

SUMMARY

In order to extend the tax capping for the eco-tax, the German Federal Government and industry have concluded a new agreement tied to improving the energy efficiency of the German economy. As part of this agreement, industry has committed itself to reduce the level of energy consumption relative to gross value added by 1.3% per annum from 2013, and by 1.35% from 2016. Since such a continuous reduction in energy demand represents a significant challenge for energy-intensive sectors, the Research Institute of the Cement Industry has joined forces with experts from the German cement companies to compile a study which describes and forecasts a plausible course of development in the use of energy in cement production in Germany under the given conditions and anticipated requirements. Based on the historic data, scenarios were created that forecast a probable development of the product portfolio and the impacts on the use of energy from a modern day perspective. On this basis, parameter studies were then carried out to see how certain developments, e.g. with regard to the availability of raw materials, the fuel mix used or the increasing requirements of environmental regulations, would affect energy usage trends. The first part of this publication describes the specific scenarios and underlying assumptions, and provides examples of maximum estimates for the trend in thermal and electrical energy demand with the hypothetical proviso that all cement clinker is burnt in new kilns and all cement is ground in new grinding plants. ◀

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Verlängerung des so genannten Spitzenausgleichs bei der Ökosteuer haben die deutsche Bundesregierung und die Industrie eine neue Vereinbarung geschlossen, die an eine Verbesserung der Energieeffizienz der deutschen Wirtschaft geknüpft ist. Die Industrie hat sich hierin verpflichtet, den auf die Bruttowertschöpfung bezogenen Energieverbrauch ab dem Jahr 2013 jährlich um 1,3%, sowie ab 2016 jährlich um 1,35% zu vermindern. Da eine solche stetige Verminderung des Energiebedarfs für energieintensive Branchen eine sehr große Herausforderung darstellt, hat das Forschungsinstitut der Zementindustrie gemeinsam mit Experten der deutschen Zementunternehmen eine Studie erstellt, die eine plausible Entwicklung des Energieeinsatzes bei der Zementherstellung in Deutschland unter den gegebenen Randbedingungen sowie zu erwartenden Anforderungen beschreibt bzw. prognostiziert. Ausgehend von der historischen Entwicklung wurden Szenarien erstellt, die eine aus heutiger Sicht wahrscheinliche Entwicklung des Produktportfolios sowie der Auswirkungen auf den Energieeinsatz prognostiziert. Darauf aufbauend wurden Parameterstudien durchgeführt, wie sich bestimmte Entwicklungen, wie z.B. hinsichtlich der Verfügbarkeit der Einsatzstoffe, des eingesetzten Brennstoffmixes oder aber zunehmende Anforderungen an Umweltauflagen auf die Entwicklung des Energieeinsatzes auswirken würden. Der erste Teil der Veröffentlichung beschreibt die angesetzten Szenarien und die zugrundeliegenden Annahmen sowie modellhafte Maximalabschätzungen für die Entwicklung des thermischen und des elektrischen Energiebedarfs unter der hypothetischen Maßgabe, dass der gesamte Zementklinker in neuen Öfen gebrannt und der gesamte Zement in neuen Mahlanlagen gemahlen würde. ◀

Energy efficiency in cement production; part 1

Energieeffizienz bei der Zementherstellung; Teil 1

1 Introduction

1.1 Motivation

For an energy-intensive industry such as the cement industry, the subject of energy efficiency has always been a significant economic factor even for financial reasons alone so that reducing energy costs, be it the cost of fuel or electricity, has been a focus of efforts to reduce manufacturing costs for many decades.

Any discussion of energy efficiency with regard to cement production raises the question of suitable reference parameters. Cement is ultimately an important constituent of the construction material concrete so this should be taken into account when considering its properties. On the other hand, concrete production can only be partly influenced by the cement industry. Cement was therefore used as the relevant reference parameter for this study. Despite this limitation, the factors affecting energy demand in cement production and their interactions are very complex. These include:

- › the available raw materials and fuels, along with other main constituents of cement in addition to the clinker,
- › the installed plant technology (including environmental protection technology),
- › the desired clinker and cement properties,
- › the specifications of the cement standards and ultimately (not included in this examination) of the concrete standards.

From this it is evident that a simple examination of the specific energy usage – in particular that of individual processes – is neither sufficient nor constructive from a higher ecological perspective. In fact, it is only possible to optimise energy efficiency in cement production in the long term by optimising the entire process chain, including the product portfolio, under the respective given constraints.

› Fig. 1 shows the trend in total energy demand in cement production in Germany between 1995 and 2012. This shows that it has hardly changed despite the manifold changes, e.g. in terms of the fuel usage, the clinker/cement ratio, etc.

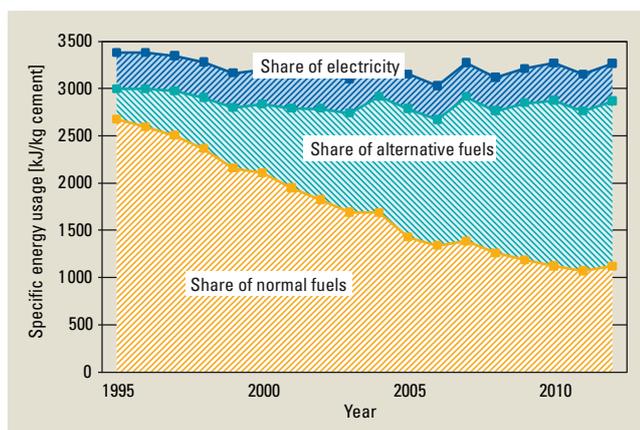


Figure 1: Energy demand of the German cement industry 1955–2012

Bild 1: Energiebedarf der deutschen Zementindustrie 1955–2012

1 Einleitung

1.1 Motivation

Für eine energieintensive Branche wie die Zementindustrie ist das Thema Energieeffizienz schon aus Kostengründen seit jeher ein wesentlicher Wirtschaftsfaktor, sodass eine Verminderung der Energiekosten, seien es die Brennstoff- oder die Stromkosten, schon seit vielen Jahrzehnten im Fokus der Bemühungen um eine Verminderung der Herstellkosten liegt.

Im Hinblick auf die Energieeffizienz der Herstellung von Zement stellt sich die Frage der geeigneten Bezugsgröße. Da Zement letztlich ein wichtiger Bestandteil des Baustoffs Beton ist, müsste dieser eigentlich unter Berücksichtigung seiner Eigenschaften betrachtet werden. Andererseits kann die Betonherstellung nur teilweise durch die Zementindustrie beeinflusst werden. Deshalb wurde für diese Studie der Zement als relevante Bezugsgröße verwendet. Trotz dieser Einschränkung sind die Einflussgrößen auf den Energiebedarf der Zementherstellung sowie deren Wechselwirkungen sehr komplex. Dazu gehören:

- › die verfügbaren Roh- und Brennstoffe sowie andere Zementhauptbestandteile neben Klinker
- › die installierte Anlagentechnik (einschl. Umweltschutztechnologien)
- › die angestrebten Klinker- und Zementeigenschaften
- › die Vorgaben der Zementnorm und letztlich (außerhalb dieser Betrachtung) der Betonnorm

Daraus wird deutlich, dass eine bloße Betrachtung des spezifischen Energieeinsatzes – insbesondere von Einzelprozessen – aus übergeordneter ökologischer Sicht nicht ausreichend bzw. zielführend ist. Vielmehr kann nur eine Optimierung der gesamten Prozesskette einschließlich des Produktportfolios unter den jeweils gegebenen Randbedingungen zu einer langfristigen Optimierung der Energieeffizienz der Zementherstellung führen.

› Bild 1 zeigt die Entwicklung des Gesamtenergiebedarfs der Zementherstellung in Deutschland im Zeitraum von 1995 bis 2012. Daraus geht hervor, dass dieser sich trotz der vielfältigen Veränderungen z.B. im Hinblick auf Brennstoffeinsatz, Klinker/Zement-Faktor u.a. kaum verändert hat.

Neben den technischen und normativen Randbedingungen spielen auch andere, z.T. nicht-technische Faktoren eine wichtige Rolle:

- › Bei der Zementherstellung handelt es sich um einen Stoffumwandlungsprozess, der gewisse Reaktionsenthalpien erfordert, die technisch nicht unterschritten werden können.
- › Bei einem Massenprodukt wie Zement begrenzt die Verfügbarkeit der Einsatzstoffe die Möglichkeiten, die Energieeffizienz durch Anpassung des Produktportfolios zu verbessern.

In addition to the technical and normative constraints other, sometimes non-technical, factors also play an important role.

- › Cement production is a material transformation process that requires certain reaction enthalpies below which the process cannot function.
- › With a mass product such as cement, the availability of the raw materials limits the options for improving energy efficiency by adjusting the product portfolio.
- › The requirements placed by the market on the properties of the product can also lead to an increase in energy consumption (e.g. the production of finer cements).
- › Other political objectives, such as climate protection or the conservation of natural resources, can stand in the way of reducing energy usage, which requires the various objectives to be optimised accordingly.
- › Exogenous factors, e.g. more stringent environmental legislation, can necessitate an increase in energy consumption (e.g. the use of electricity for exhaust gas cleaning).

The Research Institute of the Cement Industry has therefore joined forces with experts from the cement companies to compile a study that describes and forecasts a plausible course of development in the use of energy in cement production in Germany under the given conditions and anticipated requirements.

1.2 Methodology

Based on the historic data, scenarios were created which forecast a probable development of the product portfolio and the use of thermal and electrical energy under current foreseeable conditions from a modern-day perspective. On this basis, parameter studies were then carried out to see how certain developments, e.g. with regard to the availability of raw materials or the fuel mix used, would affect energy usage trends. The assumptions made and the corresponding scenarios are shown below, and the appropriate conclusions are drawn. Estimates have also been made in terms of the maximum possible potential reduction with regard to the demand for electrical and thermal energy under the given conditions.

The following scenarios, which can also be combined with each other, have been defined systematically. Four individual scenarios were developed for the purpose of forecasting the distribution of the types of cement.

- › Basic scenario (Scenario 1): The development of the distribution of the types of cement based on historic data [1] and the assumptions described in Section 3.1.
- › Scenario 2: In this scenario it is assumed that 25 % less granulated blastfurnace slag will be available in the medium term. For technical reasons this shortage of granulated blastfurnace slag will primarily affect CEM II-S production rather than CEM III production (cf. the historic data for 2009).
- › Scenario 3: It is assumed that CEM II/C-M cements will be produced in Germany from 2020 onwards. Whether this cement will actually be known as CEM II/C-M in the future is still under discussion. The composition in 2020 is assumed to be 30 % granulated blastfurnace slag and 20 % limestone. In 2030, small portions of the granulated blastfurnace slag in the CEM II/C-M will be replaced by siliceous fly ash. Their market shares will develop analogously

- › Marktanforderungen an die Eigenschaften der Produkte können auch zu einer Erhöhung des Energieverbrauchs führen (z.B. Herstellung feinerer Zemente)
- › Andere politische Ziele, wie der Klimaschutz oder die Ressourcenschonung, können der Verminderung des Energieeinsatzes entgegenstehen, was eine entsprechende Optimierung der verschiedenen Zielsetzungen erfordert.
- › Exogene Faktoren, wie z.B. eine verschärfte Umweltgesetzgebung, können eine Erhöhung des Energieverbrauchs (z.B. des Stromeinsatzes für die Abgasreinigung) erfordern.

Das Forschungsinstitut der Zementindustrie hat deshalb gemeinsam mit Experten der Zementunternehmen eine Studie erstellt, die eine plausible Entwicklung des Energieeinsatzes der Zementherstellung in Deutschland unter den gegebenen Randbedingungen sowie zu erwartenden Anforderungen beschreibt bzw. prognostiziert.

1.2 Methodik

Ausgehend von den historischen Daten wurden Szenarien erstellt, die eine aus heutiger Sicht wahrscheinliche Entwicklung des Produktportfolios sowie des thermischen und des elektrischen Energieeinsatzes unter den heute absehbaren Rahmenbedingungen prognostizieren. Ausgehend davon wurden Parameterstudien durchgeführt, wie sich bestimmte Entwicklungen, wie z.B. hinsichtlich der Verfügbarkeit der Einsatzstoffe oder des eingesetzten Brennstoffmixes auf die Entwicklung des Energieeinsatzes auswirken würden. Die getroffenen Annahmen sowie die entsprechenden Szenarien werden im Folgenden dargestellt und entsprechende Schlussfolgerungen getroffen. Darüber hinaus wurden Abschätzungen im Hinblick auf das maximal mögliche Minderungspotenzial im Hinblick auf den elektrischen und den thermischen Energiebedarf unter den gegebenen Randbedingungen durchgeführt.

Methodisch wurden die folgenden Szenarien definiert, die auch untereinander kombiniert werden können. Für die Prognose der Zementartenverteilung wurden vier verschiedene Szenarien entwickelt:

- › Basisszenario (Szenario 1): Entwicklung der Zementartenverteilung auf Basis historischer Daten [1] mit den in Kapitel 3.1 beschriebenen Annahmen
- › Szenario 2: In diesem Szenario wird angenommen, dass mittelfristig 25 % weniger Hüttensand zur Verfügung stehen wird. Der Hüttensandmangel geht aus technologischen Gründen im Wesentlichen nicht zu Lasten der CEM III- sondern der CEM II-S-Produktion (vgl. hierzu die historische Entwicklung im Jahr 2009).
- › Szenario 3: Es wird angenommen, dass ab dem Jahr 2020 CEM II/C-M Zemente in Deutschland produziert werden. Ob diese Zemente zukünftig tatsächlich CEM II/C-M genannt werden, wird derzeit noch diskutiert. Für die Zusammensetzung wird im Jahr 2020 30 % Hüttensand und 20 % Kalkstein angenommen. Im Jahr 2030 werden auch geringe Anteile des Hüttensands im CEM II/C-M durch Steinkohlenflugasche ersetzt. Deren Marktanteile entwickeln sich analog, jedoch etwas langsamer, zu den CEM II/B-M-Zementen seit dem Jahr 2005. Aus technologischen Gründen ersetzen CEM II/C-M-Zemente im Wesentlichen CEM II/B-M- und CEM II-S-Zemente.
- › Szenario 4: Kombination der Szenarien 2 und 3.

