

Backfilling and Securing of Abandoned Small-Scale Coal Mines with Coal Combustion By-Products (CCBs) Generated at Power Plant Sites and with Domestic CCB's Generated at Ger District Sites

Mongolia is heavily dependent on coal due to its energy sector. During the last decades in the power plants and the households of the capital city, Ulaanbaatar, coal has been burned from the mines of the subbituminous coal deposits of Nalaikh, Baganuur and Shivee-Ovoo. The calorific value of this subbituminous coal is comparatively low, it contains huge amounts of different ash types, the so-called coal combustion by-products (CCB's).

Mongolian power plants generate more than 800.000 t/a of CCB's. CCB's are mainly fly ash, bottom ash and boiler slag. CCB's are generated by thermal power plants and by coal combustion in the Ger districts of Mongolia. Most of these CCB's are usually disposed to special designed ponds without any environmental or social benefit. In literature quite a few applied experiences are found utilizing CCB's in Mongolia. A fraction of it goes to concrete manufacturing.

The main idea of the BASMIC project is to investigate whether there are opportunities to use at the German-Mongolian Institute for Resources and Technology (GMIT), Ulaanbataar/Mon-

golia, CCB's from the power plants for backfilling and securing of abandoned small mining sites in Nalaikh, what is an outlying district of Ulaanbaatar nearly 30 km away south-eastly. For this purpose, to investigate several Mongolian CCB's, laboratory analysis has been conducted. As a result, on a laboratory scale, BASMIC could demonstrate in general the technical suitability of the CCB's generated in Mongolian power plants as backfill material for abandoned mining sites.

A sociological study in typical Mongolian Ger micro districts was also part of BASMIC. Mongolian Ger inhabitants have been requested by questionnaires how it can be successful to motivate them to collect their ashes generated by the household combustion to use it for backfilling of abandoned small-scale mines. The result was that an overwhelming majority of more than 900 requested households agreed to the BASMIC goals under use of their household ashes and they articulated their will to contribute to the success. The sociological study is not part of this publication.

1 Formation and characteristics of CCB's

Coal combustion by-products (CCB's) differ widely in chemical and physical properties mainly in dependence of the origin and the combustion source. Mongolia's coal deposits consist mainly of bituminous coal, sub-bituminous coal, and lignite. After mining the coal is destined to the combustion processes of two major consumer sections in Mongolia.

The primary coal consumers are the power plants for the generation of electricity and heat. The yearly power plant coal consumption shows a significant peak during the winter times. Eight major power plants can be counted in Mongolia, four are in Ulaanbaatar with a CCB generation of about 700,000 t/a. The CCB's produced by power plants count for around 30 % of the charged coal mass.

Thermal power plants commonly dispose the CCB's into ash ponds transported with water, in a slurry state, through big tubes of 2 to 3 km length. Annually 8.4 M t coal is combusted and presumably 2.8 M t of ash is shipped to the ponds occupying an area of around 1.1 km².

Of the four power plants in the city, only the power plant 4 (PP4) is equipped with an electrostatic separator to capture fly ashes. The remaining thermal power plants simply discharge all

1 Zusammensetzung und Eigenschaften der CCBs

Die Nebenprodukte der Kohleverbrennung (coal combustion by-products – CCB) unterscheiden sich stark in ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften, besonders in Abhängigkeit von ihrer Herkunft und der Verbrennungsquelle. Die Kohlevorkommen der Mongolei bestehen hauptsächlich aus Steinkohle, subbituminöser Kohle und Braunkohle. Nach dem Abbau ist die Kohle für die Verbrennungsprozesse zweier Hauptverbraucher in der Mongolei bestimmt.

Erster Hauptverbraucher sind die Kraftwerke, die Energie und Wärme erzeugen. Der jährliche Kohleverbrauch der Kraftwerke erreicht im Winter einen deutlichen Höhepunkt. In der Mongolei gibt es acht große Kraftwerke, vier davon mit einer CCB-Produktion von etwa 700.000 t/a befinden sich in Ulaanbataar. Die CCBs, die in den Kraftwerken erzeugt werden, machen etwa 30 % der gesamten Kohlemasse aus.

Wärmeanlagen entsorgen die CCBs üblicherweise als Nassschlamm durch große Rohre von 2 bis 3 km Länge in Aschebecken. Jährlich werden 8,4 Mio. t Kohle verbrannt. Hieraus werden schätzungsweise 2,8 Mio. t Asche in diese Becken transportiert, die eine Fläche von etwa 1,1 km² einnehmen.

Von den vier Kraftwerken der Stadt ist nur Kraftwerk 4 (KW 4) mit einem elektrostatischen Abscheider zur Sammlung der Flug-

Versatz und Sicherung von verlassenen Kleinstbergbaubetrieben mit Nebenprodukten aus der Kohleverbrennung (CCBs) in Kraftwerken und in Jurten-Distrikten vor Ort

Die Mongolei ist bei der Energieerzeugung sehr stark von Kohle abhängig. In den vergangenen Jahrzehnten wurden in den Kraftwerken und Haushalten der Hauptstadt Ulaanbataar subbituminöse Kohlen aus den Bergwerken in Nalaikh, Baganuur und Shivee-Ovoo verbrannt. Der Brennwert dieser subbituminösen Kohlen ist aufgrund des Inhalts an großen Mengen verschiedener Aschearten, den sogenannten Nebenprodukten der Kohleverbrennung (coal combustion by-products – CCB) vergleichsweise niedrig.

Die Kraftwerke in der Mongolei erzeugen über 800.000 t/a dieser CCBs. Diese bestehen hauptsächlich aus Flugasche, Schlacke und Kesselasche. CCBs werden durch Wärmekraftanlagen und Kohleverbrennung in den Ger-Distrikten der Mongolei erzeugt (Mit Ger-Distrikt wird die Ansiedlung von Jurten um die Mongolische Hauptstadt bezeichnet. Anmerkung der Redaktion). Der Großteil dieser CCBs wird ohne jeglichen ökologischen oder sozialen Nutzen in speziell dafür entworfene Sammelbecken entsorgt. In der Fachliteratur lassen sich einige Erfahrungen über die CCB-Nutzung in der Mongolei finden. Nur ein Bruchteil davon fließt in die Betonherstellung. Der Leitgedanke des BASMIC-Projekts ist die Untersuchung der

Möglichkeiten, an der Deutsch-Mongolischen Hochschule für Rohstoffe und Technologie (GMIT), Ulaanbataar/Mongolei, CCBs aus Kraftwerken zum Versatz und zur Sicherung verlassener Kleinstbergwerke in Nalaikh, einem Bezirk etwa 30 km süd-östlich von Ulaanbataar zu nutzen. Um verschiedene mongolische CCBs zu untersuchen, wurden Laboranalysen durchgeführt. Dadurch konnte BASMIC im Labormaßstab die allgemeine technische Eignung der in mongolischen Kraftwerken erzeugten CCBs als Versatzmaterial für verlassene Bergwerke feststellen.

Eine soziologische Studie, die in den typisch mongolischen Ger-Mikro-Distrikten durchgeführt wurde, war ebenfalls Teil von BASMIC. Hierzu wurden die Bewohner der Jurten befragt, inwieweit sie sich dazu motivieren ließen, ihre im eigenen Haushalt erzeugte Asche zu sammeln, um damit die verlassenen Kleinstbergwerke zu verfüllen. Ergebnis war, dass eine überwältigende Mehrheit von über 900 Haushalten bereit war, den BASMIC-Zielen zur Verwendung ihrer Haushaltsasche zuzustimmen, und sie erklärten sich bereit, zum Erfolg beizutragen. Diese soziologische Studie ist jedoch nicht Teil dieser Veröffentlichung.

ashes together after combustion. PP 4 discharges into five ponds of which four are complete filled. The total pond volume is approximately 6 to 9 M m³, each pond has volumes of around 1.2 to 1.9 M m³.

The other formidable CCB producer is the Mongolian household sector, especially the Mongolian Ger districts. Ger's are residences derived from the former nomadic lifestyle of the country. This household's burn coal partly mixed with wood or other combustible components in ovens to heat the housing and to cook mainly in the winter season. Around 190,000 ger's are in the vicinity of Ulaanbaatar consuming around 1.2 Mt/a of coal and generating around 0.21 Mt/a CCB's.

Especially during the winter times households increase burning of coal with or without other components, what leads to several environmental problems. Two main challenges are:

1. 2.8 Mio. t/a CCB's generated in the capital city Ulaanbaatar are a permanent pollution threat to air and soil, substantially with trace heavy metals, radioactive compounds, and dusts. As leachate the pollutants harm the water cycle. Another risk is the creation of concrete-like layers beneath the ground due to the pozzolanic activities of the CCB's.

asche ausgestattet. Die restlichen Wärmekraftanlagen entsorgen die gesamte Asche zusammen nach dem Verbrennungsprozess. KW 4 entsorgt diese in fünf Becken, von denen vier bereits vollständig gefüllt sind. Das Gesamtvolumen der Becken beträgt etwa 6 bis 9 Mio m³, dabei hat jedes Becken ein Volumen von etwa 1,2 bis 1,9 Mio m³.

Der andere große CCB-Produzent sind die mongolischen Haushalte, insbesondere die Ger-Distrikte, Jurten-Siedlungen, die dem ehemals nomadischen Lebensstil des Landes entstammen. Diese Haushalte verbrennen Kohle teils gemeinsam mit Holz oder anderen brennbaren Materialien in ihren Öfen, um besonders im Winter die Häuser und Jurten zu beheizen und zu kochen. In der Umgebung Ulaanbataars gibt es etwa 190.000 Gers, die ungefähr 1,2 Mio. t/a Kohle verbrauchen und rd. 0,21 Mio. t/a CCB erzeugen.

Besonders während der Wintermonate steigt die Kohleverbrennung der Haushalte mit oder ohne andere Brennmaterialien an. Das führt zu enormen Problemen für die Umwelt. Die zwei größten Herausforderungen dabei sind:

1. Die 2,8 Mio. t/a CCBs, die in der Hauptstadt Ulaanbataar erzeugt werden, sorgen durch Schwermetallbelastung, radio-

2. In Mongolia, many legal or illegal coal mining activities take place in various scales. Normally the abandoned mines have been left still open without regularly mine-closure and rehabilitation. The consequences are large-scale devastated landscapes with the negative chemical and physical characteristics of newly exposed soil. Human beings and animals are endangered in different ways.

1.1 Origin of CCB's

Coal, as a fuel, is fed into combustion chamber for heating or electricity generating purposes. The combustion process essentially turns coal into heat and CCB's. The CCB's escape the burning chamber in two ways: up and down. An air stream is provided to promote the combustion, which inadvertently carries the light particles with itself up. The lifted particles are collected by means of an electrostatic separator or a baghouse, and then termed as "fly ash".

Along with the light particles, the stream also carries some sulfur content which should be caught by a Flue Gas Desulfurization (FGD) process. After buffering with limestone or lime so-called FGD gypsum is formed. FGD gypsum is not a part of the BASMIC investigation.

Particles, that are too big and heavy, fall down the chamber against the air stream, and are termed as "boiler slag" or "bottom ash" depending on the phase at the time it drops off the chamber. Boiler slag leaves the chamber in molten status and bottom ash in solid status (1).

Amount and characteristics of each CCB (Figure 1) substantially rely on,

- composition of burned coal;
- incombustible matter in the coal;
- coal pulverization technique and efficiency;
- additives to and conditions during the combustion;
- efficiency of emission control devices; and
- storage and handling of CCB.

1.2 Fly ash

Fly ash is the fine part of the CCB's that is harvested from the exhaust gases arose from combustion chamber by electrostatic separator or baghouses. Its particles are exceptionally fine, predominantly spherical in shape and various in diameter from $< 1 \mu\text{m}$ to $> 150 \mu\text{m}$. Although fly ashes are tiny in size, they make up always more than 50 % of the total CCB production.

The fly ash particles are shaped like tiny solidified bubbles, which are often solid and rigid spherical particle, the so-called cenospheres. The properties of fly ash vary widely dependent on the mineral composition of coal burned, equipment used for grinding, the furnace type, and the combustion process itself. The fly ash's specific gravity ranges between 2.05 and 2.68 g/cm³. Big constructions, such as dams or retaining walls, widely benefit from the use of fly ash as a binding agent because it offers a good performance than conventional natural construction materials, but the density is lower.

The American Society for Testing and Materials (ASTM) C618 differentiates fly ash into two categories – Classes F and C fly ash. Class F fly ash normally results from combustion of bitumi-

aktive Bestandteile und Staub für dauerhafte Verunreinigungen der Luft und der Erde. Als Sickerwasser schaden die Verschmutzungen dem Wasserkreislauf. Ein weiteres Risiko ist die Bildung betonähnlicher Schichten in der Erde aufgrund der puzzolanischen Eigenschaften der CCBs.

2. In der Mongolei wird legaler und illegaler Bergbau in unterschiedlichen Größenordnungen betrieben. Bergwerke werden üblicherweise einfach verlassen und stehen offen. Rehabilitationsmaßnahmen werden nicht durchgeführt. Große Landschaftsbereiche bleiben mit chemisch und physikalisch verunreinigten Böden verwüstet zurück und gefährden Menschen und Tiere auf unterschiedlichste Arten.

1.1 Entstehung der CCBs

Kohle wird als Brennstoff in eine Brennkammer gegeben, um Wärme oder Strom zu erzeugen. Der Verbrennungsprozess verwandelt die Kohle in Wärme und CCBs. Die CCBs verlassen die Brennkammer auf zwei Wege: Sie steigen auf oder ab. Ein Luftstrom fördert die Verbrennung und lässt gleichzeitig die leichten Teilchen aufsteigen. Diese Teilchen werden von einem elektrostatischen Abscheider oder einem Gewebefilter gesammelt und als „Flugasche“ eingestuft.

