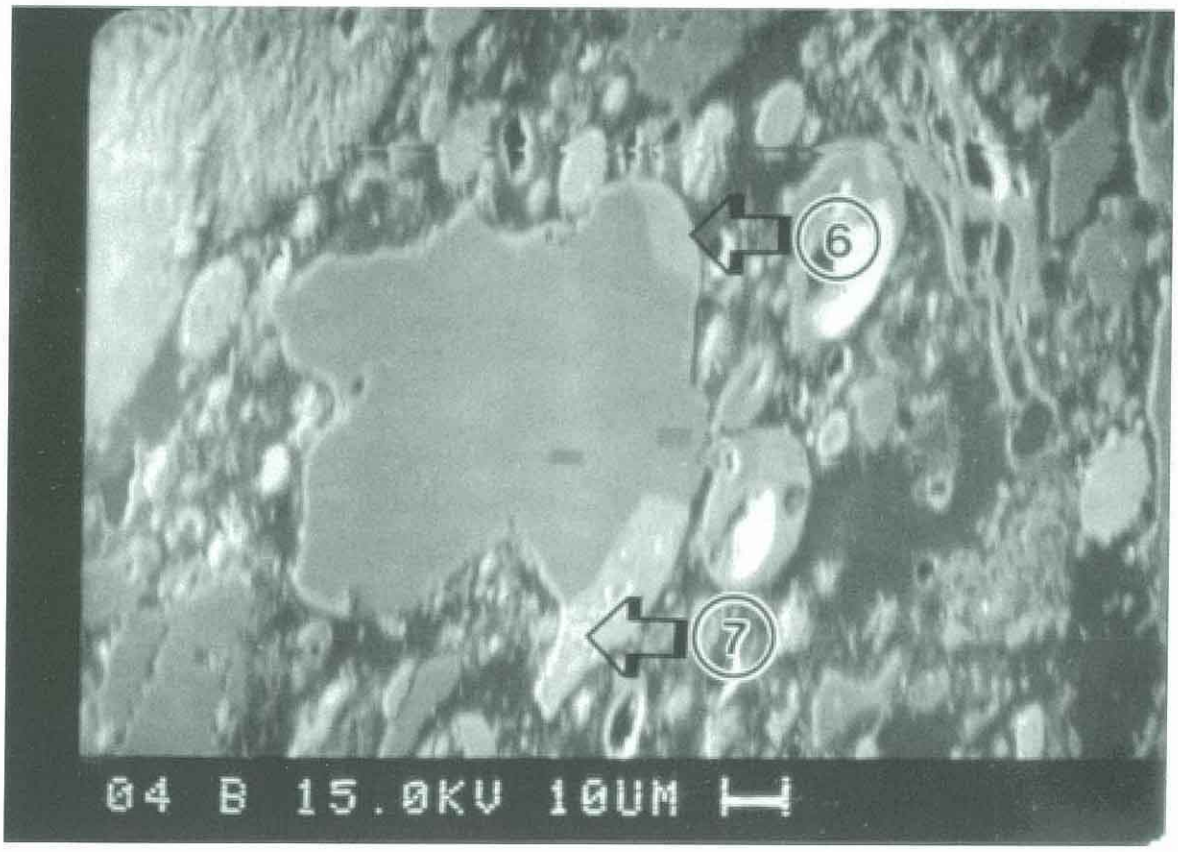


Bild 2