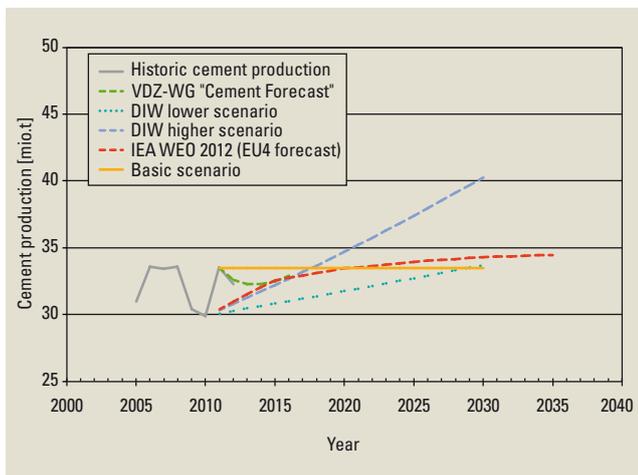


Figure 2: Historic and predicted cement production based on various studies

Bild 2: Historische und prognostizierte Zementproduktion basierend auf verschiedenen Studien

gously, albeit somewhat more slowly than those of the CEM II/B-M cements since 2005. For technical reasons, CEM II/C-M cements will essentially replace CEM II/B-M and CEM II-S cements.

Scenario 4: A combination of scenarios 2 and 3.

As far as the forecast for the development of process and plant technology is concerned a distinction is made between a BAU scenario (BAU = Business As Usual) and a BAT scenario (BAT = Best Available Technique). The BAU scenario assumes normal technical development of the process engineering and plant technology. In the BAT scenario the energy consumptions that would be derived from complete renewal of the entire plant pool ("greenfield plants") are examined to determine the optimum situation.

This first part of the article presents the scenarios together with the underlying assumptions, the results of the BAT scenarios for the two most energy-intensive sub-processes – the thermal energy demand of the clinker burning process and the electrical energy demand of the cement grinding process.

2 Developments in cement production

An essential basic assumption for forecasting energy usage is the expected growth in quantity with respect to cement production. Even though energy efficiency is a specific parameter, the expected scale of cement production has a significant effect on the possible product portfolio. Since the volumes of the other main constituents of cement, e.g. granulated blastfurnace slag or fly ash, are independent of the growth in demand for cement, there is a significant interrelationship between the forecast demand for cement and the clinker/cement ratio. The latter characterises the proportion of cement clinker in the cement and therefore the intergrinding of other main constituents in addition to clinker in the cement.

Various studies, which are briefly introduced below, have been incorporated in this analysis. Fig. 2 provides a summary of the results. It illustrates historic cement production between 2005 and 2012. It also takes into consideration the following forecasts/studies with regard to future developments:

Bezüglich der Prognose der verfahrens- bzw. anlagentechnischen Entwicklung wird zwischen einem BAU-Szenario (BAU = Business As Usual) und einem BAT-Szenario (BAT = Best Available Technique) differenziert. Im BAU-Szenario wird von einer normalen technischen Entwicklung der Verfahrens- und Anlagentechnik ausgegangen. Im BAT-Szenario wird im Sinne einer Maximalabschätzung betrachtet, welche Energieverbräuche sich bei einer grundlegenden Erneuerung des gesamten Anlagenparks („Greenfield-Anlagen“) ergeben würde.

Der vorliegende erste Teil dieser Veröffentlichung umfasst die Darstellung der Szenarien mitsamt der zugrunde liegenden Annahmen sowie die Ergebnisse der BAT-Szenarien für die zwei energieintensivsten Teilprozesse, den thermischen Energiebedarf des Klinkerbrennprozesses sowie den elektrischen Energiebedarf der Zementmahlung.

2 Entwicklung der Zementproduktion

Eine wichtige grundlegende Annahme für eine Prognose des Energieeinsatzes stellt die erwartete Mengenentwicklung bzgl. der Zementherstellung dar. Auch wenn es sich bei der Energieeffizienz um eine spezifische Größe handelt, wirkt sich die erwartete quantitative Zementherstellung maßgeblich auf das mögliche Produktportfolio aus. Da die anderen Zementhauptbestandteile, wie z.B. Hüttensand oder Flugasche mengenmäßig unabhängig von der Entwicklung des Zementbedarfs sind, existiert ein maßgeblicher Zusammenhang zwischen prognostiziertem Zementbedarf und dem so genannten Klinker/Zement-Faktor. Letzterer charakterisiert den Anteil des Zementklinkers im Zement und damit die Zumahlung von anderen Hauptbestandteilen neben Klinker in den Zementen.

In die Analyse wurden verschiedene Studien einbezogen, die nachfolgend kurz vorgestellt werden sollen. Bild 2 gibt die Ergebnisse zusammenfassend wieder. Zum einen ist darin die historische Zementproduktion für die Jahre 2005 bis 2012 dargestellt. Zum anderen wurden folgende Prognosen/Studien bezüglich der zukünftigen Entwicklungen berücksichtigt:

- Der Arbeitskreis Zementprognose des VDZ gibt jährlich eine Prognose ab, wie sich der Zementbedarf in Deutschland in den kommenden fünf Jahren entwickeln wird [2]. Die dargestellte Prognose berücksichtigt den Zementverbrauch in den Jahren 2012 bis 2016. Veränderungen der Importe und Exporte von Zement werden nicht berücksichtigt. Damit wurden die Veränderungsdaten für diese Studie eins zu eins auf die Zementproduktion umgerechnet.
- Das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) hat im Auftrag des Bundesverbands Baustoffe – Steine und Erden (BBS) eine Studie zur langfristigen Rohstoffnachfrage durchgeführt [3]. Diese beinhaltet u.a. eine Prognose des Bauvolumens in Deutschland für den Zeitraum 2010 bis 2030. Zwei Szenarien wurden erarbeitet: Ein unteres Szenario geht von einer durchschnittlichen jährlichen Veränderung von +0,6% aus. Das entsprechende obere Szenario weist eine jährliche Steigerung des Bauvolumens um 1,5% aus.
- Die International Energy Agency geht in ihrem „World Energy Outlook 2012“ [4] für die vier europäischen Länder Frankreich, Deutschland, Italien und Großbritannien davon aus, dass die Zementproduktion basierend auf dem

- ▶ The cement forecast study group of the VDZ issues an annual forecast of how it expects demand for cement in Germany to develop in the coming five years [2]. The forecast presented here considers cement demand between 2012 and 2016. It does not take into account any changes in cement imports and exports. For this study the rates of change were transposed one-to-one to cement production.
- ▶ The German Institute for Economic Research (DIW) has carried out a study on long-term raw material demand on behalf of the German Building Materials Association (BBS) [3]. This includes, among other things, a forecast of the construction volume in Germany between 2010 and 2030. Two scenarios were developed: A 'lower' scenario assumes an average annual change of +0.6%. The corresponding 'higher' scenario exhibits an annual increase in the construction volume of 1.5%.
- ▶ In its "World Energy Outlook 2012" [4] the International Energy Agency assumes that based on the figure for 2010 (91.9 million tonnes) cement production in the four European countries France, Germany, Italy and Great Britain would grow to 105 million tonnes by 2030. The graph shown in Fig. 2 indicates a one-to-one transposition of the growth rate for the four countries to German production.

Since some of the studies evaluate the growth in cement demand (not production), it has also been assumed that there are no significant changes in the import/export situation.

Further studies compiled in the years prior to the economic crisis (2009 and earlier) have not been taken into consideration, since they do not take into account the considerable cut-back in 2009 and 2010 and can therefore be regarded as less realistic.

Apart from the 'higher' DIW scenario, the scenarios presented indicate that the market could grow in the region of 30 and 35 million tonnes in terms of domestic production. On this basis it was decided to assume a constant level of cement production based on 2011. This is also backed up by forecasts for the medium-term mainly stable population figures in Germany and the assumption that per-capita demand is not expected to change significantly in the medium term. Such forecasts are, of course, unable to cover fluctuation such as those which occurred in 2009 and 2010, triggered by the global economic crisis.

3 Development of the cement portfolio

3.1 Assumptions

3.1.1 Fundamental parameters

The following section forecasts the development of the cement product portfolio in Germany up to 2030. To be able to generate various scenarios based on the available data, it is first necessary to specify some fundamental parameters. The following assumptions were made:

- ▶ Based on the basic principles outlined in Section 2 the total cement production is assumed to remain at a constant 33.5 million tonnes until 2030 (including exports).
- ▶ It has also been assumed that the cement technology predominantly used in Germany will not undergo any significant changes by 2030.
- ▶ Fly ash will continue to be used primarily as a concrete addition and to a small degree as a main constituent of cement.

Jahr 2010 (91,9 Mio. t) bis zum Jahr 2030 auf 105 Mio./t ansteigen wird. Die in Bild 2 dargestellte Kurve kennzeichnet eine Eins-Zu-Eins-Umsetzung der Steigerungsrate für die vier Länder auf die deutsche Produktion.

Da einige der Studien die Entwicklung des Zementverbrauchs (nicht der Produktion) betreffen, wurde zusätzlich angenommen, dass es keine signifikanten Veränderungen der Import-/Exportsituation gibt.

Weitere Studien, die in den Jahren vor der Wirtschaftskrise (2009 und früher) erstellt wurden, wurden nicht berücksichtigt, da sie den wesentlichen Einschnitt in den Jahren 2009 und 2010 nicht berücksichtigen und damit als wenig realistisch angesehen werden.

Die dargestellten Szenarien deuten bis auf das obere DIW-Szenario darauf hin, dass sich eine zukünftige Marktentwicklung in einem Bereich zwischen 30 und 35 Mio. Tonnen Inlandsproduktion abspielen dürfte. Auf dieser Basis wurde entschieden, von einer konstanten Zementproduktion basierend auf dem Jahr 2011 auszugehen. Hierfür sprechen auch Prognosen für die mittelfristig weitgehend stabile Bevölkerungszahl in Deutschland sowie die Annahme, dass sich der Pro-Kopf-Verbrauch mittelfristig nicht wesentlich ändern wird. Schwankungen wie die in den Jahren 2009 und 2010, ausgelöst durch die Weltwirtschaftskrise, können selbstverständlich durch solche Prognosen nicht abgedeckt werden.

3 Entwicklung des Zementportfolios

3.1 Annahmen

3.1.1 Grundlegende Rahmenbedingungen

Im Folgenden wird die Entwicklung des Zementproduktportfolios in Deutschland bis zum Jahr 2030 prognostiziert. Um verschiedene Szenarien auf Basis der vorhandenen Datengrundlage errechnen zu können, ist es zunächst erforderlich, grundlegende Rahmenbedingungen festzulegen. Folgende Annahmen wurden getroffen:

- ▶ Basierend auf den in Kapitel 2 beschriebenen Grundlagen wird die Gesamtzementproduktion bis zum Jahr 2030 als konstant bei 33,5 Mio. Tonnen (inkl. Export) angenommen.
- ▶ Es wird davon ausgegangen, dass sich die Betontechnologie, die in Deutschland überwiegend angewandt wird, innerhalb der Jahre bis 2030 nicht wesentlich verändern wird.
- ▶ Flugasche wird weiterhin im Wesentlichen als Betonzusatzstoff und in geringem Maß als Zementhauptbestandteil eingesetzt.
- ▶ Hüttensand wird weiterhin als Zementhauptbestandteil verwendet.
- ▶ Bezüglich der Zementgehalte je m³ Beton wird keine signifikante Veränderung angenommen.

3.1.2 Verfügbarkeit von Hauptbestandteilen

Neben Portlandzementklinker kommen in Deutschland im Wesentlichen die Zementhauptbestandteile Hüttensand, Steinkohlenflugasche und Kalkstein zum Einsatz. Die Verfügbarkeit von Kalkstein wird im Rahmen der angenommenen Zementproduktionsmenge als unbegrenzt vorausgesetzt. Die historische Verfügbarkeit sowie die Annahmen der zukünftigen Verfügbarkeit von Hüttensand und Steinkohlenflugasche stützen sich auf Angaben des Instituts für Baustoff-Forschung e.V. (FEhS) [5, 6] bzw. des VGB Powertech e.V. [7, 8]. Die histo-

- Granulated blastfurnace slag will continue to be used as a main constituent of cement.
- There is not expected to be any significant change in the cement content per m³ of concrete.

3.1.2 Availability of main constituents

In addition to Portland cement clinker the other main constituents of cement used in Germany are granulated blastfurnace slag, siliceous fly ash and limestone. The availability of limestone is presumed to be unrestricted within the limits of the assumed cement production volume. The historic availability and assumptions on future availability of granulated blastfurnace slag and siliceous fly ash are based on the data of the German Building Materials Institute (FEhS) [5, 6] and VGB Powertech e.V. [7, 8]. The historic availability, usage and assumption of future availability of both materials are illustrated in Figs. 3 and 4. The large decrease in the availability of blastfurnace slag and granulated blastfurnace slag in 2009 (Fig. 3) can be attributed to the economic crisis. In subsequent years, the available volume rose back to that of pre-crisis levels (approx. 8 million tonnes). Unless stated otherwise, it has been assumed based on the data of the FEhS that there will be a constant availability of somewhat over 8 million tonnes of blastfurnace slag until 2030. According to [5], the percentage of granulated blastfurnace slag is slightly under 80 %.

