

# Scientific Report

Hoenig, V.; Koring, K.; Fleiger, P.; Müller, Ch.; Palm, S.; Reiners, J.

## **Energy efficiency in cement production: part 1**

**Reprint from Cement International:**

Issue No.: 2013, 11(3), pp. 50-67

Hoenig, V.; Koring, K.; Fleiger, P.; Müller, Ch.; Palm, S.; Reiners, J.

## **Energy efficiency in cement production: part 2**

**Reprint from Cement International:**

Issue No.: 2013, 11(4), pp. 46-65

## 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.

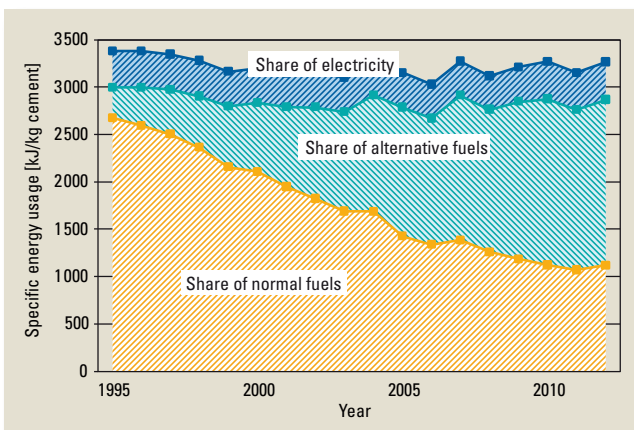


Figure 1: Energy demand of the German cement industry 1955–2012

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.

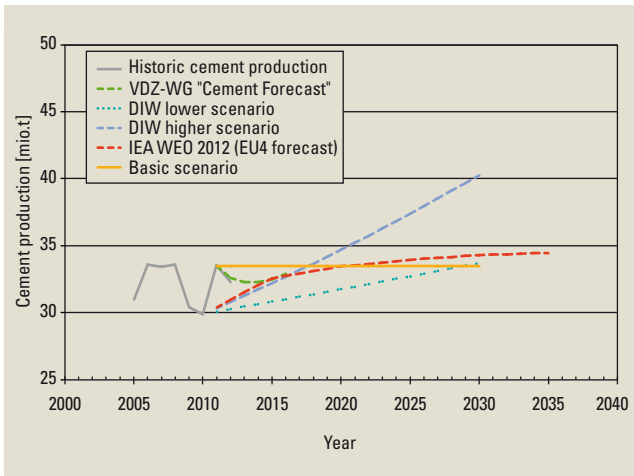


Figure 2: Historic and predicted cement production based on various studies

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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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

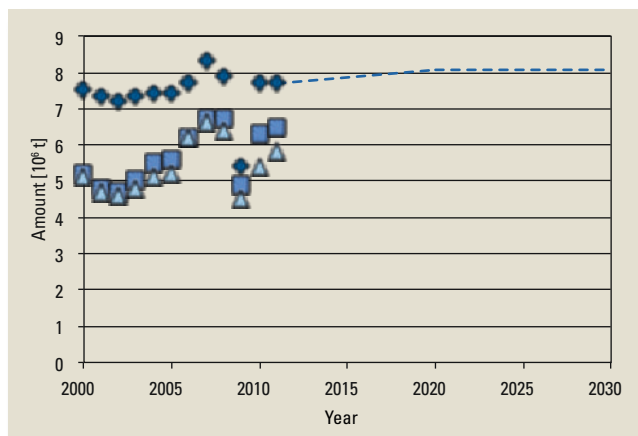


Figure 3: Availability of granulated blastfurnace slag in Germany, assumption [5, 6]

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

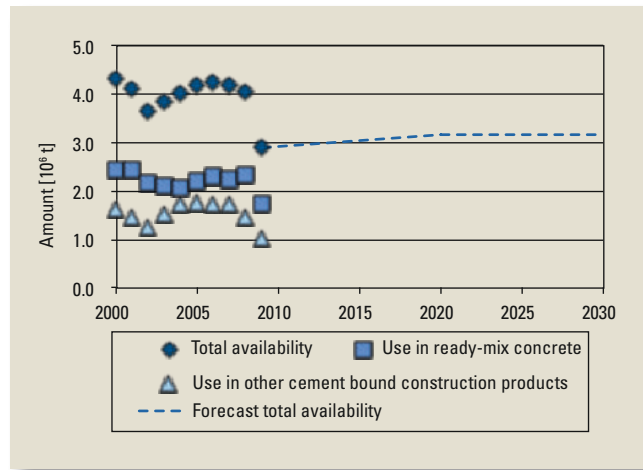


Figure 4: Availability of siliceous fly ash in Germany, assumption [7, 8]

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  $\frac{2}{3}$  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-

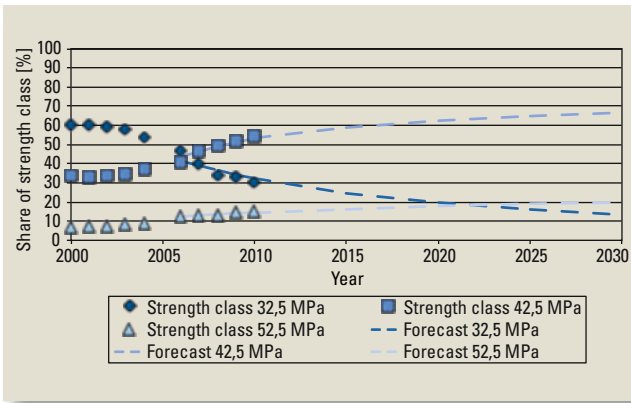


Figure 5: Trend in the strength classes (Scenarios 1-4)

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.

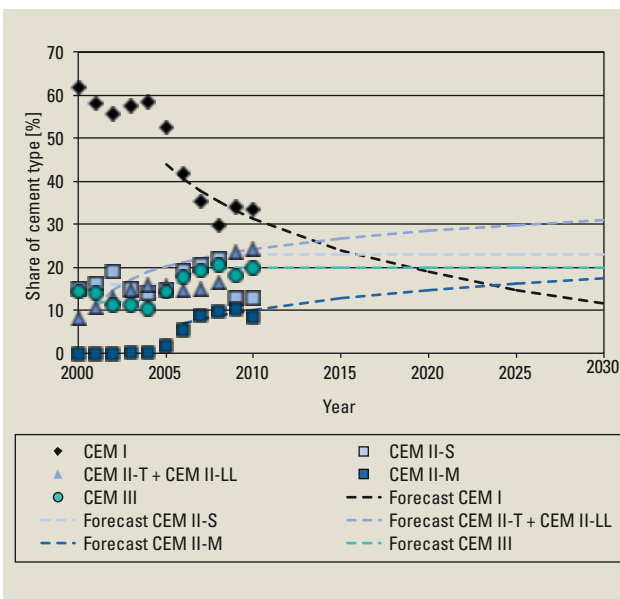


Figure 6: Historic and predicted development of the cement types: Basic scenario (Scenario 1)

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

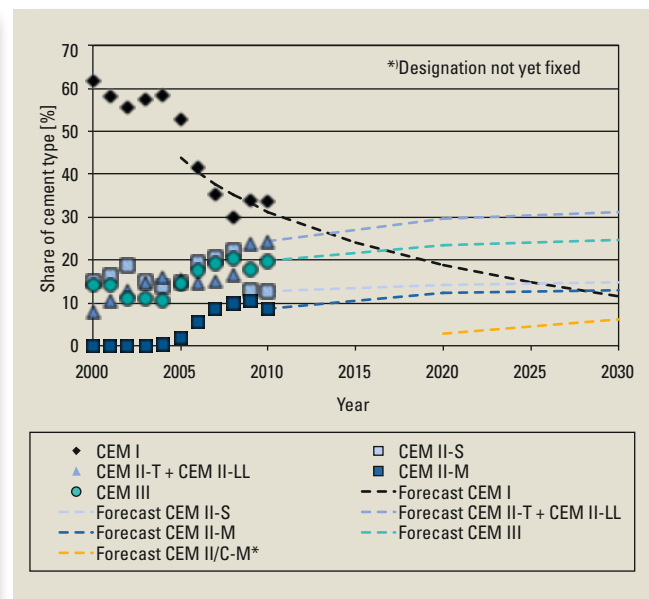


Figure 8: Historic and predicted development of the cement types: Scenario 3

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

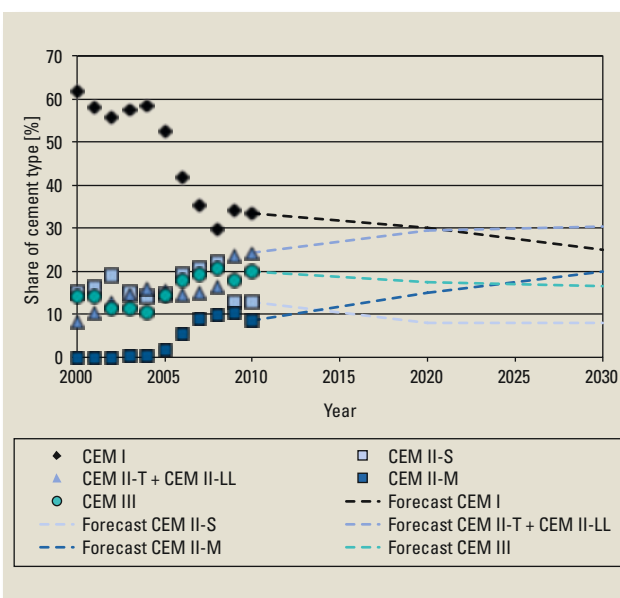


Figure 7: Historic and predicted development of the cement types: Scenario 2

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

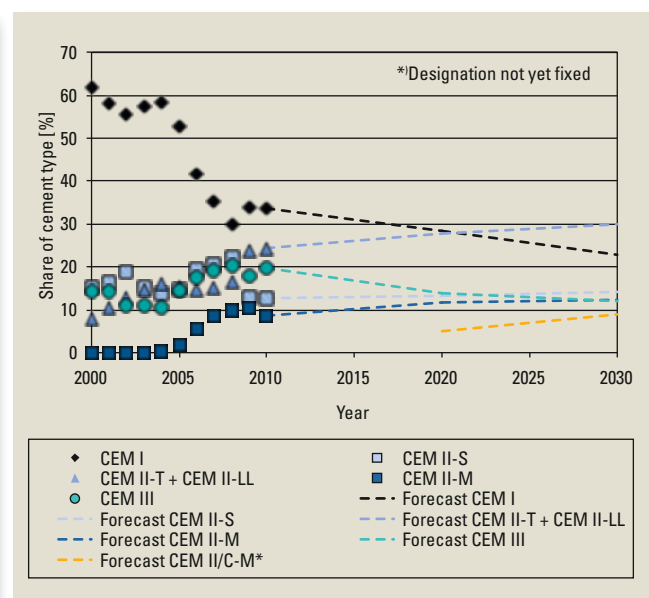


Figure 9: Historic and predicted development of the cement types: Scenario 4

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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> 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

