

From Mining Waste to Load-Bearing Support Material

Underground stowing material has to meet all kinds of divergent requirements. From an economic viewpoint the overall costs should be kept as low as possible, while from a stowing point of view the material as a load-bearing element often has to satisfy very high standards. Moreover, the preference is generally to use discard from the colliery itself, as this will reduce the cost associated with tipping and/or disposal.

The transition from residual waste to load-bearing support material is a complex process that combines support engineering, material technology and process-related elements. These individual aspects will be described in detail in order to explain the basic approach used and to highlight the interdependent nature of the factors involved. The development process is presented using the example of a pumpable, residue-based backfill intended for a pot-ash mine.

The first task in the project to develop a suitable backfill was to define the load-bearing specifications of the material, this being followed by a study to ascertain the boundary conditions and technical options present at the deployment site. A basic concept can then be drawn up once all the various parameters have been identified and established.

The concept is based around a multi-layered consideration of many different criteria, which is needed in order to assess the fea-

sibility of the often complex requirements involved. Preliminary investigations into the available residues, such as saline deposits, slag and ash, serve as a basis for an initial evaluation of the technological properties of these materials. This will be used to plan targeted laboratory tests aimed at creating a suitable stowing product and possibly also to include the intermediate steps – preparation, classification and grinding/crushing – and carry out a technical and economic assessment of these processes.

On the basis of standardised methods adopted in accordance with the appropriate rules, and with the aid of self-developed test procedures relating, e.g., to flowability (rheology), curing behaviour and final strength, a suitable stowing material can then be identified in the laboratory as part of an iterative process. A broad range of experience is needed in this area in order to be able to assess the interdependencies and the way in which parameter changes will affect the end result. Data obtained empirically during practical application will be a crucial factor in achieving effective solutions. Over the years this approach has been used by technical projects at both national and international level for the successful development of stowing materials of all kinds.

This paper was presented by the author at the 3rd International Freiberg Symposium “Construction Materials and Backfill in Mining”, which was held on 5th October 2017.

Vom Reststoff zum tragfähigen Ausbaumittel

Versatzmaterial unter Tage hat vielfach widersprüchlichen Anforderungen zu entsprechen. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht sollen die Gesamtkosten möglichst gering gehalten werden. Unter dem Gesichtspunkt Versatz als tragendes Ausbaumittel einzusetzen, wird häufig ein qualitativ höherwertiger Baustoff gefordert. Zusätzlich wird die Verwendung bergwerkseigener Reststoffe bevorzugt, um Kosten für Aufhaltung oder Entsorgung zu minimieren. Die Metamorphose vom Reststoff zum tragfähigen Ausbaumittel ist ein komplexer Vorgang, der ausbautechnische, baustofftechnologische und verfahrenstechnische Elemente verknüpft. Diese Einzelaspekte werden näher erläutert, um die grundsätzliche Herangehensweise zu verdeutlichen und deren Abhängigkeit aufzuzeigen. Am Beispiel eines pumpbaren Versatzmaterials aus Reststoffen für ein Kalibergwerk wird der Entwicklungsprozess vorgestellt.

Zu Beginn eines Projekts zur Entwicklung eines Versatzbaustoffs steht an erster Stelle die Definition der Tragfähigkeitsanforderungen an den Versatzstoff. Es schließt sich die Erfassung der Randbedingungen und der technischen Möglichkeiten am jeweiligen Einsatzort an. Nach Festlegung bzw. Ermittlung der Parameter wird ein Basiskonzept erarbeitet.

Das Konzept entsteht aus vielschichtigen Betrachtungen zahlreicher Kriterien, um die Realisierbarkeit der oftmals komplexen

Anforderungen zu überprüfen. Voruntersuchungen an verfügbaren Reststoffen wie etwa Abraumsalz, Schlacken oder Aschen dienen einer ersten Einschätzung der baustofftechnologischen Eigenschaften der Materialien. Diese wiederum dienen dazu, zielgerichtete Laboruntersuchungen zur Kreation der Versatzstoffmischung zu planen und eventuell erforderliche Zwischenschritte – aufbereiten, klassieren, mahlen – einzubeziehen und diese sowohl technisch als auch wirtschaftlich zu bewerten.

Auf Basis genormter, dem einschlägigen Regelwerk entsprechenden Verfahren, aber auch mithilfe selbst entwickelter Testverfahren, u. a. zur Fließfähigkeit (Rheologie), zum Aushärteverhalten und zur Endfestigkeit, wird im Labor meist in iterativen Schleifen die passende Versatzstoffmischung ermittelt. Ein breiter Erfahrungsschatz ist erforderlich, um die wechselseitigen Abhängigkeiten bei der Veränderung der Parameter auf das Endergebnis einschätzen zu können. In der Betriebs- und Anwendungspraxis empirisch gewonnene Erkenntnisse tragen maßgeblich zur Erreichung effizienter Lösungen bei. Mit dieser Verfahrensweise wurden in der Vergangenheit zahlreiche Versatzstoffe im Rahmen nationaler und internationaler Projekte erarbeitet.