According to [7], the sharp reduction in the available quantities of siliceous fly ash in 2009 (Fig. 4) is not due to falling demand, but rather a weakening of the economy and therefore of the demand for electricity as a result of the economic crisis. The VGB estimates that this level can be roughly maintained in the years leading up to 2030. In contrast, [9] presents a scenario in which demand for electricity in Germany will fall by 2030 to roughly two thirds of the current level (2010). This reduction will particularly affect the generation of electricity from bituminous coal, and therefore also indirectly affect the production of siliceous fly ash. However, since the following forecasts are not based on a significant use of fly ash as a main constituent of cement, this scenario is not taken into consideration in the calculations.

3.2 Scenarios

3.2.1 General background

The initial situation for all of the following scenarios is based on [1]. The various forecasts have been compared with trends in other European countries and discussed with

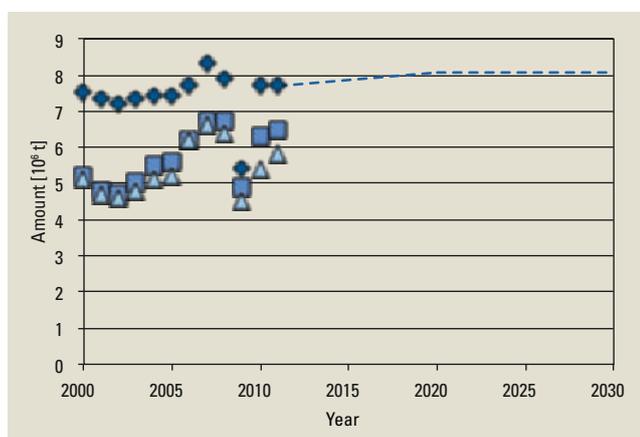


Figure 3: Availability of granulated blastfurnace slag in Germany, assumption [5, 6]

Bild 3: Verfügbarkeit von Hüttensand in Deutschland, Annahme [5, 6]

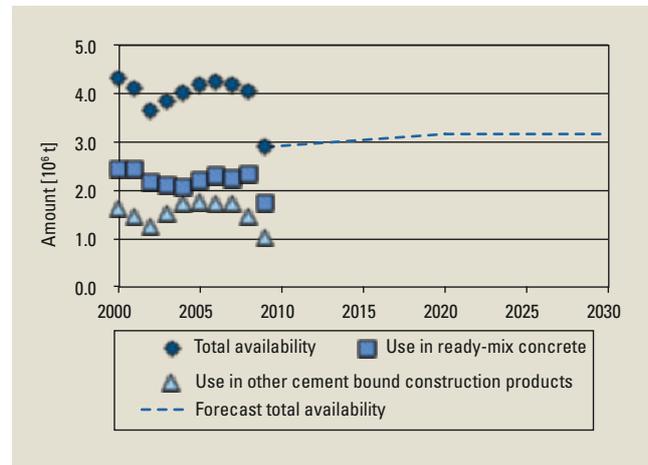


Figure 4: Availability of siliceous fly ash in Germany, assumption [7, 8]

Bild 4: Verfügbarkeit von Steinkohlenflugasche in Deutschland, Annahme [7, 8]

rische Verfügbarkeit, die Verwendung sowie die Annahme der zukünftigen Verfügbarkeit beider Stoffe sind in den Bildern 3 und 4 dargestellt. Der starke Rückgang der Verfügbarkeit von Hochofenschlacke bzw. Hüttensand im Jahr 2009 (Bild 3) ist auf die Wirtschaftskrise zurückzuführen. In den darauffolgenden Jahren stieg die verfügbare Menge wieder auf Vorkrisenniveau (ca. 8 Mio. Tonnen). Bei den Annahmen wird, soweit nicht anders angegeben, den Aussagen des FEhS folgend von einer konstanten Verfügbarkeit von etwas über 8 Mio. Tonnen Hochofenschlacke bis zum Jahr 2030 ausgegangen. Der Anteil an granulierter Hochofenschlacke bzw. Hüttensand liegt gemäß [5] bei etwas unter 80 %.

Der starke Rückgang der verfügbaren Mengen an Steinkohlenflugasche im Jahr 2009 (Bild 4) ist gemäß [7] nicht auf sinkende Nachfrage, sondern auf eine Abschwächung der Konjunktur und damit des Stromverbrauchs in Folge der Wirtschaftskrise zurückzuführen. Der VGB geht davon aus, dass dieses Niveau in den Jahren bis 2030 in etwa gehalten werden kann. Im Gegensatz dazu wird in [9] ein Szenario aufgestellt, in dem der Stromverbrauch in Deutschland bis zum Jahr 2030 auf etwa 2/3 des derzeitigen Stands (2010) zurückgehen wird. Diese Absenkung geht insbesondere auch zu Lasten der Verstromung von Steinkohle und damit indirekt auch zu Lasten der Erzeugung von Steinkohlenflugasche. Da in den folgenden Prognosen aber nicht mit einem signifikanten Einsatz von Steinkohlenflugasche als Zementhauptbestandteil gerechnet wird, bleibt dieses Szenario in den Berechnungen unberücksichtigt.

3.2 Szenarien

3.2.1 Allgemeines

Als Ausgangssituation für alle folgenden Szenarien dient [1]. Die verschiedenen Prognosen, wurden mit Entwicklungen in anderen europäischen Ländern verglichen und mit Experten des Forschungsinstituts und der Zementindustrie diskutiert. Aktuelle Entwicklungen und Anforderungen des Markts konnten so in die Betrachtung aufgenommen werden. In den folgenden Diagrammen sind diejenigen Prognosen dargestellt, die innerhalb der Zementindustrie als realistisch angesehen werden.

3.2.2 Entwicklung der Festigkeitsklassen

Wie die historische Datenbasis in Bild 5 zeigt, nahm der Anteil der Zemente der höheren Festigkeitsklassen innerhalb der letzten zehn Jahre in Deutschland deutlich zu. Diese Ent-

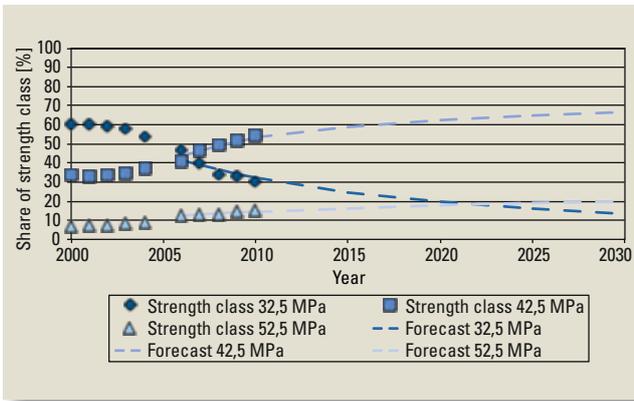


Figure 5: Trend in the strength classes (Scenarios 1-4)

Bild 5: Entwicklung der Festigkeitsklassen (Szenarien 1-4)

wicklung ging mit einer stetigen Verringerung des Anteils der Portlandzemente (Bilder 6 bis 9) einher. Da bei Zementen eine schnelle Frühfestigkeitsentwicklung angestrebt wird, verschiebt sich aufgrund der langsameren Hydratation der Hauptbestandteile neben Klinker die Normdruckfestigkeit nach 28 Tagen zumeist zu höheren Festigkeiten. Das heißt insbesondere, dass Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 R durch solche der Festigkeiten 42,5 N ersetzt wurden. In den Prognosen wird davon ausgegangen, dass sich diese Entwicklung auch in den kommenden Jahren fortsetzt (s. Bild 5). Das bedeutet, dass der Anteil der Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 MPa von etwa 60 % im Jahr 2000 auf unter 15 % im Jahr 2030 abnehmen wird. Parallel dazu steigt der Anteil der Festigkeitsklasse 42,5 MPa von gut 30 % auf über 60 % in 2030 an. Der Anteil der Festigkeitsklasse 52,5 MPa steigt dagegen nur geringfügig von ca. 7 % auf etwa 20 % (2030) an.

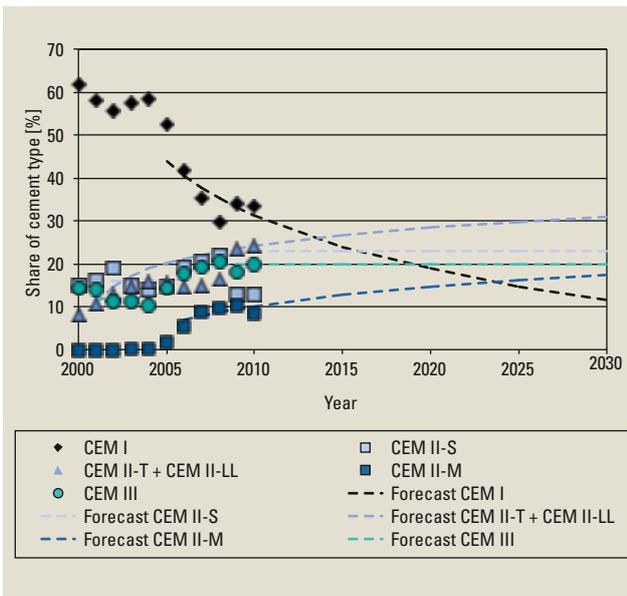


Figure 6: Historic and predicted development of the cement types: Basic scenario (Scenario 1)

Bild 6: Historische und prognostizierte Entwicklung der Zementarten: Basisszenario (Szenario 1)

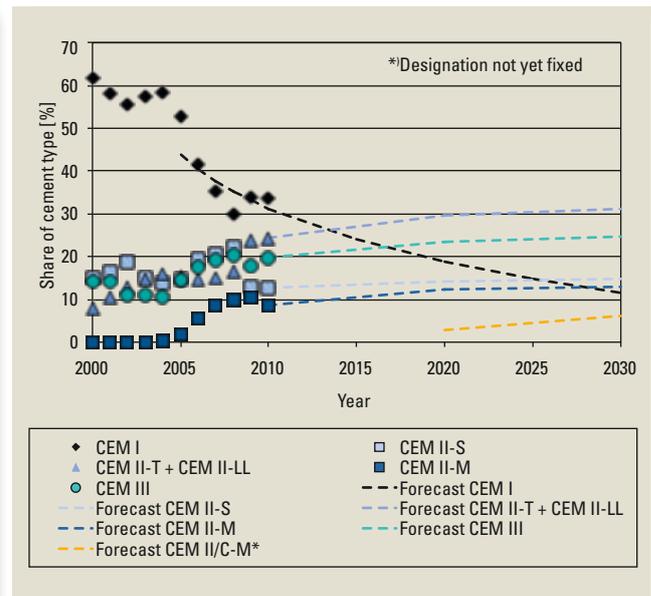


Figure 8: Historic and predicted development of the cement types: Scenario 3

Bild 8: Historische und prognostizierte Entwicklung der Zementarten: Szenario 3

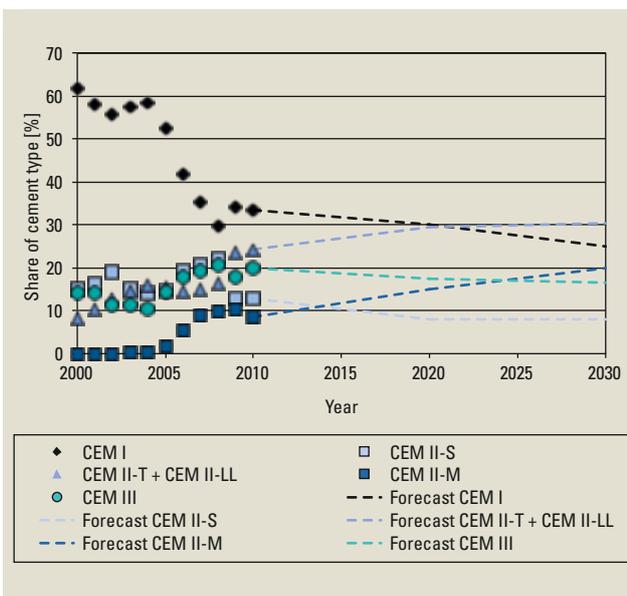


Figure 7: Historic and predicted development of the cement types: Scenario 2

Bild 7: Historische und prognostizierte Entwicklung der Zementarten: Szenario 2

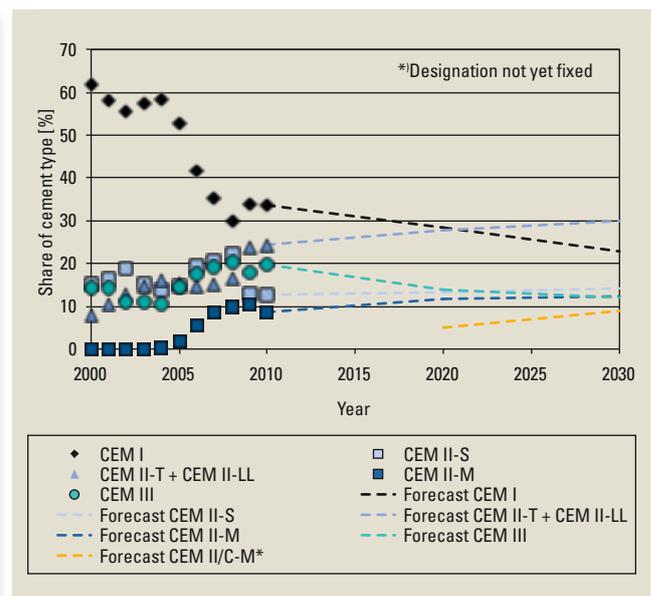


Figure 9: Historic and predicted development of the cement types: Scenario 4

Bild 9: Historische und prognostizierte Entwicklung der Zementarten: Szenario 4

experts from the Research Institute and the cement industry. This has made it possible to include current market trends and requirements in the examination. The following diagrams present each of the forecasts regarded as realistic within the cement industry.