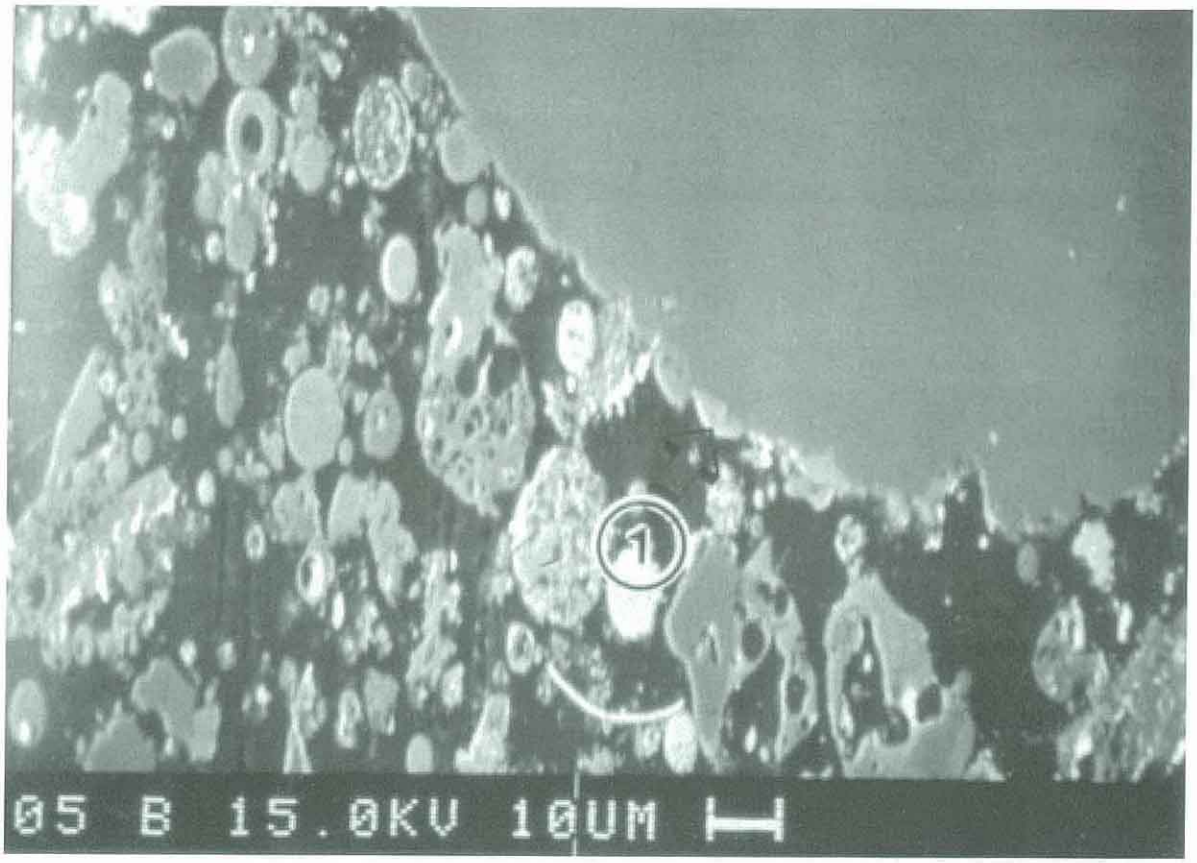


Bild 3

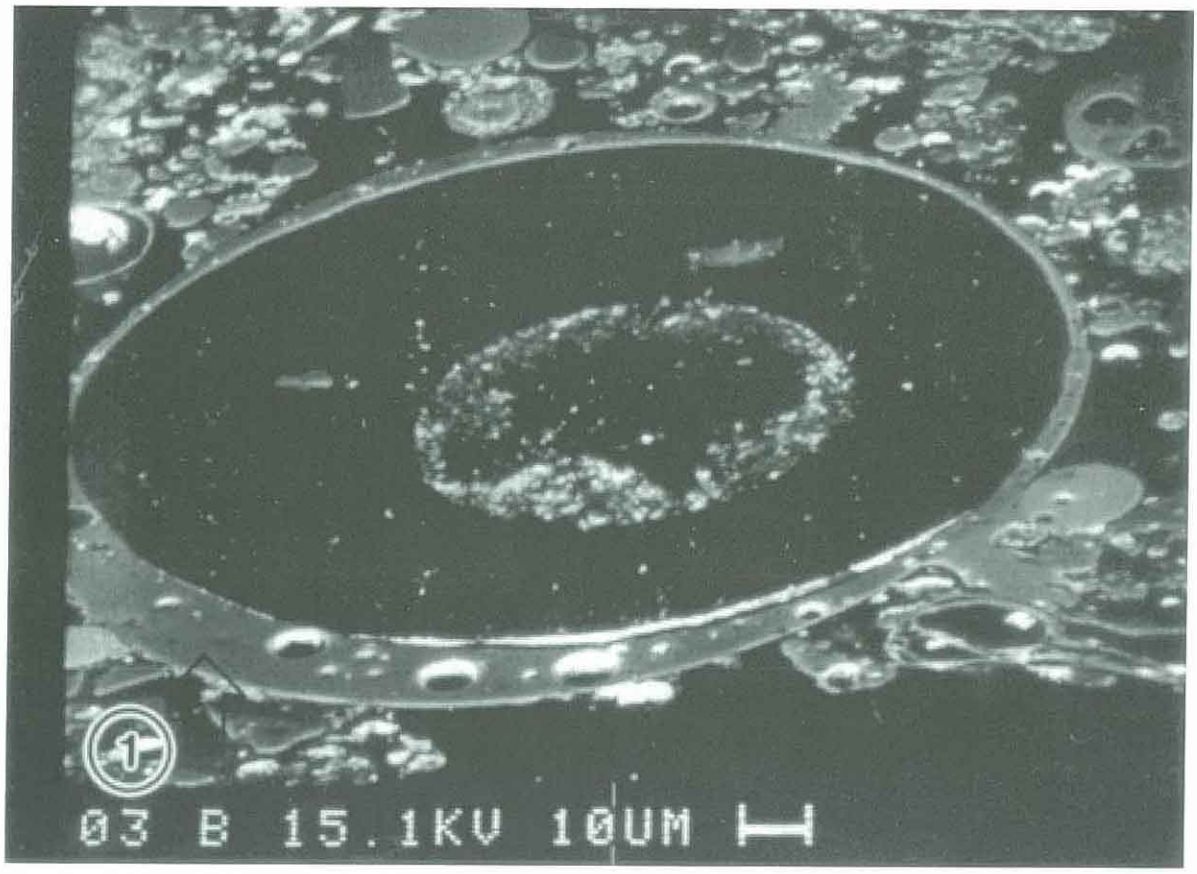