Der Beitrag wurde vom Verfasser auf dem 3. Internationalen Freiburger Fachkolloquium „Baustoffe und Versatz“ am 5. Oktober 2017 in Freiberg gehalten.

Introduction

Underground mining operations generally result in large quantities of residual material being produced along with the target mineral. This material is in the form of processing residue of different kinds and will vary according to the type of mineral being mined, its concentration and the characteristics of the surrounding rock. There will also be quantities of waste of no mineral value that are generated for example during the excavation of mine cavities and roadways. This mining waste will come in different forms, from large-sized to finely crushed material, depending on the scope of the downstream preparation facilities. As a general rule this residue – which is considered superficially as worthless – is simply tipped on to waste dumps and the many spoil heaps dotted around the Ruhr countryside, along with the huge mounds of waste salt to be seen in other parts of Germany, stand testimony to this long-standing practice. The systematic use of coal washery tailings is a niche solution and does not represent the standard approach. In the salt and potash mining industries, on the other hand, waste salt is often used for the filling and stabilisation of the underground workings and in order to preserve surface tipping capacity. Environment protection is now playing an increasing role when it comes to resource recycling in the salt and potash industries, the main aim here being to counteract the salinisation of streams and watercourses resulting from the infiltration of leachate from spoil heaps.

A different set of strata conditions can be found in the German ore mining industry where, in comparison with coal mining and salt and potash extraction, the quantities of mineral and residue produced were – and in some cases still are – generally smaller. This means that at least some of the processing waste can be employed as backfill for the underground workings, while it can also be used on a case-by-case basis in the building and road-construction sectors.

Backfill for underground mine workings

Residue material is often used as backfill in the underground mining industry and some winning methods cannot be used without a stowing operation in place.

The material can be stowed in a variety of ways and each placement technique has its own process-specific particularities with their typical advantages and drawbacks. One simple method involves the loose placement of granular material in a dry or wet condition. This operation is carried out by tipping, blowing or flushing the material without any additional work needed. Any post-treatment only involves mechanical backfilling and compaction by vehicle. Such a loose filling operation allows high throughputs to be achieved and is suitable for those areas where geomechanically-active, load-bearing fill is not required.

Supportive, load-bearing material has to meet various geomechanical requirements. These include loading capacity, strength development and a specified filling rate. Other criteria include transportable volume, absence of solubility and elutriation, limited forming behaviour and the restricted release of setting heat.

Slurry backfilling is a particularly challenging technique. In extremely simplified terms this involves mixing granular and powdered solids with a fluid to create a pumpable suspension.

Einleitung

Neben der Gewinnung von Rohstoffen fallen bei bergbaulichen Aktivitäten im Untertage-Bergbau große Mengen an Reststoffen an. Bei diesen Reststoffen handelt es sich um Aufbereitungsrückstände unterschiedlichster Natur, in Abhängigkeit vom abgebauten Wertmineral, dessen Konzentration und den Nebengesteinseigenschaften. Hinzu kommen Mengen, die beispielsweise aus der Auffahrung von Grubenräumen stammen und kein Wertmineral enthalten. Je nach Umfang weiterer Aufbereitungsprozesse liegen bergbauliche Reststoffe in kaum bis stark zerkleinerter Form vor. In der Regel werden diese – oberflächlich betrachtet wertlosen – Reststoffe zu flächenhaft ausgedehnten Halden aufgeschüttet. Die zahlreichen Bergehalden im Ruhrgebiet und die großen Halden aus Abraumsalz in anderen Teilen Deutschlands legen weithin sichtbare Zeugnisse hierüber ab. Die planmäßige Verwertung von Waschbergen aus der Steinkohlegewinnung stellt eine Nischenlösung dar und entspricht nicht der Regel. Im Salz- und Kalibergbau wird Abraumsalz dagegen zur Verfüllung von alten Abbauen zur Stabilisierung sowie zur Schonung von Haldenkapazitäten eingesetzt. Aspekte des Umweltschutzes spielen bei der Reststoffverwertung im Salz- und Kalibergbau eine zunehmende Rolle, um der Versalzung von Fließgewässern infolge der Einleitung von Halden-Sickerwässern entgegenzuwirken.

Im deutschen Erzbergbau, der im Vergleich zur Steinkohlegewinnung und zum Salz- und Kalibergbau tendenziell geringere Absolutmengen an Wertmineral und Reststoffen hervorgebracht hat und vereinzelt noch hervorbringt, liegen andere Nebengesteinsverhältnisse vor. Dies erlaubt eine zumindest teilweise Verwertung von Aufbereitungsrückständen im Grubengebäude. In Einzelfällen besteht hier die Möglichkeit der Verwertung im Bereich der Bauindustrie und des Verkehrswegebbaus.