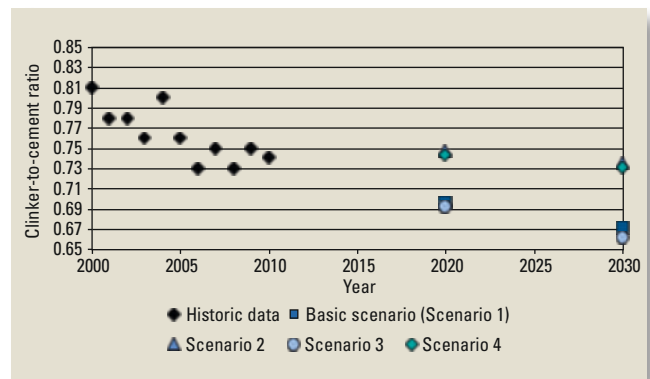


Figure 10: Historic and predicted development of the clinker/cement ratio

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

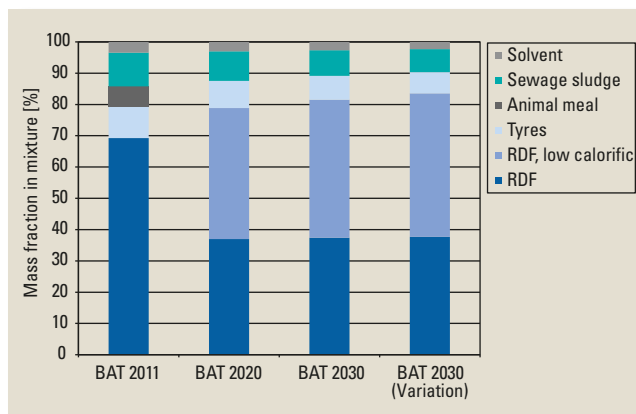


Figure 11: Combination of the alternative fuels for the various calculation scenarios

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

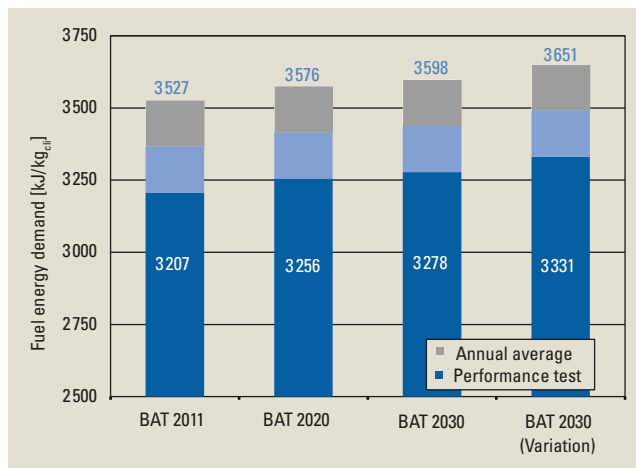
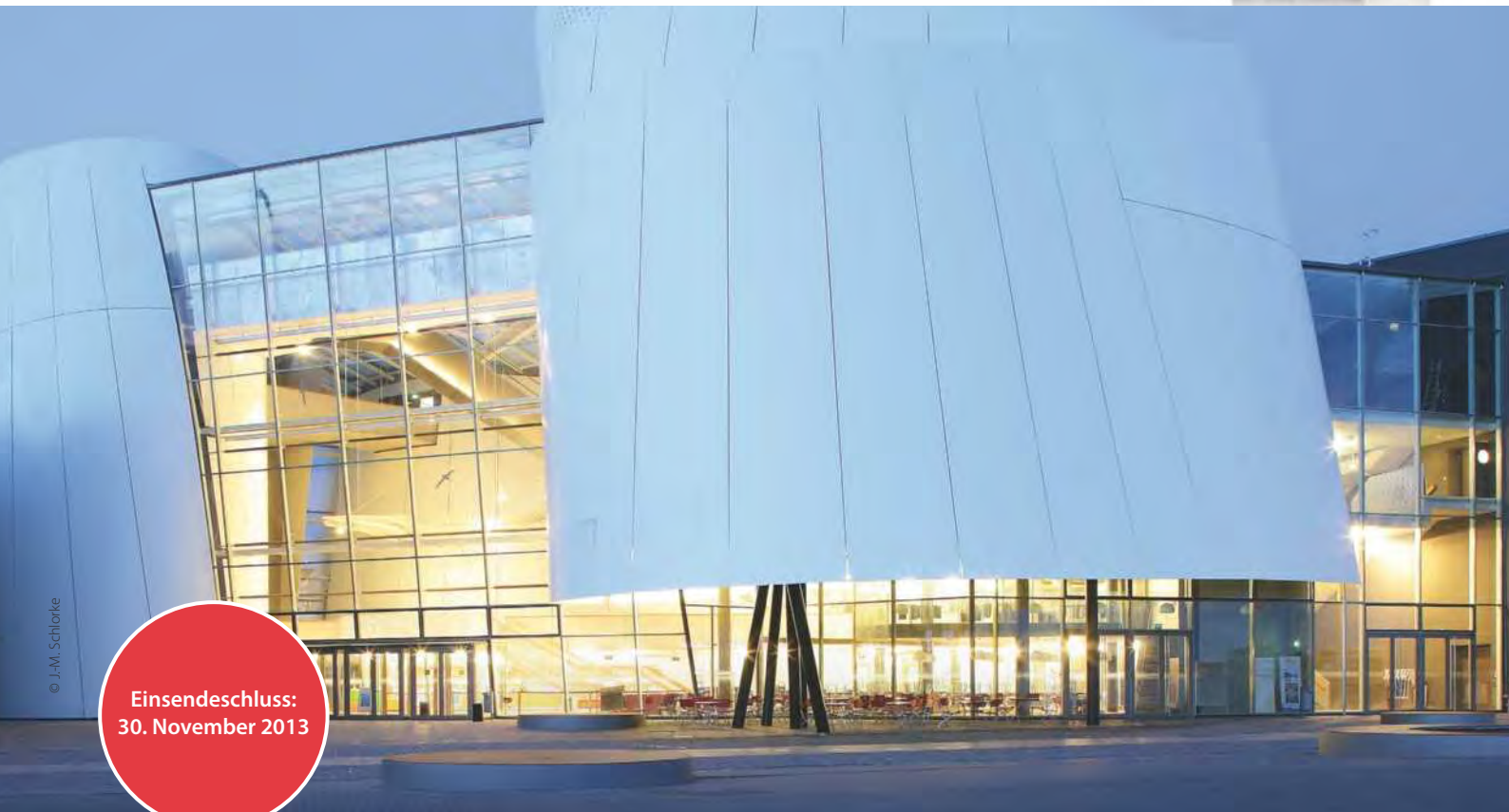


Figure 12: Calculated fuel energy demand for the various BAT scenarios

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](http://www.cemex.de)



Table 2: Savings potential of the calculation scenarios

Tabelle 2: Einsparpotenzial der Berechnungsszenarien

	BAT 2020			BAT 2030			BAT 2030 (variant)		
	PT <sup>1)</sup>	Min.	Max.	PT <sup>1)</sup>	Min.	Max.	PT <sup>1)</sup>	Min.	Max.
Mean value [kJ/kg <sub>cl</sub> ]	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

<sup>1)</sup> 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 CO<sub>2</sub> 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<sub>cement</sub> and accounts for the

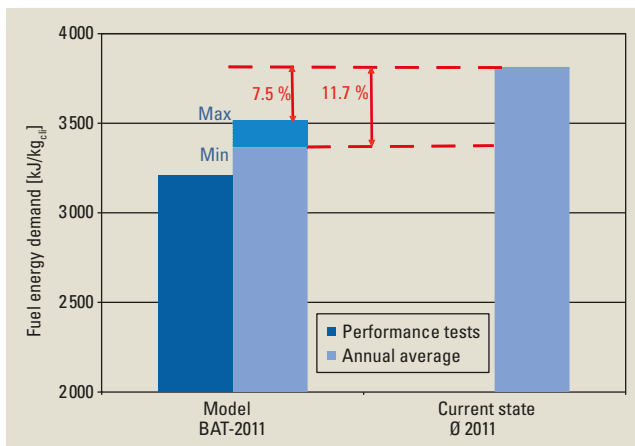


Figure 13: Maximum savings potential: current situation in 2011 compared to BAT 2011 scenario

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.

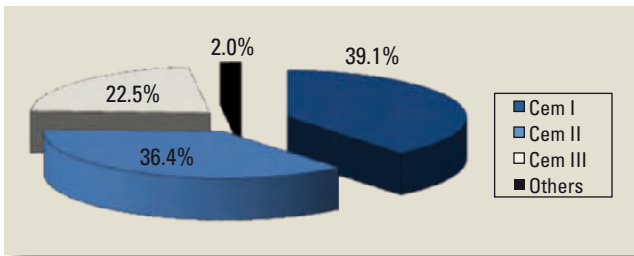


Figure 14: Percentages of the 662 evaluated data sets associated with the different types of cement

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 CO<sub>2</sub>-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<sub>Zement</sub> 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  $\text{cm}^2/\text{g}$  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  $88 \text{ kWh/t}$ . 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  $123.5 \text{ kWh/t}$ .