3.2.2 Development of the strength classes

The historic data base in **Fig. 5** shows that the proportion of cement in the higher strength classes has grown significantly within the last ten years in Germany. This growth was accompanied by a continuous decrease in the proportion of Portland cements (**Fig. 6 to 9**). A rapid early strength development is desirable in cements so the standard compressive strength after 28 days is usually displaced towards higher strengths due to the slower hydration of the main constituents besides clinker. This means, in particular, that cements of strength class 32,5 R have been replaced by those of strength class 42,5 N. The forecasts assume that this trend will continue in the coming years (see **Fig. 5**). This means that the percentage of the cements in the 35,2 MPa strength class will fall from around 60 % in 2000 to less than 15 % in 2030. Parallel to this, the percentage in the 42,5 MPa strength class will increase from at least 30 % to more than 60 % in 2030. In contrast, the percentage in the 52,5 MPa strength class will increase only marginally from approx. 7 % to about 20 % (2030).

3.2.3 Development of the cement types

In all the scenarios for forecasting the distribution of the types of cement it has been assumed that both CEM/A and CEM/B cements will continue to grow uniformly. CEM II-P, CEM II-V, CEM III/C, CEM I and CEM V cements have been disregarded since they are not currently relevant to the German market and it has therefore been assumed that this will not change significantly by 2030. Each of the quantities of granulated blastfurnace slag available in the scenarios (see **Fig. 3**) has been almost entirely used. For each of the CEM II-M cements, 50 mass % of the main constituents besides clinker has been limestone. The scenarios described in Section 1 are simulated below.

In the basic scenario (**Fig. 6**) and in scenario 3 (**Fig. 8**), based on the trend of previous years and development in other European countries, it has been assumed that the percentage of Portland cement will continue to fall to slightly over 10 % by 2030. Assuming that total cement production in Germany is not going to change, this trend will be offset by the increased market share of cements containing limestone. The share of CEM II-S and CEM III cements remains essentially at a constant level in both scenarios. However, for CEM II-LL and CEM II-M cements Scenario 1 forecasts an increase of roughly 10 % each. Scenario 3 is based on the introduction of CEM II/C-M cements to the market (see above). Their share is assumed to be about 6 % in 2030. For technological reasons, the increase in the proportion of CEM II/A-M and CEM II/B-M cements will fall to the same extent.

As described above, in Scenario 2 (**Fig. 7**) and Scenario 4 (**Fig. 9**), there is assumed to be a 25 % shortage of granulated blastfurnace slag. A shortage of this magnitude has already occurred as a result of the economic crisis in 2009. Analogous to the development of the cement product portfolio in this year, these scenarios forecast that CEM III cement production will fall only slightly (approx. -4 % between 2008 and 2030). The shortage of granulated blastfurnace slag will

3.2.3 Entwicklung der Zementarten

In allen Szenarien zur Prognose der Zementartenverteilung wurde davon ausgegangen, dass sich CEM/A- und CEM/B-Zemente jeweils gleichmäßig weiterentwickeln. CEM II-P-, CEM II-V-, CEM III/C-, CEM IV- und CEM V-Zemente wurden vernachlässigt, da diese im deutschen Markt bisher nicht relevant sind und davon ausgegangen wird, dass sich dies innerhalb des Zeitraums bis 2030 nicht signifikant ändern wird. Die in den Szenarien zur Verfügung stehenden Hüttensandmengen (s. **Bild 3**) wurden jeweils nahezu vollständig verwendet. Dabei wurden für CEM II-M-Zemente jeweils 50 M.-% der Hauptbestandteile neben Klinker als Kalkstein angesetzt. Im Folgenden wurden die in Kapitel 1 beschriebenen Szenarien simuliert.

Im Basisszenario (**Bild 6**) sowie in Szenario 3 (**Bild 8**) wird dem Trend der letzten Jahre sowie Entwicklungen in anderen europäischen Ländern folgend angenommen, dass der Anteil an Portlandzementen kontinuierlich auf etwas mehr als 10 % im Jahre 2030 sinken wird. Unter der Annahme, dass sich die Gesamtzementproduktion in Deutschland nicht ändert, wird diese Entwicklung durch vergrößerte Marktanteile von kalksandsteinhaltigen Zementen kompensiert. Die Anteile an CEM II-S- und CEM III-Zementen bleiben in beiden Szenarien im Wesentlichen auf konstantem Niveau. Für CEM II-LL- und CEM II-M-Zemente wird in Szenario 1 jeweils eine Steigerung um etwa 10 % prognostiziert. In Szenario 3 wird von der Markteinführung von CEM II/C-M-Zementen (siehe oben) ausgegangen. Deren Anteil wird für das Jahr 2030 mit etwa 6 % angenommen. Aus technologischen Gründen wird dafür die Steigerung der Anteil an CEM II/A-M- und CEM II/B-M-Zementen im gleichen Maß gesenkt.

In Szenario 2 (**Bild 7**) und in Szenario 4 (**Bild 9**) wird, wie oben beschrieben, von einer Verknappung der Hüttensandverfügbarkeit um 25 % ausgegangen. Eine Verknappung in dieser Größenordnung gab es bereits in Folge der Wirtschaftskrise im Jahr 2009. Analog zur Entwicklung des Zementproduktportfolios in diesem Jahr wird in diesen Szenarien prognostiziert, dass die CEM III-Zementproduktion nur geringfügig gesenkt wird (ca. -4 % von 2008 bis 2030). Im Wesentlichen geht die Verknappung der Hüttensandverfügbarkeit zu Lasten der Produktion von CEM II-S-Zementen (ca. -14 % von 2008 bis 2030). Diese Entwicklung wird durch erhöhte Anteile von CEM I-, CEM II-LL-, CEM II-M und in Szenario 4 auch von CEM II/C-M-Zementen kompensiert.

3.3 Auswirkung auf den Klinker/Zement-Faktor

Als Maßstab für die Bewertung der Szenarien in Bezug auf die Reduzierung der klinkerinduzierten CO₂-Emissionen kann der Klinker/Zement-Faktor herangezogen werden. Dieser wurde für die vier Szenarien aus den Anteilen der Zementarten berechnet. Als Klinkergehalt aller Zemente wurde jeweils der untere mögliche Wert der Zusammensetzung plus eines Vorhaltemaßes von 2 % angesetzt. Beispielsweise wurden für einen CEM II/A (80 + 2) % verwendet. Die historischen Klinker/Zement-Faktoren bis zum Jahr 2011 sowie die auf Basis der vier Prognosen berechneten Werte zeigt **Bild 10**.

Die Szenarien, die auf einer Verringerung der Hüttensandverfügbarkeit basieren, führen zu Klinker/Zement-Faktoren auf dem heutigen Niveau. Trotz einer in den Szenarien angenommenen Verringerung des Portlandzementanteils auf ca. 25 % sowie einer Steigerung des CEM II/C-M-Anteils (Szenario 4) auf ca. 9 % im Jahr 2030 führt der angenom-

primarily affect the production of CEM II-S cements (approx. –14% between 2008 and 2030). This trend will be offset by the increased proportion of CEM I, CEM II-LL, CEM II-M cements and, in scenario 4, of CEM II/C-M cement.

3.3 Impact on the clinker/cement ratio

The clinker/cement ratio can be used as a benchmark for evaluating the scenarios with regard to the reduction in the clinker-induced CO₂ emissions. This was calculated from the proportions of the cement types for each of the four scenarios. The clinker content of each of the cements was calculated based on the lowest possible value of the composition plus an allowance of 2%. For example, 80 + 2% was used for CEM II/A cement. The historic clinker/cement ratios up to 2011 and the values calculated based on the four forecasts are illustrated in Fig. 10.

The scenarios which are based on a reduction in the availability of granulated blastfurnace slag produced clinker/cement ratios equivalent to today's level. Despite the reduction in the percentage of Portland cement to 25% assumed in the scenarios and an increase in the percentage of CEM II/C-M (Scenario 4) to approx. 9% by 2030, the assumed shortage of granulated blastfurnace slag produced a clear reduction in the percentage of CEM III and, in particular, of CEM II-S cements. This market behaviour has already been observed in response to the steel crises in 2009 (see Fig. 3, Figs. 6 to 9). In this year, there was also approx. 25% less granulated blastfurnace slag available.

A reduction in the percentage of Portland cement to approx. 12% (Scenarios 1 and 3) at a constant level of availability of granulated blastfurnace slag represents an optimistic forecast in comparison to Scenarios 2 and 4. However, these scenarios only produced a maximum reduction in the clinker/cement ratio of 7 or 8%. This indicates that the optimisation potential in Germany with regard to a reduction in the clinker/cement ratio has already been largely exhausted under the given conditions.

4 Modelling the thermal energy demand

The savings potential with regard to the fuel energy demand of the clinker burning process was evaluated on the basis of a comparison between a so-called "greenfield" plant and a real plant in the German cement industry. This evaluation was based on the simulation of a BAT (Best Available Techniques) plant using various alternative fuels. In these scenarios, cement clinker is used as the reference parameter since corresponding reference values, e.g. those in the European BAT reference document for the cement industry, are formulated on this basis.

4.1 Process engineering model

The thermal energy demand for the use of alternative fuels was calculated on the basis of a process engineering model developed at the Research Institute of the Cement Industry. This model is presented in depth in [10, 11]. In essence, it describes the process from feeding in the kiln meal to the discharge of the clinker from the cooler and consists of individual models for the following plant components: preheater, calciner, bypass, rotary kiln and grate cooler. The plant components of the external recirculating system, i.e. the evaporative cooler, raw grinding plant and dust separator, can also be included. All of the individual models can be theoretically combined and make it possible to determine a steady-state

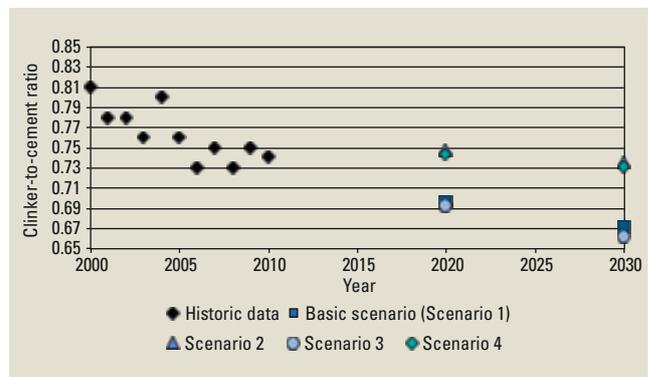


Figure 10: Historic and predicted development of the clinker/cement ratio
Bild 10: Historische und prognostizierte Entwicklung Klinker/Zement-Faktors

mene Hüttensandmangel zu einer deutlichen Absenkung des CEM III- und insbesondere des CEM II-S-Anteils. Dieses Verhalten des Marktes konnte aufgrund der Stahlkrise schon im Jahr 2009 (s. Bild 3, Bild 6 bis Bild 9) beobachtet werden. In diesem Jahr standen ebenfalls ca. 25% weniger Hüttensand zur Verfügung.

Eine Verringerung des Portlandzementanteils bei konstanter Hüttensandverfügbarkeit auf ca. 12% (Szenarien 1 und 3) stellt im Vergleich zu den Szenarien 2 und 4 eine optimistische Prognose dar. Dennoch führen diese Szenarien nur zu einer maximalen Absenkung des Klinker/Zement-Faktors um 7 bzw. 8%. Dies deutet darauf hin, dass das Optimierungspotenzial in Deutschland hinsichtlich einer Verringerung des Klinker/Zement-Faktors unter den gegebenen Randbedingungen bereits weitgehend ausgeschöpft ist.

4 Modellierung des thermischen Energiebedarfs

Das Einsparpotenzial bezüglich des Brennstoffenergiebedarfs des Klinkerbrennprozesses wurde anhand eines Vergleichs zwischen einer sogenannten „Greenfield“-Anlage und einer realen Anlage der deutschen Zementindustrie bewertet. Dieser Bewertung lag die Simulation einer BAT (Best Available Techniques)-Anlage mit unterschiedlichem Einsatz alternativer Brennstoffe zugrunde. In diesen Szenarien wird Zementklinker als Bezugsgröße verwendet, da entsprechende Vergleichswerte, wie z.B. im europäischen BAT-Referenzdokument für die Zementindustrie, so formuliert sind.

4.1 Verfahrenstechnisches Prozessmodell

Die Berechnung des thermischen Energiebedarfs beim Einsatz von alternativen Brennstoffen fand anhand eines am Forschungsinstitut der Zementindustrie entwickelten verfahrenstechnischen Prozessmodells statt. Dieses Modell wird in [10, 11] ausführlich vorgestellt. Im Kern beschreibt es den Prozess von der Ofenmehlaufgabe bis zum Austritt des Klinkers aus dem Kühler und besteht aus Einzelmodellen für die Anlagenkomponenten Vorwärmer, Calcinator, Bypass, Drehrohrofen und Rostkühler. Weiterhin können auch die Anlagenteile des äußeren Kreislaufs, d.h. Verdampfungskühler, Rohmahlanlage und Staubabscheider, einbezogen werden. Alle Einzelmodelle können rechnerisch miteinander verbunden werden und erlauben es, einen stationären Zustand für die gesamte Drehofenanlage zu bestimmen. Aufgrund des modularen Aufbaus können unterschiedliche Anlagenschaltungen vergleichsweise leicht und flexibel rechnerisch nachgebildet werden. Ebenso können einzelne Komponenten

condition for the entire rotary kiln plant. This modular structure allows the simple and flexible theoretical comparison of different plant configurations. It is likewise possible to define individual components of the plant geometrically so that different sizes of plant can be modelled. The computer model is based on material and energy balances of kiln feed, dust and gas flows. In addition to the combustion calculation of the fuels and the heat transfer, the relative chemical-mineralogical solid reactions, gas phase reactions and gas/solid reactions were also taken into account.

4.2 Simulation study

The simulation study is based on a previously defined reference situation which has been adjusted to bring it in line with the various calculation scenarios with regard to the fuel usage.

