

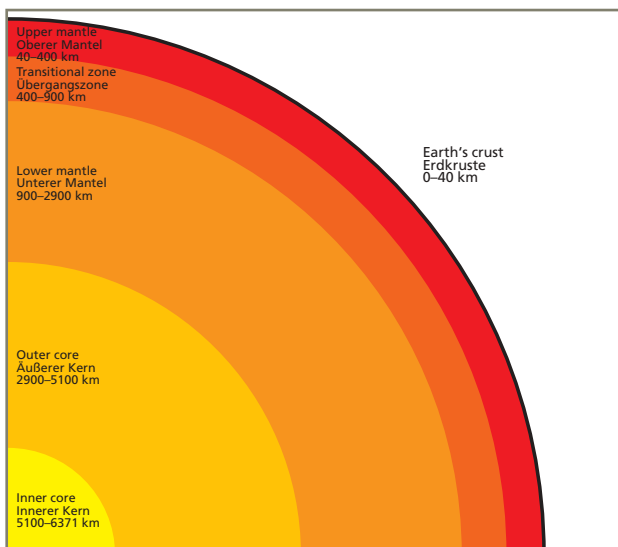
# Additives for the Production of Heavy Bricks – a Holistic Integrated Approach and Practical Results

## Zusatzstoffe für die Herstellung schwerer Ziegel – ganzheitlicher Ansatz und praktische Resultate

The use of heavy and load-bearing bricks is becoming increasingly important. To increase the density of the brick body, mainly crushed igneous sands are used as additives, although the efficiency of these additives varies widely. Recent study findings reveal new perspectives. In this context, the wide geological potential of natural additives is compared to selected industrial waste materials. It is shown that body density can be increased most effectively with iron oxide sludges and additives rich in heavy spar (baryte). With regard to the naturally occurring raw materials, the best results are obtained with basic volcanites.

### 1 Holistic geological approach

Thanks to ground-breaking geophysical studies at the beginning of the last century, we are now certain about how the earth's shell is structured. The individual layers of the shell are separated from each other by seismic discontinuities within the structure of the earth. Such discontinuities can be identified from clear jumps in the decay curves of earthquake waves, a basic differentiation being made between P waves (longitudinal waves; waves in the direction of propagation) and S waves (transversal waves; waves vibrating perpendicular to the direction of propagation). The most distinct discontinuities indicate a division of the earth's structure into three



»1 Schematic of the earth's structure  
»1 Schematischer Aufbau der Erde

Dem Einsatz schwerer und tragfähiger Ziegel kommt aktuell eine stark steigende Bedeutung zu. Um die Scherbenrohddichte des Ziegels zu erhöhen, werden bis dato vor allem magmatische Brechsande als Zusätze verwendet, wobei die Effizienz dieser Zusatzstoffe sehr unterschiedlich ist. Aktuelle Untersuchungsergebnisse zeigen neue Perspektiven auf. Dabei wird das breite geologische Potenzial an natürlichen Zusatzstoffen ausgewählten industriellen Reststoffen gegenübergestellt. Im Ergebnis hat sich gezeigt, dass sich die Scherbenrohddichte am wirkungsvollsten mit Eisenoxidschlämmen und schwerspatreichen Zusätzen erhöhen lässt. Bei natürlichen Rohstoffen werden die besten Ergebnisse mit basischen Vulkaniten erzielt.

### 1 Ganzheitlicher geologischer Ansatz

Durch bahnbrechende geophysikalische Untersuchungen zu Beginn des letzten Jahrhunderts gilt der Schalenbau der Erde als gesichert. Die einzelnen Schalen werden dabei durch seismische Diskontinuitäten innerhalb des Erdkörpers voneinander abgegrenzt. Solche Diskontinuitäten sind kenntlich an deutlichen Sprüngen der Laufzeitkurven von Erdbebenwellen, wobei grundsätzlich zwischen P-Wellen (Longitudinalwellen; Wellen schwingen in Fortpflanzungsrichtung) und S-Wellen (Transversalwellen; Wellen schwingen senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung) unterschieden wird. Die deutlichsten Diskontinuitäten lassen eine Dreiteilung des Erdkörpers in Erdkruste, Erdmantel und Erdkern erkennen (»1).

Als Erdkruste wird die Zone von der Erdoberfläche bis zur Moho-Diskontinuität bezeichnet. Hier ist ein plötzlicher Anstieg der P-Wellen-Geschwindigkeit von ca. 6,5 auf 8,0 km/s zu verzeichnen. Die Kruste ist mit einer Dicke von im Mittel knapp 40 km vergleichsweise dünn, wobei zwischen kontinentaler und ozeanischer Kruste differenziert wird. Die kontinentale Erdkruste ist geologisch komplex zusammengesetzt und in ihrer Mächtigkeit starken Schwankungen unterworfen. Während die Mächtigkeit unter den sehr alten Festlandskernen von Kontinentalschollen (Kratonen) nur rund 30 km beträgt, kann sie unter Faltengebirgen (Orogenen) bis auf 60 km ansteigen. Nach dem geophysikalischen Verhalten wird der kontinentalen Kruste überwiegend eine granodioritische Zusammensetzung zugeschrieben. Silizium und Aluminium sind nach Sauerstoff die dominierenden Elemente. Demgegenüber weist die ozeanische Erdkruste eine völlig andere geologische Struktur und Zusammensetzung

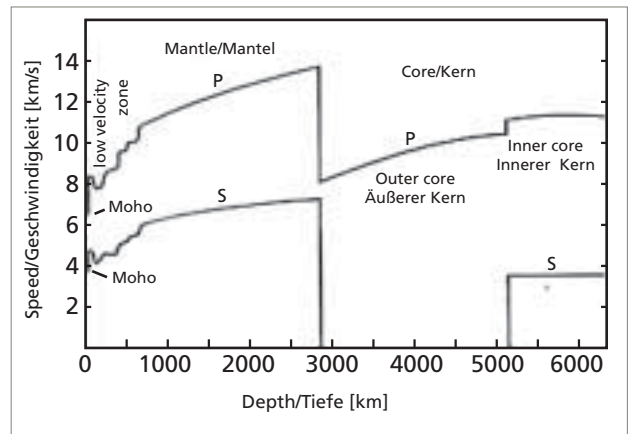
components – the earth's crust, the earth's mantle and the earth's core (»1).

The earth's crust refers to the zone from the earth's surface to the Moho discontinuity. Here a sudden increase in the P-wave speed from around 6.5 to 8.0 km/s is registered. With a thickness averaging just under 40 km, the crust is comparatively thin, although a differentiation is made between the continental and oceanic crust. The continental earth crust has a geologically complex composition and its thickness varies widely. Whereas its thickness below the ancient cores of the continental massifs (cratons) only measures around 30 km, under folded belts (orogenies) its thickness can increase to 60 km. Based on its geophysical behaviour, a granodioritic composition is mainly attributed to the continental crust. After oxygen, silicon and aluminium are the dominating elements. In comparison, the oceanic earth's crust exhibits a completely different geological structure and composition. With a thickness of 5 to 7 km, it is much thinner and its thickness varies much less. Under a generally hardly more than 500-m-thick cover of oceanic sediment, a sequence of basalt rocks is found, which are discharged at the mid-Oceanic ridge in the form of volcanic pillow lavas. These consist of rock melts and differentiation products of the earth's upper mantle. Compared to the continental crust, the oceanic crust contains a higher amount of magnesium. In older literature, the continental crust is therefore referred to as SIAL and the oceanic crust as SIMA. The average density of the earth's crust is around 2.8 g/cm<sup>3</sup>.

Following below the earth crust, to a depth of around 400 km, comes the earth's upper mantle. The slight increase in the P-waves and S-waves in the upper mantle, suddenly regresses at a depth of 70 to 150 km and falls to a pronounced minimum (»2). This zone is therefore referred to as the low-velocity zone. The behaviour of the waves can be attributed to a decrease in viscosity on account of partial melting processes in the underlying asthenosphere. The low-velocity zone is of crucial importance for the endogenous dynamics of the earth, as it enables a mobile sliding of the rigid lithospheric plates and therefore all plate tectonic phenomena. For the earth's upper mantle, a largely peridotitic composition with a basaltic content is assumed. In simplified terms, this is referred to as pyrolite rock [1].

Within the transitional zone from 400 to 900 km of the earth's depth, there exist several smaller seismic discontinuities and differences in rock density, which can be attributed to mineralogical phase transformations. In the lower part of the transitional zone, there are also changes to the phase conditions with an increase in the coordination numbers of the atoms involved. Important here are the phase transformations of the olivines, pyroxenes and garnets. Up to a depth of 2900 km follows the earth's lower mantle, which presumably also has a pyrolytic composition. The gradual increase in the wave velocities and the density up to values of 5.5 g/cm<sup>3</sup> can be largely explained based on a normal compaction of homogeneous material within the earth's gravity field. The average density of the earth's mantle is around 4.5 g/cm<sup>3</sup>. In chemical terms, the earth's mantle mainly consists of heavy silicates with a low percentage of metal oxides.