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

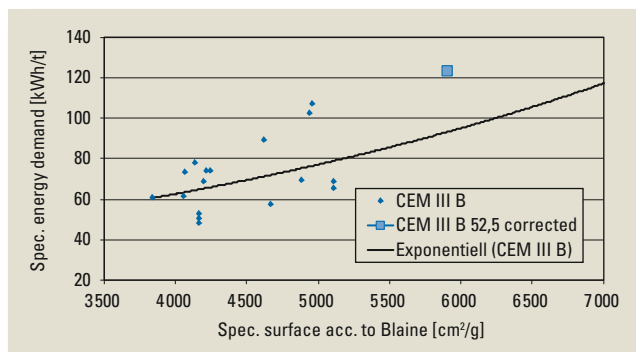


Figure 15: Extrapolation of the specific energy demand for grinding CEM III B cement

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  $\text{cm}^2/\text{g}$  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  $88 \text{ kWh/t}$ . 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



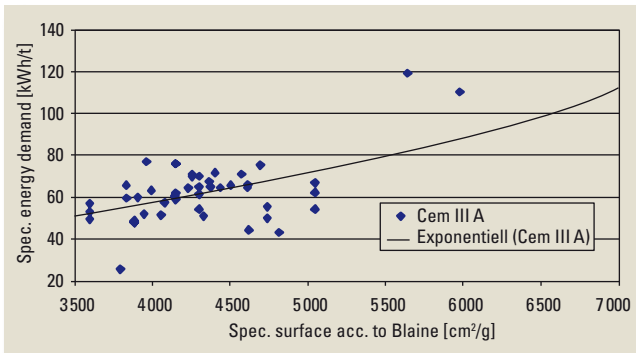


Figure 16: Extrapolation of the specific energy demand for grinding CEM III A cement

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

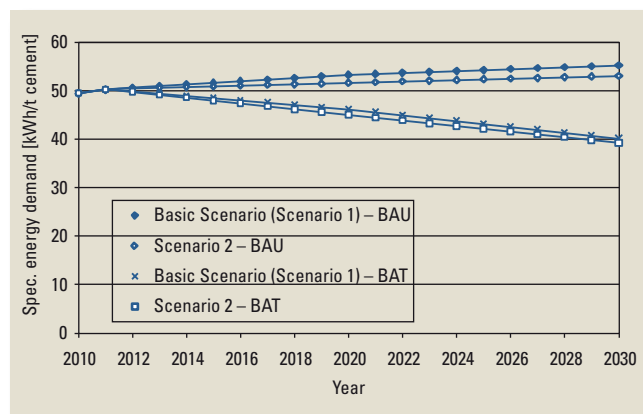


Figure 17: Predicted development of the specific energy demand for Scenarios 1 and 2 respectively for the BAU and BAT cases

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 significantly 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. It was also taken into account 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 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 account 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 trends 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**

## SUMMARY

Industrial companies in Germany are subject to taxation of the electrical energy demand. Energy-intensive companies are very largely free from this ("tax capping"). To ensure that this exemption continues in the future, the federal German government and industry have concluded a new agreement that is linked to an improvement in the energy efficiency of the German economy. As part of this agreement, industry has committed itself to reducing the level of energy demand 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 second part of this publication describes the effects of these scenarios on the thermal and electrical energy demand of cement production and provides an estimate of the remaining potential. It also considers the interactions of the durability of concrete and the energy demand of cement production. It then examines the part that could possibly be played in the future by limestone as a main cement constituent – the only one available in Germany in practically unlimited quantities – in higher contents than is currently normal. An outline is given of the influence of the environmental effects (including energy demand) of cement production on the assessment of the sustainability of buildings. ◀

## ZUSAMMENFASSUNG

Industrieunternehmen unterliegen in Deutschland einer Besteuerung des elektrischen Energiebedarfs. Energieintensive Unternehmen sind hiervon weitgehend befreit (so genannter Spitzenausgleich). Um diese Befreiung auch zukünftig zu gewährleisten, 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 zweite Teil der Veröffentlichung beschreibt zum einen die Auswirkungen der beschriebenen Szenarien auf den thermischen und den elektrischen Energiebedarf der Zementherstellung und gibt eine Einschätzung der verbleibenden Potenziale. Zum anderen umfasst er die Betrachtung der Wechselwirkungen der Dauerhaftigkeit von Beton und des Energiebedarfs der Zementherstellung. Dabei wird auch der Frage nachgegangen, welche Rolle dem Kalkstein als – in Deutschland einzigen praktisch unbegrenzt verfügbaren – Zementhauptbestandteil in höheren Gehalten als heute üblich in der Zukunft ggf. zukommen könnte. Abschließend wird der Einfluss der Umweltwirkungen (einschließlich des Energiebedarfs) der Zementherstellung auf die Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden dargestellt. ◀

(Translation by Robin B. C. Baker)

# Energy efficiency in cement production; part 2

## Energieeffizienz bei der Zementherstellung; Teil 2

### 6 Forecast of the energy demand up to 2030

The effects of the most important parameters on the energy demand have been simulated for two of the scenarios described in Part I of this publication (see CEMENT INTERNATIONAL 11 (2013), vol. 3, p. 50 ff.). The following influencing variables were examined

- › optimization of the process/plant technology
- › influence of the cement portfolio
- › use of alternative fuel
- › implementation of environmental protection measures, and
- › importance of the cross-sectional technologies.

It is important for further considerations that the final energy (kWh/t product or MJ/t product) is always used in the evaluation of the efficiency of plants or process sections while ecological balance considerations, in which the primary energy usage is evaluated, are used for the product evaluation (see sections 7 and 8). This means that the evaluation of the electricity demand sometimes has different weightings.

#### 6.1 Potential of process engineering optimization

Process engineering optimization of the plants is a routine task in the cement industry that is carried out as part of the annual overhaul. These must be differentiated from capital investment in significant changes to the plant inventory, such as replacement of an obsolete clinker cooler by a new one or the installation of a more efficient mill for grinding cement. The effects of such measures were not examined individually in this study. The basic savings potential of these systems have been described in detail by the same authors in the ECRA Technology Papers [15] that are published on the Internet at [www.wbcscement.org](http://www.wbcscement.org).

The process engineering potential in clinker burning and cement grinding was evaluated in this study for the purposes of estimating its maximum value. The results have been described in Part 1 of this publication and form part of the estimate of the total potential in Section 6.6.

The simulation of the different scenarios, for which the underlying assumptions are described in detail in Part 1 of this publication, was based on a reduction of the thermal energy demand by 5 % in the period up to 2030 by continuous process engineering optimization measures.

#### 6.2 Effect of the cement portfolio

The investigations were carried out for scenarios 1 (basic scenario) and 2. The basic scenario assumes a development in the distribution of cement types based on historical data in which the essential changes relate to cement types and the availability of other main cement constituents, such as granulated blastfurnace slag. In scenario 2 it is assumed that 25 % less granulated blastfurnace slag will be available in the medium term.

The change in product portfolio affects the energy demand of cement production in two ways. Firstly, the increased

### 6 Prognostizierung des Energiebedarfs bis 2030

Die Auswirkungen der wichtigsten Parameter auf den Energiebedarf wurden für zwei der in Teil 1 dieser Veröffentlichung (s. CEMENT INTERNATIONAL 11 (2013) H. 3, S. 50 ff.) beschriebenen Szenarien simuliert. Dabei wurden die Einflussgrößen

- › Optimierung der Verfahrens-/Anlagentechnik
- › Einfluss des Zementportfolios
- › Einsatz alternativer Brennstoffe
- › Durchführung von Umweltschutzmaßnahmen sowie
- › Bedeutung der Querschnittstechnologien

untersucht.

Für die weiteren Betrachtungen ist von Bedeutung, dass bei der Bewertung der Effizienz von Anlagen bzw. Prozessschritten immer die Endenergie (als kWh/t Produkt oder MJ/t Produkt) herangezogen wird. Bei der Produktbewertung (s. Abschnitte 7 und 8) kommen dagegen ökobilanzielle Betrachtungen hinzu, bei denen der Primärenergieeinsatz bewertet wird. Dadurch fällt die Bewertung des Strombedarfs z.T. unterschiedlich ins Gewicht.

#### 6.1 Potenziale der verfahrenstechnischen Optimierung

Die verfahrenstechnische Optimierung der Anlagen ist in der Zementindustrie eine regelmäßige Aufgabe, die im Rahmen der jährlichen Revisionen durchgeführt wird. Davon zu unterscheiden sind Investitionen in signifikante Veränderungen des Anlagenbestands, wie z. B. der Austausch eines älteren Klinkerkühlers gegen einen neuen oder die Installation einer effizienteren Mühle zur Zementmahlung. Die Auswirkungen solcher Maßnahmen wurden im Rahmen dieser Studie nicht im Einzelnen untersucht. Die grundsätzlichen Einsparpotenziale dieser Technologien wurden ausführlich von denselben Autoren in den so genannten ECRA-Technology Papers [15] beschrieben, die unter [www.wbcscement.org](http://www.wbcscement.org) im Internet veröffentlicht sind.

In dieser Studie wurden die verfahrenstechnischen Potenziale beim Klinkerbrennen und bei der Zementmahlung im Sinne einer Maximalabschätzung bewertet. Die Ergebnisse sind in Teil 1 dieser Veröffentlichung beschrieben und sind Bestandteil der Abschätzung der Gesamtpotenziale in Abschnitt 6.6.

Im Rahmen der Simulation der verschiedenen Szenarien, deren zugrundeliegende Annahmen in Teil 1 dieser Veröffentlichung im Detail beschrieben sind, wurde eine Minderung des thermischen Energiebedarfs infolge stetiger verfahrenstechnischer Optimierungen von 5 % im Zeitraum bis 2030 zu Grunde gelegt.

#### 6.2 Auswirkung des Zementportfolios

Die Untersuchungen wurden für die Szenarien 1 (Basisszenario) und 2 durchgeführt. Im Basisszenario wird von einer Entwicklung der Zementartenverteilung auf Basis der historischen Daten ausgegangen, wobei sich die wesentlichen

replacement of clinker by other main constituents, such as granulated blastfurnace slag, leads to a reduction in the cement-related thermal energy demand. Secondly, there are changes in the grindability of the cements. Granulated blastfurnace slag is harder to grind and contributes to an increase in the electrical energy demand for cement grinding but the increasing use of limestone as a main cement constituent can – depending on the type of mill and whether the cement components are interground or ground separately – have the opposite effect.

Under the assumptions made for the basic scenario the clinker/cement factor in the German cement industry will fall from 73.3 % in 2011 to 67.0 % in 2030. The replacement of the clinker will lead to a reduction in the thermal energy demand from 2759 MJ/t cement in 2011 to 2428 MJ/t cement. The electrical energy demand will increase only slightly from 109.4 (394) to 110.8 kWh/t cement (399 MJ/t). Fig. 18 shows that the electrical energy demand plays only a secondary role in the total energy demand of cement production. In this case, the essential lever for reducing the energy demand lies in replacement of the cement clinker and the saving of the requisite fuel energy. The assumed continuous improvement by process engineering optimization of 5 % over the entire period is also taken into account.

In scenario 2, on the other hand, the clinker/cement factor falls only slightly to 72.6 %. The limiting condition is the drop in availability of granulated blastfurnace slag. There is a correspondingly smaller effect on the thermal energy consumption (2 631 MJ/t cement in 2030). The electrical energy demand falls slightly because of the reduced use of the hard-to-grind granulated blastfurnace slag. However, the saving in electricity for clinker burning turns out to be lower because of the higher clinker/cement factor, so that overall there is an increase to 112.6 kWh/t cement (405 MJ/t).