Versatz im Tiefbau

Im Untertage-Bergbau werden Reststoffe häufig als Versatzmaterial eingesetzt. Bestimmte Abbaumethoden sind ohne Versatz nicht anwendbar.

Das Einbringen des Versatzes kann auf vielfältige Weise erfolgen. Jede Einbringtechnik trägt verfahrensspezifische Besonderheiten in sich mit typischen Vor- und Nachteilen. Eine einfache Versatzart stellt das lose Einbringen von körnigem Material in trockenem bis nassem Zustand dar. Das Einbringen erfolgt durch Abkippen, Einblasen oder Einspülen ohne wesentliche Nacharbeiten. Lediglich maschinelles Aufschütten und Verdichten durch Befahren sind Bestandteil einer Nachbearbeitung. Der lose Einbau von Versatz erlaubt hohe Durchsatzmengen und ist in Bereichen zweckmäßig, der ohne Anforderungen an gebirgsmechanisch wirksamen, sogenannten stützenden Versatz auskommt.

Stützender und damit tragfähiger Versatz muss gebirgsmechanische Anforderungen erfüllen können. Hierzu zählen etwa Tragfähigkeit, Festigkeitsentwicklung und ein erzielbarer Verfüllgrad. Weitere Kriterien sind förderbare Volumina, ausbleibende Löslichkeit und Eluierbarkeit, geringes Formänderungsverhalten sowie die Begrenzung freigesetzter Abbindewärme.

Ein besonders anspruchsvolles Versatzverfahren ist der sogenannte Dickstoffversatz. Stark vereinfacht werden hierbei körnige und pulverförmige Feststoffe mit einer Flüssigkeit zu einer pumpfähigen Suspension gemischt. Aufgrund des hohen techni-



Fig. 1. Flow test with a non-sedimenting stowing material.

Bild 1. Fließversuch mit einem sedimentationsstabilen Versatzbaustoff. Photo/Foto: DMT

Because of the high technical outlay needed for the preparation, delivery and placement of these dense-medium suspensions they are only employed when specific demands dictate. Such circumstances may be technological or regulatory in nature, but have more commonly to do with support engineering factors.

Slurry backfilling is by far the most cost- and know-how-intensive method of placing backfill material in underground cavities. In return, slurry backfill offers significant flexibility when it comes to strength potential, waste recycling and cavity filling ratio.

The development of the slurry backfill technique calls for a methodical approach with geomechanical, technological, economic and logistic aspects all closely interlinked in the process. At the start of any project to develop a stowing material it is not usually possible to guarantee that all the requirements will be met to the same degree. It is often the economic reasons that underlie the decision not to develop to operational maturity a process that has shown itself to be technically feasible.

The following sections will attempt to explain the methodical approach used to develop a dense-medium backfill based on waste material. The complexity of such a task is often underestimated. This applies not only to the ultimate application process but also, quite often, to the iterative development stages, commencing with an analysis of the baseline situation.

Slurry backfill

The best-known wet-mix material is concrete and the simplest composition formula for concrete is gravel, sand, cement and water. Gravel and sand are referred-to as aggregate and in standard concrete these are non-reactive substances. The binding medium (cement) reacts with water and sets hydraulically. In freshly mixed concrete the cement and water together form cement paste and this must be produced in such a way that it “supports” the aggregate and prevents it from settling to the bottom (Figure 1).

The density of the cement is of particular advantage here, as this creates a relatively high-density suspension. The denser the suspension, the greater will be its “carrying capacity” for solid particles such as mineral granulate.

The flow characteristics of slurries are mainly determined by the amount of stable suspension they contain. While an excess of mixing liquid will obviously reduce the friction between the grains, it will also reduce the density, and hence the carrying capacity, of the mixture. As well as having a tendency for the liquid

schen Aufwands für das Bereitstellen, Fördern und Einbauen von Dickstoffsuspensionen, werden diese nur aufgrund spezifischer Erfordernisse eingesetzt. Dies können technologische, regulatorische aber insbesondere auch ausbautechnische Gründe sein.

Dickstoffversatz ist die mit Abstand kosten- und Know-how-intensivste Art und Weise, Versatzmaterial in untertägige Hohlräume einzubringen. Im Gegenzug bietet der Dickstoffversatz eine große Flexibilität in Bezug auf Merkmale wie Festigkeitspotential, Reststoffverwertung und Füllungsgrad von untertägigen Hohlräumen.

Die Entwicklung von Dickstoffversatz erfordert ein methodisches Vorgehen, bei dem gebirgsmechanische, baustofftechnologische, wirtschaftliche und logistische Aspekte eng miteinander verknüpft sind. Zu Beginn eines Projekts für die Entwicklung von Versatzbaustoff kann meist nicht garantiert werden, dass alle Erfordernisse gleich gut erfüllt werden können. Nicht selten sind es wirtschaftliche Gründe, die dafür sorgen, dass ein technologisch zwar durchführbares Verfahren nicht bis zur Betriebsreife umgesetzt wird.