Gemeinsam mit den leichten Teilchen befördert der Luftstrom einige Schwefelanteile, die von einer Rauchgasentschwefelungsanlage (REA) gesammelt werden. Nach der Zugabe von Kalkstein oder Kalk entsteht daraus sogenannter REA-Gips. REA-Gips ist nicht Teil der BASMIC-Untersuchungen.

Zu große und schwere Partikel fallen gegen den Luftstrom in der Brennkammer herab und werden je nach Zeitpunkt des Ausfallens aus der Kammer als „Kesselschlacke“ oder „Bodenasche“ bezeichnet. Die Kesselschlacke verlässt die Kammer in geschmolzenem und die Bodenasche in festem Zustand (1).

Die Menge und Eigenschaften jedes CCBs (Bild 1) hängen erheblich ab von

- der Zusammensetzung der verbrannten Kohle,
- den nicht brennbaren Stoffen in der Kohle,
- der Art und Effizienz der Kohlezerkleinerung,
- den Zusätzen zur und Bedingungen während der Verbrennung,
- der Effizienz der Emissionskontrollgeräte und
- der Lagerung und Handhabung der CCBs.

1.2 Flugasche

Die Flugasche ist der feine Bestandteil der CCBs, der durch elektrostatische Abscheider oder Gewebefilter aus den Abgasen der



Fig. 1. Coal combustion by-products (2).

Bild 1. Nebenprodukte der Kohleverbrennung (2).

nous or anthracite coal, whereas Class C fly ash originates from the combustion of lignite or sub-bituminous coal.

Class C fly ash generally contains about more than 15 % CaO whereas Class F fly ash up to 5 %. The Class C fly ash features a mass sum of the minerals SiO_2 , Al_2O_3 , and Fe_2O_3 of at least 50 %, Class F fly ash at least 70 %.

The geotechnical properties are important because fly ash is used for civil engineering or backfilling purposes. The properties are quantified in Table 2. Fly ash is preferable in many field applications due to its pozzolanic and cementitious properties.

The compaction of soil is complicated when the soil holds high moisture. Fly ash, when used on soils with high moisture, quickly reduces the moisture to a level suitable for compaction. Fly ash is proved to be a formidable shrink-swell potential reducer like lime. This can be ascribed to the fact that fly ash is very fine in size, and it promotes the pozzolanic reaction, which provides geotechnical strength and the consumption of water.

The pozzolanic reaction runs between the siliceous and aluminous material from the pozzolan material and calcium hydroxide in the presence of moisture to produce cementitious compounds. The reactive silica of the pozzolan, and calcium hydroxide react under the influence of water in a hydration reaction to calcium silicate hydrate C-S-H or similar compounds.

In the literature are many ongoing and past experiences utilizing fly ash to enhance concretes. The industrial area Mandideep near Bhopal, Madhya Pradesh/India is an example for the improvement of concrete by the addition of fly ash that is used for a rigid road pavement. Fly ash was mixed with Portland cement in steps of 10 % (0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % fly ash). The mix design was applied on the specimen for flexural strength and compressive strength tests. In the result, it is concluded that a mix of 30 % fly ash with 70 % of cement was of optimum design with the result of a compressive strength of 45 MPa and a flexural strength of 7 MPa.

The fly ash, which otherwise could harm the environment, contributes to the production of concrete. Besides, fly ash is more available and cheaper than cement. Additionally, fly ash reduces water consumption because it comprises mostly spherical particles. The spherical particles allow fly ash to act as a bearing between particles in the concrete in its fresh state.

It has been demonstrated that the use of fly ash enhances the concrete workability, compressive strength, flexural strength, pump ability, cohesion and durability. Moreover, it reduces corrosion, alkali silica reaction, sulfate reaction shrinkage as it decreases concrete's permeability and bleeding.

1.3 Bottom ash

In comparison to the size of fly ash, bottom ash is coarser. Bottom ashes appear in gray to black colors, although high calcium content can attribute to a whitish color. The grain size typically ranges from small sizes up to 10 mm. In terms of chemical composition, bottom ash shows similar composition to fly ash, but featuring greater content of carbon.

Bottom ash tends to be more inert than fly ash because of its larger particles and highly fused state. This fact attributes to less pozzolanic property so that bottom ash does not feature as strong binder material in concrete or in mortar as fly ash.

Verbrennungskammer gesammelt wird. Ihre Teilchen sind besonders fein, hauptsächlich kugelförmig und variieren im Umfang von $< 1 \mu\text{m}$ bis $> 150 \mu\text{m}$. Obwohl Flugasche aus winzigen Teilchen besteht, macht sie immer über 50 % der gesamten CCB-Produktion aus.

Die Flugascheteilchen haben die Form winziger, festgewordener Bläschen. Es handelt sich dabei um leichtgewichtige, inerte, hohle Kugeln mikroskopischer Dimension, sogenannte Cenosphären. Die Eigenschaften der Flugasche variieren in Abhängigkeit von der Mineralzusammensetzung der verbrannten Kohle, den Geräten, die zum Mahlen verwendet werden, der Art der Brennkammer und dem Verbrennungsprozess selbst. Das spezifische Gewicht der Flugasche liegt zwischen 2,05 und 2,68 g/cm³. Große Konstruktionen wie Dämme oder Stützwände profitieren weitreichend von der Nutzung von Flugasche als Bindemittel, da es bei geringerer Dichte höhere Festigkeiten liefert als herkömmliche Baumaterialien.

Die American Society of Testing and Materials (ASTM) klassifiziert in C618 zwei Kategorien von Flugasche – Flugasche der Klassen F und C. Flugasche der Klasse F entsteht üblicherweise aus der Verbrennung von Anthrazitkohle, während Flugasche der Klasse C aus der Verbrennung von Braunkohle stammt.

Flugasche der Klasse C enthält in der Regel mehr als 15 % CaO, Flugasche der Klasse F hingegen nur bis zu 5 %. Flugasche der Klasse C enthält zusammen mindestens 50 % der Minerale SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3 , Flugasche der Klasse F mindestens 70 %.

Da die Flugasche im Bauwesen oder zum Versatz verwendet wird, sind ihre geotechnischen Eigenschaften wichtig. Die Eigenschaften werden in Tabelle 2 dargestellt. Flugasche wird aufgrund ihrer puzzolanischen und zementähnlichen Eigenschaften in vielen Anwendungsbereichen bevorzugt.

Wenn die Erde viel Feuchtigkeit enthält, wird die Bodenverdichtung erschwert. Flugasche senkt, bei Nutzung auf Erde mit hoher Feuchtigkeit, die Feuchtigkeit auf eine Stufe, die Verdichtung möglich macht. Flugasche reduziert, ähnlich wie Kalkstein, das Schwind- oder Quellpotential. Dies kann der Feinkörnigkeit der Flugasche zugeschrieben werden. Zudem fördert sie die puzzolanische Reaktion, welche für geotechnische Festigkeit und Wasserabsorption sorgt.

Die puzzolanische Reaktion läuft zwischen den kieselensäure- und aluminiumhaltigen Materialien des Puzzolanmaterials und Calciumhydroxid unter Einfluss von Feuchtigkeit ab, um zementähnliche Stoffe zu erzeugen. Die reaktive Kieselsäure der Puzzolane und Calciumhydroxid reagieren unter Einfluss von Feuchtigkeit in einer Hydratationsreaktion zu Calciumsilikathydrat C-S-H oder ähnlichen Stoffen.

In der Fachliteratur finden sich sowohl laufende als auch abgeschlossene Erfahrungen zur Nutzung von Flugasche zur Verbesserung von Beton. Beispielsweise wird im Industriegebiet in Mandideep bei Bhopal, Madhya Pradesh/Indien Flugasche zur Verbesserung von Beton für den Straßenbau eingesetzt. Die Flugasche wurde in 10 %-Schritten (0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % Flugasche) mit Portland-Zement gemischt. Die Mischungen wurden für die Erstellung von Prüfkörpern für Biege- und Druckfestigkeitstests hergestellt. Mit einer Mischung von 30 % Flugasche und 70 % Zement wurden die besten Ergebnisse erzielt. Die Druckfestigkeit betrug 45 MPa und die Biegefestigkeit 7 MPa.

A primary recovery way of bottom ash is the application as sub-base and base courses under rigid and flexible pavements as an alternative for aggregates. Bottom ash also finds its recovery role in concrete as aggregate material substituting sand, gravel and crushed stones in several civil engineering applications (Figure 2).

Concrete is composed of aggregate (or filler) materials and binder materials which react under the influence of water. Aggregate materials contribute 65 to 80 % to concrete and are differentiated in fine and coarse aggregates.

Fine and coarse aggregates are substitutable with bottom ash because of the content of cenospheres, low iron oxides, and high carbon contents (3). The cenospheres of bottom ash are spherical particles that are empty inside and partially open. In (4) the used bottom ash has a density of 641 kg/m³. This bottom ash substitutes fine aggregates (sand) having a density of 1,223.78 kg/m³.

Bottom ash is, thus, quite unstable in volume as the cenospheres may break and shrink the body. Because of the presence of cenospheres, bottom ashes have an extremely low maximum dry density. That is also the reason for a substantially high moisture capacity of bottom ash which prevents it widely from being utilized for construction purposes. In the research, the problem associated with cenospheres is attempted to be remedied with addition of soil that essentially fills the empty spheres.

In (3, 4) bottom ash (density 1.96 kg/l) mixed with 20 % soil (density 2.60 kg/l) and cement (density 3.15 kg/l) is tested for its substitute-ability for conventional granular material. The sizes of bottom ashes are comparable to those of coarse sand to fine gravel. The research study (3, 4) varied relation of cement to bottom ash from 0 to 20 % in step of each 5 % and conducted unconfined compressive strength tests and shear strength tests. Finally, the research study concluded that the addition of 10 % cement to a mixture of bottom ash and soil (20 %) is the optimum design. In that case compressive strengths of over 3 MPa and shear strengths of 300 kPa have been detected which would be acceptable for geotechnical applications.

The literature reports about cenospheres having found in bottom ash. Bottom ash particles are hard, brittle, irregular in shape, mostly sharp edged, and very light weighted in comparison to soil due to the cenospheres.

Cenospheres can be manipulated in a way that it serves a purpose. The empty space can be treated as an accommodation for

Die ansonsten umweltschädliche Flugasche trägt so zur Herstellung von Beton bei. Zudem ist Flugasche leichter verfügbar und kostengünstiger als Zement. Außerdem senkt Flugasche die Wasseraufnahme, da sie hauptsächlich aus kugelförmigen Teilchen besteht, die es der Flugasche ermöglichen, als Lager zwischen den Teilchen in frischem Beton zu fungieren.

Es wurde gezeigt, dass die Nutzung von Flugasche die Bearbeitbarkeit, Druckfestigkeit, Biegefestigkeit, Pumpbarkeit, Bindekraft und Lebensdauer des Betons verbessert. Darüber hinaus verringert sie, durch Senkung der Durchlässigkeit und Wasserabsonderung des Betons, Korrosion, Alkali-Kieselsäure-Reaktionen und Schwindung durch Sulfatreaktionen.

1.3 Schlacke

Schlacke ist, verglichen mit Flugasche, gröber. Schlacke ist grau bis schwarz, wobei ein hoher Calciumgehalt zu einer weißlichen Farbe führen kann. Die Größe der Teilchen liegt üblicherweise bei bis zu 10 mm. Schlacke ähnelt in ihrer chemischen Zusammensetzung der Flugasche, jedoch weist Schlacke einen höheren Kohlenstoffgehalt auf.

Schlacke ist aufgrund der größeren Teilchen und des geschmolzenen Zustands oftmals reaktionsträger als Flugasche. Dies führt zu geringeren puzzolanischen Eigenschaften, sodass Schlacke als Bindemittel in Beton oder Mörtel nicht so effektiv ist wie Flugasche.

Eine primäre Art der Verwertung von Schlacke ist die Anwendung als untere und obere Tragschicht beim Straßen- und Wegebau anstelle von Schotter. Schlacke wird auch als Zuschlagstoff in Beton eingesetzt, um Baumaterialien wie Sand, Schotter und Splitt zu ersetzen (Bild 2).

Beton besteht aus Zuschlagstoffen und Bindemitteln, die bei Wassereinfluss reagieren. Beton besteht zu 65 bis 80 % aus Zuschlagstoffen, die in feine und grobe Zuschlagstoffe unterteilt werden.

Feine und grobe Zuschlagstoffe können aufgrund der Menge an Cenosphären, niedrigen Eisenoxiden und hohem Kohlenstoffgehalt durch Schlacke ersetzt werden (3). Die Cenosphären der Schlacke sind kugelförmige Teilchen, die innen hohl und teils offen sind. In (4) hat die verwendete Schlacke eine Dichte von 641 kg/m³ und ersetzt feine Zuschlagstoffe (Sand) mit einer Dichte von 1.233,78 kg/m³.

Schlacke hat tendenziell ein instabiles Volumen, da die Cenosphären platzen und den Aufbau schrumpfen lassen könnten. Durch die Cenosphären hat Schlacke eine niedrige maximale Trockendichte. Dies ist auch der Grund, weshalb Schlacke eine sehr hohe Wasserkapazität besitzt, welche sie für Bauzwecke weitestgehend unbrauchbar macht. Dem Problem, das mit Cenosphären verbunden ist, wird in der Forschung durch die Hinzugabe von Boden entgegengewirkt, um die leeren Sphären auszufüllen.