4.2.1 Definition of the model plant

The starting point for the calculations to quantify the factors which influence the clinker-specific energy demand with variable input quantities and types of alternative fuels is a so-called BAT plant. This plant comprises a grate cooler, rotary kiln, calciner with tertiary air duct and a five-stage cyclone preheater. It is intended to comply as closely as possible with the description of the BREF (BAT reference document [12]) and in a performance test should therefore have a specific fuel energy demand of about 3000 kJ/kg of clinker at a clinker output of 3000 t/d with bituminous coal as the fuel. The BREF provides no specifications for either the kiln meal or clinker composition, or for the fuels and their properties. So appropriate values provided by the Research Institute were used. On the one hand, an average virtual kiln meal was created from numerous kiln meal analyses for the calculation, while on the other hand analysis results were used to chemically define the bituminous coal, RDF, animal meal, etc. used as fuels [11].

4.2.2 Definition of the BAT scenarios

Four different BAT scenarios were simulated:

- › BAT scenario for 2011 with a substitution rate of 61 % [13]. This scenario corresponds to the case where all the German cement clinker has been produced with the actual fuel and raw material mix in the "BAT plant" described above.
- › BAT scenario for 2020
- › BAT scenario for 2030
- › BAT scenario for 2030 with a very high use of alternative fuels (variant)

These scenarios differ in terms of the proportion of the alternative fuels in the fuel mix, their calorific value and the bypass rate (▶ Table 1). Based on the increase in the average substitution rate in Germany in recent years, a further increase to 70 % by 2020 and to 80 % by 2030 has been assumed. In contrast to this, a variant with 90 % use of alternative fuels has been calculated. From a technical point of view, this

ten der Anlage geometrisch definiert werden, sodass unterschiedliche Anlagengrößen abgebildet werden können. Das Computermodell basiert auf Stoff- und Energiebilanzen von Brenngut-, Staub- und Gasflüssen. Dabei werden neben der Verbrennungsrechnung der Brennstoffe und der Wärmeübertragung auch die relevanten chemisch-mineralogischen Feststoffreaktionen und die Gasphasenreaktionen sowie Gas-Feststoff-Reaktionen berücksichtigt.

4.2 Simulationsstudie

Die Simulationsstudie basiert auf einem zuvor definierten Referenzzustand, der im Einklang mit den verschiedenen Berechnungsszenarien hinsichtlich des Brennstoffeinsatzes angepasst wurde.

4.2.1 Definition der Modellanlage

Ausgangspunkt für die Berechnungen zur Quantifizierung der Einflüsse auf den klinkerspezifischen Energiebedarf mit veränderlicher Einsatzmenge und Art von alternativen Brennstoffen bildet eine so genannte BAT-Anlage. Diese Anlage besteht aus Rostkühler, Drehrohrföfen, Calcinator mit Tertiärluftleitung und fünf-stufigem Zyklonvorwärmer. Sie soll möglichst exakt der Beschreibung des BREFs (BAT-Referenzdokument [12]) entsprechen und im Sinne eines Leistungstests somit bei einem Klinkerdurchsatz von 3000 t/d und Steinkohle als Brennstoff einen spezifischen Brennstoffenergiebedarf von etwa 3000 kJ/kg Klinker aufweisen. Da im BREF weder Vorgaben für die Ofenmehl- oder Klinkerzusammensetzung noch für die Brennstoffe und deren Eigenschaften gemacht werden, wurde auf entsprechende Werte des Forschungsinstitutes zurückgegriffen. So wurde einerseits aus zahlreichen Ofenmehlanalysen ein mittleres, virtuelles Ofenmehl für die Berechnung erzeugt. Andererseits wurden die Brennstoffe Steinkohle, Fluff, Tiermehl etc. auf Basis von Analyseergebnissen chemisch definiert. [11]

4.2.2 Definition der BAT-Szenarien

Vier verschiedene BAT-Szenarien wurden simuliert:

- › BAT-Szenario für das Jahr 2011 mit einer Substitutionsrate von 61 % [13]: Dieses Szenario entspricht dem Fall, dass der gesamte deutsche Zementklinker mit dem tatsächlichen Brennstoff- und Rohstoffmix in der oben beschriebenen „BAT-Anlage“ bereitgestellt worden wäre.
- › BAT-Szenario für das Jahr 2020
- › BAT-Szenario für das Jahr 2030
- › BAT-Szenario für das Jahr 2030 mit sehr hohem Einsatz alternativer Brennstoffe (Variante)

Diese Szenarien unterscheiden sich im Anteil der alternativen Brennstoffe im Brennstoffmix, dessen Heizwert sowie der Bypassrate (▶ Tabelle 1). Ausgehend von der Steigerung der durchschnittlichen Substitutionsrate in Deutschland in den letzten Jahren wurde eine weitere Steigerung bis 2020 auf 70 % und bis 2030 auf 80 % angenommen. Abweichend davon wurde zudem eine Variante mit einem 90-%igen Einsatz von alternativen Brennstoffen berechnet. Diese Variante

Table 1: Calculation scenarios

Tabelle 1: Berechnungsszenarien

	BAT 2011	BAT 2020	BAT 2030	BAT 2030 (variant)
Substitution rate [%]	61	70	80	90
Calorific value in calciner firing system [MJ/kg]	19	17	16	15
Bypass rate based on kiln inlet [%]	4	4	5	6

variant is regarded as a potential maximum at an industry level, without any significant change to the plant pool. Based on the expected changes in the availability of high-value alternative fuels, the scenarios indicate a decreasing average calorific value and an increasing usage rate. In line with the increase in the substitution rate, an increasing amount of recirculating materials is introduced into the plant so that in each case the bypass rate has been raised by 1%.

4.2.3 Assumptions

For the scenarios presented it was essential to make some assumptions, especially with respect to the types and quantities of the respective alternative fuels in the mix. The initial mix for the alternative fuels was compiled from the VDZ environmental data for 2011 [8]. Quantities of fuels less than 2% (e.g. scrap wood, waste oil, etc.) have been disregarded and replaced in proportion by the other materials. A mix of solvent, mechanically dewatered sewage sludge, animal meal, shredded tyres and RDF was therefore created for the BAT 2011 scenario. The fuel distribution for the firing points was set as follows:

- ▶ Calciner firing system: RDF or low-calorific fuels, sewage sludge, animal meal, shredded tyres
- ▶ Main firing system: RDF, animal meal, solvent

The respective proportions for the calculated scenarios are shown in ▶ Fig. 11. Based on the BAT 2011 scenario, it has been assumed for the other scenarios that animal meal is no longer available. Furthermore, the proportion of sewage sludge in the mix was kept constant. The available quantities of shredded tyres and solvent used were assumed to remain constant over the coming years. Their percentages in the alternative fuel mix therefore fall as the substitution rate rises. An increasing amount of low-calorific RDF was also included in the calculation to simulate the reduction in calorific value in the calciner firing system. The fossil fuel mix in all BAT scenarios was assumed to be a mix of 30% bituminous coal and 70% pulverised lignite (calorific value of the mix: 23800 kJ/kg). Small amounts of fuel oil and natural gas, used primarily for start-up purposes, were disregarded.

4.3 Results

The results of the process model provided, among other things, the fuel energy demand for a steady-state condition which, from a technical point of view, corresponds to a performance test. To determine the minimum and maximum annual average, which also takes into account the start-up and shut-down processes, 160 to 320 kJ/kg [11] were added to the calculated fuel energy demand, cf. also [12]. ▶ Fig. 12 shows the resulting fuel energy demands for the respective scenarios.

As expected, the fuel energy demand rose with increasing substitution rate compared to the BAT 2011 scenario. This increase is primarily caused by the process-integrated drying of the alternative fuels. Additional heat losses are also caused by the increased bypass operation. The fuel energy demand rises between the BAT 2001 case and the 2030 variant by approx. 4%. The values presented in Fig. 12 correspond to the hypothetical case that all the cement clinker in Germany is produced in rotary kiln plants which meet the BAT level described above.

The maximum possible savings potential was calculated based on these data for a highly efficient greenfield plant

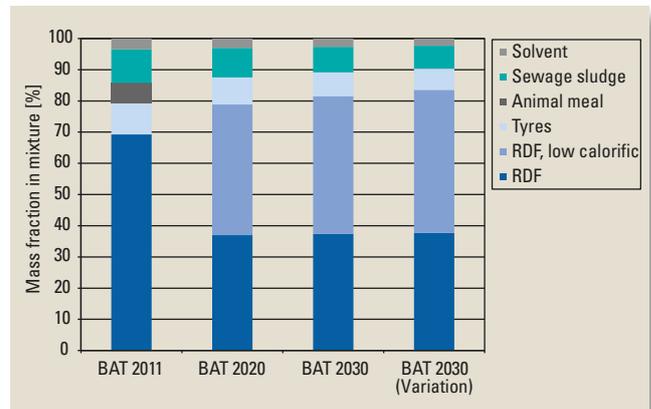


Figure 11: Combination of the alternative fuels for the various calculation scenarios

Bild 11: Mischung der alternativen Brennstoffe der verschiedenen Berechnungsszenarien

wird in technischer Hinsicht als ein potenzielles Maximum auf Branchenebene ohne signifikante Änderung des Anlagenparks angesehen. Aufgrund der zu erwartenden Veränderungen in der Verfügbarkeit höherwertiger alternativer Brennstoffe weisen die Szenarien einen sinkenden durchschnittlichen Heizwert mit steigender Einsatzrate auf. Im Einklang mit der Zunahme der Substitutionsrate werden vermehrt kreislaufbildende Stoffe in die Anlage eingetragen, sodass die Bypassrate jeweils um 1% angehoben wurde.

4.2.3 Annahmen

Für die dargestellten Szenarien war es notwendig, Annahmen insbesondere im Hinblick auf die Arten und Mengen der jeweiligen alternativen Brennstoffe in der Mischung zu treffen. Die Eingangsmischung der alternativen Brennstoffe wurde aus den VDZ-Umweltdaten aus dem Jahr 2011 [8] erstellt. Anteile von Brennstoffen unter 2% (wie Altholz, Altöl, Sonstiges) wurden vernachlässigt und anteilig durch die restlichen Materialien aufgefüllt. Für das Szenario BAT 2011 wurde somit eine Mischung aus Lösungsmittel, mechanisch entwässertem Klärschlamm, Tiermehl, Reifenschnitzel und Fluff kreiert. Die Brennstoffaufteilung auf die Feuerungsstellen wurde wie folgt angesetzt:

- ▶ Calcinatorfeuerung: Fluff oder niederkalorischer Fluff, Klärschlamm, Tiermehl, Reifenschnitzel
- ▶ Hauptfeuerung: Fluff, Tiermehl, Lösungsmittel

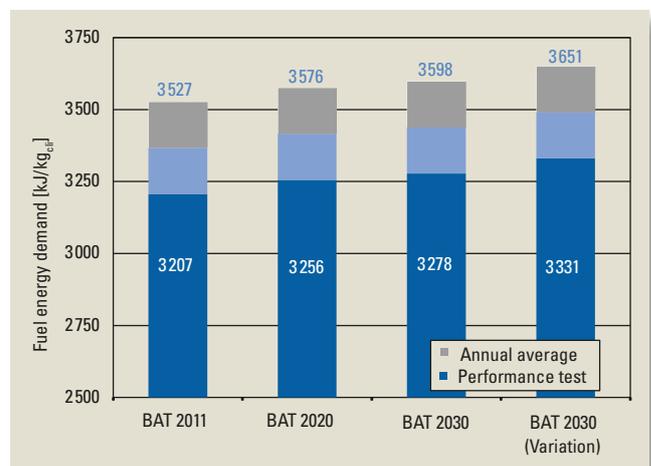
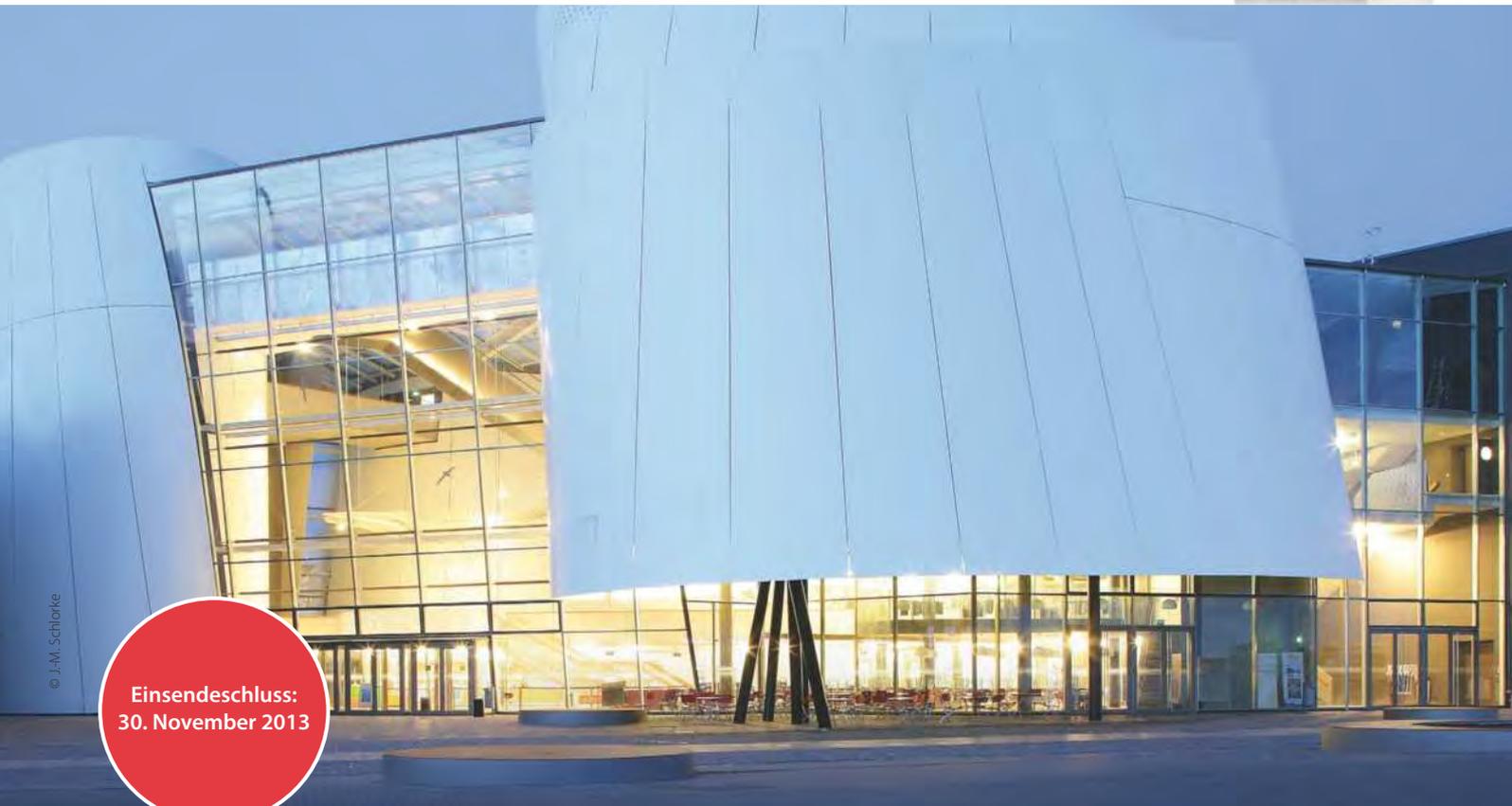