The boundary between the earth's mantle and the earth's core is indicated by a seismic discontinuity of the first order at depth of 2900 km. At this point, the velocity of the



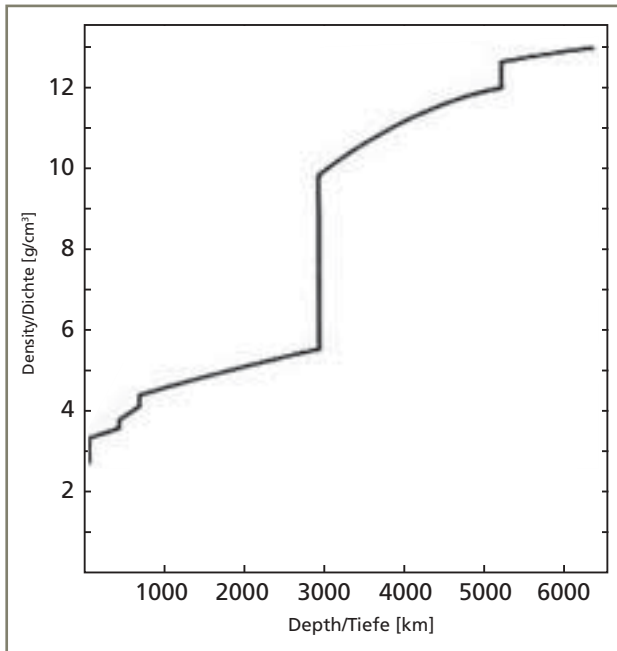
»2 Seismic velocities of P/S-waves, from [1]

»2 Seismische Geschwindigkeiten von P/S-Wellen, aus [1]

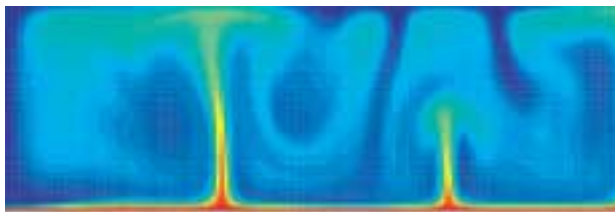
auf. Mit einer Dicke von 5 bis 7 km ist sie wesentlich dünner und deutlich geringeren Mächtigkeitsschwankungen unterworfen. Unter einer meistens kaum mehr als 500 m mächtigen Decke ozeanischer Sedimente befindet sich eine Abfolge von basaltischen Gesteinen, die an den mittelozeanischen Rücken in Form von vulkanischen Pillow-Laven austreten. Es handelt sich um Gesteinsschmelzen und Differentiationsprodukte des oberen Erdmantels. Im Unterschied zur kontinentalen Kruste enthält die ozeanische Kruste einen erhöhten Anteil an Magnesium. In der älteren Literatur wird die kontinentale Kruste deshalb auch als SIAL und die ozeanische Kruste als SIMA bezeichnet. Die mittlere Dichte der Erdkruste liegt bei ungefähr 2,8 g/cm<sup>3</sup>.

Unter der Erdkruste folgt bis in eine Tiefe von ca. 400 km der Obere Erdmantel. Die innerhalb des oberen Mantels leicht zunehmende Geschwindigkeit der P-Wellen und S-Wellen wird in einer Tiefe von 70 bis 150 km sprunghaft rückläufig und erfährt ein ausgeprägtes Minimum (»2). Diese Zone wird deshalb als Low-Velocity-Zone bezeichnet. Das Verhalten der Wellen ist auf eine Abnahme der Viskosität durch partielle Schmelzvorgänge in der unterlagernden Asthenosphäre zurückzuführen. Die Low-Velocity-Zone ist für die endogene Dynamik der Erde von ausschlaggebender Bedeutung, weil hierdurch ein mobiles Gleiten der starren Lithosphärenplatten und damit sämtliche Phänomene der Plattentektonik ermöglicht werden. Für den oberen Erdmantel wird von einer weitgehend peridotitischen Zusammensetzung mit basaltischem Anteil ausgegangen. Vereinfacht spricht man von so genanntem Pyrolitgestein [1].

Innerhalb der Übergangszone von 400 bis 900 km Erdtiefe bestehen mehrere kleinere seismische Diskontinuitäten und Dichtesprünge im Gestein, die auf mineralogische Phasenumwandlungen zurückzuführen sind. Im unteren Teil der Übergangszone kommen Änderungen der Phasenzustände unter Erhöhung der Koordinationszahlen der beteiligten Atome hinzu. Wesentlich sind dabei die Phasenumwandlungen der Olivine, Pyroxene und Granate. Bis zu einer Tiefe von 2900 km folgt der untere Erdmantel, der vermutlich ebenfalls eine pyrolytische Zusammensetzung aufweist. Die allmähliche Zunahme der Wellengeschwindigkeiten und der Dichte bis auf Werte von 5,5 g/cm<sup>3</sup> lässt sich weitgehend aus einer normalen Verdichtung von homogenem Material innerhalb des Schwerfelds der Erde erklären. Die mittlere Dichte des Erdmantels liegt bei rund 4,5 g/cm<sup>3</sup>. Chemisch besteht der Erdmantel vor allem aus schweren Silikaten mit einem geringen Anteil an Metalloxiden.



»3 Increase in the density with depth [1]  
 »3 Zunahme der Dichte mit der Tiefe, aus [1]

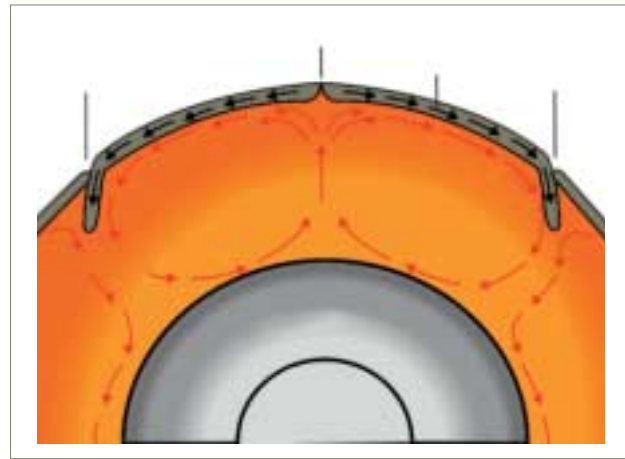


»4 Convection cells in the earth's mantle  
 »4 Konvektionszellen im Erdmantel

P-waves falls abruptly. The S-waves do not penetrate into the earth's outer core at all. In view of this phenomenon, we must assume that the earth's outer core is liquid up to another discontinuity at a depth of around 5080 km. At the boundary between the earth's mantle and the earth's core, the density suddenly jumps from 5.5 to 9.5 g/cm<sup>3</sup>. Our ideas regarding the material composition of the earth core are based partly on geophysical findings and partly on assumed similarities to the material composition of iron meteorites. Accordingly, the outer core consists essentially of an iron-nickel melt, the inner core probably of a solid iron-nickel alloy. With increasing depth, the density of the earth's core gradually increases from 9.5 g/cm<sup>3</sup> up to values of just under 13.0 g/cm<sup>3</sup>, a clear increase in density being detectable at the boundary between the outer and inner core. The average density of the earth's core is around 11.0 g/cm<sup>3</sup>.

## 2 Endogenous Dynamics

»3 shows that the density of the rocks rises considerably with increasing depth. Against this background, the question is how accessible is this immense potential with regard to the selected objective or how far can this potential be utilized with reasonable, i.e. economically justifiable technical measures. After research of all possibilities, we can answer this question now: "Only a tiny fraction of this geological potential can be used." Let's begin with the geological processes of endogenous dynamics and plate tectonics. Unlike the moon, the earth is geologically active. The differentiation processes, with high-density minerals in the core and



»5 Schematic of endogenous dynamics  
 »5 Schema der endogenen Dynamik

Die Grenze zwischen dem Erdmantel und dem Erdkern wird von einer seismischen Diskontinuität erster Ordnung in einer Erdtiefe von 2900 km angezeigt. An dieser Stelle sinkt die Geschwindigkeit der P-Wellen unvermittelt ab. Die S-Wellen dringen überhaupt nicht in den äußeren Erdkern ein. Dieses Phänomen zwingt zu der Annahme, dass der äußere Erdkern bis zu einer weiteren Diskontinuität in einer Erdtiefe von rund 5080 km flüssig ist. Die Dichte springt an der Grenze vom Erdmantel zum Erdkern schlagartig von 5,5 auf 9,5 g/cm<sup>3</sup>. Die Vorstellung über den Stoffbestand des Erdkerns basiert zum einen auf geophysikalischen Befunden, zum anderen auf Analogien zum Stoffbestand von Eisenmeteoriten. Demnach besteht der äußere Kern im Wesentlichen aus einer Eisen-Nickel-Schmelze, der innere Kern wahrscheinlich aus einer festen Eisen-Nickel-Legierung. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Dichte des Erdkerns allmählich von 9,5 g/cm<sup>3</sup> bis auf Werte von knapp 13,0 g/cm<sup>3</sup> zu, wobei an der Grenze vom äußeren zum inneren Kern ein deutlicher Dichtesprung zu verzeichnen ist. Die mittlere Dichte des Erdkerns liegt bei ungefähr 11,0 g/cm<sup>3</sup>.