### 6.3 Effects of the use of alternative fuels

The use of alternative fuels in the cement industry has had a long tradition, especially in Central Europe. The cement industry has adapted and optimized not only the operation of its kiln plants but also the complete process chain with respect to the product properties of the altered fuel situa-

Entwicklungen hinsichtlich der Zementarten sowie der Verfügbarkeit anderer Zementhauptbestandteile, wie z. B. Hüttsand, fortsetzt. In Szenario 2 wird angenommen, dass mittelfristig 25 % weniger Hüttsand zur Verfügung stehen wird.

Die Veränderung des Produktportfolios wirkt sich in zweierlei Hinsicht auf den Energiebedarf der Zementherstellung aus. Zum einen führt die verstärkte Substitution von Klinker durch andere Hauptbestandteile, wie z. B. Hüttsand, zu einer Verringerung des zementbezogenen thermischen Energiebedarfs. Zum anderen verändern sich die Mahlbarkeiten der Zemente. Während Hüttsand schwerer mahlbar ist und zu einer Erhöhung des elektrischen Energiebedarfs bei der Zementmahlung beiträgt, kann sich z. B. die zunehmende Verwendung von Kalkstein als Zementhauptbestandteil – abhängig vom Mühlentyp sowie von einer gemeinsamen oder getrennten Mahlung der Zementkomponenten – in umgekehrter Weise auswirken.

Unter den für das Basisszenario getroffenen Annahmen sinkt der Klinker/Zement-Faktor der deutschen Zementindustrie von 73,3 % im Jahr 2011 auf 67,0 % im Jahr 2030. Die Substitution des Klinkers führt zu einer Abnahme des thermischen Energiebedarfs von 2 759 MJ/t Zement in 2011 auf 2 428 MJ/t Zement. Der elektrische Energiebedarf steigt nur geringfügig von 109,4 kWh/t (394 MJ/t) auf 110,8 kWh/t Zement (399 MJ/t) an. Wie in Bild 18 dargestellt, spielt der elektrische Energiebedarf im Hinblick auf den Gesamtenergiebedarf der Zementherstellung nur eine untergeordnete Rolle. Der wesentliche Hebel zur Minderung des Energiebedarfs besteht in diesem Fall in der Substitution des Zementklinkers und der Einsparung der dafür erforderlichen Brennstoffenergie. Darüber hinaus ist die angenommene stetige Verbesserung durch verfahrenstechnische Optimierung um 5 % im Gesamtzeitraum berücksichtigt.

Im Szenario 2 sinkt der Klinker/Zement-Faktor dagegen nur geringfügig auf 72,6 %. Die limitierende Randbedingung ist der Rückgang der Verfügbarkeit von Hüttsand. Der Effekt auf den thermischen Energieverbrauch (2 631 MJ/t Zement in 2030) fällt entsprechend geringer aus. Der elektrische Energiebedarf für die Zementmahlung sinkt geringfügig aufgrund des weniger verwendeten schwer mahlbaren Hüttsands. Andererseits fällt die Stromersparung für das Klinkerbrennen aufgrund des höheren Klinker/Zement-Faktor geringer aus, sodass sich insgesamt ein Anstieg auf 112,6 kWh/t Zement (405 MJ/t) ergibt.

### 6.3 Auswirkungen des Einsatzes alternativer Brennstoffe

Der Einsatz alternativer Brennstoffe hat in der Zementindustrie insbesondere in Mitteleuropa inzwischen eine lange Tradition. Die Zementindustrie hat nicht nur den Betrieb ihrer Ofenanlagen sondern auch die komplette Prozesskette im Hinblick auf die Produkteigenschaften an die veränderte Brennstoffsituation angepasst und optimiert. Die Vorteile des Einsatzes alternativer Brennstoffe in der Zementindustrie sind heute auf breiter Ebene anerkannt. Der wesentliche übergeordnete positive Effekt auf Umwelt und Energieeinsatz besteht in der Substitution fossiler Brennstoffe, vor allem Kohle. Da die Abfälle, aus denen die alternativen Brennstoffe hergestellt werden, in diesem Fall nicht mehr an anderer Stelle verbrannt werden müssen, werden die entsprechenden fossilen Brennstoffe nahezu vollständig eingespart. Dies gilt in besonderem Maße, da der energetische

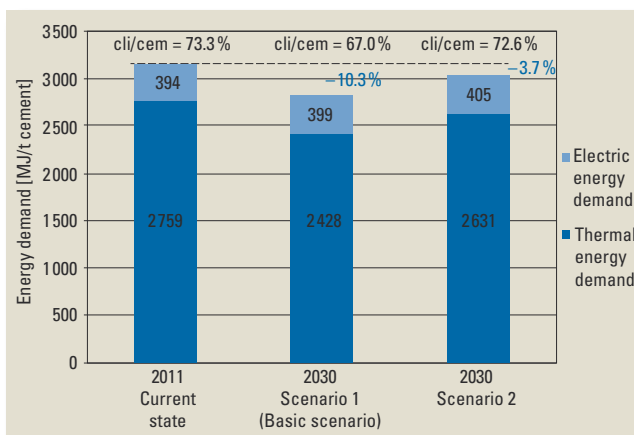


Figure 18: Influence of the clinker/cement factor on the specific energy demand of cement production (including 5 % reduction of the fuel energy demand due to continuous optimization)

Bild 18: Einfluss des Klinker/Zement-Faktors auf den spezifischen Energiebedarf der Zementherstellung (5 %ige Minderung des Brennstoffenergiebedarfs aufgrund stetiger Optimierung berücksichtigt)

tion. The advantages of using alternative fuels in the cement industry are now widely recognized. The essential overriding positive effect on the environment and energy usage arise from the replacement of fossil fuels, especially coal. The waste materials from which the alternative fuels are produced will in this case no longer have to be burnt somewhere else so there is a virtually complete saving of the corresponding fossil fuels. This is particularly true because the energy efficiency of rotary kiln plants in the cement industry of about 70 % is very high compared with other combustion processes.

From the technical and economic aspects each change of fuel in a combustion process leads to a change in the specific fuel energy demand. The important influencing variables involved are the calorific value and the volume of exhaust gas generated. The higher the calorific value of a fuel the higher is the adiabatic combustion temperature (effectively the maximum theoretically achievable process temperature), which has a great effect on the heat transfer in the process. Because fuel oil has a significantly higher calorific value than coal a change of fuel from, for example, heavy fuel oil to coal leads to an increase in the fuel energy demand of a process. An exception to this is natural gas. Although it has a higher calorific value than fuel oil it produces larger specific volumes of exhaust gas because the heat transfer to the kiln feed is reduced as a result of the lower proportion of radiation.

The principle described above also applies to the replacement of coal in the clinker burning process by alternative fuels with lower calorific values. However, the fuel properties of alternative fuels sometimes differ very sharply. On average it can be assumed that the alternative fuels used in Germany have lower calorific values than the coals used. This is taken appropriately into account in the simulations shown below.

If, for example, lignite is replaced it should be borne in mind that this has usually been dried and ground before it is delivered to the cement plant, so the corresponding energy demand (thermal and electrical) is not allocated to the cement plant. On the other hand, although the alternative fuels are processed (external electrical energy demand) they are delivered in a moist state. The corresponding drying takes place directly in the clinker burning process and is therefore allocated to the cement production process. In addition to the above-mentioned effect this is one reason why, in a direct comparison, an increase in the use of alternative fuels leads to an increase in the thermal energy demand of the clinker burning process.

In the basic scenario it is assumed that the use of alternative fuels can be raised from 61 % (2011) to 80 % by 2030. This is based on the assumption that the requisite alternative fuels made from high-calorie fractions will continue to be available in Germany in the future in sufficient quantity and quality for improving the energy situation. However, a trend towards falling calorific value and rising moisture content has been assumed in the calculations.

» Fig. 19 shows the effect of increased use of alternative fuels on the energy demand. The first bar shows the actual situation in 2011 while the second bar shows just the effect of the reduced clinker/cement factor. The third bar shows that the additional use of 80 % (instead of 61 %) alternative fuels leads to a thermal energy demand of 2 532 MJ/t

Wirkungsgrad von Drehofenanlagen der Zementindustrie im Vergleich zu anderen Verbrennungsprozessen mit rund 70 % sehr hoch ist.

Aus technisch-wissenschaftlicher Sicht führt jeder Brennstoffwechsel in einem Verbrennungsprozess zu einer Veränderung des spezifischen Brennstoffenergiebedarfs. Die wesentlichen Einflussgrößen hierauf sind der Heizwert sowie der entstehende Abgasvolumenstrom. Je höher der Heizwert eines Brennstoffs ist, desto höher ist die so genannte adiabatische Verbrennungstemperatur (quasi die theoretisch maximal erreichbare Prozesstemperatur), die einen großen Einfluss auf die Wärmeübertragung im Prozess hat. Aufgrund des deutlich höheren Heizwerts von Heizöl im Vergleich zu Kohle führt ein Brennstoffwechsel von z. B. schwerem Heizöl auf Kohle zu einer Erhöhung des Brennstoffenergiebedarfs eines Prozesses. Eine Ausnahme gilt hier für den Brennstoff Erdgas. Trotz des im Vergleich zu Heizöl höheren Heizwerts, ergeben sich spezifisch größere Abgasvolumenströme, da die Wärmeübertragung an das Brenngut infolge des geringeren Strahlungsanteils vermindert ist.

Das zuvor beschriebene Prinzip gilt auch für den Ersatz von Kohle durch heizwertärmere alternative Brennstoffe im Klinkerbrennprozess. Allerdings unterscheiden sich die Brennstoffeigenschaften alternativer Brennstoffe z.T. sehr stark. Im Durchschnitt der in Deutschland eingesetzten alternativen Brennstoffe ist von einem insgesamt niedrigeren Heizwert im Vergleich zur eingesetzten Kohle auszugehen. Dies wurde bei den im Folgenden dargestellten Simulationen entsprechend berücksichtigt.

Wird z. B. Braunkohle substituiert, ist zu beachten, dass diese üblicherweise gemahlen und getrocknet im Zementwerk angeliefert wird. Der entsprechende Energieverbrauch (thermisch und elektrisch) wird nicht dem Zementwerk angerechnet. Die alternativen Brennstoffe werden dagegen zwar aufbereitet (externer elektrischer Energiebedarf), jedoch in feuchtem Zustand angeliefert. Die entsprechende Trocknung erfolgt im Klinkerbrennprozess direkt und wird deshalb dem Zementherstellungsprozess angerechnet. Neben dem oben genannten Effekt ist dies ein Grund dafür, warum die Steigerung des Einsatzes von alternativen Brennstoffen im direkten Vergleich zu einer Erhöhung des thermischen Energiebedarfs des Klinkerbrennprozesses führt.