In den folgenden Abschnitten wird die methodische Vorgehensweise zur Entwicklung eines Dickstoffversatzes aus Reststoffen erläutert. Die Komplexität einer solchen Aufgabenstellung wird häufig unterschätzt. Dies gilt nicht nur für die spätere Umsetzung, sondern häufig auch bereits für die iterativen Entwicklungsschritte, beginnend mit der Analyse der Ausgangssituation.

Dickstoffversatz

Der bekannteste Baustoff in Form eines Dickstoffs ist Beton. Die einfachste Zusammensetzung von Beton besteht aus Kies, Sand, Zement und Wasser. Kies und Sand werden als Gesteinskörnung bezeichnet und sind in Normalbeton nicht-reaktive Stoffe. Zement als Bindemittel reagiert mit Wasser und erhärtet hydraulisch. Im Frischbeton bildet der Zement mit dem Wasser den Zementleim, der so beschaffen sein muss, dass die Gesteinskörnung von ihm „getragen“ wird, damit diese nicht sedimentiert (Bild 1).

Als vorteilhaft erweist sich hier die hohe Dichte von Zement, sodass die Suspensionsdichten relativ hoch sind. Je höher die Dichte einer Suspension, umso größer ist das „Tragvermögen“ für feste Partikel, wie mineralische Körnungen.

Die Fließeigenschaften von Dickstoffen werden maßgeblich durch den Anteil an tragfähiger Suspension bestimmt. Ein Überschuss an Anmachflüssigkeit reduziert zwar die Reibung zwi-

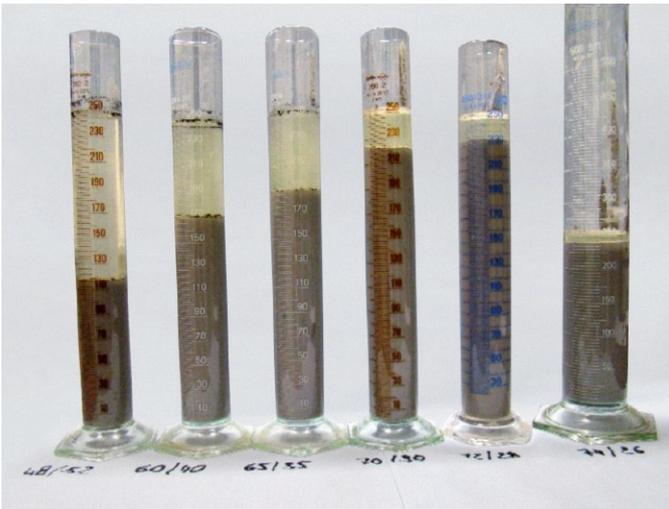


Fig. 2. Settling rate for suspensions of different composition.
Bild 2. Absetzmaß von Suspensionen unterschiedlicher Zusammensetzung. Photo/Foto: DMT



Fig. 3. Filter cake from a building material.
Bild 3. Filterkuchen eines Baustoffs. Photo/Foto: DMT

to separate out, or “bleed” (Figure 2), such mixtures will easily release their fluid during pumping and this will leave a filter cake of solid particles in the pipeline (Figure 3).

These fundamental physical properties have to be taken into consideration when developing slurry backfill. Other factors include the chemical interactions that are likely to be produced by mineralised mixing fluid and reactive aggregate or additives.

The development effort required for a stable slurry backfill will be presented and described below using an actual case study. This particular example was selected because it effectively represents the complexity of a task of this kind.

Initial situation

For environmental reasons, and due to geomechanical requirements, waste salt from a spoil heap is to be used as a raw-material base for a pumpable backfill. The aim of the project is to recycle as much of the waste salt as possible. Other potentially suitable materials (Figure 4) include coarse-sized boiler slag and quartz sand. Saturated salt solution had to be used as the mixing liquid. The choice of a suitable binder was dependent on regional availability.



Fig. 4. Crushed aggregate.
Bild 4. Gebrochene Gesteinskörnung. Photo/Foto: DMT

schen den Körnungen, gleichzeitig sinkt jedoch die Dichte und damit die Tragfähigkeit. Neben der Neigung zum Absondern von Flüssigkeit, dem sogenannten Bluten (Bild 2), wird beim Pumpen derartiger Mischungen leicht Flüssigkeit ausgepresst und es verbleibt ein Filterkuchen von festen Körnern in der Rohrleitung (Bild 3).

Diese grundlegenden physikalischen Eigenschaften sind bei der Entwicklung von Dickstoffen zu berücksichtigen. Weitere Aspekte sind chemische Wechselwirkungen, die bei mineralisierten Anmachflüssigkeiten, reaktiver Gesteinskörnung oder Zusatzstoffen zu erwarten sind.