Bild 4

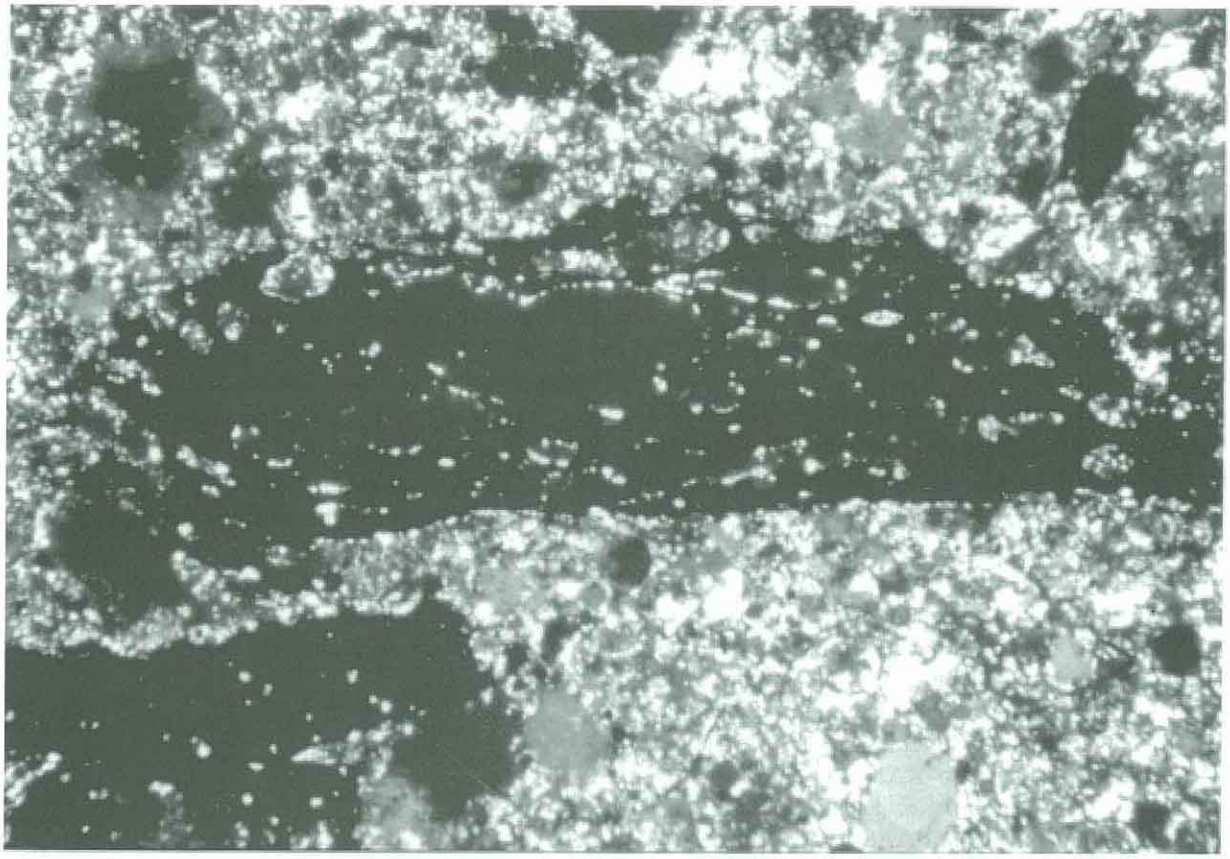