Figure 12: Calculated fuel energy demand for the various BAT scenarios

Bild 12: Errechneter Brennstoffenergiebedarf der verschiedenen BAT-Szenarien

» Mit dem seit 1984 vergebenen Förderpreis Beton gelingt es der Firma CEMEX, aktuelle Forschungsarbeiten einem weitaus größeren Leser- und Anwenderkreis bekannt zu machen, als dies bei Dissertationen im Bereich der Betonforschung üblicherweise der Fall ist. Sie unterstützt und beschleunigt somit die Umsetzung wissenschaftlicher Ergebnisse in die Baupraxis. Vor diesem Hintergrund stellt der Förderpreis für jeden jungen Wissenschaftler einen besonderen Anreiz dar. «

Dr.-Ing. Doris Strehlein, Dipl.-Ing. Edgar Bohner, Preisträger Förderpreis Beton 2012



© J.-M. Schlorke

Einsendeschluss:
30. November 2013

Förderpreis Beton 2014

Ausschreibung und Einladung zur Teilnahme am Wettbewerb

Die CEMEX Deutschland AG, Düsseldorf, gibt hiermit die Ausschreibung des „Förderpreises Beton“ für das Jahr 2014 bekannt. Die Stiftung des Preises erfolgt mit dem Ziel, die Entwicklung der Herstellung, Verarbeitung und Anwendung von Beton und Betonbauteilen voranzutreiben. Ansätze zur Übertragung der Erkenntnisse in die Praxis sind erwünscht. Die auszuzeichnende Arbeit soll Möglichkeiten zur Verbesserung der baustoffspezifischen Eigenschaften, der Qualität, der Wirtschaftlichkeit, der Ökologie sowie der technologischen Aspekte dieser Produkte aufzeigen.

Der Preis ist mit 20.000 Euro dotiert. Er kann bei Vorliegen gleichwertiger Arbeiten geteilt werden.

Die Arbeit muss in deutscher oder englischer Sprache entstanden sein und der Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Sie darf nicht älter als zwei Jahre sein. Arbeiten von Professoren von Technischen Hochschulen, Universitäten und Fachhochschulen oder Arbeiten, bei denen diese als Mitautoren genannt werden, sind von der Teilnahme ausgeschlossen.

Die Entscheidung über die Vergabe des Preises trifft ein unabhängiges Preisgericht: Prof. Dr. Harald Budelmann, TU Braunschweig, Jury-Vorsitzender | Prof. Dr. Rolf Breitenbücher, Ruhr-Universität Bochum | Prof. Christoph Gehlen, TU München | Prof. Dr. Michael Ludwig, Bauhaus Universität Weimar | Prof. Dr. Harald S. Müller, Universität Karlsruhe | Prof. Dr. Michael Raupach, RWTH Aachen

Zur Teilnahme eingeladen sind: Praktiker und Wissenschaftler aus Bauunternehmen, aus der Baustoffproduktion, aus Forschungseinrichtungen, aus Universitäten sowie aus Materialprüfanstalten.

Bitte senden Sie Ihre Arbeit in sechsfacher Ausfertigung bis zum 30. November 2013 an:
CEMEX Deutschland AG | Peter Lyhs | Theodorstraße 178 | 40472 Düsseldorf | www.cemex.de



Table 2: Savings potential of the calculation scenarios

Tabelle 2: Einsparpotenzial der Berechnungsszenarien

	BAT 2020			BAT 2030			BAT 2030 (variant)		
	PT ¹⁾	Min.	Max.	PT ¹⁾	Min.	Max.	PT ¹⁾	Min.	Max.
Mean value [kJ/kg _{cl}]	3256	3416	3576	3278	3438	3598	3331	3491	3651
Savings potential clinker [kJ/kg]		475	315		538	378		568	408
Savings potential [%]		12.2	8.1		13.5	9.5		14.0	10.1

¹⁾ PT = performance test (from the model)

compared to data gathered from a real plant. The minimum and maximum annual average values, which are based on the BAT 2011 model, were used as the basis. Fig. 13 illustrates how the savings potential for the actual case in 2011 with a real substitution rate of 61% was determined. From this it is clear that the replacement of all German rotary cement kilns by new-build "greenfield" plants would only lead to a reduction in the fuel energy consumption by 7.5 to 11.7 % relative to 2011. This emphasises the high level of efficiency achieved by the German kiln plants.

The average energy demand of German plants with increasing substitution rate gathered between 1994 and 2011 was used as the basis for comparison and extrapolated for the future scenarios (Table 2).

As the use of alternative fuels increases there is a marginal increase in the maximum savings potential. This would therefore lead to a maximum saving in the use of thermal energy in the clinker burning process of 10 to 14 % by 2030 if all German plants were replaced by "greenfield" kiln plants based on the BAT standard.

In contrast, the specific CO₂ emissions decrease with increasing use of alternative fuels. The somewhat lower fossil emission factor and the biogenic fractions of some alternative fuels are responsible for this.

5 Energy demand for cement grinding

The grinding of cement clinker and other main and secondary constituents, such as granulated blastfurnace slag or limestone, requires approx. 50 kWh/t_{cement} and accounts for the

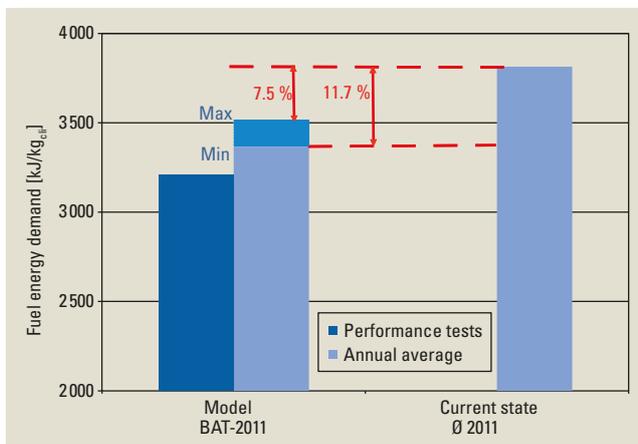


Figure 13: Maximum savings potential: current situation in 2011 compared to BAT 2011 scenario

Bild 13: Maximales Einsparpotenzial: Ist-Zustand 2011 im Vergleich zum BAT 2011-Szenario

Die jeweiligen Anteile für die berechneten Szenarien sind in Bild 11 dargestellt. Ausgehend von dem BAT 2011-Szenario wurde für die weiteren Szenarien angenommen, dass Tiermehl nicht mehr zur Verfügung steht. Des Weiteren wurde der Anteil, den Klärschlamm in der Mischung einnimmt, konstant gehalten. Die verfügbaren Einsatzmengen von Alt-reifenschnitzel und Lösemitteln wurden über die kommenden Jahre als gleich bleibend angenommen. Mit steigender Substitutionsrate verringert sich somit deren Anteil am alternativen Brennstoffmix. Um den sinkenden Heizwert in der Calcinatorfeuerung zu simulieren, wurde zudem vermehrt niederkalorischer Fluff eingerechnet. Der fossile Brennstoffmix wurde in allen BAT-Szenarien mit einer Mischung aus 30 % Steinkohlen- und 70 % Braunkohlenstaub (Heizwert der Mischung: 23800 kJ/kg) angenommen. Geringe Anteile an Heizöl und Erdgas, die primär zum Anfahren genutzt werden, wurden vernachlässigt.

4.3 Ergebnisse

Als Ergebnis liefert das Prozessmodell u.a. den Brennstoffenergiebedarf für einen stationären Zustand, der im technischen Sinn einem Leistungstest entspricht. Zur Ermittlung des minimalen und maximalen Jahresdurchschnitts, der ebenfalls An- und Abfahrvorgänge berücksichtigt, wurden 160 bis 320 kJ/kg [11] auf den berechneten Brennstoffenergiebedarf addiert, vgl. auch [12]. Bild 12 zeigt den so ermittelten Brennstoffenergiebedarf für die jeweiligen Szenarien.

Erwartungsgemäß steigt der Brennstoffenergiebedarf mit zunehmender Substitutionsrate im Vergleich zum Szenario BAT 2011 an. Dieser Anstieg wird v.a. durch die prozessintegrierte Trocknung der alternativen Brennstoffe verursacht. Zudem entstehen zusätzliche Wärmeverluste durch den erhöhten Bypassbetrieb. Der Brennstoffenergiebedarf steigt zwischen dem BAT 2011-Fall und der Variante 2030 um ca. 4 % an. Die in Bild 12 dargestellten Werte entsprechen dem hypothetischen Fall, dass der gesamte in Deutschland produzierte Zementklinker in Ofenanlagen hergestellt wird, die das oben beschriebene BAT-Niveau erfüllen.

Das maximal mögliche Einsparpotenzial wurde anhand dieser Daten einer hocheffizienten Greenfield-Anlage im Vergleich zu real erhobenen Daten berechnet. Als Grundlage dient der minimale und maximale Jahresdurchschnittswert, basierend auf der BAT 2011-Modellierung. Bild 13 zeigt die Ermittlung des Einsparpotenzials für den aktuellen Fall aus 2011 mit einer realen Substitutionsrate von 61%. Hieraus wird deutlich, dass der Ersatz aller deutschen Zementdrehöfen durch auf „grüner Wiese“ neugebaute Anlagen mit Bezug auf das Jahr 2011 nur zu einer Verminderung des Brennstoffenergieeinsatzes um 7,5 bis 11,7 % führen würde. Dies unterstreicht das hohe erreichte Effizienzniveau der deutschen Ofenanlagen.

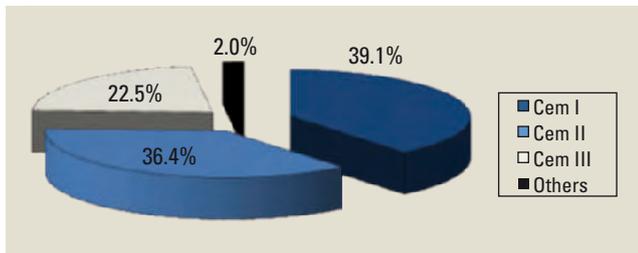


Figure 14: Percentages of the 662 evaluated data sets associated with the different types of cement

Bild 14: Anteile der 662 ausgewerteten Datensätze an den Zementarten

majority of electrical energy in the production process. The energy demand depends on a range of factors.

- ▶ The fineness of the cements produced – the fineness of the ground cements is determined by the strength requirements. Greater strength requirements are usually achieved by more extensive grinding. The energy demand of the grinding process increases exponentially as the fineness increases.
- ▶ The composition of the cements produced – the variation in grindability of the different raw materials, such as the granulated blastfurnace slag, which is difficult to grind, or the more easily ground limestone, alter the specific energy demand of each type.
- ▶ The grinding technology – ball mills continue to be the main type of mill used in Germany for grinding cement. However, there are high-pressure comminution processes such as high-pressure grinding rolls or vertical roller mills which, with certain limitations, are also used very efficiently for grinding cement.

In addition to the actual grinding plants, the other plant units, such as transportation equipment and fans, also affect energy consumption. Furthermore, the way in which the grinding process is organised, either as a combined grinding process for all the constituents in a single mill or as separate grinding with a subsequent mixing process, also has an effect.

5.1 Modelling the energy demand

The evaluation of these factors, particularly with regard to the interrelationships between the fineness and composition, represents a complex problem. Isolated examination and extrapolation of the process engineering parameters is therefore not constructive. The change in energy demand was therefore modelled by analysing a great deal of data that give a representative overview of the cement grinding plants in Germany. Overall, a total of 662 data sets for actual grinding systems were evaluated. ▶ Fig. 14 illustrates the structure of the underlying data. CEM I cements account for the main share with 39.1%, followed by CEM II cements with 36.4% and CEM III cements with 22.5%. The remaining cement types account for 2%.

The specific energy demand of the entire grinding system comprising mill, separator, transportation equipment and fans was analysed. The information was weighted according to the given production volumes and the mean energy demand was formulated for each cement type. In order to determine the mean specific energy demand of the entire German cement industry, the data on the composition of the portfolio of types was based on the "VDZ Figures and Data" [1]. The sub-division into types and strength classes was adopted in its entirety. Only the differentiation between

Für die Zukunftsszenarien wird als Vergleichsbasis der in den Jahren 1994 bis 2011 erhobene durchschnittliche Energiebedarf deutscher Anlagen mit steigender Substitutionsrate herangezogen und extrapoliert (▶ Tabelle 2).

Mit zunehmendem Einsatz alternativer Brennstoffe steigt das maximale Einsparpotenzial geringfügig an. Maximal würden sich somit in 2030 10 bis 14% des thermischen Energieeinsatzes beim Klinkerbrennprozess einsparen lassen, wenn alle deutschen Anlagen durch eine „Greenfield“-Ofenanlage nach BAT-Standard ersetzt würden.