In (3, 4) wird getestet, inwiefern Schlacke (Dichte 1,96 kg/l) mit 20 % Boden (Dichte 2,60 kg/l) und Zement (Dichte 3,15 kg/l) als Ersatz für herkömmliches, granulöses Material fungieren kann. Die Größe der Schlacke ist vergleichbar mit der von grobem Sand oder feinem Schotter. Die Forschungsstudie (3, 4) variierte das Verhältnis von Zement zu Schlacke von 0 bis 20 % in 5 %-Schritten und führte uneingeschränkte Druck- und Scherfestigkeitstests durch. Letztendlich wurde in der Forschungsstudie gefolgert, dass die Zugabe von 10 % Zement zu einer Mischung aus Schlacke und Bo-

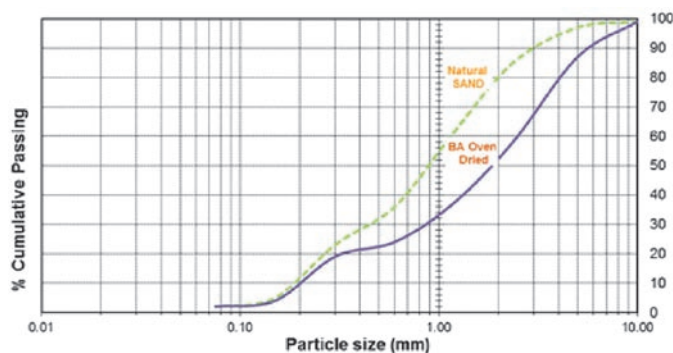


Fig. 2. Particle size comparison between river sand and bottom ash (4).
Bild 2. Vergleich der Teilchengröße von Flusssand und Schlacke (4).

water or for fine particles. When cenospheres hold water back, it can be used for plants growth or can aid hardening processes at latter stages where water is required.

Instead of filling material into the cenospheres, utilizations as noise absorbent material has been known. Around 80% of the tested bottom ashes have the same sound absorbing ability as conventional sound absorbent materials. The positive aspects get enhanced with bigger bottom ash particles due to the large cenospheres.

Noise reaching a road wall immediately has been partly reflected especially by the cenospheres inside. Another noise portion got captured by the cenospheres. Eventually cenospheres dissipate and only a small fraction of sound captured manages to escape. The research pointed out that the thicker the material the more it absorbs the noise. This way bottom ash included in a road construction can effectively reduce noise pollution originated from the traffic.

1.4 Boiler slag

Boiler slag is falling down the chamber like the bottom ash but differs in phase when leaving the combustion chamber. Boiler slag, as its name implies, leaves the chamber in a molten state and its pieces are predominantly sized between 0.5 to 5 mm. Boiler slag is very hard and brittle, usually a smooth texture is significant, sometimes it tends to possess pores.

The main application for recovery of boiler slag is the use in hot mix asphalt for road construction because of its hard-durable particles and resistance to surface wear.

1.5 Characteristics and applications of CCB's

By mining-caused exposure of sulfidic rock and soil, e.g. pyrite, sulfuric acid gets released into the environment. This effect is accompanied with decreased pH values and different other problems. CCB's inhere neutralizing abilities. In study (1) several experiments with CCB's on acidic soil have been conducted. The neutralizing ability of CCB's have been demonstrated because of high calcium and magnesium content. The alkalinity of CCB's can range between 10 to 60% (pure limestone: 100% alkalinity) and they can be used as buffering agent on acidic soil. To neutralize an acidic ground at a pH-value of 4 around 700 t of CCB's per acre would be required.

CCB's can be used as fertilizer. In terms of chemical compounds, CCB's contain micro-nutrients such as sulfur, calcium, and magnesium. Moreover, an increment of the pH value caused by CCB's addition to the soil unlocks some nutrients that deliver compounds and leads to a chemically binding of phytotoxic metals. CCB's include low doses of boron which is an essential element for plants growth.

CCB's are supporter to increase the mechanical strength of soil, although the amended soil can become erosive because of the cenospheres. Source (5) reports about utilization of CCB's produced in Mongolia for road construction. The study evaluated CCB's collected from power plants of Darkhan and Erdenet. A further study (5) describes tests of strength, electron microscopic image, X-ray micro-analysis, and X-ray powder diffraction to research the CCB's compatibility to road construction. The research results illustrated highly carbonaceous, poor

den (20%), das optimale Mischverhältnis sei. In diesem Fall wurde eine Druckfestigkeit von über 3 MPa und eine Scherfestigkeit von 300 kPa gemessen, was für geotechnische Anwendungen akzeptabel wäre.

Die Fachliteratur berichtet von Cenosphären, die in Schlacke gefunden wurden. Schlacketeilchen sind hart, spröde, unregelmäßig geformt, meist scharfkantig und aufgrund der Cenosphären im Vergleich zum Boden sehr leicht.

Cenosphären können so manipuliert werden, dass sie einen bestimmten Zweck erfüllen. Der Hohlraum kann als Aufnahmemöglichkeit für Wasser oder feine Teilchen genutzt werden. Wenn Cenosphären Wasser zurückhalten, kann dies für Pflanzenwachstum genutzt werden oder in späteren Phasen Härtungsprozesse unterstützen, für die Wasser benötigt wird.

Anstelle des Befüllens der Cenosphären mit Material ist auch die Verwendung als lärmabsorbierendes Material bekannt. Etwa 80% der getesteten Schlacken hat die Fähigkeit, Geräusche so zu absorbieren, wie herkömmliches lärmdämpfendes Material. Diese positiven Auswirkungen werden von der Schlacke aufgrund der großen Cenosphären hervorgerufen.

Trifft Lärm auf Lärmschutzwände, wird ein Teil davon, insbesondere von den Cenosphären im Inneren, sofort reflektiert. Ein weiterer Teil des Lärms wird von den Cenosphären aufgenommen. Letztendlich lösen sich die Cenosphären auf und nur ein kleiner Bruchteil des aufgenommenen Lärms kann entweichen. In der Forschung wird darauf hingewiesen, dass die Geräuschabsorption in Abhängigkeit von der Dicke des Materials steigt. So kann die Schlacke im Straßenbau verwendet werden und effektiv die verkehrsbedingte Lärmbelastung reduzieren.

1.4 Kesselasche

Ähnlich wie Schlacke fällt auch Kesselasche auf den Boden der Brennkammer, allerdings zu einem anderen Zeitpunkt. Wie die Bezeichnung vermuten lässt, verlässt Kesselasche die Brennkammer in geschmolzenem Zustand und ihre Teilchen sind überwiegend zwischen 0,5 und 5 mm groß. Kesselasche ist sehr hart und spröde, üblicherweise ist die glatte Konsistenz maßgeblich, manchmal ist sie porös.

Die Hauptverwendung bei der Verwertung von Kesselasche liegt aufgrund der harten, widerstandsfähigen Teilchen sowie des hohen Verschleißwiderstands in der Zugabe in heißen Mischasphalt für den Straßenbau.

1.5 Eigenschaften und Anwendung der CCBs

Bei abbaubedingter Freilegung von sulfidischem Gestein und Erde, wie beispielsweise Pyrit, wird Schwefelsäure freigesetzt. Dieser Effekt wird von sinkenden pH-Werten und anderen Problemen begleitet. CCBs haben neutralisierende Fähigkeiten. In einer Studie (1) wurden einige Experimente mit CCBs auf säurehaltigem Boden durchgeführt. Die neutralisierende Fähigkeit der CCBs wurde aufgrund hoher Calcium- und Magnesiumgehalte demonstriert. Die Alkalität der CCBs liegt zwischen 10 und 60% (reiner Kalkstein: 100% Alkalität) und sie können als Puffersubstanz auf säurehaltiger Erde eingesetzt werden. Um säurehaltigen Boden mit einem pH-Wert von 4 zu neutralisieren, bräuchte man eine CCB-Menge von etwa 7 t/m².

CCBs können als Dünger verwendet werden. Bezüglich der chemischen Zusammensetzung enthalten CCBs Mikronährstoffe

calcium and acid contents which implied inferior cementitious properties.

In (5) the CCB's have been mixed with soil, lime agent and cement. In the result, a mix composed of 5% cement, 5% limestone, 27% of Darkhan ash, 63% of soil with 27% water addition showed the best performance having 3.5 MPa strength after 28 d of drying. The result indicated that the mix is suitable for applications of road construction in Mongolia.

In underground mines so-called supported methods often are applied to mine the minerals. Supported mining methods involve replacing mineral pillars by artificial constructions to support the mine roof for safety, the so-called backfilling. CCB's are perfect suitable for backfilling use in underground mines because of the strength characteristics.

Source (6) describes the backfilling procedure of an underground coal mine in Illinois. A specially designed mix of fly ash and pulverized bed combustion ash with the mix ratio 1:2 was used to backfill the mined-out area by replacing the former pillars. The backfilling paste comprises around 65 to 70% of aggregates. In total 15,000 t of the paste has been injected through two holes from the surface. Measurements confirmed that the poured paste spread out at least 91.44 m from the injection projections. A strength of 190 psi has been measured and a stiffness of 18,000 psi after 28 d, and 40,400 psi after 90 d and therewith an increasing mine value from 56% to 64%.

In the coal mine in Illinois an acidic environment had invaded the territory but after the backfilling the pH value of the soil was assumed to be neutralized. With the backfilling the mine has benefited regarding economics, environment, and safety.

The utilization practice for controlling subsidence is represented in another exhausted underground mine applied in Illinois in 1996 (6). Approximately 8,000 t CCB's based pastes with an aggregates content of more than 70% were blindly backfilled at a high density to the underground. Later an observation has been made by camera inspections. 61 m movement of the grout from the pouring point has been detected. After 60 days, a core sample was tested, and a strength of 500 to 600 psi and a stiffness of 30,000 to 35,000 psi has been measured. This result has illustrated a clear improvement of the ground safety above the underground mine.

Number / Nummer	CCB Source / CCB Quelle	Abbreviation / Abkürzung
1.	Baganuur Cyclone Ash	BCA
2.	Baganuur Bottom Ash	BBA
3.	Nalaikh Military Ash	NMA
4.	Nalaikh Cyclone Ash	NCA
5.	Nalaikh Bottom Ash	NBA
6.	Nalaikh Ger District Ash	NGD
7.	Thermal Plant Bottom	TBA
8.	Thermal Plant Fly Ash	TFA
9.	Glear Project Dust	GPD

Table 1. BASMIC CCB samples – abbreviations. // Tabelle 1. BASMIC CCB-Proben – Abkürzungen. Source/Quelle: GMIT/ DMHT

wie Schwefel, Calcium und Magnesium. Zudem sorgt eine Erhöhung des pH-Werts durch die Zugabe von CCBs für die Freisetzung einiger Nährstoffe und zur chemischen Bindung phytotoxischer Metalle. CCBs enthalten geringe Mengen Bor, ein Element, das für Pflanzenwachstum essenziell ist.

CCBs unterstützen auch den Anstieg der mechanischen Festigkeit des Bodens, obwohl dieser aufgrund der Cenosphären leichter erodieren kann. Quelle (5) berichtet von der Nutzung der in der Mongolei erzeugten CCBs im Straßenbau. Die Studie bewertete CCBs, die in Kraftwerken in Darkhan und Erdenet gesammelt wurden. Quelle (5) beschreibt Festigkeitsprüfungen, Aufnahmen unter dem Elektronenmikroskop, Röntgen-Mikroanalysen und Pulverröntgendiffraktometrie, um die Eignung der CCBs für den Straßenbau zu untersuchen. Die Forschungsergebnisse zeigten einen hohen Kohlenstoff-, sowie geringen Calcium- und Säuregehalt, was geringe zementähnliche Eigenschaften bedeutet.

In (5) wurden die CCBs mit Boden, Kalkmittel und Zement vermischt. Das Ergebnis war eine Mischung aus 5% Zement, 5% Kalkstein, 27% Darkhan-Asche, 63% Erde mit 27% hinzugegebenem Wasser, die mit einer Festigkeit von 3,5 MPa nach 28 Tagen Trocknung das beste Ergebnis lieferte. Dieses bedeutet die Eignung für Anwendungen im Straßenbau in der Mongolei.

Im Bergbau unter Tage werden oftmals sogenannte unterstützende Methoden zum Rohstoffabbau angewandt. Bei den unterstützenden Abbaumethoden werden die Pfeiler aus mineralischen Rohstoffen durch künstliche Konstruktionen ersetzt, um die Hangendschichten des Bergwerks zur Verhinderung von Auswirkungen auf die Tagesoberfläche zu unterstützen. Man spricht hierbei von Versatz. CCBs eignen sich aufgrund ihrer Festigkeitseigenschaften optimal zum Versatzbau.

Quelle (6) beschreibt den Versatzprozess eines Bergwerks in Illinois. Zur Verfüllung der untertägigen Hohlräume und als Ersatz für die mineralischen Pfeiler wurde eine speziell entworfene Mischung aus Flugasche und pulverisierter Schlacke in einem Mischverhältnis von 1:2 verwendet. Die Versatzmasse besteht aus etwa 65 bis 70% Zuschlagstoffen. Insgesamt wurden durch zwei Löcher an der Oberfläche 15.000 t der Paste eingepumpt. Messungen bestätigten, dass sich das Verfüllmaterial mindestens 91,44 m um die Bohrlöcher verteilt hatte. Messungen ergaben eine Festigkeit von 190 PSI und eine Steifigkeit von 18.000 PSI nach 28 Tagen, 40.400 PSI nach 90 Tagen und daher eine Erhöhung des Werts des Bergwerks von 56 bis 64%.