Im Basis-Szenario wurde angenommen, dass der Einsatz alternativer Brennstoffe bis zum Jahr 2030 von 61 % (2011) auf 80 % gesteigert werden kann. Dabei wurde zugrunde gelegt, dass die dafür notwendigen alternativen Brennstoffe aus heizwertreichen Fraktionen in Deutschland auch in Zukunft in ausreichender Menge und Qualität für die energetische Verbesserung zur Verfügung stehen. Dennoch wurde bei den Rechnungen von einem tendenziell sinkenden Heizwert und einem steigenden Feuchtegehalt ausgegangen.

» Bild 19 zeigt die Auswirkung des erhöhten alternativen Brennstoffeinsatzes auf den Energiebedarf. Während der erste Balken den Ist-Zustand im Jahr 2011 zeigt, entspricht der zweite Balken dem alleinigen Effekt des verringerten Klinker/Zement-Faktors. Der dritte Balken zeigt, dass der zusätzliche Einsatz von 80 % (anstatt 61 %) alternativer Brennstoffe zu einem thermischen Energiebedarf von 2 532 MJ/t Zement sowie einem praktisch unverändertem elektrischen Energiebedarf führt. Dabei ist hierin – wie oben bereits dargestellt –

cement and a practically unchanged electrical energy demand. Included in this – as already explained above – is the process-integrated drying of the alternative fuels. It must also be borne in mind that the CO<sub>2</sub> emissions are reduced by this fuel replacement. This is attributable partly to the usually lower C/H ratio (i.e. lower carbon content relative to the energy content) than in coal and partly to the biogenic fraction of some alternative fuels. The fact that the use of alternative fuels replaces fossil fuels, and in this way also saves emissions, is not taken into account in this direct examination (with reference to the cement plant chimney).

#### 6.4 Influence of environmental protection measures

Over the past years the cement industry has continuously lowered its emissions by a variety of capital investments. In Germany this is associated principally with the intensified legislation in connection with the use of waste-derived fuels. As a rule, secondary exhaust gas cleaning measures entail some additional power demand and sometimes also the use of additional thermal energy. The introduction of SNCR technology for NO<sub>x</sub> abatement, for example, has led both to a certain increase in electricity demand for pumps and the like and to an increased thermal energy demand as the result of the injection of aqueous solutions in the hot part of the kiln plant.

The calculations carried out here were based on the fact that the NO<sub>x</sub> and dust emissions have to be lowered still further as a result of the implementation of the European IED (Industry Emissions Directive). For German cement plants this means that from 2019 the NO<sub>x</sub> limit will be lowered to 200 mg/m<sup>3</sup> (10 % O<sub>2</sub>) and from 2016 the dust limit will be lowered to 10 mg/m<sup>3</sup> (10 % O<sub>2</sub>).

An NO<sub>x</sub> limit of 200 mg/m<sup>3</sup> means that the more efficient, but also more energy intensive, SCR technology will have to be installed in many rotary kiln plants. Experience from two demonstration projects on the use of the SCR technology in the cement industry that are currently running in Germany shows that an additional electricity demand of 5 kWh/t clinker must be expected regardless of the process (high-dust or low-dust SCR). It is also assumed that lowering the dust limit to 10 mg/m<sup>3</sup> will lead to an increase in electricity demand by about 1 kWh/t clinker as it will be necessary to modify or replace the corresponding filters.

Bearing in mind these developments there will be an electrical energy demand of 114.8 kWh/t cement (413 MJ/t) in 2030. Fig. 19 (fourth bar) shows the corresponding increase in electrical energy demand, while the thermal energy demand remains unaffected by these measures.

#### 6.5 Significance of cross-sectional technologies and large drives

Optimization of the cross-sectional technologies is often regarded as having great potential for long-term reduction of industrial energy demand. The proportion of the electricity

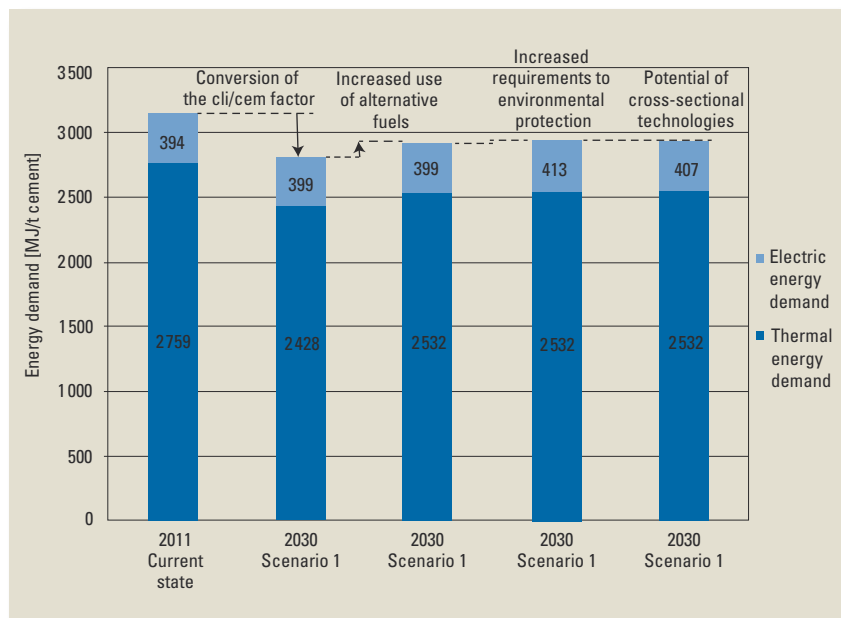


Figure 19: Influence of different parameters on the energy demand of cement production

Bild 19: Einfluss verschiedener Parameter auf den Energiebedarf der Zementherstellung

die prozessintegrierte Trocknung der alternativen Brennstoffe enthalten. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch diese Brennstoffsubstitution gemindert wird. Dies ist zum einen auf das meist niedrigere C/H-Verhältnis (d.h. geringerer Kohlenstoffgehalt bezogen auf den Energieinhalt) im Vergleich zu Kohle und zum anderen auf die biogenen Anteile einiger Alternativbrennstoffe zurückzuführen. Dass der Einsatz alternativer Brennstoffe fossile Brennstoffe substituiert und dadurch zusätzlich übergeordnet Emissionen einspart, wird bei dieser direkten Betrachtung (bezogen auf den Kamin des Zementwerks) nicht berücksichtigt.

#### 6.4 Einfluss von Umweltschutzmaßnahmen

Die Zementindustrie hat in den vergangenen Jahren ihre Emissionen durch vielfältige Investitionen stetig gesenkt. In Deutschland hängt dies vor allem mit der verschärften Gesetzgebung im Zusammenhang mit dem Einsatz abfallstämmiger Brennstoffe zusammen. Sekundäre Abgasreinigungsmaßnahmen erfordern in der Regel einen zusätzlichen Strombedarf, z.T. auch einen zusätzlichen thermischen Energieeinsatz. So hat die Einführung der SNCR-Technologie zur NO<sub>x</sub>-Minderung sowohl zu einer gewissen Erhöhung des Strombedarfs für Pumpen u.Ä. sowie zu einem erhöhten thermischen Energiebedarf in Folge der Eindüsung wässriger Lösungen in den Heißbereich der Ofenanlage geführt.

Für die hier durchgeführten Rechnungen wurde zugrunde gelegt, dass infolge der Umsetzung der europäischen Industry Emissions Directive (IED) die NO<sub>x</sub>- und Staubemissionen weiter abgesenkt werden müssen. Für die deutschen Zementwerke bedeutet dies z. B., dass der NO<sub>x</sub>-Grenzwert ab dem Jahr 2019 auf 200 mg/m<sup>3</sup> (10 % O<sub>2</sub>) sowie der Staubgrenzwert bereits ab 2016 auf 10 mg/m<sup>3</sup> (10 % O<sub>2</sub>) abgesenkt wird.

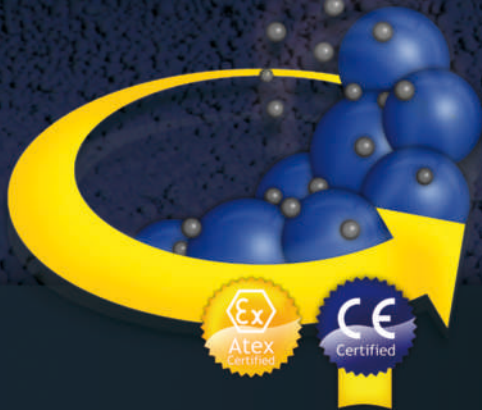
Ein NO<sub>x</sub>-Emissionsgrenzwert von 200 mg/m<sup>3</sup> bedeutet, dass an vielen Drehofenanlagen die effizientere, aber auch energieintensivere SCR-Technologie installiert werden muss. Erfahrungen aus zwei derzeit in Deutschland laufenden Demonstrationsprojekten zur Anwendung der SCR-Technologie in der Zementindustrie zeigen, dass unabhängig



# Smart Technology for Leading Companies

KIMA Echtzeitsysteme GmbH

## SmartFill



High-definition, fail-safe fill level and temperature measurement for ballmills in cement, mineral, ceramic and ore industry.

## MillMaster



Optimises grinding facilities within 3 weeks. Fast, powerful and reliable. The new generation expert system.

Highly developed measuring and control systems for industrial applications.



**Kima Echtzeitsysteme GmbH**

phone: +49 2463 / 99 67 - 0  
mail: info@kimaE.de  
web: www.kimaE.de  
GERMANY 52428 Juelich



**Kima Automatisierung GmbH**

phone: +49 2565 / 9346 -33  
mail: office@kima.de  
web: www.kima.de  
GERMANY 48599 Gronau-Epe

demand of a cement plant that is accounted for by cross-sectional technologies was therefore examined as part of this study. The cross-sectional technologies include compressed air generation, the lighting in the plant, air conditioning and refrigerating systems in the plant (e.g. air conditioning for the control room) and the electricity consumption in the plant's administrative offices (lighting, computers, electrical heating, etc.). The numerous drives are allocated to the respective process stages and their energy demands often cannot be measured separately. In a cement mill, for example, the mill drive itself is normally measured separately. However, the electrical energy demand of the entire grinding plant, i.e. including separator, recirculation fan, filter, etc., is used for the evaluation.