Anhand eines Fallbeispiels soll der Entwicklungsaufwand für einen tragfähigen Dickstoffversatz erläutert und beschrieben werden. Das Beispiel wurde so ausgewählt, dass es die Komplexität der Aufgabenstellung weitreichend repräsentiert.

Ausgangslage

Aus Gründen des Umweltschutzes sowie wegen gebirgsmechanischer Erfordernisse soll aufgehaldetes Abraumsalz als Rohstoffbasis für einen pumpbaren Versatzbaustoff verwendet werden. Ziel ist es, möglichst große Mengen an Abraumsalz zu verwerten. Es stehen weitere potentiell geeignete Rohstoffe (Bild 4) zur Verfügung, wie etwa stückige Kesselschlacke und Quarzsand. Als Anmachflüssigkeit muss gesättigte Salzlösung verwendet werden. Die Auswahl eines geeigneten Bindemittels ist von der regionalen Verfügbarkeit abhängig.

Der aus den verfügbaren Rohstoffen zu entwickelnde Versatzbaustoff soll über Tage angemischt werden und über eine Rohrleitung bis zum Verarbeitungspunkt gepumpt werden können. Neben der Versatzleistung (Volumenstrom) sind hier insbesondere Rohrdurchmesser und Leitungslängen relevant. Die rheologischen Eigenschaften des zu entwickelnden Dickstoffversatzes sind entweder auf ein vorgegebenes System abzustimmen oder umgekehrt. Dem sind jedoch Grenzen gesetzt. Druckverluste in Rohrleitungen werden durch die Fließeigenschaften des Dickstoffversatzes bestimmt. Vereinfacht ausgedrückt kann ein Dickstoffversatz mit hohem Fließwiderstand nur über geringere Entfernungen gepumpt werden als Baustoff mit niedrigem Fließwiderstand. Die Förderbarkeit hängt zudem noch von weiteren Faktoren wie Rohrlitungsdurchmesser, Höhendifferenzen und dem Volumenstrom ab.

The backfill to be developed from the available waste materials was to be mixed above ground and then pipelined to the underground placement site. Factors of relevance here include not just the stowing performance (volume flow) but also the pipe diameter and the pumping distances. The rheological properties of the proposed slurry backfill either have to be adjusted to suit a pre-given system, or vice versa. However there are limits to this. Pressure losses in pipelines are determined by the flow characteristics of the slurry. Put simply, a slurry backfill with a high flow resistance cannot be pumped over as great a distance as a material with a low resistance to flow. The pumping capacity will also depend on other factors such as pipeline diameter, height differences and volume flow.

At the placement point the material should be self-spreading over the backfill zone and should set with minimal generation of heat.

Raw materials

The mineralogy of the material, and this applies especially in the case of salt waste, has to be borne in mind during the early stages of the development process. This will depend on the nature of the deposits, which will generally be heterogeneous in structure. This means that the mineralogy and hence the chemical reactivity can change, a factor that will later have a significant influence on the properties of the fill material. The choice of binder, if such is required, must be coordinated with the reactivity of the other constituents.

Clean water cannot be used as a mixing fluid in conjunction with salts as the latter can become dissolved in the water to saturation level. In this case the finest particles are removed from the salt, or aggregate, as these are dissolved first. These fine particles are crucial for the sedimentation stability of a suspension as they form the paste that supports the granules.

A subsequent stage in the investigations involved an examination of the particle size distribution of the solids. This was undertaken using screen analyses of representative samples. The grain size and distribution largely determine the quantity of suspension paste required and also influence the flow characteristics of the material.

Leaching reactions mean that the waste salt contains practically no finest-grained material (fines). The powder-fine particle content, which is an essential constituent, therefore has to be added either in the form of reactive or inert components, or by way of pulverised binding media. As binding media are, in relative terms, the most expensive ingredients in the material, it can be advantageous to supply the need for the fines fraction by other methods. This could involve the use of suitable coal combustion residuals from power stations. The use of inexpensive power-station byproducts such as boiler slag, which can be prepared by crushing and grinding, could potentially be a technically and economically feasible option in this case (Figure 5).

If a screen analysis of the aggregate indicates that certain grain sizes are absent, these can be supplemented at least to some degree. Here it is generally of an advantage to have access to as comprehensive a range of raw materials as possible. However, in reality the scope for this is usually fairly limited.



Fig. 5. Ground aggregate.

Bild 5. Gemahlene Gesteinskörnung. Photo/Foto: DMT

Am Einbauort soll sich der Dickstoffversatz möglichst selbsttätig im zu versetzenden Bereich verteilen und ohne nennenswerte Wärmeentwicklung erhärten.