## 2 Endogene Dynamik

»3 zeigt, dass die Dichte der Gesteine mit zunehmender Tiefe um ein Vielfaches zunimmt. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, inwieweit dieses gewaltige Potenzial im Sinne der hier gewählten Zielstellung zugänglich ist bzw. mit vertretbaren technischen Maßnahmen erschlossen werden kann. Nach Recherche aller Möglichkeiten soll die Antwort schon an dieser Stelle vorweggenommen werden: „Nur ein winziger Bruchteil des geologischen Potenzials ist nutzbar.“ Beginnen wir mit den geologischen Prozessen der endogenen Dynamik und Plattentektonik. Im Unterschied zum Mond ist die Erde geologisch aktiv. Die Differenzierungsprozesse, mit hochdichten Mineralen im Kern und leichteren Mineralen in Mantel und Kruste, sind noch lange nicht abgeschlossen. Durch gravitative Kompression bei der Entstehung der Erde und den Zerfall radioaktiver Elemente weist der Erdkern eine Temperatur von rund 5000 °C auf. So steigt ein ständiger Wärmestrom aus der Tiefe zur Erdoberfläche auf, der an besonderen Stellen durch Magmenbewegungen deutlich spürbar und sichtbar die Oberfläche erreicht (Hot-Spot-Vulkane wie z. B. Island, Hawaii, Kanarische Inseln).

Der Wärmetransport erfolgt konvektiv, wobei sich im Erdmantel Konvektionszellen mit einem Durchmesser von mehreren tausend Kilometer Durchmesser bilden und den ei-

lighter minerals in the mantle and crust, have not yet been completed by a long way. Owing to gravitational compression during the formation of the earth and the decay of radioactive elements, the earth's core has a temperature of around 5000° C. A constant stream of heat therefore rises from the depth to the earth's surface, and in the form of magma movements this clearly certain points of the surface (hot-spot volcanoes, e.g. Iceland, Hawaii, Canary Islands).

The heat transport is convective, in the earth's mantle convection cells with a diameter of several thousand kilometres are formed and act as the real motor of the plate tectonics (»4). Based on punctiform heat maxima (shown in red) at the mantle/core, hot material rises, which falls again at other places after appropriate cooling (shown in blue/green). Driven in this way, rigid lithosphere plates float with a velocity of up to several centimetres per year on the asthenosphere to disappear again in the earth's mantle at convergent plate boundaries or subduction zones (e.g. American West Coast, Sumatra, Japan). In contrast, at divergent plate boundaries, e.g. the Mid-Atlantic Ridge, hot mantle material is constantly transported to the surface in the form of basaltic lava as a result of volcanic activity (»5). These are, however, not original rocks from the earth's mantle but differentiation products. At the hot spots too, partial melting and differentiation processes ensure that not the primary rocks from the lower mantle, but lighter, fractionated melts reach the surface. Rocks from the earth's core do not reach the earth's surface.

### 3 Classification of the Geological Potential

#### 3.1 Igneous rocks

Igneous rocks are crystallization products formed from silicate melts. Depending on the depth of the crystallization location, a differentiation is made between plutonites (deep-seated rocks) and volcanites (effusive rocks). Plutonites crystallize in deeper layers of the earth with slow cooling. They have a medium- to coarse-grained microstructure without texture effects. In contrast, volcanites are characterized by the rise and intrusion of the magma as far as the near-surface interlaminar bonding or by the outflow and degassing of the magma at the earth's surface. As a result of the fast cooling, the microstructure of the volcanites is generally more finely grained than the deep-seated rocks. On crystallization of the intrusive melts, mainly fine- to medium-grained volcanites are formed, from the extrusive melts mainly small to dense-grained volcanites, e.g. basalts. On quenching of the lavas, for example on contact with sea water, the lavas often solidify as volcanic glass (obsidian). Volcanic rocks often have a porphyric microstructure, in which larger developed "phenocrysts" are embedded in a fine-grained, sometimes even glassy matrix. Besides erupting liquid lava, most volcanoes emit solid material that is ejected explosively. These loose materials sediment on the earth's surface as pyroclastic rocks. Depending on the grain size, a differentiation is made between volcanic blocks, lapilli and ashes. The dust-fine to sand-grained ashes solidify under the influence of water to tuffs. Eroded ashes and tuffs, which have been mixed with clays and deposit secondarily are referred as tuffites. Igneous rocks are further classified essentially according to their modal mineral composition in the QAPF double triangle diagram. Relevant examples of igneous rocks are: gabbros, granites, andesites, basalts, basan-

gentlichen Motor der Plattentektonik darstellen (»4). Über punktuelle Wärmemaxima (rot dargestellt) an der Grenze Mantel/Kern steigt heißes Material auf, das an anderen Stellen nach entsprechender Abkühlung (blaugrün dargestellt) wieder absinkt. So angetrieben, schwimmen starre Lithosphärenplatten mit einer Geschwindigkeit von bis zu mehreren Zentimetern pro Jahr auf der Asthenosphäre, um an so genannten konvergenten Plattengrenzen oder Subduktionszonen (z. B. Amerikanische Westküste, Sumatra, Japan) wieder im Erdmantel zu verschwinden. Demgegenüber wird an divergenten Plattengrenzen wie z. B. dem mittelatlantischen Rücken ständig heißes Mantelmaterial in Form von basaltischen Laven durch Vulkanismus an die Oberfläche transportiert (»5). Es handelt sich hierbei jedoch nicht um Originalgesteine des Erdmantels, sondern um Differentiationsprodukte. Auch bei den Hot Spots sorgen partielle Aufschmelz- und Differentiationsprozesse dafür, dass nicht Primärgesteine des unteren Mantels, sondern leichtere, fraktionierte Schmelzen an die Oberfläche gelangen. Gesteine des Erdkerns gelangen nicht an die Erdoberfläche.

### 3 Klassifizierung des geologischen Potenzials

#### 3.1 Magmatische Gesteine

Magmatische Gesteine sind Kristallisationsprodukte aus silikatischen Schmelzen. In Abhängigkeit von der Tiefe des Kristallisationsstandortes wird zwischen Plutoniten (Tiefengesteinen) und Vulkaniten (Ergussgesteinen) unterschieden. Plutonite kristallisieren in tieferen Erdstockwerken bei langsamer Abkühlung aus. Sie weisen ein mittel- bis grobkörniges Korngefüge ohne Textureffekte auf. Demgegenüber sind die Vulkanite durch Aufstieg und Intrusion des Magmas bis in den oberflächennahen Schichtverband oder durch Ausfließen und Entgasen des Magmas an der Erdoberfläche gekennzeichnet. Infolge der raschen Abkühlung ist das Gefüge der Vulkanite generell feinkörniger als das der Tiefengesteine. Bei der Kristallisation der intrusiven Schmelzen entstehen meistens fein- bis mittelkörnige Vulkanite, aus den extrusiven Schmelzen überwiegend klein- bis dichtkörnige Vulkanite wie z.B. Basalte. Bei Abschreckung der Laven, beispielsweise in Kontakt mit Meerwasser, erstarren die Laven häufig auch als vulkanisches Glas (Obsidian). Vulkanische Gesteine weisen oft ein porphyrisches Gefüge auf, bei dem größer entwickelte „Einsprenglinge“ in eine feinkörnigen, z. T. auch glasige Grundmasse eingebettet sind. Die meisten Vulkane fördern neben flüssiger Lava auch festes Material, das explosiv ausgeworfen wird. Diese Lockerstoffe sedimentieren auf der Erdoberfläche als pyroklastische Gesteine. Je nach Korngröße wird zwischen vulkanischen Blöcken, Lapilli und Aschen unterschieden. Die staubfeinen bis sandkörnigen Aschen verfestigen sich unter Wassereinfluss zu Tuffen. Erodierete Aschen und Tuffe, die mit Tonen vermennt und sekundär abgelagert worden sind, bezeichnet man als Tuffite. Die weitere Klassifikation der magmatischen Gesteine erfolgt im Wesentlichen nach ihrem modalen Mineralbestand im QAPF-Doppeldreieck. Relevante Beispiele für magmatische Gesteine sind: Gabbros, Granite, Andesite, Basalte, Basanite, Diabase, Rhyolithe. Nachfolgend sollen diese Gesteine im Hinblick auf ihre petrografischen Eigenschaften kurz charakterisiert werden [2]:

##### › Gabbro (Tiefengestein)

Melanokrates bis mesokrates, mittel- bis grobkörniges, meist massig ausgebildetes Gestein mit Plagioklas und Diopsid. Die

ites, diabases, rhyolites. In the following these rocks are briefly characterized with regard to their petrographic properties [2]:

› **Gabbro (deep-seated rock)**

Melanocratic to mesocratic, medium- to coarse-grained, usually massive rock with plagioclase and diopside. The anorthite content in plagioclase ranges between 30 to 50%. Only in exceptional cases, a low content of free quartz and potash feldspar. Dark minerals are orthorhombic pyroxenes, occasionally also hornblendes and olivine.

› **Granite (deep-seated rock)**

Leucocratic, medium to coarse-grained massive rock with light-coloured components, consisting of potash feldspar, plagioclase and free quartz, the anorthite content in the plagioclase being under 30%. The dark constituents are mainly the micas biotite and muscovite, more rarely hornblendes, pyroxenes and tourmaline. Zirconium, titanite, apatite, and opaque minerals such as magnetite and ilmenite may be found as accessory minerals. The microstructure of granite is holocrystalline and is primarily undirectionally grained.

› **Andesite (effusive rock)**

Dense to fine-grained, grey to reddish-brown rock with phenocrysts of plagioclase, hornblende, biotite and pyroxenes. The matrix is often glassy. Andesite is a volcanic equivalent of diorite.