Die spezifischen CO₂-Emissionen nehmen dagegen mit steigendem Einsatz alternativer Brennstoffe ab. Hierfür sind der z.T. niedrigere fossile Emissionsfaktor sowie die biogenen Anteile einiger alternativer Brennstoffe verantwortlich.

5 Energiebedarf der Zementmahlung

Die Mahlung von Zementklinker und anderen Haupt- und Nebenbestandteilen wie Hüttensand oder Kalkstein benötigt mit ca. 50 kWh/t_{Zement} den Hauptteil an elektrischer Energie im Produktionsprozess. Der Energiebedarf ist dabei von einer Reihe von Faktoren abhängig:

- ▶ Feinheit der hergestellten Zemente: Bedingt durch die Festigkeitsanforderungen ergeben sich die Feinheiten der gemahlten Zemente. Höhere Festigkeitsanforderungen werden dabei in der Regel durch eine stärkere Mahlung erreicht. Mit steigenden Feinheiten nimmt der Energiebedarf der Mahlung exponentiell zu.
- ▶ Zusammensetzung der hergestellten Zemente: Durch die unterschiedlichen Mahlbarkeiten verschiedener Einsatzstoffe wie schwer mahlbarer Hüttensand oder leicht mahlbarer Kalkstein verändert sich der spezifische Energiebedarf je Sorte.
- ▶ Technologie der Mahlung: Zur Mahlung von Zement werden in Deutschland immer noch vorwiegend Kugelmühlen eingesetzt. Es existieren jedoch Verfahren der Hochdruckzerkleinerung wie Gutbett-Walzenmühlen oder Vertikal-Wälzmühlen, die, mit gewissen Einschränkungen, auch sehr effizient in der Zementmahlung eingesetzt werden können.

Neben den eigentlichen Mahlanlagen beeinflussen auch die übrigen Aggregate wie Transporteinrichtungen oder Gebläse den Energieverbrauch. Darüber hinaus hat die Organisation der Mahlung als entweder gemeinsame Mahlung aller Komponenten in einer Mühle oder getrennte Mahlung mit anschließender Vermischung einen Einfluss.

5.1 Modellierung des Energiebedarfs

Die Bewertung dieser Einflussgrößen stellt, insbesondere in Hinblick auf Wechselwirkungen wie sie zwischen Feinheiten und Zusammensetzungen bestehen, ein komplexes Problem dar. Eine isolierte Betrachtung und Extrapolation der verfahrenstechnischen Parameter ist daher nicht zielführend. Die Veränderung des Energiebedarfs wurde daher durch Auswertung einer Vielzahl von Daten, die einen repräsentativen Überblick über die in Deutschland zur Zementmahlung betriebenen Anlagen geben, modelliert. Insgesamt wurden hierzu 662 Datensätze realer Mahlsysteme ausgewertet. ▶ Bild 14 zeigt die Zusammensetzung der zu Grunde gelegten Daten. Den Hauptanteil mit 39,1% stellen CEM I-Zemente gefolgt von CEM II-Zementen mit 36,4% und CEM III-Zementen mit 22,5%. Die übrigen Zementarten machen einen Anteil von 2% aus.

R and N cements was disregarded. 2011 was selected as the reference scenario. On this basis, the 2010 data was used as a test scenario for validation purposes.

The majority of the cement types analysed can be described by a sufficient number of examined data sets. Cement types for which there is no or insufficient data were examined separately and corrected respectively by extrapolation. This is explained in detail below for the determination of the specific energy demand for grinding CEM III B 52,5 cement. » Fig 15 illustrates the relationship between the specific energy demand in kWh/t and the Blaine fineness in cm^2/g for CEM III B cement based on the data for the 32,5 and 42,5 strength classes.

Extrapolating the values to an assumed fineness of $5900 \text{ cm}^2/\text{g}$ on the assumption of an exponential relationship gives a value of about 88 kWh/t . However, it is to be expected that the energy demand will increase far more rapidly than indicated by the available data base. Apart from the additional energy used, which derives solely from the generation of new surface area in the material, process engineering aspects also play a part. The efficiency of the grinding process, for example, falls significantly with very high finenesses. Among other things, this is due to high recirculation and the associated greater tendency of the material to agglomerate, the decrease in the stressing intensity and rise in temperature. The latter can limit the operation of the plants and lead to more frequent changes in type, which is also reflected in the specific energy demand. The theoretical extrapolation is unable to take these parameters into account. The data sets for grinding CEM III A cements were therefore also used. An analogous extrapolation was also conducted based on the values of the 32,5 and 42,5 classes. This was referred to the available data sets for grinding CEM III A 52,5 cement. As can be seen from » Fig. 16, this gave a deviation of approx. 44% as expected. This was used to correct the estimate for CEM III B cement. The adjusted value, as shown in Fig. 15, was 123.5 kWh/t .

The database for CEM II L/LL cements of strength class 42,5 was also judged to be inadequate. The available data were therefore corrected on the basis of the data sets for classes 32,5 and 52,5 using the relationship to the 42,5 class obtained from the other types. Due to the low production volumes, there is only a small amount of data on CEM V A and CEM V B cements and the products classified as "other binders". Insofar as necessary, these were checked by comparing them for plausibility against cements of similar types. The effect of these amounts on the total energy demand was

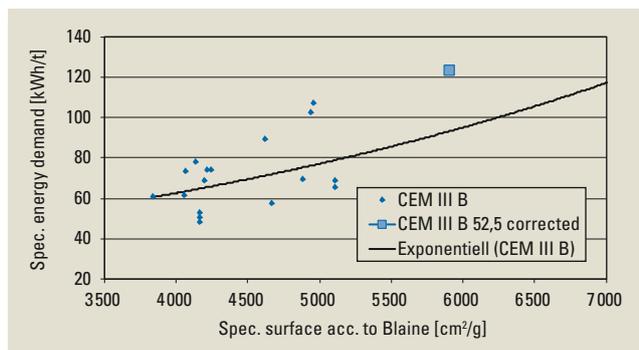


Figure 15: Extrapolation of the specific energy demand for grinding CEM III B cement

Bild 15: Extrapolation des spezifischen Energiebedarfs zur Mahlung von CEM III B

Ausgewertet wurde der spezifische Energiebedarf des gesamten Mahlsystems bestehend aus Mühle, Sichter, Transporteinrichtungen und Gebläsen. Gemäß den angegebenen Produktionsmengen wurden die Angaben gewichtet und der mittlere Energiebedarf je Zementart gebildet. Zur Bestimmung des mittleren spezifischen Energiebedarfs für die gesamte deutsche Zementindustrie wurden die Angaben über die Zusammensetzung des Sortenportfolios gemäß „VDZ-Zahlen und Daten“ [1] zugrunde gelegt. Hierbei wird die Unterteilung in Sorten und Festigkeitsklassen vollständig übernommen. Lediglich die Unterscheidung zwischen R- und N-Zementen wurde vernachlässigt. Als Referenzszenario wurde das Jahr 2011 ausgewählt. Ausgehend davon wurden die Angaben des Jahres 2010 als Testszenario zur Validierung herangezogen.

Der überwiegende Teil der betrachteten Zementarten kann durch eine ausreichende Anzahl an untersuchten Datensätzen beschrieben werden. Zementarten, für die keine oder eine unzureichende Datenbasis vorliegt, wurden separat untersucht und mittels Extrapolation rechnerisch bestimmt respektive korrigiert. Dies wird nachfolgend explizit für die Bestimmung des spezifischen Energiebedarfs zur Mahlung von CEM III B 52,5 erläutert. » Bild 15 stellt den Zusammenhang zwischen spezifischem Energiebedarf in kWh/t und der Feinheit nach Blaine in cm^2/g für den CEM III B auf Basis der Daten für die Festigkeitsklassen 32,5 und 42,5 dar.

Extrapoliert man die Werte unter Annahme eines exponentiellen Zusammenhangs auf eine angenommene Feinheit von $5900 \text{ cm}^2/\text{g}$, so ergibt sich ein Wert von etwa 88 kWh/t . Es ist jedoch zu erwarten, dass der Energiebedarf weit stärker ansteigt, als es die vorhandene Datenbasis abbilden kann. Neben dem energetischen Mehraufwand, der sich rein aus der Erzeugung neuer Oberflächen im Material ableitet, kommen verfahrenstechnische Aspekte zum Tragen. So sinkt bei sehr hohen Feinheiten der Wirkungsgrad der Mahlung deutlich. Dies ist unter anderem bedingt durch hohe Umläufe und verbunden damit stärkere Agglomerationsneigung des Materials, Rückgang der Beanspruchungsintensitäten und Anstieg der Temperatur. Letzteres kann den Betrieb der Anlagen einschränken und zu häufigeren Sortenwechseln führen, die sich zusätzlich im spezifischen Energiebedarf niederschlagen. Die rechnerische Extrapolation kann diese Parameter nicht berücksichtigen. Daher wurden zudem die Datensätze für die Mahlung von CEM III A-Zementen herangezogen. Auf Basis der Werte für die Klassen 32,5 und 42,5 wurde analog eine Extrapolation durchgeführt. Diese wurde bezogen auf die vorhandenen Datensätze für die Mahlung von CEM III A 52,5. Wie in » Bild 16 zu erkennen, ergibt sich hier, wie erwartet, eine Abweichung von ca. 44%. Diese wurde herangezogen, um die Abschätzung für den CEM III B zu korrigieren. Der angepasste Wert ergibt sich, wie in Bild 15 zu sehen, mit $123,5 \text{ kWh/t}$.

Als unzureichend wurde ferner die Datenbasis für CEM II L/LL-Zemente in der Festigkeitsklasse 42,5 bewertet. Vorhandene Daten wurden daher ausgehend von Datensätzen der Klassen 32,5 und 52,5 mittels der Verhältnisse zur Klasse 42,5, gebildet aus den Daten der übrigen Sorten, korrigiert. Aufgrund der geringen Produktionsmengen existieren nur wenige Daten zu CEM V A- und CEM V B-Zementen sowie zu den unter „sonstige Bindemittel“ klassifizierten Produkten. Diese wurden sofern erforderlich durch Vergleiche mit Sorten-ähnlichen Zementen auf Plausibilität überprüft. Ferner wurde rechnerisch der Einfluss dieser Anteile auf den

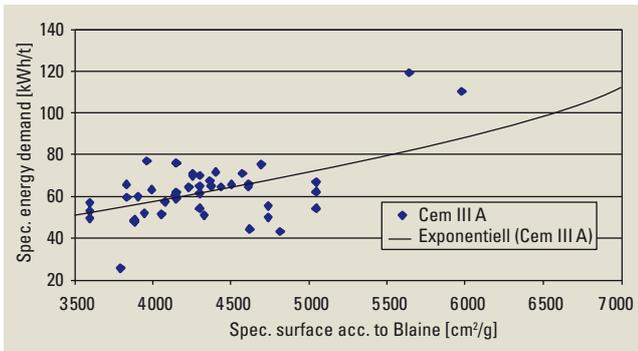


Figure 16: Extrapolation of the specific energy demand for grinding CEM III A cement

Bild 16: Extrapolation des spezifischen Energiebedarfs zur Mahlung von CEM III A

also estimated. An error of 20 kWh/t, equivalent in percentage terms to a deviation of 50 to 100 %, has an effect of less than 0.01 kWh/t on the total specific energy demand. The impact on the change in energy demand to be determined is judged to be even less.

5.2 Scenarios

The various development scenarios for the product portfolio outlined above were transferred to the selected classification into cement types. The cements not explicitly examined in the scenarios, including CEM II-B-P and V, CEM IV, CEM V and other binders, were kept at the absolute values for 2011.

5.2.1 Test scenario 2010

In order to validate the selected procedure and the assumptions made, the energy demand for 2010 was first determined on the basis of the available information for the type portfolio [13] using the energy data from 2011. The specific electrical energy demand for cement production from the clinker silo to the packing plant was used as the control value [13]. An increase in electrical energy of about 0.8 kWh/t was determined in 2011 compared to the previous year. The energy demand model for 2010 and 2011 analogously gave an increase of 0.9 kWh/t from 49.5 kWh/t to 50.3 kWh/t, which confirmed the applicability of the chosen approach.

Since the energy demand model only considered the entire grinding system, the figures differ from the VDZ environmental data due to the inclusion of other systems such as the packing plant and all the other consumers of electricity including compressed air and lighting. Based on the values for the two years this gave an average of 8.3 kWh/t. This value was judged by the experts to be realistic.

5.2.3 The effect of the cement types on energy consumption

The impacts of the basic scenario (Scenario 1) described in Section 1.2 and of Scenario 2 on electrical energy demand were first examined without taking technological factors into consideration. This examination was defined as "Business As Usual" (BAU) in section 1.2. Fig. 17 illustrates the growth in specific energy demand for the cement grinding process up to 2030. The values for up to 2020 and between 2020 and 2030 are based on the assumption of linear growth. It is apparent that the trend towards greater strengths has a decisive effect on the energy demand. Based on 2011, this results in an increase of 5.8 % by 2020 and 9.7 % by 2030. This corresponds to a specific energy demand of 53.3 kWh/t in 2020 and 55.2 kWh/t in 2030.

gesamten Energiebedarf ermittelt. Ein Fehler von 20 kWh/t, was prozentual einer Abweichung von 50 bis 100 % entspricht, übt einen Einfluss von kleiner 0,01 kWh/t auf gesamten spezifischen Energiebedarf aus. Der Einfluss auf die zu ermittelnde Veränderung des Energiebedarfs ist zudem als noch weitaus geringer zu bewerten.

5.2 Szenarien

Die verschiedenen oben erläuterten Szenarien zur Entwicklung des Produktportfolios wurden auf die gewählte Einteilung in Zementarten übertragen. Dabei wurden die nicht explizit in den Szenarien untersuchten Zemente, darunter CEM II-B-P und V, CEM IV, CEM V und sonstige Bindemittel, konstant auf den absoluten Werten von 2011 belassen.