Im Bergwerk in Illinois hatte sich ein saures Milieu auf dem Gelände ausgebreitet, doch nach dem Verfüllen wurde angenommen, dass sich der Boden neutralisiert habe. Mithilfe des Versatzes profitierte das Bergwerk in den Bereichen Wirtschaftlichkeit, Umwelt und Sicherheit.

Die Anwendung zur Verhinderung von Bergsenkungen wurde 1996 in einem stillgelegten Bergwerk in Illinois erprobt (6). Etwa 8.000 t auf CCBs basierende Masse mit einem Zuschlagstoffgehalt von mehr als 70% wurden mit hoher Dichte ohne jegliche Planung in das Bergwerk verfüllt. Später wurde mit Kameras folgende Beobachtung gemacht: Der Mörtel hatte sich 61 m um das Einfüllloch verteilt. Nach 60 Tagen wurde ein Kern gezogen und eine Zugfestigkeit von 500 bis 600 PSI sowie eine Steifigkeit von 30.000 bis 35.000 PSI festgestellt. Das Ergebnis zeigte eine klare Verringerung des Bergsenkungsrisikos durch den untertägigen Bergbau.



Fig. 3. CCB Samples.
Bild 3. CCB-Proben.
Photo/Foto: GMIT/ DMHT



Fig. 4. CCB blocks poured into molds.
Bild 4. CCB-Blöcke werden in Formen gegossen.
Photo/Foto: GMIT/ DMHT

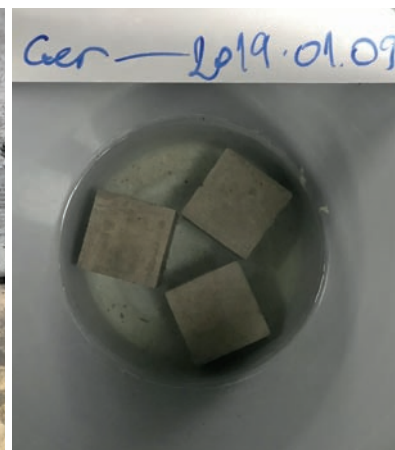


Fig. 5. CCB blocks in water.
Bild 5. CCB-Blöcke im Wasser.
Photo/Foto: GMIT/ DMHT

2 Laboratory investigation of CCB's

The CCB samples have been transported in big bags to the process laboratory of the German-Mongolian Institute for Resources and Technology (GMIT), Ulaanbataar/Mongolia, and prepared from the tray of ashes (7). A sieve analysis was conducted twice on some ashes. A pozzolanic reaction has been observed between fine particles, therefore it was decided to set an upper size limit of 2 mm.

The investigated CCB's are illustrated in table 1 (with abbreviations) and in figure 3. GPD is a uncomplete combusted dust of another GMIT project and not part of this publication.

A mixture which would presumably be used as backfilling material technically consists of a filler material, a binder material and fine and coarse aggregates. The components are mixed and water was added to produce grout. The core strengthening reaction takes place between the binder and filler materials. Darkhan slag (DS), and fly ash from PP 4 (TFA) have been nominated to be potential binder materials because of their high calcium content. Only small portions of the Darkhan slag has been grinded because of its material wearing hardness.

The filler and binder materials underwent various tests before and after mixing. As a result of an estimation on needed reactants (CaO and SiO_2) from both filler and binder materials, the research reasoned out that a 90% ash should be admixed with 10% of Portland cement (PC) to achieve a required strength. The same relation has been applied between ashes (90%) as filler and TFA (10%) as binder.

Water was added to the mixes until it appears to be smooth and viscous grout. The prepared grouts have been poured into molds, then confined with external pressure to produce cubic blocks (Figure 4). The pressing effort served to eliminate air bubbles that were captured inside the grouts while pouring. Uniformity is a crucial factor for having reliable results. The blocks have been kept in the mold for 24 h.

Filler and binder materials are added together and blended thoroughly before water addition. A heat release was noticed while producing the grouts. Before pouring the grout into the mold, the mold surface has been lubricated with a vegetable oil.

Thereafter the blocks have been engaged and dipped under water in buckets (Figure 5) for 28 d according to literature recom-

2 Laboruntersuchungen der CCBs

Die CCB-Proben wurden den Aschesammelstellen entnommen und in Big-Bags zum Prozesslabor der Deutsch Mongolischen Hochschule für Rohstoffe und Technologie (DMHT) in Ulaanbataar/Mongolei transportiert (7). Manche Aschearten wurden zwei Siebanalysen unterzogen. Da man zwischen feinen Teilchen eine puzzolanische Reaktion beobachten konnte, wurde eine maximale Korngröße von 2 mm festgelegt.

Die untersuchten CCBs werden in Tabelle 1 (mit Abkürzungen) und Bild 3 dargestellt. GPD ist ein unvollständig verbrannter Staub eines anderen Projekts der DMHT und nicht Teil dieser Veröffentlichung.

Eine Mischung, die möglicherweise als Versatzmaterial genutzt würde, besteht aus Füllstoffen, Bindemittel sowie feinen und groben Zuschlagstoffen. Die Bestandteile werden vermengt und es wird Wasser hinzugefügt, damit Mörtel entsteht. Die Kernverfestigungsreaktion findet zwischen den Füllstoffen und Bindemitteln statt. Darkhan-Schlacke (DS) und Flugasche aus KW 4 (TFA) wurden aufgrund ihres hohen Calciumgehalts zu potentiellen Bindemitteln erklärt. Es wurden nur geringe Mengen der Darkhan-Schlacke gemahlen, da sie aufgrund ihrer Festigkeit zu Geräteverschleiß führt.

Die Füllstoffe und Bindemittel wurden vor und nach dem Vermengungsprozess verschiedenen Tests unterzogen. Aufgrund einer Annahme bezüglich der benötigten Reaktiven (CaO und SiO_2), die sowohl im Füll- als auch im Bindemittel enthalten sein sollten, ergab die Untersuchung eine Mischung von 90% Asche mit 10% Portland Zement (PC), um die benötigte Festigkeit zu erreichen. Dasselbe Mischverhältnis wurde bei Asche (90%) als Füllmittel und TFA (10%) als Bindemittel angewandt.

Den Mischungen wurde Wasser hinzugefügt, bis sich ein glatter, zähflüssiger Mörtel ergab. Dieser vorbereitete Mörtel wurde dann in Formen gegossen und mit externem Druck zu Würfeln gepresst (Bild 4). Dieser Druck wurde aufgebracht, um beim Eingießen des Mörtels eventuell entstandene Luftbläschen zu entfernen. Da die Einheitlichkeit ein entscheidender Faktor ist, um zuverlässige Untersuchungsergebnisse zu erzielen, verweilten die Würfel 24 h in den Formen.

Füllstoffe und Bindemittel werden gründlich vor der Wassergabe vermengt. Bei der Herstellung des Mörtels wurde eine

mentations to induce a pozzolanic and cementitious reaction while the laboratory had an ambient temperature and moisture during the whole research time.

Some blocks, mostly blocks consisting of fly ash in combination with bottom ash, have been disintegrated with the time. Fly ash blocks without any other component have been resisted the water immersion and demonstrated later a remarkable result in the compression tests. Also blocks containing cement as binder material have been registered as resistant.

Eight kinds of experiments have been carried out to evaluate the chosen CCB's:

1. Sieve analysis (GMIT Processing Laboratory).
2. Moisture test (MNS ISO 589:2003 at GMIT Processing Laboratory).
3. XRF – Chemical analysis (AXIOSmAX at Geological Central Laboratory of Mongolia).
4. Radiation measurement (GMIT Processing Laboratory).
5. Elution test (LLC-ISO-MNS 11885:2007 at Khanlab Laboratory).
6. Unconfined compression test (GMIT Processing Laboratory).
7. FT-IR measurement (MFST – Institute of Physics and Technology).
8. SEM analysis (ISO 13322-1:2014 at MFST – Institute of Physics and Technology).

2.1 Sieve Analysis

Each sieve with mesh sizes of 0.063, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8 mm was charged with 1 kg of CCB's. The sieving operation ran for 10 min with shaking intensity of 65 units (machine scale) on 1 kg samples of ashes. The Figures 6 a – h illustrate the sieving result.

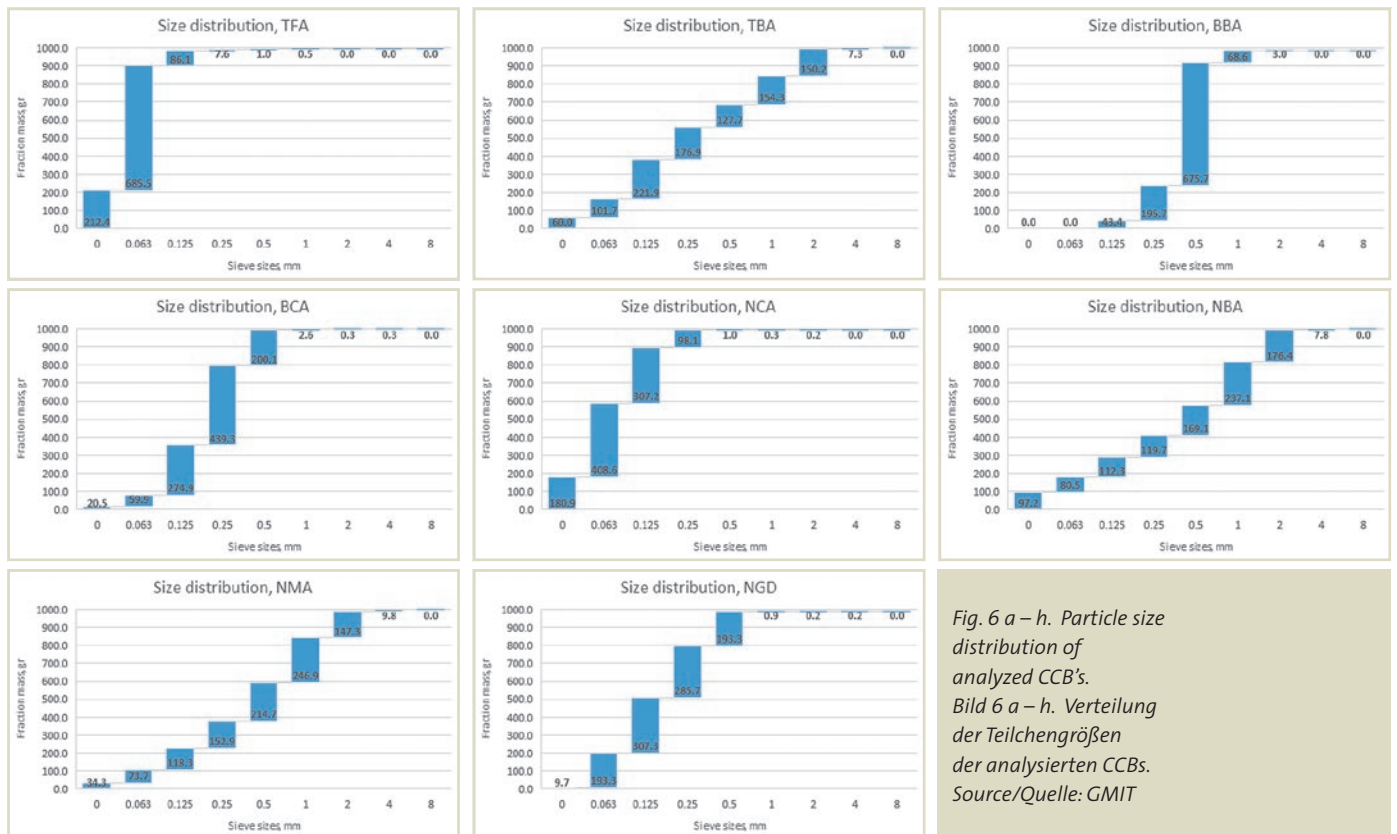


Fig. 6 a – h. Particle size distribution of analyzed CCB's.
Bild 6 a – h. Verteilung der Teilchengrößen der analysierten CCBs.
Source/Quelle: GMIT

Wärmeabgabe festgestellt. Die Formen wurden mit Pflanzenöl eingefettet, bevor der Mörtel eingefüllt wurde.

Im nächsten Schritt wurden die Würfel verfestigt und in Eimern 28 Tage lang unter Wasser getaucht (Bild 5), was laut Fachliteratur eine puzzolanische und zementähnliche Reaktion verursachen soll. Das Labor hatte während der gesamten Forschungszeit eine angemessene Temperatur und Luftfeuchtigkeit.

Einige der Blöcke, besonders die, welche hauptsächlich aus einer Kombination aus Flugasche und Schlacke bestanden, lösten sich mit der Zeit auf. Die ausschließlich aus Flugasche bestehenden Blöcke hielten dem Wasserbad stand und lieferten später beachtliche Ergebnisse in den Druckproben. Blöcke, die Zement als Bindemittel enthielten, wurden ebenfalls als beständig eingestuft.

Um die ausgewählten CCBs zu bewerten, wurden acht unterschiedliche Untersuchungen durchgeführt:

1. Siebanalyse (Prozesslabor der DMHT).
2. Feuchtigkeitsbestimmung (MNS ISO 589:2003, Prozesslabor der DMHT).
3. Chemische Röntgenfluoreszenzanalyse (AxiosmAX im Geological Central Laboratory der Mongolei).
4. Strahlungsmessung (Prozesslabor der DMHT).
5. Auswaschungstest (LLC-ISO-MNS 11885:2007 im Khanlab-Labor).
6. Uneingeschränkte Druck- und Scherfestigkeitsprüfung (Prozesslabor der DMHT).
7. FT-IR Spektroskopie (MFST – Institute of Physics and Technology).
8. Rasterelektronenmikroskop-Analyse (ISO 13322-1:2014, MFST).