Fig. 20 shows the percentage of the total power demand of eleven German cement plants investigated that is accounted for by the cross-sectional technologies defined above. The percentage due to the cross-sectional technologies in the plants investigated came on average to just under 8% in which there was a comparative wide spread. As a rule the generation of compressed air makes up more than 50% of the power usage for the cross-sectional technologies. The majority of compressed air systems examined were comparatively modern because the capital investment in renewing central compressed air systems pays for itself in a few years. The situation is more difficult with a decentralized compressed air supply as a large number of fairly small systems have to be replaced.

The potential that could be exploited in the period up to 2030 by a 20% reduction in the power used for the cross-sectional technologies was examined during the calculations for the forecast. The right-hand bar in Fig. 19 shows that the effect of this measure is quite small. In total, an electrical energy demand of 113.1 kWh/t cement (407 MJ/t) can be achieved by incorporating the influencing variables that are simulated above. The thermal energy demand remains unaffected by this. This result shows that the savings potential by optimizing the cross-sectional technologies in energy-intensive industries tends to be insignificant.

The large drives in cement plants should not be allocated to the cross-sectional technologies. They account for a large part of the power demand. Examination of eleven cement plants in Germany has shown that the number of drives > 250 kW drive rating is between 15 and 20 in fairly small plants and up to over 50 in the larger plants. The largest drives are the main drives for the mills (cement mill, raw mill) followed by the drives for the exhaust fan and for the crushers in the quarry. Many large drives are not controlled drives as this is not necessary due to the nature of the process. This is true, for example, of the cement mill drive where the cement fineness is controlled by the mass flow and the separator setting. The same also applies to the crusher drives in the quarry. Large controlled drives include the gas fan drives and the kiln drive. Bearing in mind the large drives that are in constant operation the proportion of large drives regulated by frequency converters accounts for more than 50% with respect to the drive ratings. This shows that, even though difficult to quantify, a certain savings potential can still be achieved by installing more electricity-saving frequency converter controlling systems. However, the fact that the power demand accounts for only about 15% of the total energy demand of cement production means that this potential is also limited.

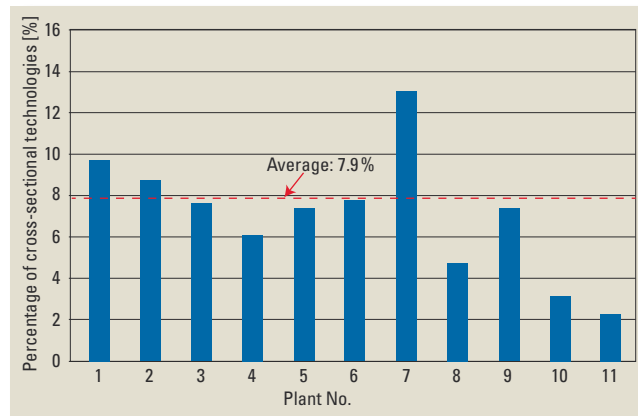


Figure 20: Percentage of the electrical energy demand of the eleven plants investigated that is due to the cross-sectional technologies

Bild 20: Anteil der Querschnittstechnologien am elektrischen Energiebedarf von elf untersuchten Werken

vom Verfahren (High-Dust- oder Low-Dust-SCR) mit einem zusätzlichen Strombedarf von 5 kWh/t Klinker zu rechnen ist. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die Absenkung des Staubgrenzwerts auf  $10 \text{ mg/m}^3$  zu einer Erhöhung des Strombedarfs um etwa 1 kWh/t Klinker führen wird, da die entsprechenden Filter umgebaut oder ersetzt werden müssen.

Unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Entwicklungen ergibt sich für das Jahr 2030 ein elektrischer Energiebedarf von 114,8 kWh/t Zement (413 MJ/t). Bild 19 (vierter Balken) zeigt die entsprechende Erhöhung des elektrischen Energiebedarfs, während der thermische Energiebedarf von diesen Maßnahmen unbeeinflusst bleibt.

## 6.5 Bedeutung der Querschnittstechnologien und Großantrieben

Die Optimierung von Querschnittstechnologien wird häufig als großes Potenzial zur langfristigen Verminderung des industriellen Energiebedarfs angesehen. Deshalb wurde im Rahmen dieser Studie untersucht, welchen Anteil Querschnittstechnologien am Strombedarf eines Zementwerks haben. Zu den Querschnittstechnologien zählen die Druckluft-erzeugung, die Beleuchtung im Werk, Klima- und Kälteanlagen im Werk (z. B. Klimatisierung des Leitstands) sowie der Stromverbrauch in Büros der Werksverwaltung (Beleuchtung, Computer, elektrische Heizung usw.). Die große Zahl von Antrieben wird den jeweiligen Prozessschritten zugeordnet und deren Energiebedarf ist häufig nicht separat messbar. So wird z. B. in einer Zementmühle häufig der Mühlenantrieb selbst separat gemessen. Zur Bewertung wird jedoch der elektrische Energiebedarf der gesamten Mahlanlage, d.h. einschließlich Sichter, Umlaufgebläse, Filter usw. herangezogen.

Bild 20 zeigt den Anteil der so definierten Querschnittstechnologien am Gesamtstrombedarf von elf untersuchten deutschen Zementwerken. Der Anteil der Querschnittstechnologien betrug in den untersuchten Werken durchschnittlich knapp 8%, wobei eine vergleichsweise große Streuung festgestellt wurde. Die Erzeugung von Druckluft macht in der Regel mehr als 50% des Stromeinsatzes für Querschnittstechnologien aus. Die meisten der untersuchten Druckluftanlagen waren auf einem vergleichsweise modernen Stand, da sich die Investition in die Erneuerung zentraler Druckluftanlagen wirtschaftlich in wenigen Jahren rechnet.

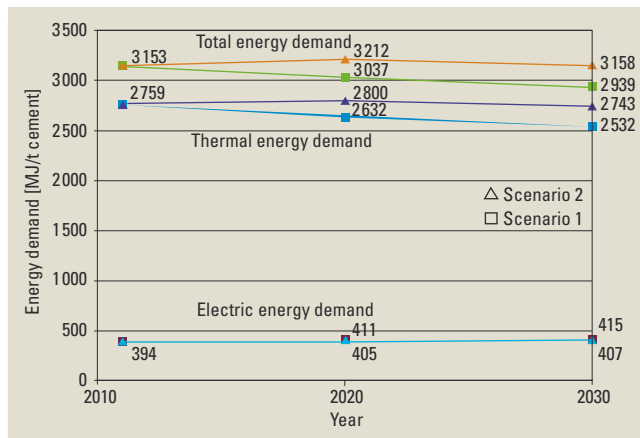


Figure 21: Predicted development of the energy demand of cement production in Germany up to 2030 for scenario 1 (basic scenario) and scenario 2 (25 % lower availability of granulated blast-furnace slag)

Bild 21: Prognostizierte Entwicklung des Energiebedarfs der Zementherstellung in Deutschland bis 2030 für Szenario 1 (Basis Szenario) und Szenario 2 (um 25 % geringere Verfügbarkeit von Hüttensand)

## 6.6 Overall potential

Fig. 21 combines the predicted developments described above for scenarios 1 (reference scenario) and 2 (granulated blastfurnace slag availability 25 % less than for scenario 1). Bearing in mind all the influencing variables described it can be assumed that in the basic case the total energy demand of the German cement industry (thermal and electrical) will fall from 3153 MJ/t cement in 2011 to 2939 MJ/t cement. For the case where less granulated blastfurnace slag is available as a further main cement constituent no diminution in the energy demand (3158 MJ/t cement) would be possible up to 2030 under the given assumptions. As a whole, these calculations show that the biggest lever for further reduction is lowering the clinker/cement factor, while measures that concern reducing the power demand play a secondary role. Measures for improved utilization of waste heat, e.g. for generating electricity, were not considered here as although they would lead to an overall reduction of the energy usage in the cement plant (or else in, for example, the power plant) they have no effect on the performance evaluation of sub-processes (e.g. kWh/t cement during cement grinding).

Fig. 22 also includes the calculations for estimating the maximum reduction potential (full implementation of BAT technologies through construction of new kiln and cement grinding plants) that were shown in the first part of the publication. It can be seen from the diagram that under the given assumptions (reference state scenario 1) the total energy demand could be reduced by just under 7 % in the period from 2011 to 2030 in the basic scenario, while practically no reduction could be expected if insufficient granulated blastfurnace slag is available (scenario 2). If the maximum achievable potential for clinker burning and cement grinding is included then this gives reductions of 12 % and just under 14 % respectively. This maximum case is based on the product portfolio in scenario 1 and the assumption that the majority of kiln and cement grinding plants will be built from new to the state of the art on greenfield sites. When this maximum potential is compared with the reduction in energy demand (right across all industry) of 1.3 or 1.35 % per year that is being called for by German politicians it is clear that such a reduction is not possible in the cement industry, even under extreme assumptions.

Schwieriger stellt sich dies bei dezentraler Druckluftversorgung dar, da eine größere Zahl kleinerer Anlagen ersetzt werden müsste.

Im Rahmen der Prognoserechnungen wurde untersucht, welches Potenzial im Zeitraum bis 2030 durch eine 20 %ige Verminderung des für Querschnittstechnologien eingesetzten Stroms erschließbar wäre. Der rechte Balken in Bild 19 zeigt, dass die Auswirkung dieser Maßnahme recht klein ist. Insgesamt lässt sich damit unter Einbeziehung der zuvor simulierten Einflussgrößen ein elektrischer Energiebedarf von 113,1 kWh/t Zement (407 MJ/t) erreichen. Der thermische Energiebedarf bleibt hiervon unberührt. Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass das Einsparpotenzial durch Optimierung von Querschnittstechnologien in energieintensiven Branchen eher unbedeutend ist.

Die großen Antriebe sind in Zementwerken nicht den Querschnittstechnologien zuzurechnen. Sie machen einen Großteil des Strombedarfs aus. Die Untersuchung von elf Zementwerken in Deutschland zeigt, dass die Zahl der Antriebe > 250 kW Antriebsleistung zwischen 15 bis 20 bei kleineren Werken sowie bis über 50 in den größeren Werken beträgt. Die größten Antriebe sind die Hauptantriebe der Mühlen (Zementmühle, Rohmühle) gefolgt von den Antrieben der Abgasgebläse und dem des Brechers im Steinbruch. Viele Großantriebe werden nicht geregelt betrieben, da dies prozessbedingt nicht erforderlich ist. Dies gilt z. B. für den Zementmühlenantrieb, wobei die Zementfeinheit über den Massendurchfluss und die Sichtereinstellung geregelt wird. Dasselbe gilt auch für Brecherantriebe im Steinbruch. Geregelt sind z. B. die Antriebe der Gasgebläse sowie der Ofenantrieb. Unter Berücksichtigung der konstant betriebenen Großantriebe betrug der Anteil der FU(Frequenzumrichter)-geregelteten Großantriebe mehr als 50 % bezogen auf die Antriebsleistung. Dies zeigt, wenn auch schlecht quantifizierbar, dass noch ein gewisses Einsparpotenzial durch den Einbau weiterer stromsparender FU-Regelungen besteht. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass der Strombedarf aber nur ca. 15 % des Gesamtenergiebedarfs der Zementherstellung ausmacht, ist dieses Potenzial ebenfalls begrenzt.