› **Basalt (effusive rock)**

Melanocratic dense to medium-grained, occasionally porphyritic rock with a dark grey to black colour. Depending on the chemical composition, a basic differentiation is made between high-alkaline-earth tholeiite basalts (plagioclase basalts) and high-alkali basalts (olivine basalts). Main components in both cases are plagioclase with an anorthite content of 50 to 70% as well as augite. Olivine, ilmenite, magnetite and titanomagnetite as well as hornblende are present. Basalt is the volcanic equivalent of gabbro.

› **Diabase (effusive rock)**

Tholeiite basalt that has been secondarily and extensively transformed by metamorphism is traditionally referred to as diabase, paleobasalt or greenstone. This is a predominantly dark green, dense to medium-grained, sometimes even porphyritic rock. Owing to predominantly weathering-related mineral transformations, plagioclase has more or less transformed into albite and calcite. Augite has partly or completely transformed into amphibole or chlorite, olivine mainly into serpentine.

› **Rhyolite (effusive rock)**

Leucocratic, dense to fine-grained rock with occasional phenocrysts of quartz and the feldspars sanidine and plagioclase. Dark minerals such as biotite are only rarely interspersed. The matrix is often glassy, i.e. not crystalline, and characterized by a fluidal microstructure. If the matrix is completely glassy, a differentiation is made between obsidian and vesicular-porous pumice stone. Rhyolite is the volcanic equivalent of granite. Quartz porphyry is a transformed rhyolite in which plagioclases have been transformed into albite.

### 3.2 Metamorphic rocks

Metamorphic rocks are products of rock metamorphism, which takes place always in deeper layers of the earth, always under increased pressure and/or at increased temperature. Metamorphism is defined as a mineralogical and structural transformation of rocks while the solid state is

Anorthitgehalte im Plagioklas betragen zwischen 30 bis 50 %. Nur in Ausnahmefällen geringe Gehalte an freiem Quarz und Kalifeldspat. Dunkle Minerale sind orthorhombische Pyroxene, gelegentlich auch Hornblende und Olivin.

› **Granit (Tiefengestein)**

Leukokrates, mittel- bis grobkörniges massiges Gestein mit hellen Gemengteilen, bestehend aus Kalifeldspat, Plagioklas und freiem Quarz, wobei die Anorthitgehalte im Plagioklas unter 30 % liegen. Zu den dunklen Gemengteilen zählen überwiegend die Glimmer Biotit und Muskovit, seltener Hornblende, Pyroxene und Turmalin. Akzessorisch können Zirkon, Titanit, Apatit, und opake Minerale wie z. B. Magnetit und Ilmenit auftreten. Das Gefüge von Granit ist holokrystallin und überwiegend richtungslos körnig ausgebildet.

› **Andesit (Ergussgestein)**

Dichtes bis feinkörniges, graues bis rötlichbraunes Gestein mit Einsprenglingen von Plagioklas, Hornblende, Biotit und Pyroxenen. Die Grundmasse ist häufig glasig ausgebildet. Andesit ist das vulkanische Äquivalent von Diorit.

› **Basalt (Ergussgestein)**

Melanokrates dichtes bis mittelkörniges, gelegentlich porphyrisches Gestein von dunkelgrauer bis schwarzer Farbe. Nach dem Chemismus wird grundsätzlich unterschieden zwischen erdalkalireichen Tholeiitbasalten (Plagioklasbasalten) und alkalireichen Alkalibasalten (Olivinbasalten). Hauptbestandteile sind in beiden Fällen Plagioklas mit Anorthitgehalten mit 50 bis 70 % sowie Augit. Häufig sind Olivin, Ilmenit, Magnetit und Titanomagnetit sowie Hornblende vorhanden. Basalt ist das vulkanische Äquivalent des Gabbros.

› **Diabas (Ergussgestein)**

Sekundär, durch Metamorphose stark umgewandelter Tholeiitbasalt wird traditionell als Diabas, Paläobasalt oder als Grünstein bezeichnet. Es handelt sich um überwiegend dunkelgrünes, dichtes bis mittelkörniges, z. T. auch porphyrisches Gestein. Durch überwiegend verwitterungsbedingte Mineralumwandlungen ist Plagioklas mehr oder weniger in Albit und Calcit übergegangen. Augit ist teilweise oder gänzlich in Amphibol oder Chlorit, Olivin meist in Serpentin umgewandelt.

› **Rhyolith (Ergussgestein)**

Leukokrates, dichtes bis feinkörniges Gestein mit gelegentlichen Einsprenglingen von Quarz und den Feldspäten Sanidin und Plagioklas. Nur selten sind dunkle Minerale wie Biotit eingesprengt. Die Grundmasse ist häufig glasig, also nicht kristallin, ausgebildet und durch ein Fluidalgefüge gekennzeichnet. Bei vollständig glasiger Ausbildung wird zwischen Obsidian und blasig-porösem Bimsstein unterschieden. Rhyolith ist das vulkanische Äquivalent des Granits. Quarzporphyr ist ein umgewandelter Rhyolith, bei dem die Plagioklase in Albit umgewandelt wurden.

### 3.2 Metamorphe Gesteine

Metamorphe Gesteine sind Produkte der Gesteinsmetamorphose, die in tieferen Erdschichten stets unter erhöhtem Druck und/oder erhöhter Temperatur stattfindet. Metamorphose wird definiert als eine mineralogische und strukturelle Umbildung von Gesteinen unter Beibehaltung des festen Zustandes infolge physikalisch-chemischer Bedingungen, die verschieden von den ursprünglichen Bildungsbedingungen der Gesteine sind. Üblicherweise wird zwischen unterschiedlichen Metamorphosegraden von sehr schwach bis stark unterschieden. Metamorphe Gesteine können aus magma-

maintained as a result of physical-chemical conditions that differ from the rocks' original conditions of formation. There are usually differences in the degree of metamorphism from very weak to strong metamorphism. Metamorphic rock can form from igneous rocks or sedimentary rocks. Characteristic is a orientation of minerals, which is often visually detectable as a schistosity or banded structure of the rocks. In Germany, metamorphic rocks are only found near to the surface in limited regions. The examples are therefore limited to gneiss and crystalline schist.

#### › Gneiss

Medium- to coarse-grained, granular-flaser-like or layered, rarely columnar rock consisting mainly of light-coloured constituents. The main minerals are feldspars, accounting for more than 20%, and free quartz as well as 10 to 50% phyllosilicates, especially the micas muscovite and biotite. Gneisses can be formed from igneous or sedimentary starting products. They are sometimes transformed from existing gneisses by polymetamorphism. On account of partial melting at high temperatures, fluid transitions to granite-like rocks can occur.

#### › Crystalline schist

This is a term for fine to medium-grained rock with very good cleavability to tectonic cleavage planes. A differentiation is made between mica-schist, green schist and blue schist or glaucophane schist. Incomplete crystallization products of metamorphism are characterized by porphyroblasts on the scaling surfaces. The porphyroblasts consist of cordierite and andalusite, sometimes of biotite and chlorite.

### 3.3 Sedimentary rocks

In contrast to the igneous and metamorphic rocks, sediments are formed at low temperatures by weathering, transport and deposition. Depending on the type of deposition, a differentiation is made between clastic and chemical sediments. Chemical sediments (precipitated sediments) are derived by chemical precipitation from super-saturated solutions, these include carbonates, sulphates and evaporites. Clastic sediments (fragmental rocks) are formed by an accumulation of rock fragments and individual particles. They are displaced weathering products, e.g. clays, loams and sands. The transport medium is mainly flowing water, but sometimes ice or wind. With the gradual sinking of sediments to greater depths of the earth, a dewatering, compaction and diagenetic consolidation of the sediments takes place in the geological epochs. Mainly clay schist and greywacke can be considered as additives for the production of heavy bricks.

#### › Clay schist

Diagenetically consolidated clay with a clear cleavage-plane microstructure and generally plane-parallel platy lamination according to the stratification planes. Clay schists still contain pore water, but unlike plastic clays are strongly dehydrated and their microstructure compressed and cannot be deformed plastically or only to a limited extent. On account of the geological pressure of the overburden, the original clay mineral paragenesis generally transforms in the direction of increased percentages of illite and chlorite. At a very high pressure of the overburden, the limit to metamorphism can be reached, with transitions to clay schists and crystalline schists.

#### › Greywacke

Greywackes are grey to greenish-grey clastic sedimentary rocks with a considerable content of quartz, feldspar and rock fragments. Chlorite, mica and carbonates as well as clay

tischen Gesteinen oder aus Sedimentgesteinen entstehen. Charakteristisch ist eine Einregelung der Minerale, die vielfach auch visuell in einer Schieferung oder Bänderung der Gesteine erkennbar wird. In Deutschland treten metamorphe Gesteine oberflächennah nur regional begrenzt auf. Die Beispiele beschränken sich daher auf Gneise und kristalline Schiefer.

#### › Gneis

Mittel- bis grobkörniges, körnig-flaseriges oder lagiges, selten stängliges Gestein, das überwiegend aus hellen Gemengteilen besteht. Hauptminerale sind Feldspäte mit mehr als 20 % und freier Quarz sowie 10 bis 50 % Phyllosilikate, vor allem die Glimmer Muskovit und Biotit. Gneise können aus magmatischen oder sedimentären Ausgangsprodukten gebildet sein. Zum Teil sind sie auch durch Polymetamorphose aus bereits vorliegenden Gneisen umgeprägt. Durch partielle Aufschmelzung können bei hohen Temperaturen fließende Übergänge zu granitähnlichen Gesteinen entstehen.