2.1 Siebanalyse

Jedes Sieb mit Maschenweiten von 0,063, 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 4 und 8 mm wurde mit 1 kg CCBs belastet. Der Siebprozess lief

2.2 Moisture test

100 g samples of CCB's have been charged into glasses and set into an oven for 120 min at a temperature of 105 °C. Finally, the CCB's have been weighed to estimate the moisture content by mass change (Figure 7).

Nalaikh bottom ash reveals the highest moisture of 7.9 %. This is reasonable because it was received suspended in water. On the practice, the ash is removed by water flush. It should be noted that Darkhan slag bears no water as it originates from smelting.

2.3 XRF – chemical analysis

After mixing the CCB's to serve as filler and binder for XRF analysis each sample of 100 g has been chosen from the trays and sent to the Geological Central Laboratory of Mongolia. The test was conducted in accordance with AXIOSmAX. Chemical analysis was conducted to reveal ratio of SiO₂, CaO, Fe₂O₃, and Al₂O₃ compounds. The result is presented in Table 2.

Among the constituents, ratio of each compound varies widely. SiO₂ spans in range between 6.25 to 47%, CaO between 3.78 and 22.97%, Al₂O₃ ratio between 5.23 and 12.55%, Fe₂O₃ ratio between 3.68 and 15.56%.

As often mentioned in the literature, the SiO₂ ratio in CCB's accounts mostly for its weight. As expected, TFA featured the highest CaO content (22.97%). TBA featured the next highest CaO content (19.46%). An unexpectedly significant CaO amount was detected in NGD ash with 13.57%. It was expected that concrete made from these ashes would show the highest strengths. PC, DS, TFA were selected as binder material belonging to the high CaO content.

2.4 Radiation measurement

Two radiation meters have been applied for measuring beta and gamma radiations of the CCB's. During the measurement, the other environment parameters were ambient.

The measurement devices rested on the CCB's inside the trays for 1 min. Then the display of the meters has been registered for five times per 1 min. Figure 8 shows measuring of radiation on ash in trays which was conducted twice on each component.

Table 3 summarizes all Gamma radiation measurements in terms of average and standard deviation. In total ten measure-

CCB	Compound / Bestandteile			
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
GPD	6.25			
TFA	42.29	22.97	12.55	10.58
TBA	47.00	19.46	12.19	15.48
BBA	45.76	6.33	12.51	11.40
BCA	44.52	3.12	11.74	10.23
NCA	44.79	10.13	12.54	7.63
NBA	33.35	3.78	10.92	3.68
NMA	40.46	7.39	13.94	5.68
NGD	49.17	13.57	10.31	6.93
PC	21.32	59.55	5.23	3.81
DS	27.84	30.68	8.69	15.56

Table 2. CCB's – chemical main compounds.

Tabelle 2. Die chemischen Bestandteile der CCBs.

Source/Quelle: Geological Central Laboratory

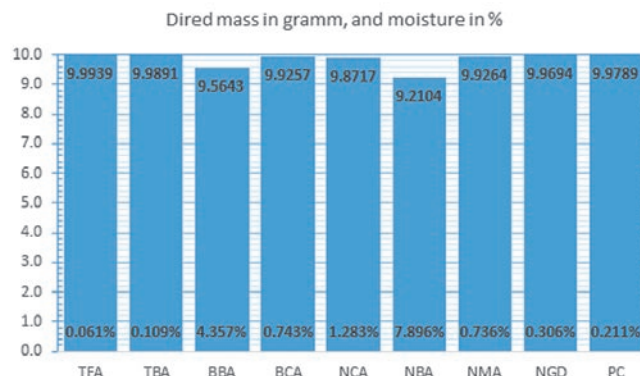


Fig. 7. Moisture content of CCB's.

Bild 7. Feuchtigkeitsgehalt der CCBs. Source/Quelle: GMT/DMHT

10 min lang, bei einer Siebintensität von 65 Einheiten (Maschinenmaßstab) bei 1 kg Ascheproben. Die Bilder 6 a – h zeigen die Siebergebnisse.

2.2 Feuchtigkeitsuntersuchung

Jeweils 100 g-Proben des CCBs wurden in Gläser gefüllt, gewogen und für 120 min in einem Ofen einer Temperatur von 105 °C ausgesetzt. Anschließend wurden die Proben zur Ermittlung des Feuchtigkeitsgehalts erneut gewogen. Der Feuchtigkeitsgehalt ergibt sich aus der Änderung der Masse (Bild 7).

Die Schlacke aus Nalaikh hatte mit 7,9 % den höchsten Feuchtigkeitsgehalt. Da diese bei Lieferung mit Wasser bedeckt war, ist das Ergebnis nachvollziehbar. An diesem Standort wird die Asche mithilfe einer Wasserspülung entfernt. Die Darkhan-Schlacke enthält kein Wasser, da diese im Schmelzprozess entsteht.

2.3 Chemische Röntgenfluoreszenzanalyse

Nach der Vermengung der CCBs zu Füllstoffen und Bindemitteln wurde je eine Probe von 100 g für die Röntgenfluoreszenzanalyse entnommen und zum Geological Central Laboratory der Mongolei geschickt. Die Tests wurden dem AXIOSmAX entsprechend durchgeführt. Um das Verhältnis von SiO₂, CaO, Fe₂O₃ und Al₂O₃ zu untersuchen, wurden chemische Analysen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Unter den Proben variiert die Menge jedes Bestandteils enorm. Der SiO₂-Gehalt reicht von 6,25 bis 47%, der CaO-Gehalt liegt zwischen 3,78 und 22,97%, der Al₂O₃-Gehalt zwischen 5,23 und 12,55 % und der Fe₂O₃-Gehalt zwischen 3,68 und 15,56 %.

Wie häufig in der Fachliteratur erwähnt, ist das SiO₂-Verhältnis in CCBs maßgeblich für das Gewicht verantwortlich. Wie erwartet hatte TFA den höchsten CaO-Gehalt (22,97%). In NGD wurde mit 13,57 % ein erstaunlich hoher CaO-Gehalt nachgewiesen. Es wurde erwartet, dass Beton aus diesen beiden Aschen, die höchste Festigkeit hat. PC, DS und TFA wurden aufgrund ihres hohen CaO-Gehalts als Bindemittel ausgewählt.

2.4 Strahlungsmessung

Es wurden zwei Strahlungsmessgeräte verwendet, um die Beta- und Gammastrahlung der CCBs zu messen. Während der Messung waren sämtliche Umgebungsparameter zulässig.

Die Messgeräte lagen 1 min lang auf den CCBs in den Schalen, dann wurde das Display der Geräte pro Minute fünfmal abgele-



Fig. 8. Radiation meters at GMIT Process Laboratory. // Bild 8. Strahlungsmessgeräte im Prozesslabor der DMHT. Photo/Foto: GMIT/DMHT

ments were registered on each CCB time of measurement. TBA, GPD, DS have been sorted out before radiation measurement.

Also, regarding a beta radiation, the meters registered zero amplitudes.

All measured values are in an acceptable range of radiation what means that no harmful effect on environment should appear by using the CCB's for construction purposes near the surface.

2.5 Elution test

The water, 28 d used for block production, has been stirred and 200 ml of each water samples were tested regarding elutable contents of the potential hazardous elements arsenic, mercury, chromium, lead and cadmium. On the delivery to the external laboratory, the sample of Nalaikh Military Ash got lost.

The test was performed at Khanlab Laboratory by application of the LLC-ISO-MNS 11885:2007 standard. The results of the elution tests are shown in table 4.

The elution test results illustrated no mentionable content of harmful substances with the exception that a remarkable ratio of chromium was detected for TFA although 0.212 mg/l of chromium is not beyond the thresholds. Therefore, the test resulted that the blocks do not leach enough inorganic pollutants out which can raise environmental problems.

2.6 Unconfined compression test

Next the produced blocks have been undertaken compression tests. Each compression test was conducted with a load of 140 kg/cm³

Components / Proben	Average / Durchschnitt	Standard Dev. / Standard Abweichung
TFA	0.193	0.013
BBA	0.209	0.030
BCA	0.205	0.015
NCA	0.205	0.035
NBA	0.194	0.025
NMA	0.185	0.011
PC	0.188	0.016

Table 3. CCB radiation measurement (mSv/h). // Tabelle 3. Strahlungsmessung (mSv/h) der CCBs. Source/Quelle: GMIT/DMHT

sen. Bild 8 zeigt die Strahlungsmessung der Asche in den Schalen, die bei jeder Probe zweimal durchgeführt wurde.

Tabelle 3 fasst sämtliche Durchschnitte und Standardabweichungen der Gammastrahlungsmessungen zusammen. Insgesamt wurden pro CCB zehn Messungen durchgeführt. TBA, GPD und DS wurden vor Beginn der Strahlungsmessungen aussortiert. Messungen der Betastrahlung ergaben außerdem eine Amplitude von null.

Sämtliche gemessenen Werte befinden sich innerhalb der akzeptablen Strahlungsskala, sodass keine umweltschädlichen Auswirkungen bei Nutzung von CCBs für oberflächennahe Bauzwecke zu erwarten sind.

2.5 Auswaschungstest

Das Wasser, das 28 Tage lang für die Lagerung der Blöcke genutzt wurde, wurde umgerührt und 200 ml jeder Wasserprobe wurden auf lösliche Inhaltsstoffe der unter Umständen gesundheitsgefährdenden Elemente Arsen, Quecksilber, Chrom, Blei und Cadmium untersucht. Die Probe der Nalaikh-Asche ging bei Lieferung an das externe Labor verloren.

Der Test wurde im Khanlab-Labor unter Anwendung der LLC-ISO-MNS 11885:2007 Standards durchgeführt. Die Ergebnisse der Auswaschungstests sind in Tabelle 4 dargestellt.

Die Ergebnisse der Auswaschungstests zeigten keinen nennenswerten Gehalt von schädlichen Substanzen mit Ausnahme einer auffallend hohen Menge Chrom in der TFA-Probe, wobei auch diese mit einer Menge von 0,212 mg/l die Grenze nicht überschritt. Der Test ergab demnach, dass die Blöcke keine anorganischen Schmutzstoffe enthalten, welche der Umwelt schaden könnten.

2.6 Unbeschränkte Druck- und Scherfestigkeitsprüfung

Als nächstes wurden die Blöcke einer unbeschränkten Druck- und Scherfestigkeitsprüfung unterzogen. Jede dieser Prüfungen wurde mit einer Last von 140 kg/cm³ durchgeführt und beendet, sobald das einachsige Festigkeitsprüfgerät ein Versagen oder einen Riss innerhalb des Blocks registrierte (Bilder 9 bis 11).

Typische Blockrisse entstanden vertikal, da sich die Druckkraft durch das gesamte Volumen des Blocks zieht, wobei der Kern unversehrt bleiben sollte (Bild 10). Wenn horizontale Risse entstehen, ist das Ergebnis zu verwerfen, da Bläschen oder Inhomogenitäten der Grund dafür sein können.

Ashes / Asche-proben	Suspected Hazardous Elements / Vermutete, gesundheitsgefährdende Elemente [mg/l]				
	Ac	CD	CR	Pb	Hg
GPD	<0.01	<0.005	<0.005	0.02	<0.005
TFA	0.03	<0.005	0.212	0.01	<0.005
TBA	0.01	<0.005	<0.005	<0.01	<0.005
BBA	<0.01	<0.005	<0.005	<0.01	<0.005
BCA	<0.01	<0.005	<0.005	<0.01	<0.005
NCA	<0.01	<0.005	<0.005	<0.01	<0.005
NBA	<0.01	<0.005	<0.005	<0.01	<0.005
NMA	<0.01	<0.005	<0.005	<0.01	<0.005
TW	<0.01	<0.005	<0.005	<0.01	<0.005

Table 4. CCB samples – metal contents.

Tabelle 4. Metallbestandteile der CCB-Proben.

Source/Quelle: Khanlab Laboratory



Fig. 9. Vertical cracks.
Bild 9. Vertikale Risse.
Photo/Foto: GMIT/DMHT



Fig. 10. Residual block core.
Bild 10. Restlicher Blockkern.
Photo/Foto: GMIT/DMHT



Fig. 11. Fracture pattern.
Bild 11. Rissmuster.
Photo/Foto: GMIT/DMHT

Filler/ Füllstoff	Strength / Festigkeit (kN)
TFA	91.92
TBA	13.35
BBA	9.84
BCA	13.76
NCA	3.53
NBA	9.02
NMA	16.36
NGD	17.08

Table 5. Compression strengths of grouts containing 10% cement as binder.
Tabelle 5. Druckfestigkeit von Mörtel mit 10% Zement als Bindemittel.
Source/Quelle: GMIT/DMHT

min and was finished after the uniaxial strength test device registered a failure fracture in the blocks (Figures 9 to 11).

Normal cube fractures develop vertically because the compression force is supposed to act throughout the whole block volume whereas the core of the block should remain unaffected (Figure 10). If the fractures occur horizontal, the results would be questionable because bubbles or inhomogeneities can be the reason.

A remarkably high strength of 91,58 kN was observed on the mixture of TFA and PC. In that case the compression rig had reached its capacity limit. Also, BCA when mixed with 40% of PC illustrated a comparable remarkable strength.

The compression strengths with highest values are presented in table 5.

Of course, the more cement is added, the more strength is registered. The validity of that theory is demonstrated with the increasing strength results by mixing of BCA with 20%, 30%, 40% PC.

The literature expects an endurance of grouts for backfilling expressed in a compression stress of at least 0.3 MPa. All tested blocks carry strengths of more than 0.353 MPa. With this criterion, every block has met the minimum requirement in terms of strengths.