5.2.1 Testszenario 2010

Zur Validierung des gewählten Vorgehens und der getroffenen Annahmen wurde zunächst der Energiebedarf für das Jahr 2010 auf Basis der vorliegenden Angaben zum Sortenportfolio [13] mittels der Energiedaten aus dem Jahr 2011 bestimmt. Als Kontrollwert dient der spezifische elektrische Energiebedarf für die Zementherstellung vom Klinkersilo bis zur Packerei [13]. Im Jahr 2011 wurde hier ein Anstieg der elektrischen Energie um etwa 0,8 kWh/t gegenüber dem Vorjahr festgestellt. Die Modellierung des Energiebedarfs für die Jahre 2010 und 2011 liefert analog einen Anstieg um 0,9 kWh/t von 49,5 kWh/t auf 50,3 kWh/t, was die Verwendbarkeit der gewählten Ansätze bestätigt.

Da der modellierte Energiebedarf nur die vollständigen Mahlssysteme berücksichtigt, besteht eine Differenz zu den VDZ-Umweltdaten bedingt durch weitere Systeme wie beispielsweise die Packerei und alle sonstigen elektrischen Verbraucher darunter auch Druckluft oder Beleuchtung. Diese bestimmt sich aus den Werten der beiden Jahre im Mittel zu 8,3 kWh/t. Dieser Wert wurde von den Experten als realistisch bewertet.

5.2.3 Einfluss der Zementarten auf den Energieverbrauch

Die Auswirkungen des in Kapitel 1.2 erläuterten Basisszenarios (Szenario 1) sowie des Szenarios 2 auf den elektrischen Energiebedarf wurden zunächst ohne Berücksichtigung technologischer Einflussfaktoren untersucht. Diese Betrachtung wird gemäß Kapitel 1.2 als „Business as usual“ (BAU) bezeichnet. Bild 17 zeigt die Entwicklung des spezifischen Energiebedarfs für die Zementmahlung bis 2030. Die Werte für die Jahre bis 2020 und zwischen 2020 und 2030 ergeben

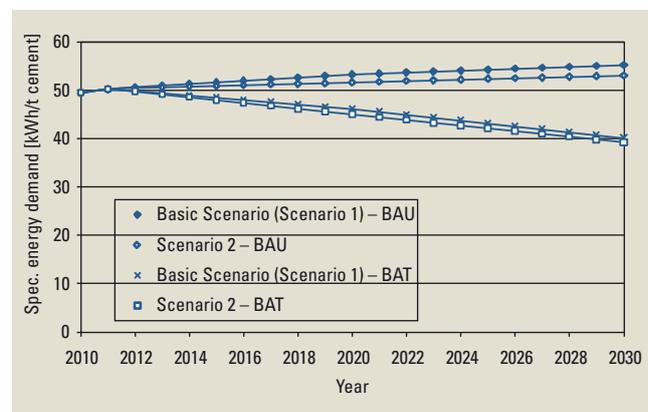


Figure 17: Predicted development of the specific energy demand for Scenarios 1 and 2 respectively for the BAU and BAT cases

Bild 17: Prognostizierte Entwicklung des spezifischen Energiebedarfs für die Szenarien 1 und 2 jeweils für den BAU- und BAT-Fall

Table 3: Assumptions for the reduction of the specific energy demand in the BAT scenarios

Tabelle 3: Annahmen für die Reduktion des spezifischen Energiebedarfs in den BAT-Szenarien

	2020	2030	Percentage of 52,5 without reduction potential
CEM I [%]	10	20	50
CEM II [%]	15	30	20

Lower values than those in the basic scenario (Scenario 1) are expected for Scenario 2 due to the reduced percentage of the granulated blastfurnace slag constituent that is difficult to grind. Nevertheless, the increase in strength is also predominant here, so that there is still an increase in the energy demand. However, with values of 2.7 % by 2020 and 5.6 % by 2030 this turns out to be less than in the basic scenario. This gives an absolute specific energy demand of 51.6 kWh/t in 2020 and 53.0 kWh/t in 2030.

5.2.4 The effect of the grinding technology: BAT scenarios
The two "Best Available Technique" scenarios (BAT) were designed in order to also estimate the possible potential of the use of highly efficient cement grinding technologies. Scenarios 1 and 2 described in Section 3 were used as a basis for the cements produced. From a process engineering and plant technology perspective it was assumed that all of the existing plants would be replaced by modern plants such as vertical roller mills or high-pressure grinding rolls in combination with ball mills for secondary grinding. The possible savings potential was estimated to be comparable for both systems at values of up to 30 % [14]. This value was verified by evaluating various data sets from real plants. The reason for the greater energy efficiency is a comminution under pressure in the bed of material or under conditions similar to those in a bed of material. In this instance, despite high losses by compression and therefore friction effects between the mill feed particles, energy utilisation is considerably greater than in the ball mill. The dissimilar stressing conditions, an altered residence time behaviour and high recirculation figures also lead to altered particle size distributions, which must be taken into account in the product. The modification of existing grinding plants is usually only economically feasible in conjunction with an increase in capacity. It is therefore a question of estimating the theoretically achievable maximum reduction potential.

Table 3 provides an overview of the assumptions made. This identified a significantly higher savings potential when grinding CEM II and III cements compared with CEM I cements due to the lower proportion of clinker. It also took into consideration that the fineness achievable during comminution in a bed of material is limited. It is therefore very difficult or even impossible to produce very fine cements in these plants. This is taken into consideration by keeping 50 % of the CEM I cements and 20 % of the CEM II and III cements unaltered at the 2011 energy demand values for strength class 52.5. Despite the negligibly low effects, the usual types were also taken into consideration in the same way as for the CEM II and III cements. Linear transposition of the maximum savings potential until 2030 was assumed.

Fig. 17 illustrates the predicted trends for the two BAU and two BAT scenarios. Both BAU scenarios exhibit a steady in-

sich unter Annahme einer linearen Entwicklung. Erkennbar ist, dass die Entwicklung hin zu höheren Festigkeiten den Energiebedarf bestimmend beeinflusst. Dies resultiert bezogen auf 2011 in einem Anstieg um 5,8 % bis 2020 und 9,7 % bis 2030. Dies entspricht einem spezifischen Energiebedarf von 53,3 kWh/t in 2020 bzw. 55,2 kWh/t in 2030.

Für das Szenario 2 sind durch den reduzierten Anteil der schwer mahlbaren Komponente Hüttensand geringere Werte als im Basisszenario (Szenario 1) zu erwarten. Dennoch überwiegt auch hier der Festigkeitsanstieg, sodass immer noch eine Zunahme des Energiebedarfs zu beobachten ist. Diese fällt jedoch mit 2,7 % bis 2020 und 5,6 % bis 2030 geringer aus als im Basisszenario. Absolut ergibt sich hier der spezifische Energiebedarf zu 51,6 kWh/t in 2020 und 53,0 kWh/t in 2030.

5.2.4 Einfluss der Mahltechnologien: BAT-Szenarien
Um zusätzlich das mögliche Potenzial durch den Einsatz hoch-effizienter Technologien zur Mahlung von Zement abschätzen zu können, wurden zwei „Best available technique“-Szenarien (BAT) konstruiert. Bezüglich der hergestellten Zemente werden die in Kapitel 3 beschriebenen Szenarien 1 und 2 zugrunde gelegt. Verfahrens- bzw. anlagentechnisch wird davon ausgegangen, dass alle bestehenden Anlagen durch moderne Anlagen wie Vertikal-Wälzmühlen oder Gutbett-Walzenmühlen in Kombination mit Kugelmühlen zur Nachmahlung ersetzt werden. Das mögliche Einsparpotenzial wurde für beide Systeme als gleichwertig eingeschätzt und auf Werte von bis zu 30 % beziffert [14]. Dieser Wert wurde durch Auswertung diverser Datensätze realer Anlagen verifiziert. Grund für die höhere Energieeffizienz ist eine Zerkleinerung unter Druck im Gutbett bzw. unter Gutbett-ähnlichen Bedingungen. Hierbei ist die Energieausnutzung trotz hoher Verluste durch Kompressions- und damit Reibungseffekte zwischen den Mahlpartikeln wesentlich höher als in der Kugelmühle. Die unterschiedlichen Beanspruchungsbedingungen, ein verändertes Verweilzeitverhalten und hohe Umlaufzahlen führen zudem zu veränderten Korngrößenverteilungen, was im Produkt zu berücksichtigen ist. Die Umrüstung bestehender Mahlanlagen ist wirtschaftlich in der Regel nur in Verbindung mit Kapazitätssteigerungen darstellbar. Es handelt sich folglich um eine Abschätzung der theoretisch erreichbaren maximalen Reduktionspotenziale.

Table 3 gives an overview of the assumptions made. Hereby a clearly higher savings potential was identified for the grinding of CEM II- and III-cements compared to CEM I-cements due to the lower clinker content. Furthermore, it was taken into account that the achievable fineness in the Gutbett is limited. So very fine cements on these plants are either very difficult or not even possible to produce. This is taken into account by keeping 50 % of the CEM I-cements and 20 % of the CEM II- and III-cements unchanged at the 2011 energy demand values for strength class 52.5. Despite the negligibly low effects, the usual types were also taken into consideration in the same way as for the CEM II and III-cements. Linear transposition of the maximum savings potential until 2030 was assumed.

Figure 17 shows the predicted developments for the two BAU- as well as two BAT-scenarios. For both BAU-scenarios, a steady increase in electrical energy demand is observed, which is primarily due to the market requirements for cements with higher strength and thus higher

crease in the electrical energy demand. This is due, in particular, to the underlying market requirements for cements with higher strengths and therefore greater fineness. The basic scenario (Scenario 1 BAT) gives a reduction in the specific energy demand of 8.3% by 2020 and 20.1% by 2030 compared to the actual value in 2010. Scenario 2 BAT gives slightly higher savings of 10.4% by 2020 and 21.9% by 2030.

In summary, the study of cement grinding shows that the electrical energy demand increases in the long term assuming normal technical development of the grinding technology. Substantial reconstruction of all German cement grinding plants (unrealistic from an economic perspective) would lead to a reduction in the electrical energy demand by a maximum of 20% by 2030 under the given conditions. However, it must be taken into account that the electrical energy demand for cement grinding represents only about half the total power requirement for cement production. ◀

rer Mahlfineinheit zurückzuführen ist. Im Basisszenario (Szenario 1-BAT) ergibt sich eine Reduktion des spezifischen Energiebedarfs um 8,3% bis 2020 und um 20,1% bis 2030 im Vergleich zum Ist-Wert 2010. Für das Szenario 2-BAT errechnen sich leicht höhere Einsparungen von 10,4% bis 2020 und 21,9% bis 2030.

Zusammenfassend zeigt die Studie zur Zementmahlung, dass der elektrische Energiebedarf langfristig ansteigt, wenn eine normale technische Entwicklung der Mahltechnik angenommen wird. Ein – unter wirtschaftlichen Aspekten unrealistischer – weitgehender Neubau aller deutschen Zementmahanlagen würde unter den gegebenen Randbedingungen zu einer Verminderung des elektrischen Energiebedarfs um maximal 20% bis 2030 führen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der elektrische Energiebedarf der Zementmahlung nur etwa die Hälfte des gesamten Strombedarfs der Zementherstellung ausmacht. ◀

LITERATURE / LITERATUR

- [1] Verein Deutscher Zementwerke (VDZ): Zahlen und Daten 2012. Stand: 18. April 2012, Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf 2012.
- [2] VDZ-Arbeitskreis Zementprognose: Zementverbrauch bis 2016, November 2012.
- [3] Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V.: Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine- und Erdenindustrie bis 2030 in Deutschland, Dezember 2012.
- [4] International Energy Agency, personal communication: base assumption for World Energy Outlook 2012.
- [5] Institut für Baustoff-Forschung e.V. (FEhS), „Report“, Duisburg, 2011, 18. Jahrgang, Nr. 1.
- [6] Institut für Baustoff-Forschung e.V. (FEhS), personal communication, July 2012.
- [7] Backes, H.-P., Brandenburger, D., Meißner, M.: Flugasche – Verfügbarkeit, Logistik, Potenzial“, 2011.
- [8] VGB Powertech e.V., personal communication, July 2012.
- [9] Fraunhofer IWES, „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“, Bericht im Auftrag des BMU, FKZ 03MAP146, 2012.
- [10] Locher, G.: Mathematical models for the cement clinker burning process; part 1: Reactions and unit operations. ZKG International 55 (2002) No. 1, pp. 29–38. part 2: Preheater, calciner and bypass. ZKG International 55 (2002) No. 1, pp. 39–50. part 3: Rotary kiln. ZKG International 55 (2002) No. 3, pp. 68–80. part 4: Grate cooler. ZKG International 55 (2002) No. 6, pp. 46–57. part 5: Complete plant. ZKG International 55 (2002) No. 7, pp. 25–37.
- [11] Hoenig, V.; Klein, H.: Model calculations of the fuel energy requirement for the clinker burning process. CEMENT INTERNATIONAL 4 (2006) No. 3, pp. 44–63.
- [12] European Commission: Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries, May 2010.
- [13] Verein Deutscher Zementwerke (VDZ): Umweltdaten : 2011, Stand: 18. April 2012, Düsseldorf, Verein Deutscher Zementwerke 2012.
- [14] VDZ-Arbeitsgruppe „Sekundärstoffe“, personal communication, September 2012.

IN-projects
UG (haftungsbeschränkt)

is specialized in the building material industry and its supply industry. As your service provider we carry out your orders in project management and quality management, as well as participation of commissioning of plants, formulation development, trouble shooting, monitoring of the factory production control etc. both at home and abroad.

Your contact: Dr. Jürgen Lutter, +49 (0) 176-66491218, info@in-projects.com