#### › Kristalliner Schiefer

Bezeichnung für fein- bis mittelkörniges Gestein mit sehr guter Spaltbarkeit nach tektonischen Schieferflächen. Es wird unterschieden zwischen Glimmerschiefer, Grünschiefer und Blauschiefer bzw. Glaukophanschiefer. Unvollständige Kristallisationsprodukte der Metamorphose sind durch Porphyroblasten auf den Schieferungsflächen gekennzeichnet. Die Porphyroblasten bestehen aus Cordierit und Andalusit, z. T. auch aus Biotit und Chlorit.

### 3.3 Sedimentäre Gesteine

Im Gegensatz zu den magmatischen und metamorphen Gesteinen sind die Sedimente bei niedrigen Temperaturen durch Verwitterung, Transport und Ablagerung entstanden. Nach der Art der Ablagerung wird zwischen klastischen und chemischen Sedimenten unterschieden. Chemische Sedimente (Ausscheidungssedimente) sind durch chemische Fällung aus übersättigten Lösungen hervorgegangen, dazu gehören unter anderem Karbonate, Sulfate und Evaporite. Klastische Sedimente (Trümmergesteine) sind durch Anhäufung von Gesteinsfragmenten und Einzelkörnern entstanden. Es sind umgelagerte Produkte der Verwitterung wie z.B. Tone, Lehme und Sande. Transportmedium ist dabei meistens fließendes Wasser, zum Teil aber auch Eis oder Wind. Mit der allmählichen Versenkung der Sedimente in größere Erdtiefen erfolgt in geologischen Zeiträumen eine Entwässerung, Verdichtung und diagenetische Verfestigung der Sedimente. Als Zusatzstoffe für die Herstellung schwerer Steine kommen in Deutschland vor allem Schiefertone und Grauwacken infrage.

#### › Schiefertone

Diagenetisch verfestigter Ton mit deutlichem Trennflächengefüge und überwiegend planparallel-plattiger Absonderung nach den Schichtflächen. Schiefertone enthalten noch Porenwasseranteile, sind aber im Unterschied zu plastischen Tonen stark dehydriert sowie im Gefüge komprimiert und gar nicht oder nur sehr begrenzt plastisch verformbar. Durch den geologischen Überlagerungsdruck kommt es i. d. R. zur Umwandlung der ursprünglichen Tonmineralparagenese in Richtung auf erhöhte Anteile an Illit und Chlorit. Bei sehr hohem Überlagerungsdruck kann die Grenze zur Metamorphose mit Übergängen zu Tonschiefern und kristallinen Schiefer erreicht werden.

#### › Grauwacke

Grauwacken sind graue bis grüngraue klastische Sedimentgesteine mit deutlichen Gehalten an Quarz, Feldspat und

substance are present as constituent minerals. Greywackes are sometimes referred as impure or poorly separated sandstones.

#### 4 Increasing body density with natural additives

In »6 the mean densities of the most important types of rock are listed by way of example. Whereas, as expected, the lowest densities are determined in the high-water plastic clays, the highest densities are observed in igneous rocks, especially in gabbros and basalts. Whereas clays generally exhibit densities below 2.0 g/cm<sup>3</sup>, in basalts densities of just over 3.0 g/cm<sup>3</sup> were obtained. Interesting are the densities of the individual minerals as shown in the diagram (»7). Here a increase in the densities can be observed beginning with tectosilicates (quartz, feldspars) and phyllosilicates (kaolinite, muscovite) through pyroxenes, amphiboles and baryte up to various iron oxides. Easily the highest densities, with values above 5.0 g/cm<sup>3</sup>, are observed in the iron minerals haematite, magnetite and wuestite.

To determine the influence of natural additives on the body density, homologous series of tests, each with an additive of 20 mass %, were performed. A relatively heavy clay with a body density of 1.94 g/cm<sup>3</sup> at 900° C firing temperature was chosen as the starting material. As the diagrams in »9 shows, some additives are counterproductive, i.e. the body density falls as a result of these additives, this trend being intensified with increasing firing temperature as a result of high sintering activity of the selected clay. In the summarized assessment, it is shown that the best results for increased body density are obtained with the addition of basic volcanites (basanite, basalt). In second place come the acid to basic plutonites (gabbro, granite). In third place rank the metamorphites (gneiss, crystalline schist) and diabase. Less efficient are acid to intermediary volcanites (rhyolite, andesite) and the sedimentary rock greywacke. Especially the carbonate content in greywackes or in diabases from feldspar weathering have a noticeably adverse effect.

#### 5 Classification of industrial waste materials

Industrial waste materials have been used in the clay brick industry since the 1980s. This consists mostly of pore-forming agents, such as papermaking waste or combustible waste materials, which make bricks more porous and lighter [3]. In the search for industrial waste with high density, waste from the iron and steel industry and waste from the production of heavy spar or baryte are suitable. For better understanding of these, the key process steps are briefly described.

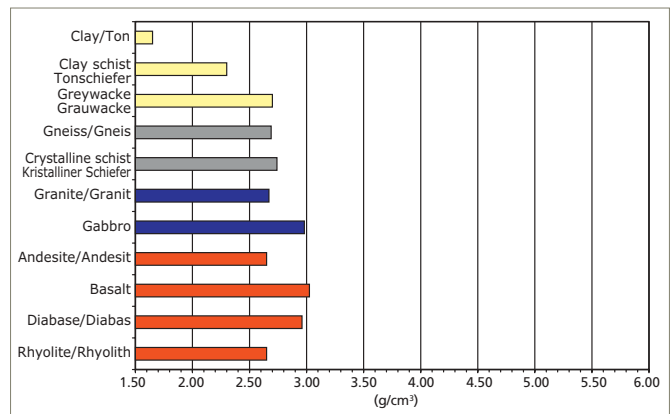
##### › Iron/Blast Furnace

Iron is almost never found in elementary form in nature, but mainly in compounds. These are mostly aqueous or anhydric oxides. The most important iron ores are red ironstone (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). In Germany only imported iron ores, with an iron content of around 65 mass %, are used. As shown in »10, iron is present in several modifications. Depending on the dissolved carbon content, a differentiation is made between iron, steel, pig iron and cementite. Pig iron is produced on industrial scale based on the reduction of oxidic iron ores with coke. The iron ore is reduced to pig iron after appropriate processing steps (crushing, sintering, pelletizing, addition of slag-forming constituents) in a blast furnace, in which temperatures up to 2000° C can be reached.

Gesteinsfragmenten. Als Nebengemengteile kommen Chlorit, Glimmer und Karbonate sowie Tonsubstanz vor. Grauwacken werden z.T. auch als unreine oder schlecht sortierte Sandsteine bezeichnet.

#### 4 Erhöhung der Scherbenrohddichte mit natürlichen Zusatzstoffen

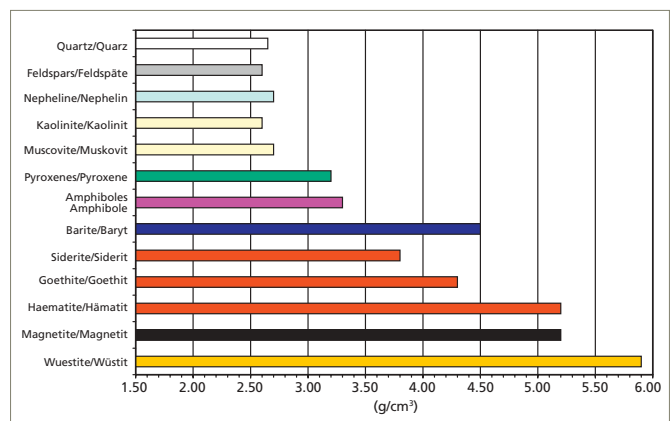
In »6 sind die mittleren Rohdichten der wichtigsten Gesteinsarten exemplarisch aufgetragen. Während die geringsten Rohdichten erwartungsgemäß in wasserreichen plastischen Tonen ermittelt werden, werden die höchsten Rohdichten in magmatischen Gesteinen, insbesondere in Gabbros und Basalten, beobachtet. Während Tone im Allgemeinen Rohdichten von unter 2,0 g/cm<sup>3</sup> aufweisen, werden bei Basalten Rohdichten von knapp über 3,0 g/cm<sup>3</sup> erzielt. Interessant sind auch die Rohdichten der einzelnen Minerale gemäß Diagramm (»7). Hier lässt sich eine deutliche Steigerung der



»6 Average densities of the near-surface rocks  
»6 Mittlere Rohdichten der oberflächennahen Gesteine

Rohdichten, beginnend bei Tectosilikaten (Quarz, Feldspäte) und Phyllosilikaten (Kaolinit, Muskovit), über Pyroxene, Amphibole und Baryt bis hin zu diversen Eisenoxiden beobachten. Die mit Abstand höchsten Rohdichten, mit Werten oberhalb von 5,0 g/cm<sup>3</sup>, werden bei den Eisenmineralen Hämatit, Magnetit und Wüstit beobachtet.