2.7 FT-IR measurement

After the compression strength tests have been finished a sample selection of the components and fractures of the hardest three blocks have been collected for analyzing in a “Fourier-Transform Infrared Spectroscopy” (FT-IR) measurement. An amount of 100 g was chosen to be sampled from the trays of ashes and broken pieces of the compressed cubes.

The test was performed at the MFST Institute of Physics and Technology. As an example, for the pozzolanic reaction, the IR measurements of TFA is illustrated in Figures 12 and 13.

The pozzolanic reaction took place in all tested variations, but in different scales.

2.8 Scanning electron microscope (SEM) analysis

Mixed samples of all CCB's each one a weight 100 g have been chosen from the CCB trays.

In den TFA- und PC-Mischungen wurde eine auffallend hohe Festigkeit von 91,58 kN gemessen. In diesem Fall hatte das Messgerät seine Maximalkapazität erreicht. Auch die Mischung von BCA mit 40% PC zeigte auffallend hohe Festigkeiten.

Die jeweils höchsten Werte der Druck- und Scherfestigkeit sind in Tabelle 5 dargestellt.

Natürlich steigt die Festigkeit, je mehr Zement hinzugefügt wird. Die Gültigkeit der Theorie wird anhand der steigenden Festigkeitsergebnisse von BCA mit 20%, 30%, 40% PC belegt.

Der Fachliteratur nach muss der zum Versatz genutzte Mörtel mindestens einem Druck von 0,3 MPa standhalten. Alle getesteten Blöcke hielten einem Druck von mehr als 0,353 MPa stand. Mit der Erfüllung dieses Kriteriums wird jeder Block den Festigkeitsanforderungen gerecht.

2.7 FT-IR-Spektroskopie

Nach Beendigung der Festigkeitsprüfungen wurden eine Probeauswahl der Komponenten und Bruchstücke der drei härtesten Blöcke gesammelt, um sie in einem Fourier-Transform-Infrarotspektrome-

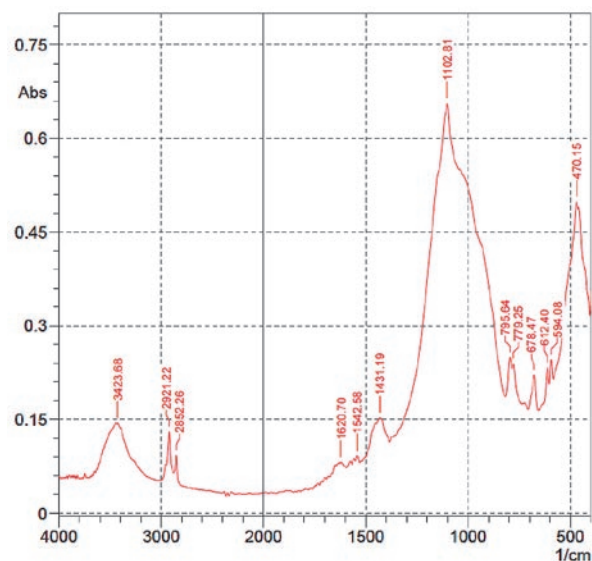


Fig. 12. Absorbance of TFA.
Bild 12. Absorption von TFA. Source/Quelle: MFST

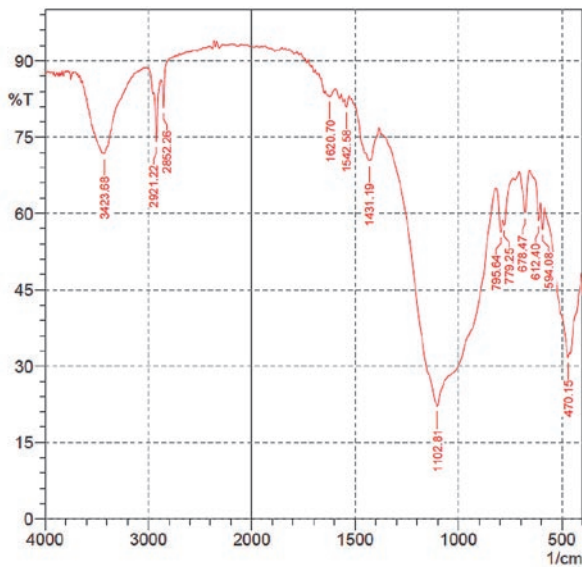


Fig. 13. Transmittance of TFA.

Bild 13. Lichtdurchlässigkeit von TFA. Source/Quelle: MFST

The test is performed at the MFST – Institute of Physics and Technology using ISO 13322-1:2014 standard. After a long observation, it should be noted that almost every image illustrates small particles adhering on bigger particles (host particles) which cannot even be illustrated in whole in 200 μm images. In the remaining figures, globe-like cenospheres could be identified. Circular fractures can be noticed on the surfaces.

In figure 14 b (upper right image), it can be seen that the spherical particles seem to be smaller than 50 μm . The literature mentions often that these unique spherical shapes attribute favorable for different applications.

Unlike TFA, generated during the same combustion process, TBA features irregularly shaped profiles with highly porous structure (Figures 15 a – b). The profiles have a coarse size what is the reason for falling down the chamber rather than be lifted by

ter (FT-IR) zu analysieren. Den Ascheproben und Bruchstücken der gepressten Blöcke wurde eine Probe von 100 g entnommen.

Der Test wurde am MFST – Institute of Physics and Technology durchgeführt. In den Bildern 12 und 13 werden beispielhaft für die puzzolanische Reaktion die IR-Messungen von TFA dargestellt.

Die puzzolanische Reaktion erfolgte in sämtlichen Testvarianten, allerdings in verschiedenen Größenordnungen.

2.8 Rasterelektronenmikroskop-Analyse

Es wurden 100 g-Proben aller gemischten CCBs genommen.

Der Test wurde am MFST gemäß ISO 13322-1:2014 Standards durchgeführt. Nach langer Beobachtung zeigt fast jedes Bild kleine Teilchen, die an größeren Teilchen (Wirtsteilchen) haften. Das kann auf 200 μm -Bildern nicht veranschaulicht werden. Auf den restlichen Bildern konnten kugelförmige Cenosphären identifiziert werden. An der Oberfläche sind runde Risse bemerkbar.

In Bild 14 b (Bild rechts oben) ist zu sehen, dass die kugelförmigen Teilchen scheinbar kleiner sind als 50 μm . Die Fachliteratur schreibt diesen einzigartigen, kugelförmigen Formen Vorteile in verschiedenen Anwendungen zu.

Anders als die im selben Verbrennungsprozess entstehende TFA, besteht TBA aus unregelmäßigen Formen mit hochporösen Strukturen (Bilder 15 a – b). Die Teilchen sind grobkörnig, weshalb sie nach dem Verbrennungsprozess auf den Boden der Brennkammer fallen, statt von der Luft nach oben getragen zu werden. In ihren Poren können sich kleinere Teilchen oder Wasser sammeln, was Cenosphären (Hohlräume) entstehen lässt.

Die REM-Bilder von BBA zeigen erkennbare poröse Strukturen (Bilder 16 a – b): Eine Struktur erinnert an eine große Bienenwabe, von der Seitenansicht ähnelt sie jedoch den beschädigten Seiten eines Buchs. Die andere Struktur besteht aus einer grobkörnigen Textur.

In Bild 17 a wirken die Teilchen voluminös und größer als 200 μm . Wie erwartet sind die Teilchen fest und grob. Die Teil-

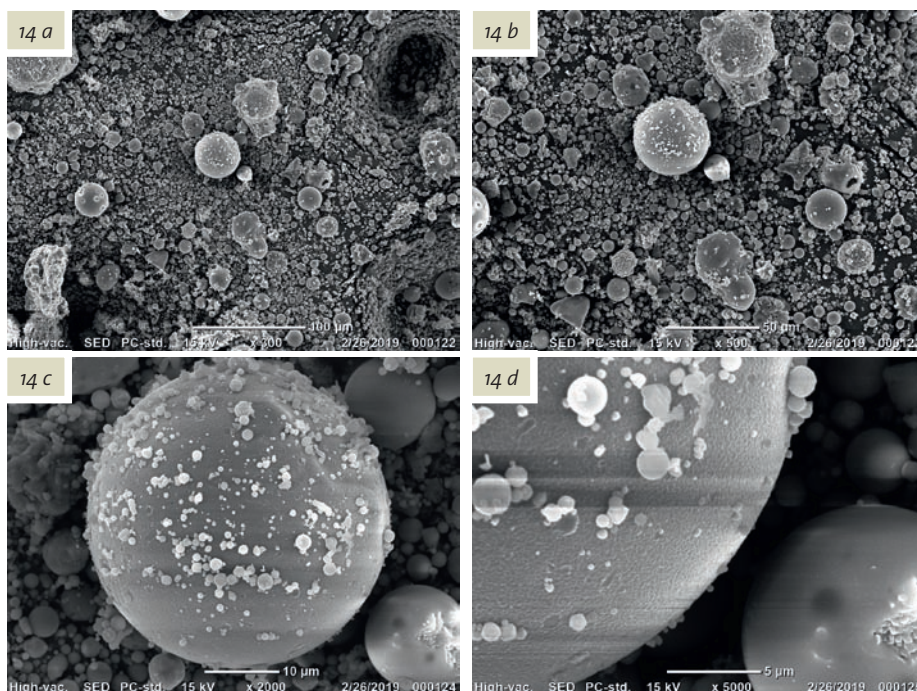


Fig. 14 a – d. SEM images of PP 4 thermal fly ash (scales: 100 μm – 5 μm).

Bild 14 a – d. REM-Bilder der KW 4 fly ash (100 μm – 5 μm)

Source/Quelle: MFST

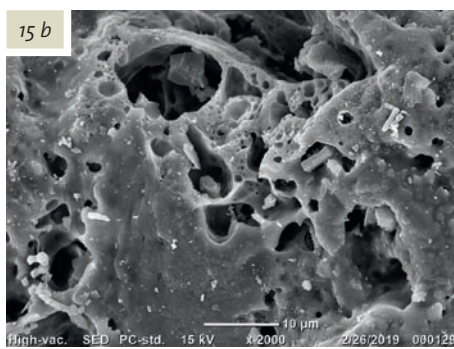
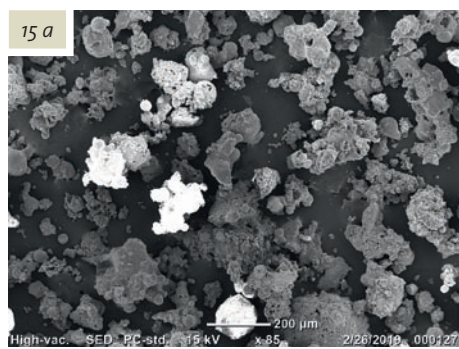


Fig. 15 a – b. SEM images of PP 4 thermal bottom ash (scales: 200 µm – 10 µm).
Bild 15a – b. REM-Bilder der KW 4 Schlacke (200 µm – 10 µm)
Source/Quelle: MFST

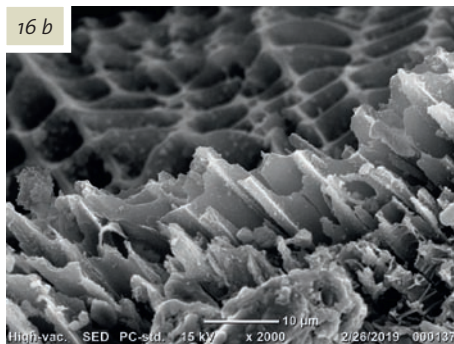
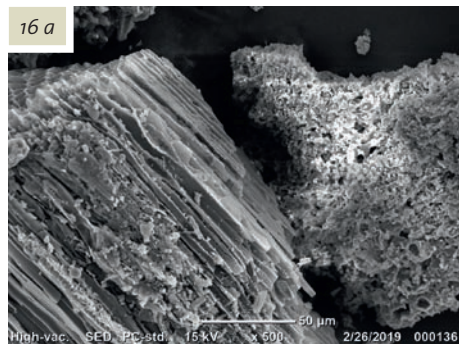


Fig. 16 a – b. SEM images of Baganuur bottom ash (scales: 50 µm – 10 µm).
Bild 16 a – b. REM-Bilder der Baganuur Schlacke (50 µm – 10 µm).
Source/Quelle: MFST

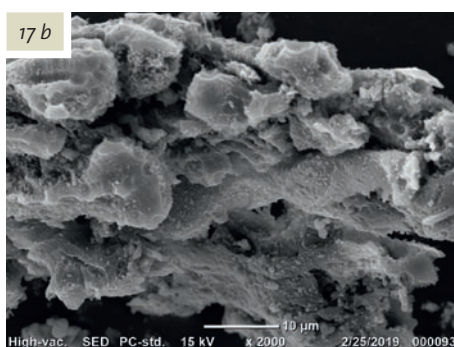


Fig. 17 a – b. SEM images of Baganuur cyclon ash (scales: 200 µm – 10 µm).
Bild 17 a – b. REM-Bilder der Baganuur Asche aus dem Fliehkraftabscheider (200 µm – 10 µm).
Source/Quelle: MFST

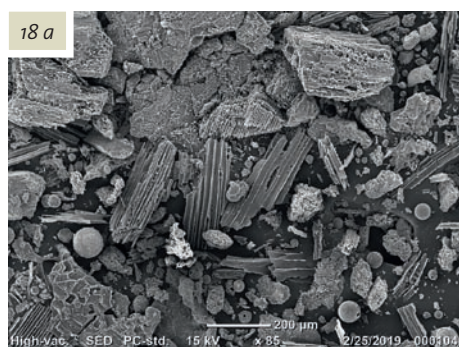


Fig. 18 a – b. SEM images of Nalaikh cyclon ash (scales: 200 µm – 50 µm).
Bild 18 a – b. REM-Bilder der Nalaikh Asche aus dem Fliehkraftabscheider (200 µm – 50 µm).
Source/Quelle: MFST

air after combustion process. Finer particles or water can be entrapped in their pores of the profiles which often are cenospheres (empty spaces).