## 6.6 Gesamtpotenziale

Bild 21 fasst die oben beschriebenen prognostizierten Entwicklungen für die Szenarien 1 (Referenz-Szenario) und 2 (Hüttensandverfügbarkeit minus 25 % im Vergleich zu Szenario 1) zusammen. Unter Berücksichtigung aller beschriebenen Einflussgrößen ist davon auszugehen, dass der Gesamtenergiebedarf der deutschen Zementindustrie (thermisch und elektrisch) im Basisfall von 3153 MJ/t Zement im Jahr 2011 auf 2939 MJ/t Zement absinken wird. Für den Fall, dass Hüttensand als weiterer Zementhauptbestandteil in geringerem Maße verfügbar ist, wäre unter den gegebenen Annahmen keine Minderung des Energiebedarfs bis zum Jahr 2030 möglich (3158 MJ/t Zement). Insgesamt zeigen diese Rechnungen, dass der größte Hebel für eine weitere Verminderung die Absenkung des Klinker/Zement-Faktors ist. Maßnahmen, die die Verminderung des Strombedarfs betreffen, spielen dagegen eine untergeordnete Rolle. Maßnahmen zur verbesserten Abwärmennutzung, z. B. zur Verstromung, wurden hier nicht betrachtet, da sie zwar zu einer Verminderung des Energieeinsatzes im Zementwerk (oder auch darüber hinaus, z. B. im Kraftwerk) insgesamt führen, aber keine Auswirkung auf die Effizienz-Bewertung von Teilprozessen (z. B. kWh/t Zement bei der Zementmahlung) haben.

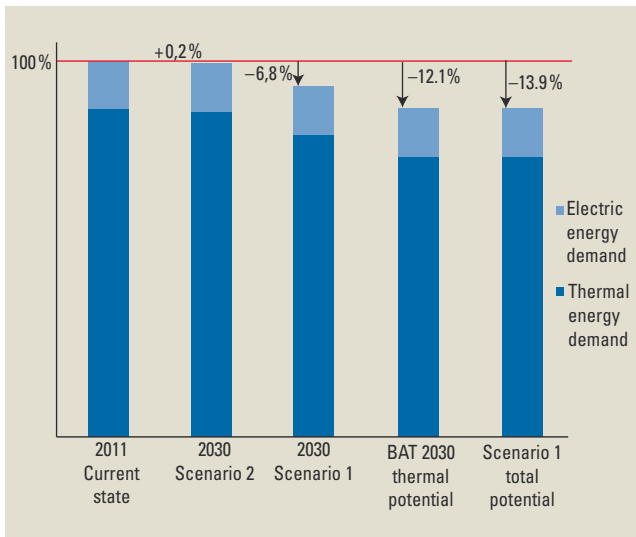


Figure 22: Potential for reducing the energy demand of cement production by 2030

Bild 22: Potenziale zur Minderung des Energiebedarfs der Zementherstellung bis 2030

## 7 Interactions between the durability of concrete and the energy demand of cement production

### 7.1 General

Most of the cements produced in Germany are used for the production of concrete. The clinker/cement factor was reduced to 73 % by 2012 through the continuous increase in the percentage of cements with several main constituents [4] and this in turn reduced the environmental effects from the production of 1 m<sup>3</sup> ready-mixed concrete/structural concrete. DIN 1045-2 requires structural concretes to have a minimum cement content of 240 to 320 kg/m<sup>3</sup> (240 to 270 kg/m<sup>3</sup> if concrete additions are included) depending on the exposure class. On this basis Life Cycle Assessment (LCA) calculations show that the global warming potential of, for example, 1 m<sup>3</sup> ready-mixed concrete/structural concrete of the C20/25 strength class has fallen by about 20 % between 1996 and 2010. During the same period the decrease in non-renewable primary energy in the form of fuels was about 37 % [1, 3]. In this context it should be noted that for the electrical energy demand in LCA considerations the evaluation is based on the primary energy used and not on the final energy.

The question as to whether a further significant reduction of the average clinker/cement factor, and therefore a reduction of the environmental impact (including the primary energy demand) of the production of cement and concrete, can be achieved in this way depends, as deduced above, on the availability of the main cement constituents like granulated blastfurnace slag and fly ash. In contrast to these main cement constituents, limestone is available in practically unlimited quantities – sometimes in varying grades – in all cement plants that produce clinker. However, there are technical limits to the possible use of a predominantly inert material like limestone as a main cement constituent in concrete, especially with respect to its durability. The application regulations for cement in different countries inside and outside Europe are given below in order to derive the essential limiting conditions. There is then a discussion about the extent to which the properties of concrete that are relevant to durability and the concrete compressive strength are

» Bild 22 bezieht zusätzlich die Berechnungen zur Maximalabschätzung (vollständige Umsetzung von BAT-Technologien durch Neubau der Ofen- und Zementmahlanlagen) ein, die im ersten Teil der Veröffentlichung dargestellt wurden. Aus dem Bild geht hervor, dass unter den getroffenen Annahmen (Referenzzustand Szenario 1) der Gesamtenergiebedarf im Zeitraum 2011 bis 2030 im Basisszenario um knapp 7 % sinken kann, während praktisch keine Verminderung zu erwarten ist, wenn Hüttensand nicht ausreichend zur Verfügung steht (Szenario 2). Bezieht man die maximal erreichbaren Potenziale beim Klinkerbrennen und Zementmahlen ein, ergibt sich eine Minderung um 12 bzw. knapp 14 %. Diesem Maximalfall liegt das Produktportfolio nach Szenario 1 sowie die Annahme, dass die meisten Ofen- und Zementmahlanlagen „auf der grünen Wiese“ entsprechend dem neuesten Stand der Technik neu gebaut werden, zugrunde. Vergleicht man dieses Maximalpotenzial mit der in Deutschland politisch geforderten Minderung des Energiebedarfs (auf Ebene der gesamten Industrie) von 1,3 bzw. 1,35 % pro Jahr, so wird deutlich, dass eine solche Minderung in der Zementindustrie auch unter extremen Annahmen nicht möglich ist.

## 7 Wechselwirkungen zwischen der Dauerhaftigkeit von Beton und dem Energiebedarf der Zementherstellung

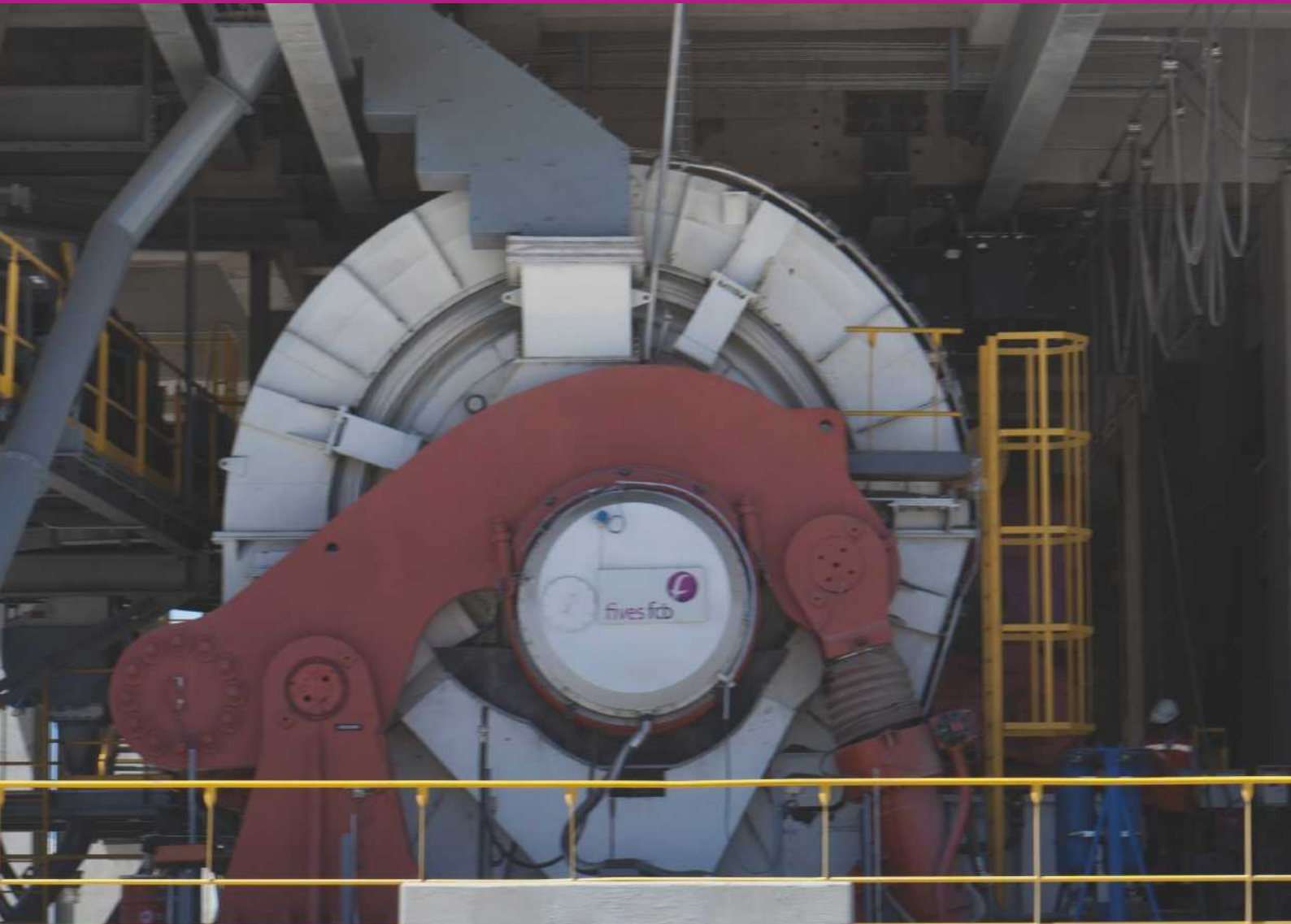
### 7.1 Allgemeines

Der überwiegende Teil der in Deutschland produzierten Zemente wird für die Herstellung von Beton verwendet. Durch die kontinuierliche Erhöhung des Anteils der Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen verringerte sich der Klinker/Zement-Faktor bis zum Jahr 2012 auf 73 % [4] und damit einhergehend reduzierten sich die Umweltwirkungen in der Herstellung von 1 m<sup>3</sup> Transportbeton/Konstruktionsbeton. Für Konstruktionsbetone besteht nach DIN 1045-2 die Forderung eines von der Expositionsklasse abhängigen Mindestzementgehalts von 240 bis 320 kg/m<sup>3</sup> (240 bis 270 kg/m<sup>3</sup> bei Anrechnung von Betonzusatzstoffen). Auf dieser Basis verringerte sich als Ergebnis ökobilanzieller Berechnungen das globale Treibhauspotenzial zum Beispiel von 1 m<sup>3</sup> Transportbeton/Konstruktionsbeton der Festigkeitsklasse C20/25 zwischen 1996 und 2010 um rd. 20 %. Im gleichen Zeitraum betrug die Abnahme nicht-erneuerbarer Primärenergie als Energieträger etwa 37 % [1, 3]. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass für den elektrischen Energiebedarf im Rahmen ökobilanzieller Betrachtungen die eingesetzte Primärenergie Bewertungsgrundlage ist, und nicht die Endenergie.