Bild 5

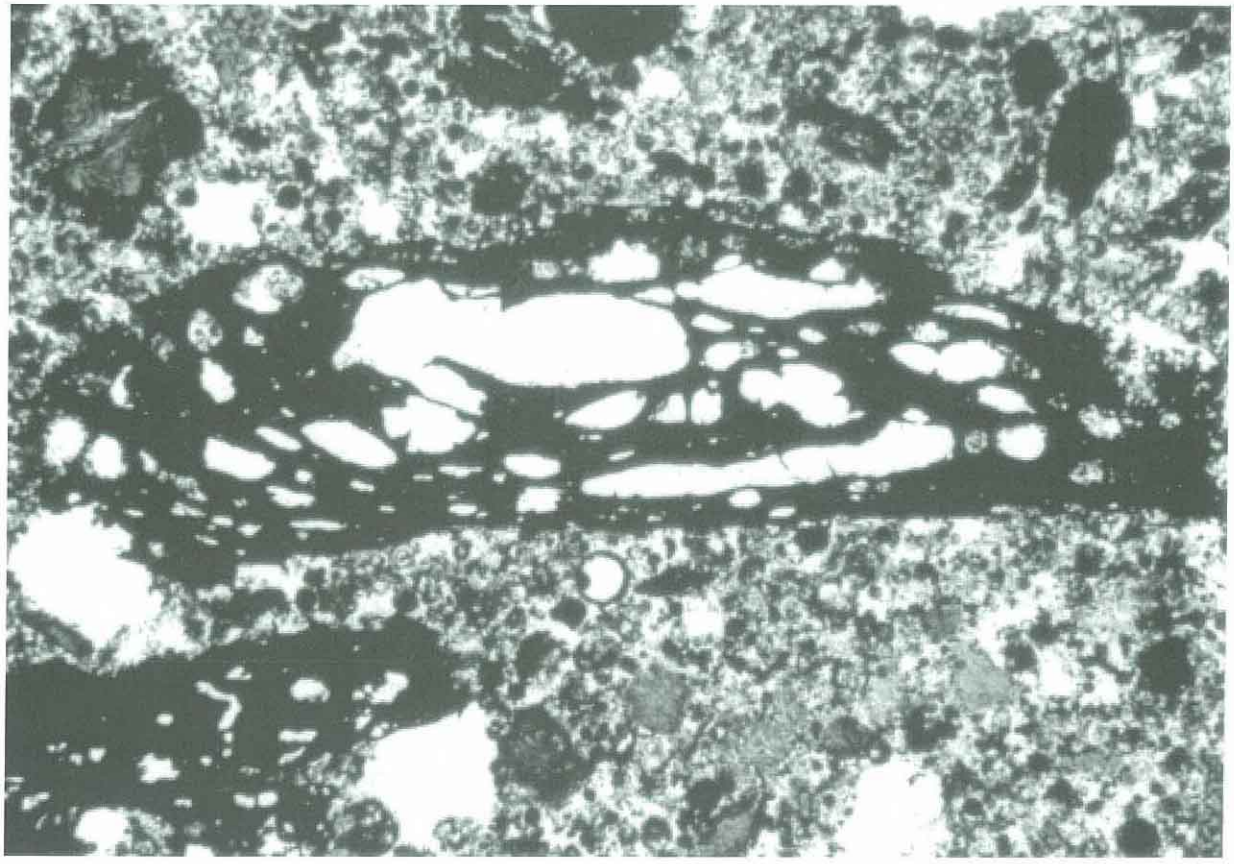


Bild 6