The SEM images of BBA illustrate two distinguishable porous structures (Figures 16 a – b): One structure seems like a tall bee comb, but from a side view, it seems like damaged book pages. The other structure features a grainy texture.

From figure 17 a, particles seem bulky and much bigger than 200 µm. It is expected that the particles are rigid and coarse. The particles seem not to be porous. The host particles feature smooth holes (without fractures).

Unlike BCA, NCA features various structures however they both were fired in the same type of furnace. Figure 18 b illustrates

chen scheinen nicht porös zu sein. Die Wirtsteilchen haben glatte Löcher (ohne Risse).

Anders als BCA enthält NCA verschiedene Strukturen, obwohl sie in derselben Ofenart verbrannt wurden. Bild 18 b zeigt Sphären mit ebener Struktur und linienartiger Textur. Die linienartige Textur scheint porös und zerrissen.

Die Bilder 19 a – b zeigen Wirtsteilchen mit scheinbar zerrissenen Oberflächen. Die an den Wirtsteilchen haftenden Teilchen wirken porös und feinkörnig. Die feinen Teilchen ähneln Bruchstücken wabenförmiger Aschestrukturen.

Die REM-Bilder der NMA zeigen Teilchen in verschiedenen Größen (Bilder 20 a – b) Die Teilchen sind unregelmäßig und haben flockenartige Strukturen. Die Wirtsteilchen hatten ebenfalls

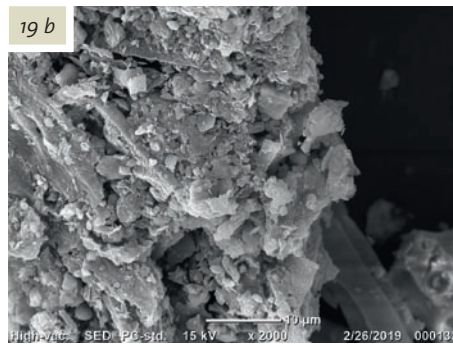
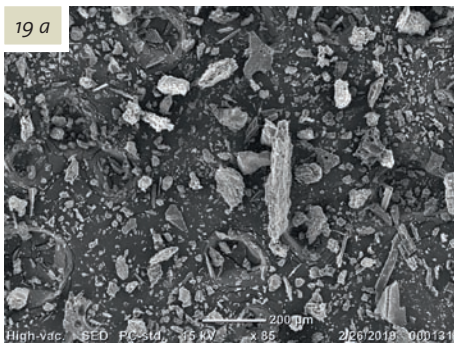


Fig. 19 a – b. SEM images of Nalaikh bottom ash (Scales: 200 μm – 10 μm).
Bild 19 a – b. REM-Bilder der Nalaikh Schlacke (200 μm – 10 μm).
Source/Quelle: MFST

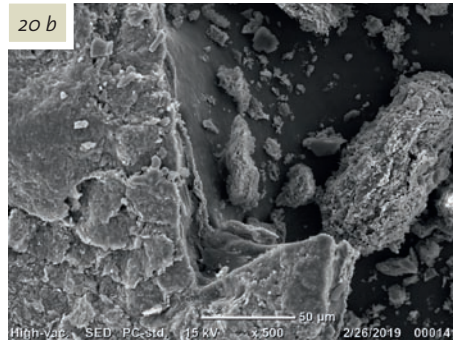
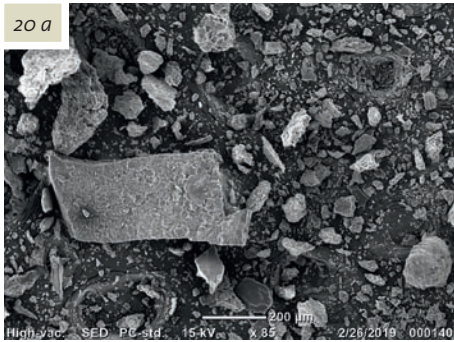


Fig. 20 a – b. SEM images of Nalaikh military ash (Scales: 200 μm – 50 μm).
Bild 20 a – b. REM-Bilder der Nalaikh Militärasche (200 μm – 50 μm).
Source/Quelle: MFST

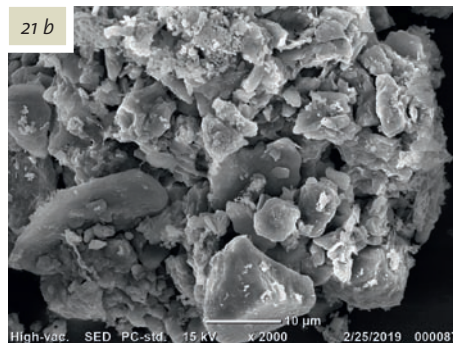
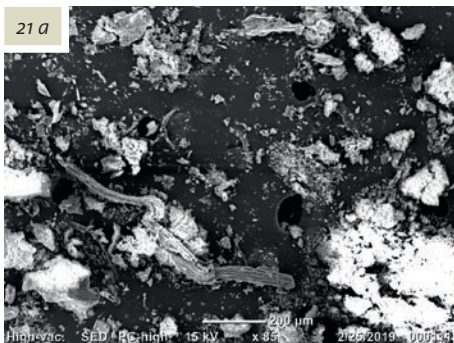


Fig. 21 a – b. SEM images of Nalaikh Ger District ash (Scales: 200 μm – 5 μm).
Bild 21 a – b. REM-Bilder der Nalaikh Ger-Distrikt Asche (200 μm – 5 μm).
Source/Quelle: MFST

planar structures with linear textures as spheres. The linear texture looks porous and fractured.

Figures 19 a – b illustrate host particles which seems to be having fractured surfaces. Particles adhered to host particles seem to be porous and fine. Fine particles look like shatters of honeycomb structured ashes.

SEM images of NMA show particles of various sizes (Figures 20 a – b). The particles are irregular and feature flake like structures. The host particles feature fractured surfaces too. Among the particles, no planar or linear textured particles have been observed.

The host particles of NGA seem to be smooth with apparent pores (Figure 21 a). Figure 21 b illustrates assembled fine particles.

One common result of the analysis of all SEM figures is clearly that almost every CCB features a unique particle texture and structure. Another common outcome is that always the finer particles adhere to the bigger ones.

3 Laboratory research results

The main results of the BASMIC investigation of nine mixed fillers and three binders are listed subsequent:

- Not every mix design can be used to produce grout that can be used as backfilling material. This was proved by some block disintegrations in water.

zerrissene Oberflächen. Unter den Teilchen konnten keinerlei ebene oder lineare Teilchen erkannt werden.

Die Wirtsteilchen der NGA sind glatt mit erkennbaren Poren (Bild 21 a). Bild 21 b zeigt eine Ansammlung feiner Teilchen.

Eines der Untersuchungsergebnisse ist allen gemein: Die Analyse aller REM-Bilder ergibt, dass jedes CCB eine einzigartige Teilchenstruktur und -textur hat. Ein weiteres gemeinsames Ergebnis ist, dass die feinen Teilchen immer an den größeren haften.

3 Ergebnisse der Laboruntersuchungen

Die Hauptergebnisse der BASMIC-Untersuchungen von neun gemischten Füllstoffen und drei Bindemitteln sind nachfolgend erläutert:

- Nicht jede Mischung kann zur Herstellung von Mörtel verwendet werden, der als Versatzmaterial genutzt werden kann. Dies wurde dadurch belegt, dass sich einige Blöcke unter Wassereinfluss auflösten.
- Jeder Block, der PC als Bindemittel enthielt, wurde den Festigkeitsanforderungen gerecht. Zudem zeigten alle Mischungen von PC mit NGD, NMA und TFA herausragende mechanische Leistungen, da die Zugabe von PC das Auftreten einer puzzolanischen Reaktion sicherstellt. Es ist denkbar, dass das hervorragende mechanische Verhalten teilweise auf die Form und Größe der Teilchen zurückzuführen ist.

- Every block with PC as binder material has fulfilled the requested strength requirement. Also, all mix designs of PC with NGD, NMA, TFA have illustrated excellent mechanical performances because the adding of PC safeguards the occurrence of the pozzolanic reaction. Conceivably the excellent mechanical behavior of those mixtures is attributed partly from the particle shapes and sizes.
- The blocks with TFA as binder material failed and did not resist the compression test. An explanation is perhaps that reactants in those blocks could not find other reactants in a sufficient number because those were locked or captured by other minerals. TFA contains 22.97% CaO, whereas PC contains 59.15% CaO. TFA is found to feature tiny spherical particles, 90% of the particles are below 0.125 mm. These particles contain 42.29% SiO₂ and 22.97% CaO by having almost no moisture (0.061%) what any pozzolanic reaction within TFA prevents. After the researcher induced the pozzolanic reaction also by adding of 10% cement a load of 91.92 kN over 0.01 m² area has been endured. With 50% DS, strength can get as high as 31.67 kN over a 0.01 m² area. Without any modifier, fly ash alone can gain strength as high as 45.35 kN over a 0.01 m² area according to the research results.
- On the one hand, TFA can be used with any binder material. TFA can compensate strength losses of any other CCB or construction material which deteriorates down to the strength threshold (30 kN). On the other hand, TFA features a comparably high release of arsenic and chrome from, although the pollutants in no test have transgressed the thresholds.
- NMA features particle fractions almost below 2 mm. Even with 7.39% CaO and 0.736% moisture NMA has illustrated a relatively good performance in an unconfined compression test with 16.36 kN strength over a 0.01 m² area when it was bound with 10% PC. In comparison to TFA every compound of NMA has been lower except for SiO₂. NMA does not harm the environment based on results of radiation and elution tests.
- NGD features particle fractions almost evenly distributed under 0.5 mm with a moisture content of 0.306%. The pozzolanic reaction in NGD alone can grant strength up to 5.69 kN over a 0.01 m² area. With a 10% cement addition, the 13.57% CaO containing NGD resists 17.07 kN strength over a 0.01 m² area. The modification multiplies the origin strength three times.
- The bulky Darkhan slag is too hard for processing under passable circumstances. DS contains comparable high contents CaO but that content is not fully reactable. The compounds of DS seem to be locked inside the hard-brittle slag fractures. Its fractures possess sharp edges. With that feature it will be recommended to use Darkhan slag as an aggregate material.
- All the blocks would not cause any environmental problems because there was not any critical detection in the radiation measurement nor released toxic elements in an elution test.
- FT-IR measurement has demonstrated that a pozzolanic reaction really takes place in the different mixtures. Also, it was demonstrated that PC adding refines the CCB mixtures to become good backfilling material. Only pure fly ash does not need cement to be a perfect backfilling agent.
- BCA features the lowest CaO content of all tested CCB's. BCA has been mixed with four different varying amounts of ce-
- Die Blöcke, die TFA als Bindemittel enthielten, fielen durch und hielten den Druck- und Scherfestigkeitsprüfungen nicht stand. Dies könnte damit erklärt werden, dass die Reaktive in diesen Blöcken nicht auf ausreichend andere Reaktive stießen, da diese in andere Mineralien eingeschlossen waren. TFA enthält 22,97% CaO, PC hingegen 59,15%. TFA enthält nachweislich winzige, kugelförmige Teilchen, 90% davon haben eine Größe unter 0,125 mm. Diese Teilchen enthalten 42,29% SiO₂ und 22,97% CaO, und die geringe Feuchtigkeit (0,061%) verhindert jegliche puzzolanische Reaktion innerhalb der TFA. Nachdem die Forscher eine puzzolanische Reaktion eingeleitet hatten, indem 10% Zement hinzugefügt wurden, stieg die Mischung auf eine Festigkeit von 91,92 kN/dm². Bei 50% DS stieg die Festigkeit auf eine Größe von bis zu 31,67 kN/dm². Den Forschungsergebnissen nach, kann Flugasche ohne Modifikator eine Festigkeit von bis zu 45,35 kN/dm² erreichen.
- TFA kann als Bindemittel verwendet werden und dem Festigkeitsverlust jedes anderen CCB oder Baumaterials, das bis zur Festigkeitsgrenze (30 kN) sinkt, entgegenwirken. Andererseits enthält TFA einen vergleichsweise hohen Arsen- und Chromwert, wobei die Grenze in keinem Test überschritten wurde.
- NMA enthält Feinstteilchen, die annähernd unter 2 mm groß sind. NMA erbrachte sogar mit 7,39% CaO und einer Feuchtigkeit von 0,736% eine relativ gute Leistung in der unbeschränkten Druck- und Scherfestigkeitsprüfung mit einer Kraft von 16,36 kN/dm², wenn sie mit 10% PC gebunden wurde. Im Vergleich zu TFA ist jeder Bestandteil der NMA geringer, mit Ausnahme von SiO₂. Den Ergebnissen der Strahlungsmessungen und der Auswaschungstests zufolge ist NMA nicht umweltschädlich.
- Die Teilchen der NGD sind gleichmäßig unter einer Größe von 0,5 mm verteilt, bei einem Feuchtigkeitsgehalt von 0,306%. Allein die puzzolanische Reaktion innerhalb der NGD kann eine Festigkeit von bis zu 5,69 kN/dm² erreichen. Bei Zugabe von 10% Zement, erreicht die NGD, die 13,57% CaO enthält, eine Festigkeit von 17,07 kN/dm². Diese Änderung verdreifacht die ursprüngliche Festigkeit der NGD.
- Die voluminöse Darkhan-Schlacke ist zu hart, um sie unter zulässigen Umständen zu untersuchen. DS enthält vergleichbar viel CaO, doch dieser Gehalt ist nicht vollständig reaktiv. Die Bestandteile der DS sind in den harten, festen Einkerbungen in der Schlacke eingeschlossen. Die Einkerbungen haben scharfe Kanten. Aufgrund dieser Eigenschaft wird die Verwendung von Darkhan-Schlacke als Zuschlagstoff empfohlen.
- Keiner der Würfel würde Umweltschäden verursachen, da die Strahlungsmessung keinerlei kritische Messwerte ergab und im Auswaschungstest keine Absonderung giftiger Elemente nachgewiesen wurde.
- Die FT-IR-Messungen zeigten, dass die puzzolanische Reaktion tatsächlich in verschiedenen Mischungen stattfand. Es wurde außerdem nachgewiesen, dass die Zugabe von PC die CCBs zu einem optimalen Versatzmaterial macht. Lediglich reiner Flugasche muss kein Zement zugefügt werden, um ein optimales Versatzmaterial zu erreichen.
- BCA hat den geringsten CaO-Gehalt aller getesteten CCBs. BCA wurde mit vier variierenden Mengen Zement vermischt: 10% (11,7 kN), 20% (11,7 kN), 30% (62,22 kN) und 40% (101,45 kN). Mit

ment: 10 % (11.7 kN), 20 % (11.7 kN), 30 % (62.22 kN), and 40 % (101.45 kN). An observed trend with each increment in cement addition has been a significant strength increase excluding between the addition of 10 and 20 %.