Um den Einfluss natürlicher Zusatzstoffe auf die Scherbenrohddichte zu ermitteln, sind homologe Versuchsreihen, jeweils mit Zusatz von 20 Masse-%, gefahren worden. Als Ausgangsmaterial ist ein relativ schwerer Ton mit einer Scherbenrohddichte von 1,94 g/cm<sup>3</sup> bei 900 °C Brenntemperatur gewählt worden. Wie die Diagramme in »9 zeigen, wirken sich einige Zusätze kontraproduktiv aus, d. h., die Scherben-



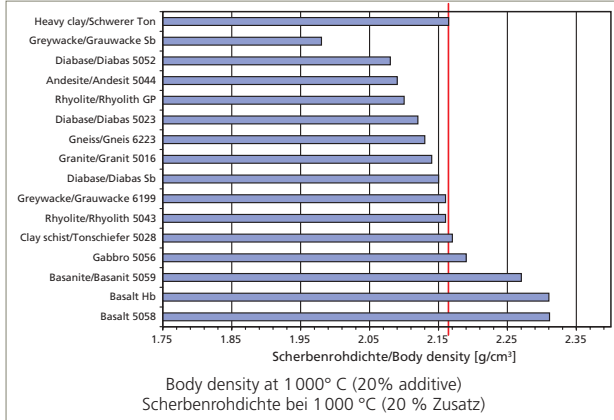
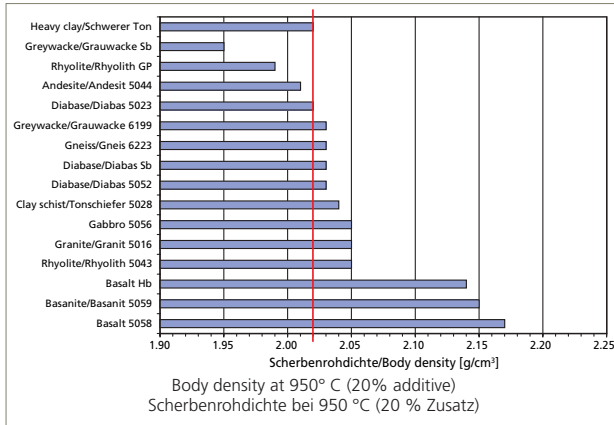
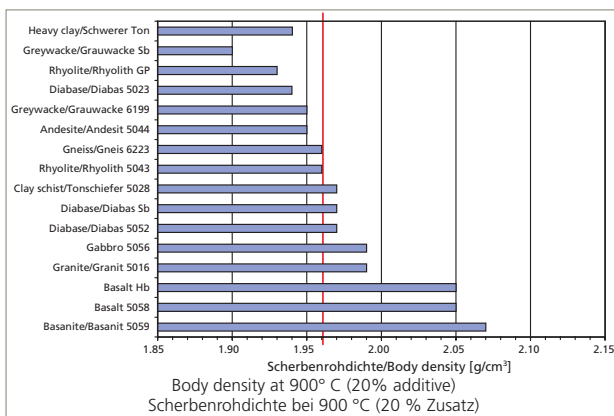
»7 Average densities of the most important minerals  
»7 Mittlere Rohdichten der wichtigsten Minerale



- »8 Delivery of additives for the production of heavy clay bricks
- »8 Anlieferung von Zusatzstoffen für die Herstellung schwerer Ziegel

» Steel/converter

To transform the pig iron produced in the blast furnace into



- »9 Influence on body density with natural additives
- »9 Beeinflussung der Scherbenrohddichte mit natürlichen Zusatzstoffen

rohddichte sinkt durch diese Zusatzstoffe, wobei sich dieser Trend mit zunehmender Brenntemperatur infolge der hohen Sinteraktivität des ausgewählten Tons noch verstärkt. In der zusammenfassenden Bewertung zeigt sich, dass die besten Ergebnisse zur Erhöhung der Scherbenrohddichte bei Zugabe von basischen Vulkaniten (Basanit, Basalt) erzielt werden. An zweiter Stelle stehen die sauren bis basischen Plutonite (Gabbro, Granit). An dritter Stelle rangieren die Metamorphite (Gneis, kristalliner Schiefer) sowie Diabase. Wenig effizient sind saure bis intermediäre Vulkanite (Rhyolith, Andesit) und das Sedimentgestein Grauwanke. Insbesondere Karbonatanteile bei Grauwancken oder bei Diabasen aus der Feldspatverwitterung machen sich negativ bemerkbar.

5 Klassifizierung industrieller Reststoffe

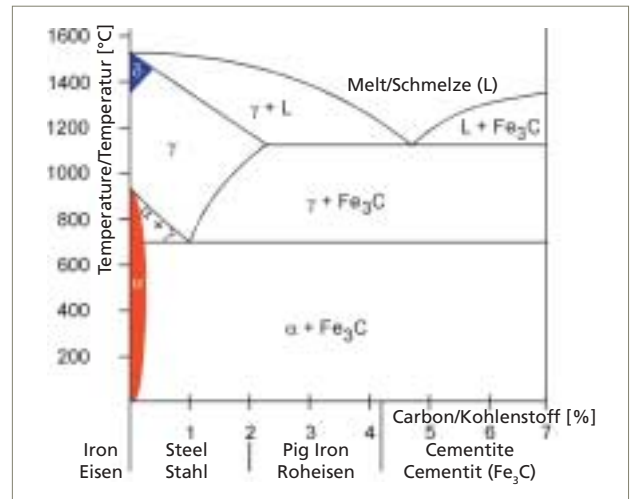
Industrielle Reststoffe werden ungefähr seit den 1980er-Jahren in der Ziegelindustrie eingesetzt. Meistens handelt es sich um Porosierungsmittel wie z.B. Papierfangstoffe oder brennbare Abfallstoffe, die den Ziegel poröser und leichter machen [3]. Auf der Suche nach industriellen Reststoffen mit hoher Dichte bieten sich dagegen Reststoffe aus der Eisen- und Stahlindustrie sowie Reststoffe aus der Herstellung von Schwespat an. Zum besseren Verständnis werden die wichtigsten Verfahrensschritte kurz beschrieben:

» Eisen/Hochofen

Eisen kommt in der Natur fast nie elementar, sondern überwiegend in Verbindungen vor. Meist handelt es sich dabei um wasserhaltige oder wasserfreie Oxide. Die wichtigsten Eisenerze sind Roteisenstein ( $Fe_2O_3$ ) und Magneteisenstein ( $Fe_3O_4$ ). Verwendet werden in Deutschland ausschließlich importierte Eisenerze mit einem Eisengehalt von rund 65 Masse-%. Wie in »10 dargestellt, kommt Eisen in mehreren Modifikationen vor. In Abhängigkeit vom gelösten Kohlenstoffgehalt wird zwischen Eisen, Stahl, Roheisen und Zementit unterschieden. Industriell wird Roheisen durch Reduktion von oxidischen Eisenerzen mit Koks hergestellt. Die Reduktion des Eisenerzes zum Roheisen erfolgt nach entsprechender Aufbereitung (Brechen, Sintern, Pelletieren, Zugabe von Schlackebildnern) im Hochofen, wobei Temperaturen bis zu 2000 °C erreicht werden können.

» Stahl/Konverter

Um das aus dem Hochofen gewonnene Roheisen in verformbaren Stahl zu überführen, muss der Kohlenstoffgehalt des Roheisens auf unter 1,0 Masse-% herabgesetzt werden.



- »10 Iron-carbon phase diagram
- »10 Phasendiagramm Eisen-Kohlenstoff

ductile steel, the carbon content of the pig iron must be lowered to below 1.0 mass %. In addition, unwanted accessory minerals such as phosphorous, sulphur, silicon, oxygen and manganese have to be reduced to low residues. In the  $O_2$  jet evaporation method, a converter is charged with pig iron, scrap and lime. A lance is used to blow oxygen onto the melt. The jet of gas and the carbon monoxide formed during refining (oxidization) effect thorough mixing of the bath, the bath temperature rising to around 1650° C. Accessory elements are fluidized as oxides into the slag phase and removed.

#### › Converter dust

In the converter, large quantities of filter dust are removed from the flue gas by means of an electrostatic dust precipitator. The volume can exceed 100000 t/year depending on the size of the steelworks. The composition of converter dusts differs depending on the specific production process. Typical magnetite contents of around 80 mass % (density 5.2 g/cm<sup>3</sup>) as well as admixtures of haematite (density 5.2 g/cm<sup>3</sup>), wuestite (density 5.9 g/cm<sup>3</sup>) and Ca-/Mg carbonates (density 2.7 g/cm<sup>3</sup>) can be assumed. In legal terms, this is usually classed as non-hazardous waste. The planned use of converter dust must be reported to the responsible authorities. Generally, storage on a hard-surfaced area, if possible under a cover, is required. During processing in the brickworks, despite moistening, contamination with iron dust particles can occur.

#### › Mill scale sludge

During hot rolling of steel, the surface of the slabs in contact with atmospheric oxygen oxidizes to form various iron oxides. Dominant are wuestite (density 5.9 g/cm<sup>3</sup>) and magnetite (density 5.2 g/cm<sup>3</sup>) before haematite (density 5.2 g/cm<sup>3</sup>). Still during the rolling process, the unwanted oxidation layer (mill scale) is removed with high-pressure water jets from the surface of the hot steel. Depending on the process, large quantities of water, but also hydraulic oils are mixed with mill scale. Depending on the process, a differentiation is made between largely oil-free coarse sinter and oil-bearing fine sinter, also referred to mill scale sludge. While the coarse fraction can be recycled back into the production process, the oil-containing fine fraction is generally used in external applications. The oil contents vary widely from around 3 to 15 mass %. In legal terms, this is generally classed as non-hazardous waste. Owing to the oil content, the responsible authorities usually specify storage on a hard surface under a cover.