Rohstoffe

Insbesondere bei Abraum Salz ist dessen Mineralogie in den ersten Entwicklungsschritten zu berücksichtigen. Diese ist abhängig von der Lagerstätte, die in der Regel zudem inhomogen aufgebaut ist. Dies bedeutet, dass sich die Mineralogie und damit die chemische Reaktivität verändern kann, was entscheidenden Einfluss auf die späteren Versatzeigenschaften hat. Die Auswahl des Bindemittels, sofern dies erforderlich ist, muss auf die Reaktivität der übrigen Bestandteile abgestimmt werden.

Die Verwendung von Frischwasser als Anmachflüssigkeit ist in Verbindung mit Salzen kaum möglich, da Salze bis zum Sättigungsgrad im Frischwasser gelöst werden können. Hierbei werden dem Salz, hier der Gesteinskörnung, die Feinstanteile entzogen, da diese zuerst gelöst werden. Die Feinstanteile sind für die Sedimentationsstabilität einer Suspension von maßgeblicher Bedeutung, da diese den korntragenden Suspensionsleim bilden.

In einem weiteren Untersuchungsschritt wird die Kornverteilung der festen Rohstoffe untersucht. Hierzu dienen Siebanalysen repräsentativer Proben. Korngröße und Kornverteilung der Ausgangsstoffe bestimmen ebenfalls maßgeblich den Bedarf an Suspensionsleim. Zudem werden die Fließeigenschaften hierdurch mit geprägt.

Abraum Salz enthält aufgrund von Auslaugungsprozessen so gut wie kein Feinstkorn (Mehlkorn). Daher ist der unabdingbare Feinstkornanteil entweder über reaktive oder inerte Rohstoffkomponenten oder über pulverförmige Bindemittel beizusteuern. Da Bindemittel in der Regel relativ betrachtet die teuersten Bestandteile eines Baustoffs sind, kann es zielführend sein, den Bedarf an Feinstkornanteil über andere Wege zu decken. Dies können geeignete Kraftwerksrückstände sein. Unter Umständen ist eine Aufbereitung preisgünstiger Kraftwerksnebenprodukte wie Kesselschlacke durch Brech- und Mahlprozesse technisch und wirtschaftlich umsetzbar (Bild 5).

Stellt sich bei Siebungen der Gesteinskörnungen heraus, dass bestimmte Kornanteile fehlen, so können diese zumindest teilweise ergänzt werden. Hierbei ist es vorteilhaft, auf eine möglichst umfangreiche Palette verfügbarer Rohstoffe zurückgreifen

Development stages

In view of the fact that the mineralogical background of raw materials of this kind is often unknown, laboratory tests have to be carried out to assess the mutual compatibility of the preselected components. This can be done, for example, using small-scale hand mixer tests. Seeing and feeling are key human senses at this stage of the investigation and these can provide a useful preliminary evaluation of flow properties and heat development. Such an approach allows an experienced engineer to reject the impracticable samples right at the outset without the need for expensive laboratory tests.

When a saturated saline solution of unknown mineralogy is being used, indicative mixing tests are carried out with the binding media available at the deployment site. There are often limitations to the availability of certain binders, especially in regions outside Europe. The mixing tests are quickly able to identify whether certain binding media such as cement and calcareous substances react with the minerals in the salt solution. Magnesium compounds in particular have a capacity to accelerate the solidification process. Variations in the binder content provide further information in respect of reaction speed so that under certain conditions it is possible to determine the potential suitability of a particular binding medium.

In the case in question the substances tested were cement, quicklime and white hydrated lime. However, not one of the many tests carried out produced a useable result. Misleading information from the client in respect of the usability of quicklime resulted in incorrect assumptions as to the suitability of this binding medium.

Further binding media were tested in the course of the test programme, including magnesium oxide (MgO). By using MgO as a binder in combination with saturated saline solution it was possible to produce a suspension that in technical terms was suitable for the proposed project. From an economic viewpoint it was necessary to reduce the MgO content to an absolute minimum. In order to achieve this, coarse-sized boiler slag was ground down and included in the composition in order to increase the fines content. By this means it was possible to replace a proportion of the binding medium.

The particle size distribution of the waste salt proved to be inadequate and in order to improve the distribution curve the quartz sand provided by the client was added to the mixture.

All previous assessments were based on subjective figures drawn from empirical values and accompanying laboratory tests.

The aforementioned process steps were then followed by mixing trials with larger batches of material, this involving standardised laboratory testing. The latter primarily comprised tests on flowability (trough test), setting behaviour and strength development. Investigations were also carried out using the pipe viscometer developed by DMT GmbH & Co. KG, Essen/Germany, (Figure 6) in order to obtain qualified information on the pumpability of the material in pipelines.