The final statement is that all investigated CCB's can be recovered to be backfilling materials except the Glear Project Ash (GPD) because it is an incomplete combusted coal dust.

No CCB has been detected that harms the environment in any manner with the exception when CCB's are used dry and powdery and so turn to dust, affecting the lungs of human beings.

4 Conclusion

The BASMIC research's aim was to evaluate a feasibility of recovering coal-combustion by-products (CCB's) as backfilling material for abandoned mines in Mongolia. If that approach is feasible then a typical win-win-situation would be visible for the society. That means that one challenge – to reuse a mass-relevant waste (CCB's) – solves another challenge – the stabilization of abandoned small-scale mining holes.

Different bottom ashes have been studied during the BASMIC-research, namely GPD, TBA, BBA, BCA, NCA, NBA, NMA, NGD. The CCB's have been collected from power plants, other factories and Ger micro districts. After sieving and partly grinding CCB's have been sorted into binder and filler materials considering the content of pozzolanic reactants in CCB's. A specifically mix design has been created based on the required pozzolanic reaction for the backfilling material to be competent, partly with addition of Portland cement.

The different mixtures have been used to shape, to water and subsequently to dry cubic blocks. The blocks which have been modified with cement illustrate all properties to be appropriate for backfilling purposes. In objection, blocks which have been modified with fly ash (10 %) often have shown a disintegration process during the water and dry process. Especially the fly ash of Ulaanbaatar's PP 4 has been analyzed regarding its characteristics as a binder material in combination with the designated filler material bottom ash. Also, not all blocks which passed successful the water-dry process have been able to resist the compression test.

TFA and TBA are generated at the same combustion process in PP 4, so their chemical contents are nearly the same. In case of SiO₂ content the range is between 42.29 % and 47.0 %, CaO has a span between 19.46 % and 22.17 %. But the results of shaping blocks with mixtures of TFA and TBA have illustrated that both do not really have similar characteristics. The strength results of their special mixture were not convincing.

Moreover, TFA blocks, when admixed with 10 % PC, exhibited extreme high strength 91.92 kN, whereas TFA blocks, without PC, exhibited 28.92 kN and 45.35 kN. This fact implies that a small exchange of PC with TFA can triple or at least double the strength of pure TFA blocks.

Most of the mix designs that used Portland cement as a binder satisfied the requirements. On the other hand, some mix designs with CCB's as binder materials did not satisfy the requirement. Some CCB's have excellent amount of CaO and SiO₂. FTIR analysis showed that a pozzolanic reaction took place in balanced mixes.

jedem Anstieg des Zementgehalts konnte eine Steigerung der Festigkeit beobachtet werden, mit Ausnahme der Zugabe von 10 und 20 %.

Als Endergebnis ergibt sich die mögliche Verwertung aller untersuchten CCBs als Versatzmaterial mit Ausnahme der Glear Project Ash (GPD), die ein unvollständig verbrannter Kohlestaub ist.

Es wurde festgestellt, dass keine der CCBs auf irgendeine Weise der Umwelt schadet, solange sie nicht in trockenem, puderförmigem Zustand verwendet werden und somit als Staub die menschliche Lunge belasten würden.

4 Fazit

Das Ziel der BASMIC-Forschung war die Bewertung der Eignung von CCBs als Versatzmaterial für verlassene Kleinbergwerke in der Mongolei. Sollte diese Möglichkeit bestehen, ergäbe dies eine Win-Win-Situation für die Gesellschaft. Dies bedeutet, eine Herausforderung – die Verwertung des Abfallprodukts CCB – kann dafür genutzt werden, eine weitere Herausforderung – die Stabilisierung verlassener Kleinbergwerke – zu erreichen.

Während der BASMIC-Forschung wurden verschiedene Schlackearten untersucht, und zwar GPD, TBA, BBA, BCA, NCA, NBA, NMA und NGD. Die CCBs wurden in Kraftwerken, anderen Fabriken und Ger-Mikrodistrikten gesammelt. Nachdem sie gesiebt und teils gemahlen wurden, wurden die CCBs aufgrund des jeweiligen Gehalts an puzzolanischen Reaktiven in Bindemittel und Füllstoffe unterteilt. Um die für ein effektives Versatzmaterial benötigte puzzolanische Reaktion zu erzeugen, wurde eine spezielle Mischung entworfen, der teilweise Portland-Zement beigefügt wurde.

Die verschiedenen Mischungen wurden verwendet, um würfelförmige Blöcke zu formen, diese zu befeuchten und anschließend zu trocknen. Die Blöcke, die mit Zement modifiziert wurden, hatten alle Eigenschaften, die ein angemessenes Versatzmaterial aufzeigen muss. Die Blöcke hingegen, die mit Flugasche (10 %) versetzt wurden, lösten sich während des Befeuchtungs- und Trocknungsprozesses auf. Insbesondere die Flugasche aus dem KW 4 in Ulaanbaatar wurde im Hinblick auf ihre Eigenschaften als Bindemittel in Kombination mit der als Füllmaterial bestimmten Schlacke untersucht. Außerdem hielten nicht alle Würfel, die den Prozess der Befeuchtung und Trocknung überstanden hatten, der Druck- und Scherfestigkeitsprüfung stand.

TFA und TBA werden durch denselben Verbrennungsprozess in KW 4 erzeugt. Daher ist ihre chemische Zusammensetzung annähernd identisch. Der SiO₂-Gehalt liegt zwischen 42,29 und 47,0 %, der CaO-Gehalt bewegt sich zwischen 19,46 und 22,17 %. Doch die Ergebnisse der Würfel mit Mischungen aus TFA und TBA zeigten, dass sich beide in ihren Eigenschaften unterscheiden. Die Festigkeitsergebnisse dieser speziellen Mischung waren nicht überzeugend.

Zudem erreichten TFA-Blöcke mit Zugabe von 10 % PC eine hohe Festigkeit von 91,92 kN, während TFA-Blöcke ohne PC nur eine Festigkeit von 28,92 kN und 45,35 kN erreichten.

Die meisten Mischungen, in denen Portland-Zement als Bindemittel verwendet wurde, erfüllten die Anforderungen. Andererseits erfüllten manche Mischungen mit CCBs als Bindemittel die Anforderungen nicht. Einige CCBs wiesen einen optimalen

As a duty Portland cement should be used to improve the usability of bottom ashes. A recommendation as a derivation from the research results should be to add 10 % of cement to every CCB for increasing the strength into a safe range. The addition of 10 % PC to the CCB's in the tests has led to the creation of blocks having strengths of at least 3,53 kN which is higher than the minimum requirement of 3 kN.

TFA can always be mixed with any other bottom ash or industrial waste because TFA alone can gain strengths more than required. But the experiments with those mixtures have shown that the TFA part should be clearly more than 10 % to execute a safe backfilling, otherwise the blocks have been disintegrated.

The expectation that Darkhan slag can be an excellent binder has not been confirmed already at sample preparation stage. As the slag is derived from molten metals, it is hard like metal. To crush and grind it, the GMIT equipment has been proofed seriously. Although DS has a high content of CaO and SiO₂ these compounds are bound into the DS structure in a way that no pozzolanic reaction could be registered. Darkhan slag can be used as aggregate materials to replace natural fine and coarse minerals in backfilling.

One result is that fly ash has been turned out as a potentially backfilling material for reclamation of abandoned small scale mine holes. The production of blocks containing 100 % TFA grout illustrated an outstanding strength nearly comparable to concrete.

In controversy to statements of some literature sources bottom ash has not been turned out as toxic. The elution and radiation tests defied that statement. In the BASMIC project no evident hazard to the environment has been detected by the usage of CCB's.

Prospectively the research team should apply for a subsequent project "BASMIC 2" to execute the laboratory results of BASMIC by carrying out backfilling tests with the tested mixtures in an exemplary abandoned small-scale coal mine of Nalaikh.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Strock, R. C.; Stehouwer, G. N.: Soil additives and soil amendments – Coal ash beneficial use in mine reclamation and mine drainage remediation in Pennsylvania, Harrisburg: Pennsylvania Department of Environmental Protection, 2004.
- (2) Parsons, E.: Coal ash ponds – The Romeo and Juliet story of coal fired power plants. 2016.
- (3) Raihan, N. I.; Hannan, R.; Shahidan, S.; Noorwirdawati, A.; Maaroi, M. Z.: A comprehensive review on the properties of coal bottom ash in concrete as sound absorption material. International Symposium on Civil and Environmental Engineering 2016 (ISCEE), 2016.
- (4) Raihan, N. I.; Hannan, R.; Shahidan, S.; Noorwirdawati, A.; Maaroi, M. Z.: Physical and chemical properties of coal bottom ash from Tanjung Bin power plant. Nurul Izzati, 2016, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 160 012056.
- (5) Hadbaatar, H.; Mashkin, N. A.; Stenina, N. G.: Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction. The Nowosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, 2016.

CaO- und SiO₂-Gehalt auf. Die FT-IR-Analyse zeigte, dass in ausgewogenen Mischungen eine puzzolanische Reaktion stattfand. Portland-Zement sollte verwendet werden, um die Brauchbarkeit der Schlacke zu erhöhen. Aufgrund der Forschungsergebnisse wird eine Zugabe von 10 % Zement zu jedem CCB empfohlen, um die Festigkeit auf ein sicheres Niveau zu bringen. Die Zugabe von 10 % PC zu den CCB, führte zur Herstellung von Blöcken mit einer Festigkeit von mindestens 3,53 kN, was die Mindestanforderung von 3 kN übertrifft.

Da TFA allein mehr als die benötigte Festigkeit erzeugt, kann sie mit jeder anderen Schlacke und anderem Industrieabfall vermischt werden. Die Experimente mit diesen Mischungen zeigten jedoch, dass der TFA-Anteil darin bei > 10 % liegen sollte, um ein sicheres Verfüllen zu garantieren, andernfalls lösen sich die Würfel auf.

Die Annahme, Darkhan-Schlacke könne als ausgezeichnetes Bindemittel agieren, wurde bereits im Stadium der Probeentnahme widerlegt. Da die Schlacke aus geschmolzenem Metall stammt, ist sie hart wie Metall. Die Geräte der DMHT konnten sie nur schwer zerkleinern und zermahlen. Obwohl DS einen hohen CaO- und SiO₂-Gehalt hat, sind diese Bestandteile auf eine Art in die Struktur eingebunden, die keine puzzolanischen Reaktionen erlaubt. Darkhan-Schlacke kann als Zuschlagstoff verwendet werden, um beim Verfüllen natürliche feine und grobe Mineralien zu ersetzen.

Ein weiteres Ergebnis ist die Eignung von Flugasche zur Verwendung als Versatzmaterial für die Sicherung von Kleinstbergwerken. Die Herstellung der Würfel, die 100 % TFA-Mörtel enthalten, zeigten eine herausragende Festigkeit, ansatzweise vergleichbar mit der von Beton.

Im Gegensatz zu einigen Aussagen in fachliterarischen Quellen, stellte sich Schlacke nicht als giftig heraus. Die Auswaschungstests und Strahlungsmessungen widerlegten diese Aussagen. Das BASMIC-Projekt konnte keine von der Nutzung der CCBs ausgehende Gefahr nachweisen.

Das Forschungsteam sollte ein nachfolgendes Projekt „BASMIC 2“ anmelden, um die Laborergebnisse von BASMIC in Untersuchungen mit den getesteten Mischungen in einem verlassenen Kleinstkohlebergwerk in Nalaikh anzuwenden.

- (6) Chugh, Y. P.; Biswas, Deb, D.: Underground placement of coal processing waste and coal combustion by-products based paste backfill for enhanced mining economics – Final report. Department of Mining and Mineral Resources Engineering, Southern Illinois University-Carbondale (SIUC), 2002.
- (7) Schmücking, R.: Bergbau in der Mongolei – Alles ist möglich. In: Mining Report Glückauf 152 (2016) Heft 1, S. 51–59.

Authors / Autoren

Dr.-Ing. Peter Vossen, EUROQUARZ GmbH, Dorsten/Germany, Temuulen Purevdorj B. Sc., Baasandorj Myagmarsuren B.Sc. and Khangai Gerelsukh B.Sc., German-Mongolian Institute for Resources and Technology (GMIT), Ulaanbataar/Mongolia