#### › Heavy spar/processing

The industrial mineral heavy spar, also referred to as baryte or barium sulphate (BaSO<sub>4</sub>), is difficult to dissolve chemically and resistant to high temperatures. On account of its high density (4.5 g/cm<sup>3</sup>), heavy spar is used in a variety of industrial applications. Heavy spar is used primarily as filler in sound insulation, but also for radiation protection. Heavy spar is, for instance, used as aggregate in concrete for shielding against X-ray radiation. On account of the high density heavy spar is also used in the counter weights of lifts and crane vehicles. In Germany there are three pits in which heavy spar is extracted underground. The heavy spar mining areas are found in the Harz, Sauerland and Black Forest regions. Above ground, the ore is separated from gangue rock by modern wet processing methods. Processing generally comprises washing and comminution as well as gravity separation by flotation.

Außerdem müssen störende Begleitelemente wie Phosphor, Schwefel, Silizium, Sauerstoff und Mangan auf niedrige Restgehalte reduziert werden. Beim  $O_2$ -Aufblasverfahren wird ein Konverter mit Roheisen, Schrott und Kalk beschickt. Auf die Schmelze wird mit einer Lanze Sauerstoff aufgeblasen. Durch den Gasstrahl und das beim Frischen entstandene Kohlenmonoxid wird das Bad durchmischt, wobei die Badtemperatur bis auf rund 1650 °C ansteigt. Begleitelemente werden als Oxide in die Schlackephase überführt und abgetrennt.

#### › Reststoff Konverterstaub

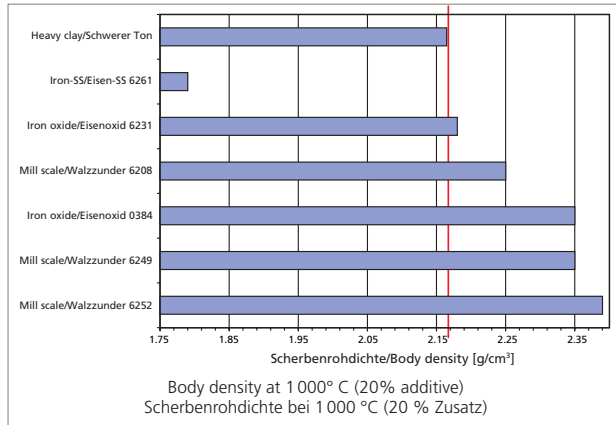
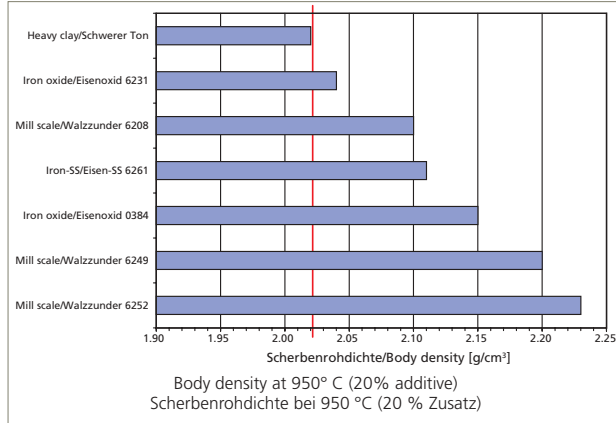
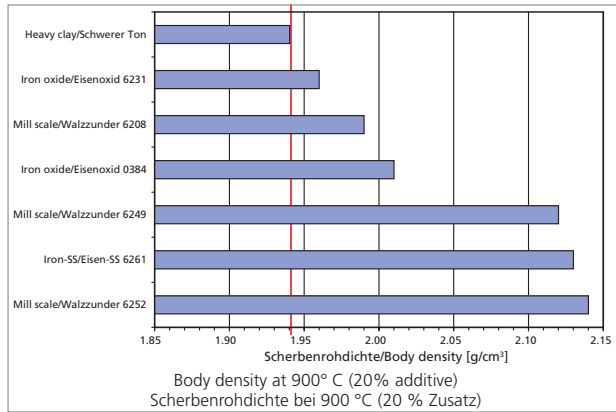
Im Konverter werden aus dem Rauchgas große Mengen Filterstaub über Elektrostaubabscheider abgefangen. Der Anfall kann je nach Größe des Stahlwerks bis über 100000 t/Jahr betragen. Konverterstäube sind je nach Produktionsprozess unterschiedlich aufgebaut. Exemplarisch kann von Magnetitgehalten um ca. 80 Masse-% (Dichte 5,2 g/cm<sup>3</sup>) sowie von Beimengungen an Hämatit (Dichte 5,2 g/cm<sup>3</sup>), Wüstit (Dichte 5,9 g/cm<sup>3</sup>) und Ca-/Mg-Karbonaten (Dichte 2,7 g/cm<sup>3</sup>) ausgegangen werden. Rechtlich handelt es sich meistens um ungefährliche Abfälle. Der geplante Einsatz von Konverterstaub ist der zuständigen Behörde anzuzeigen. In der Regel wird eine Lagerung auf einer befestigten Fläche, möglichst unter Dach, gefordert. Bei der Aufbereitung im Ziegelwerk kann es trotz Anfeuchtung zu einer Belastung mit Eisenstaubpartikeln kommen.

#### › Reststoff Walzunderschlamm

Beim Warmwalzen von Stahl oxidiert die Oberfläche der Brammen in Kontakt mit Luftsauerstoff zu verschiedenen Eisenoxiden. Dominant sind Wüstit (Dichte 5,9 g/cm<sup>3</sup>) und Magnetit (Dichte 5,2 g/cm<sup>3</sup>) vor Hämatit (Dichte 5,2 g/cm<sup>3</sup>). Noch beim Walzen wird die störende Oxidationsschicht (Walzunder) mit Wasserhochdruck von der Oberfläche des heißen Stahls entfernt. Prozessbedingt werden dabei vor allem große Mengen Wasser, aber auch Hydrauliköle, mit dem Walzunder vermischt. Prozessbedingt wird zwischen weitgehend ölfreiem Grobsinter und ölhaltigem Feinsinter, auch als Walzunderschlamm bezeichnet, unterschieden. Während die Grobfraction dem Produktionsprozess wieder zugeführt werden kann, muss die ölhaltige Feinfraktion i. d. R. extern verwertet werden. Die Ölgehalte unterliegen deutlichen Schwankungen von ca. 3 bis 15 Masse-%. Rechtlich handelt es sich überwiegend um ungefährlichen Abfall. Wegen des Ölgehaltes wird von den zuständigen Behörden meistens die Lagerung auf einer befestigten Fläche unter Dach gefordert.

#### › Schwerspat/Aufbereitung

Das Industriemineral Schwerspat, auch Baryt oder Bariumsulfat (BaSO<sub>4</sub>) genannt, ist chemisch schwer löslich und hoch temperaturbeständig. Aufgrund der hohen Rohdichte (4,5 g/cm<sup>3</sup>) wird Schwerspat industriell sehr vielfältig verwendet. In erster Linie kommt Schwerspat als Füllstoff bei der Schalldämmung, aber auch beim Strahlenschutz zum Einsatz. So wird Schwerspat als Zuschlag im Beton zur Abschirmung von Röntgenstrahlung eingesetzt. Wegen der hohen Rohdichte wird Schwerspat auch in Gegengewichten von Aufzügen und Kranfahrzeugen eingesetzt. In Deutschland gibt es derzeit drei Gruben, in denen Schwerspat unter Tage gewonnen wird. Die Abbaugebiete befinden sich im Harz, im Sauerland sowie im Schwarzwald. Über Tage wird das Erz durch moderne Nassaufbereitungsverfahren vom Ganggestein getrennt. Die Aufbereitung umfasst im We-



»11 Influence on body density with industrial waste  
 »11 Beeinflussung der Scherbenrohddichte mit industriellen Reststoffen

» Heavy spar clay TSM

The washing water from heavy spar processing contains primarily clay components from the gangue as well as baryte waste, which cannot be completely removed. Chamber presses are used to squeeze out the washing water to residual moistures of around 18 mass %. The resulting waste material is an absolutely rock-free filter cake, which can be referred to as a clay mineral-heavy spar mixture (CHSM) with regard to its mineralogical composition. This is non-hazardous waste.

4.1 Increasing body density with industrial waste

»11 shows that body density of a heavy clay can be increased substantially with the addition of industrial waste, although the efficiency of the additives varies widely. Overall much higher body densities can be obtained than with the addition of natural raw materials.

While iron oxide 6231 (converter dust) and the mill scale 6208 hardly have any effect, a significant increase in body

density is achieved by washing and crushing as well as the density separation by flotation.

» Reststoff Schwerspatton TSM

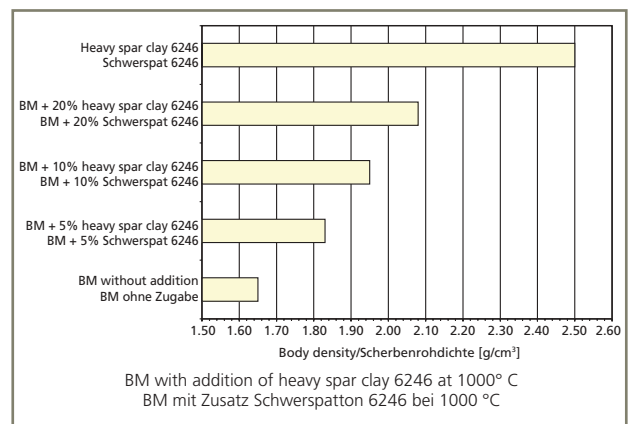
The wash water from the heavy spar processing contains above all clay components from the gangue as well as heavy spar residue, which cannot be completely separated. Through chamber filter presses the wash water can be pressed up to residual moistures of approximately 18 mass-%. As residue results an absolutely stone-free filter cake, which due to its mineralogical composition as clay mineral-heavy spar mixture TSM can be designated. It is a non-hazardous waste.