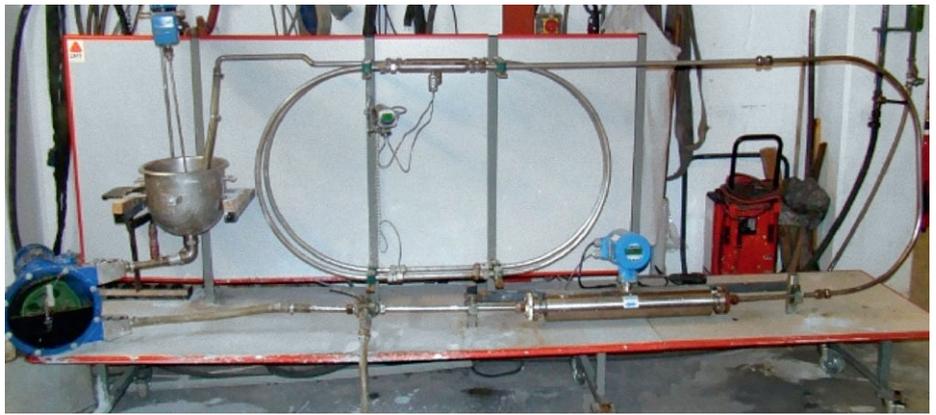


Fig. 6. The DMT pipe viscometer system.

Bild 6. Rohrviskosimeter-Messsystem der DMT. Photo/Foto: DMT

zu können. In der Realität ist dies jedoch oftmals nur sehr stark eingeschränkt möglich.

Entwicklungsschritte

Unter Berücksichtigung der häufig unbekannt Mineralogie von Reststoffen ist im Labor die Verträglichkeit der vorausgewählten Komponenten untereinander zu testen. Dies kann beispielsweise in kleinmaßstäbigen Hand-Mischversuchen erfolgen. In dieser Phase sind Sehen und Fühlen entscheidende menschliche Sinne, die erste Beurteilungen über Fließigenschaften und Wärmeentwicklung ermöglichen. Ohne aufwändige Laborprüfungen kann der erfahrene Ingenieur so schnell und frühzeitig nicht praktikable Ansätze verwerfen.

Im Fall des Einsatzes von gesättigter Salzlösung unbekannter Mineralogie werden orientierende Mischversuche mit am Einsatzort verfügbaren Bindemitteln vorgenommen. Insbesondere im außereuropäischen Ausland sind der Verfügbarkeit bestimmter Bindemittel Grenzen gesetzt. Bei den Mischversuchen stellt sich schnell heraus, ob bestimmte Bindemittel wie Zemente oder kalkhaltige Stoffe, mit den Mineralien der Salzlösung reagieren. Insbesondere Magnesiumverbindungen können hier erstarrungsbeschleunigend wirken. Variationen des Bindemittelgehalts liefern weitere Erkenntnisse in Bezug auf die Reaktionsgeschwindigkeit, sodass unter bestimmten Voraussetzungen dennoch eine potentielle Eignung für ein Bindemittel ermittelt werden kann.

Im Fallbeispiel wurden Zement, Branntkalk und Weißkalkhydrat erprobt, was jedoch in keinem der zahlreichen Versuche zu einem verwertbaren Ergebnis geführt hat. Irreführende Informationen seitens des Auftraggebers in Bezug auf die Verwertbarkeit von Branntkalk führten zu fehlerhaften Annahmen zur Eignung dieses Bindemittels.

In weiteren Versuchen wurden weitere Bindemittel erprobt, zuletzt Magnesiumoxid (MgO). Mit MgO als Bindemittel und gesättigter Salzlösung konnte eine Suspension hergestellt werden, die technisch für das Vorhaben geeignet war. Aus wirtschaftlicher Sicht war es erforderlich, den Gehalt an MgO auf das technisch erforderliche Minimum zu reduzieren. Um dies zu erreichen, wurde stückige Kesselschlacke aufgemahlen und zur Erhöhung des Feinstkornanteils in die Rezeptur integriert. Hierdurch konnte ein Teil des Bindemittels substituiert werden.

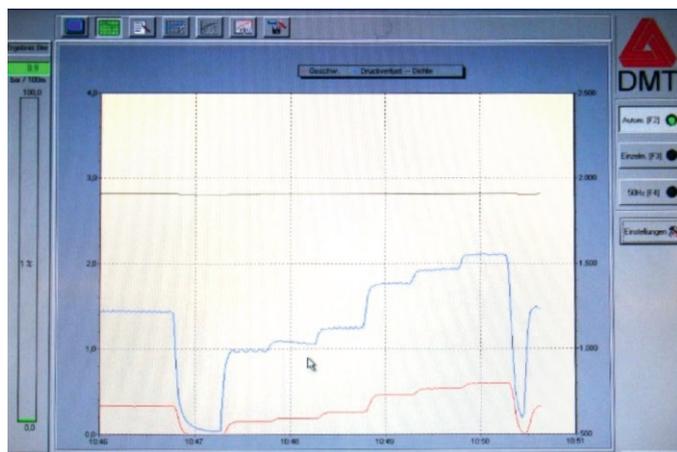


Fig. 7. Pressure-loss curves.

Bild 7. Druckverlustkurven. Photo/Foto: DMT

This system allows fine-grained material to be pumped continuously around a circuit with the flow behaviour permanently displayed at different flow speeds. The system is program-controlled and automated. As a result, pressure-loss curves (Figure 7) are generated that can be used to calculate the conveying distance as a function of the pipe diameter.

This development stage is also an iterative process that is carried forward in conjunction with the chemical-physical-technical investigations. During this phase of the development work only a few minor modifications are usually needed to the formulation. In a few rare cases, when taking measurements with the pipe viscometer, phenomena can arise that lead, e.g., to an unexpected setting of the slurry material. When such a point is reached it may in some cases be necessary to make a major adjustment to the formulation because interactions not previously observed will have taken place between the components. These can take the form of temperature-related or mechanical changes to the material properties that may have been triggered by the pumping process.

Developing a strength-forming slurry backfill material requires considerable experience and the application of human senses, especially a trained eye and tactile perception. The potential suitability of a concept formulation will very much depend on the subjective insight of the engineer in charge. Standardised laboratory tests support the development and provide key parameters along the way. The "trial and error" principle is especially valid here.

Conclusions

With the support of complex laboratory techniques such as the pipe viscometer system it is possible to establish key parameters for practical applications. Formulations can be developed much more quickly this way. Under ideal circumstances the laboratory tests will be followed by full-scale field trials aimed at verifying the practical viability of the backfill formulations that have been developed.

Author / Autor

Dipl.-Ing. Bernd Pflüger, Head of Testing Institute for Concrete, DMT GmbH & Co. KG, Essen/Germany

Die Kornverteilung des Abraumsalzes hatte sich als wenig geeignet herausgestellt. Zur Verbesserung der Sieblinie wurde der vom Auftraggeber bereitgestellte Quarzsand hinzugemischt.

Alle bisherigen Beurteilungen wurden auf der Basis von subjektiven Einschätzungen anhand von Erfahrungswerten sowie begleitenden Laborprüfungen vorgenommen.

An die bis hierher durchgeführten Arbeitsschritte schlossen sich Mischversuche in größeren Chargen an, an denen standardisierte Laborprüfungen vorgenommen wurden. Hierzu zählten insbesondere Prüfungen der Fließfähigkeit (Fließrinne), des Erstarrungsverhaltens und der Festigkeitsentwicklung. Für eine qualifizierte Aussage über die Förderbarkeit in Rohrleitungen wurden Untersuchungen mit dem Rohrviskosimeter-Messsystem (RMS) der DMT GmbH & Co. KG, Essen, durchgeführt (Bild 6).

Dieses System ermöglicht das kontinuierliche Fördern von feinkörnigen Baustoffen in einem Kreislauf mit permanenter Aufzeichnung des Fließverhaltens bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten. Das System ist programmgesteuert und automatisiert. Im Ergebnis werden Druckverlustkurven (Bild 7) als Ausgabe erstellt, die eine Berechnung der Förderweite in Abhängigkeit des Leistungsdurchmessers ermöglichen.

Auch dieser Entwicklungsschritt ist ein iterativer Vorgang, der im Zusammenhang mit den chemisch-physikalisch-technischen Voruntersuchungen fortgesetzt wird. In der Regel sind in dieser Entwicklungsphase nur noch geringfügige Änderungen an der Rezeptur erforderlich. In seltenen Fällen kann es beim Messen mit dem RMS zu Phänomenen kommen, die beispielsweise zu einem unvorhergesehenen Erstarren des Dickstoffversatzes führen. An einem solchen Punkt muss unter Umständen eine gravierende Rezepturanpassung vorgenommen werden, weil bislang nicht beobachtete Wechselwirkungen der Komponenten aufgetreten sind. Dies können temperaturbedingte oder mechanische Veränderungen der Materialeigenschaften sein, die durch den Pumpvorgang hervorgerufen worden sein können.

Die Entwicklung von festigkeitsbildendem Dickstoffversatz erfordert viel Erfahrung und den Gebrauch der menschlichen Sinne, insbesondere das geschulte Auge und den Tastsinn. Die potentielle Eignung eines Rezepturentwurfs hängt viel von der subjektiven Wahrnehmung des Ingenieurs ab. Standardisierte Labortests unterstützen die Entwicklung und liefern wichtige Kennwerte auf dem Entwicklungsweg. Die Anwendung des „Trial and Error“-Prinzips trifft hier ganz besonders zu.

Fazit

Mit der Unterstützung komplexer Labortechnik wie dem RMS lassen sich wichtige Parameter für die baupraktische Anwendung ermitteln. Auf diesem Weg können Rezepturentwicklungen deutlich beschleunigt werden. Im Idealfall schließen sich an die abgeschlossenen Laborprüfungen großmaßstäbliche Feldversuche an, um die Praxistauglichkeit der entwickelten Rezepturen für Dickstoffversatz nachzuweisen.