4.1 Erhöhung der Scherbenrohddichte mit industriellen Reststoffen

»11 zeigt, dass sich die Scherbenrohddichte eines schweren Tons bei Zugabe von industriellen Reststoffen deutlich erhöhen lässt, wobei die Effizienz der Zusätze sehr unterschiedlich ist. Insgesamt lassen sich aber deutlich höhere Scherbenrohddichten als bei Zusatz von natürlichen Rohstoffen erzielen.

Während das Eisenoxid 6231 (Konverterstaub) und der Walzzunder 6208 kaum wirken, lässt sich insbesondere beim Walzzunder 6249 und beim Walzzunder 6252 ein signifikanter Anstieg der Scherbenrohddichte erkennen. Die Ursache für die unterschiedliche Wirkungsweise liegt in der jeweiligen mineralogischen Zusammensetzung der Reststoffe. So neigt der Konverterstaub bei geringeren Brenntemperaturen beispielsweise zum Aufbau eines vergleichsweise porösen Mikrogefüges, das erst bei Brenntemperaturen ab rund 1100 °C in eine entsprechend dichte Struktur übergeht. Ähnlich verhält es sich mit dem Walzzunder 6208, der als prozessbedingte Besonderheit rund 20 Masse-% Kieselerde enthält. Auch dieses Material trägt daher bei den hier relevanten Brenntemperaturen (Hintermauerziegelproduktion von ca. 850 bis 1000 °C) kaum zur Erhöhung der Scherbenrohddichte bei.

Als wichtiges Fazit bleibt daher festzuhalten, dass aus der Rohddichte der Zusatzstoffe keine Rückschlüsse auf die Erhöhung der Scherbenrohddichte gezogen werden können. Die Wirkung des Schwerspattons TSM 6246 bei Zugabe zu einer realen Hintermauerziegelmasse ist in »12 dargestellt. Dabei kann die Scherbenrohddichte der Masse effizient von 1,64 g/cm³ (ohne Zugabe) bis auf einen Wert von 2,08 g/cm³ erhöht werden. Die Scherbenrohddichte des Schwerspattons selbst liegt bei 2,50 g/cm³.



»12 Influence on body density with the addition of heavy spar clay  
 »12 Beeinflussung der Scherbenrohddichte bei Zugabe von Schwerspatton

density can be observed especially with the mill scale 6249 and mill scale 6252. The reason for the different mechanism lies in the respective mineralogical composition of the waste. At lower firing temperatures, for example, the converter dust tends to build up a comparatively porous microstructure, which only transforms into an appropriately dense structure at firing temperatures from around 1 100° C. Similar behaviour is observed with mill scale 6208, which contains around 20 mass % diatomaceous earth as a special characteristic. Even this material therefore hardly contributes to an increase in the body density, with the relevant firing temperatures (of around 850 to 1 000° C backing brick production).

One important conclusion is therefore that the density of the additives gives no indication of the increase in body density. The effect of the heavy spar clay TSM 6246 added to a real backing brick body is shown in »12. The body density can be efficiently increased from 1.64 g/cm<sup>3</sup> (without addition) to a value of 2.08 g/cm<sup>3</sup>. The body density of the heavy spar clay itself lies at 2.50 g/cm<sup>3</sup>.


## 5 Conclusion and final remarks

The holistic geological approach assumes that the density of the earth jumps up with increasing depth. Whereas the earth's crust has an average density of 2.8 g/cm<sup>3</sup>, the average density of the earth's mantle is already around 4.5 g/cm<sup>3</sup> and that of the earth's core around 11.0 g/cm<sup>3</sup>. The high densities in the earth's mantle can be attributed to the high-iron phases, particularly to the minerals haematite, magnetite and wuestite. Despite the endogenous dynamics of the earth and the associated magmatic processes, the high-density rocks and minerals from the earth's interior do not reach the surface of the earth. Only the lighter differentiation products in the form of silicate and largely metal-oxide-free melts reach the surface at certain points of the earth. From this potential of plutonic and effusive rocks available at the earth's surface in Germany, body density can be most effectively increased with basic volcanites such as basalts and basanites.

In the iron and steel industry, red-staining waste with high densities are produced. Mineralogical studies of converter dusts and different types of mill scale have shown that these substances are very interestingly composed of iron oxide phases that are otherwise only found in the earth's mantle. They consist mainly of mixtures of magnetite and wuestite. Haematite and other phases are generally contained as accessory constituents. The tests on increasing body density have shown that the efficiency of these waste materials as additives can be very high, but also varies widely, i.e. their efficiency must be assessed in a production- or site-specific analysis. The same applies to any environmentally harmful substances. Finally, it should be noted that the use of such waste must be carefully examined in every respect and tested in complex experiments. The same applies to the logistical requirements, which must be regarded as exceptionally high compared to the normal clay transports. Only with consideration of all these factors, can long-term industrial success be combined with the universally desired financial advantages based on commensurate extra payments for waste materials delivered free. And if everything fits, the environment also profits, for in the interest of a real circular economy, the preservation of resources is a top priority.

## 5 Zusammenfassung und Schlussbemerkungen

Der ganzheitliche geologische Ansatz geht davon aus, dass die Dichte der Erde mit der Tiefe sprunghaft zunimmt. Während die Erdkruste eine mittlere Dichte von 2,8 g/cm<sup>3</sup> besitzt, liegt die mittlere Dichte des Erdmantels schon bei rund 4,5 g/cm<sup>3</sup> und die des Erdkerns bei gar rund 11,0 g/cm<sup>3</sup>. Die hohen Dichten im Erdmantel werden dabei durch eisenreiche Phasen vor allem durch die Minerale Hämatit, Magnetit und Wüstit verursacht. Trotz der endogenen Dynamik der Erde und der damit verbundenen magmatischen Prozesse erreichen die hochdichten Gesteine und Minerale des Erdinneren nicht die Erdoberfläche. Lediglich die leichteren Differentiationsprodukte gelangen in Form von silikatischen und weitgehend metalloxydfreien Schmelzen an bestimmten Stellen der Erde nach oben. Von diesem, an der Erdoberfläche in Deutschland verfügbaren Potenzial an Tiefen- und Ergussgesteinen lässt sich die Scherbenrohddichte am wirkungsvollsten mit basischen Vulkaniten wie Basalten und Basaniten erhöhen.

In der Eisen- und Stahlindustrie fallen erwartungsgemäß rot färbende Reststoffe mit hohen Rohdichten an. Mineralogische Untersuchungen an Konverterstäuben und unterschiedlichen Walzzundertypen haben ergeben, dass sich diese Stoffe interessanterweise aus Eisenoxidphasen zusammensetzen, die sonst nur im Erdmantel vorkommen. Es handelt sich überwiegend um Gemische aus Magnetit und Wüstit. Hämatit und weitere Phasen treten i. d. R. als Nebengemengteile auf. Die Versuche zur Erhöhung der Scherbenrohddichte haben gezeigt, dass die Effizienz dieser Reststoffe sehr hoch sein kann, aber auch sehr differenziert, d. h. produktions- bzw. standortspezifisch, betrachtet werden muss. Das Gleiche gilt für etwaige umweltschädliche Schadstoffe. Abschließend ist festzuhalten, dass der Einsatz derartiger Reststoffe in jeder Hinsicht sehr sorgfältig geprüft und komplex untersucht werden muss. Dasselbe gilt auch für logistische Anforderungen, die gemessen an normalen Tontransporten als außerordentlich hoch zu bewerten sind. Nur bei Berücksichtigung all dieser Faktoren lassen sich langfristige technische Erfolge mit den allseits gewünschten finanziellen Vorteilen durch entsprechende Zuzahlungen frei Werk verbinden. Und wenn alles passt, ist auch der Umwelt gedient, denn im Interesse einer real funktionierenden Kreislaufwirtschaft wird Ressourcenschonung ganz groß geschrieben. 

### Literatur

- [1] Matthes, S.: Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. 1983/6, 417 S., Springer-Verlag; Heidelberg.
- [2] Krakow, L.: Klassifikation und Bezugsquellen eignungsgeprüfter Ton- und Magerungsrohstoffe in Deutschland. –Teil 1: Ziegelindustrie International 3/2002, S. 16–24, Teil 2: Ziegelindustrie International 4/2002, S. 32–40; Bauverlag, Wiesbaden.
- [3] Hauk, D.; Hilker, E.: Abfallstoffeinsatz in der Ziegelindustrie. – Ziegeleitechnisches Jahrbuch, 1984, S. 15–60; Bauverlag, Wiesbaden und Berlin.

### Dr. Krakow RohstoffConsult

Hans Böckler-Staße 2 | 37079 Göttingen | Germany  
 T +49 (0) 5 51 50 45 50 | F +49 (0) 55 15 04 55 50  
[krakow@clayserver.de](mailto:krakow@clayserver.de) | [www.dr-krakow-tone.de](http://www.dr-krakow-tone.de)