Die Frage, ob sich auf diesem Wege eine weitere deutliche Reduzierung des mittleren Klinker/Zement-Faktors und damit eine Verringerung der Umweltwirkungen (einschließlich des Primärenergiebedarfs) der Herstellung von Zement und Beton realisieren lässt, hängt wie oben hergeleitet einerseits von der Verfügbarkeit von Zementhauptbestandteilen wie Hüttensand und Flugasche ab. Im Vergleich zu diesen Zementhauptbestandteilen ist Kalkstein in allen Zementwerken mit Klinkerproduktion praktisch unbegrenzt – in z.T. unterschiedlicher Qualität – verfügbar. Allerdings ergeben sich technische Grenzen der Einsatzmöglichkeiten eines überwiegend inertem Materials wie Kalkstein als Zementhauptbestandteil im Beton insbesondere im Hinblick auf seine Dauerhaftigkeit. Zur Ableitung der maßgeblichen Randbedingungen werden nachfolgend die Anwendungsregeln von Zement in verschiedenen europäischen und außereuropäischen Ländern dargestellt und die Frage diskutiert, inwie-

## What about your grinding technology?

→ Horomill<sup>®</sup>, a new design to optimize your cement grinding plant



Thanks to its process expertise, Fives FCB provides innovative and reliable solutions such as the Horomill<sup>®</sup> grinding mill, which benefits from 20 years of experience.

Recently, Fives FCB has implemented significant technical development in order to enhance the grinding plants' production capacity and optimize the operation & maintenance costs.

The Horomill<sup>®</sup> technology is a significant breakthrough in the grinding process

→ [Read more from pages 76 to 81](#)



Table 4: Comparison of the application regulations for cements in the national appendices to the European concrete standard EN 206-1 using the example of a concrete for exposure class XF1 [6]

Tabelle 4: Vergleich der Anwendungsregeln für Zemente im Rahmen nationaler Anhänge zur europäischen Betonnorm EN 206-1 am Beispiel eines Betons für die Expositionsklasse XF1 [6]

Country	Max. (w/c) <sub>eq</sub>	Min. c in kg/m <sup>3</sup>	CEM I	CEM II						CEM III		CEM IV		CEM V	
				S		LL		M		A	B	A	B	A	B
				A	B	A	B	A	B						
Austria	0.55	300	x	x	x				(x)	x	(x)				
Belgium	0.55	300	x	x	x	x	x	x	x	x	x			(x)	
Denmark	0.55	150	(x)			(x)									
Finland	0.60	270	x	x	x	x		x		x	x				
Germany	0.60	280	x	x	x	x	○	(x)	(x)	x	x	○	(x)	(x)	(x)
Ireland	0.60	300	x			x									
Italy	0.50	320	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
The Netherlands	0.55	300	x	x	x	(x)	(x)	(x)	(x)	x	x	(x)	(x)	(x)	(x)
Norway	0.60	250	x	x		x									
Great Britain	0.60	280	x	x	x	x				x	x	(x)	(x)		

x Permitted

(x) With restrictions

Not mentioned

○ Not permitted

related and therefore ultimately also limit the energy-saving potential of reducing the clinker/cement factor.

weit dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften von Beton und seine Druckfestigkeit zusammenhängen und damit letztlich auch das Energieeinsparpotenzial über eine Verminderung des Klinker/Zement-Faktors begrenzen.

## 7.2 Application regulations for cement

### 7.2.1 Comparison of European countries

The application regulations for cement are based on the extensive practical experience in the various countries where the cements are used successfully with their respective concrete compositions, concrete cover and curing under the corresponding climatic conditions in accordance with the building traditions and safety requirements.

Transfer of the application regulations of one country to the conditions in another country is not permissible without further checking of the durability properties of the concrete. This can be demonstrated vividly by comparing the application regulations for cements in different countries using the example of concretes for exterior building elements (► Table 4).

Based on the nationally available and proven raw materials used in exterior building elements Italy permits the use of a significantly wider range of cements than, for example, Germany. However, comparison of the concrete technology boundary conditions shows that the requirements for this are also different in Italy (max. w/c = 0.50) from those in Germany (max. w/c = 0.60).

In addition to the concrete technology boundary conditions the comparison also needs to take account of the practical application of the cements and possibly also of the testing proof required for classification in the appropriate material standard. This is illustrated by the following comparison of the boundary conditions for cement production and application in India compared with the conditions in Europe and Germany.

## 7.2 Anwendungsregeln von Zement

### 7.2.1 Europäische Länder im Vergleich

Die Anwendungsregeln für Zement basieren auf den umfangreichen Praxiserfahrungen der Länder, in denen die Zemente – bei jeweiliger Betonzusammensetzung, Betondeckung und Nachbehandlung sowie unter den entsprechenden klimatischen Bedingungen gemäß der Bautradition und nach dem Sicherheitsbedürfnis – erfolgreich eingesetzt wurden.

Die Übertragung der Anwendungsregeln eines Lands auf die Verhältnisse in einem anderen Land ist nicht ohne weitere Überprüfung der Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons zulässig. Anschaulich darstellen lässt sich dies im Vergleich von Anwendungsregeln für Zemente verschiedener Länder am Beispiel von Außenbauteilbetonen (► Tabelle 4).

So lässt Italien auf der Basis national verfügbarer und bewährter Rohstoffe in Außenbauteilen die Verwendung einer deutlich größeren Bandbreite von Zementen zu als z. B. Deutschland. Der Vergleich der betontechnischen Randbedingungen zeigt, dass die Voraussetzungen hierfür in Italien (max. w/z = 0,50) aber auch andere sind als in Deutschland (max. w/z = 0,60).

Neben den betontechnischen Randbedingungen sind beim Vergleich der praktischen Anwendung von Zementen ggf. auch die prüftechnischen Nachweise zur Einordnung in die entsprechende Stoffnorm zu berücksichtigen. Dies verdeutlicht der nachfolgende Vergleich der Randbedingungen der Zementherstellung und Anwendung in Indien im Vergleich zu den Verhältnissen in Europa bzw. in Deutschland.

## 7.2.2 India as an example

At the request of the CSI (Cement Sustainability Initiative) the ECRA (European Cement Research Academy) carried out a study [5] of the extent to which the properties of cements complying with the Indian cement standard (Bureau of Indian Standard, BIS) and their application are comparable with the properties of cement complying with the European standard EN 197-1 (EN) and what influence this has on the energy demand of cement production.

Table 5 shows a comparison of typical fineness values of the three main types of cement produced in India with the corresponding cements complying with EN 197-1. It can be seen from this data that in some cases the Indian cements are substantially coarser than the corresponding European cements. In particular, OPC/CEM I cements show a significant difference between 3 000 cm<sup>2</sup>/g Blaine in India and values of 3 600 cm<sup>2</sup>/g Blaine for cements of the 42,5 strength class and about 5 000 cm<sup>2</sup>/g for cements of the 52,5 strength class.

In a comparison of the strength classes it must be born in mind that the test methods laid down in the corresponding standards lead to different results:

- ▶ the strength test specified in BIS is carried out at a temperature of 27 instead of 20 °C (EN)
- ▶ the strength test specified in BIS is carried out on the basis of a standard consistency instead of a specified water/cement ratio (EN)

The two aspects mean that the same cement tested in accordance with BIS would show a higher compressive strength than if it were tested in accordance with EN 197-1 or EN 196. As a rule of thumb, supported by some published Indian articles, it can be said that an OPC of the 43 strength class complying with BIS would be comparable with the CEM I 32,5 strength class complying with EN 197-1. An OPC of the 53 strength class of good quality (as specified in BIS) would correspond to the 42,5 (N) strength class as specified in EN 197-1. It should also be mentioned that the Indian standard does not include the PSC and PPC 43 and 53 strength classes. The cements containing granulated blastfurnace slag in the higher strength classes (42,5 N) are particularly widely used in Europe and require a greater fineness.

The Indian cement standard is therefore matched to the local conditions with respect to the market, the available materials and the ambient conditions. In some cases this allows the Indian cement producers to grind their cements significantly coarser than in other regions around the world. This greatly reduces the power demand for grinding the cement. This relationship leads to the assumption that different concrete technology boundary conditions, for example a lower water/cement ratio and therefore more cement per cubic metre of concrete, will possibly be required for the cement to achieve a comparable performance in the concrete. Comparison of the Indian concrete standard IS 456:2000 with the European concrete standard EN 206-1 and the associated German application document (DIN 1045-2) shows that this is actually the case. Even though the regulations are not comparable in all details ▶ Table 6 uses a comparison of two different types of structural elements and different stress classes to illustrate the fundamental differences. Comparison of the minimum cement content per cubic metre of concrete shows higher values for the Indian standard. The maxi-

Table 5: Cement fineness (examples) [5]

Tabelle 5: Zement-Feinheit (Beispiele) [5]

Cement type BIS / EN	Strength class [MPa]	Typical Blaine fineness [cm <sup>2</sup> /g] <sup>1)</sup>	
		India	Europe
OPC / CEM I	43/42,5 53/52,5	} 3 000	3 600 4 880
PSC / CEM III	33/32,5 43/42,5	3 600 k. A. <sup>2)</sup>	3 920 4 440
PPC / CEM II/B-V (W)	33/32,5	3 400	4 470

<sup>1)</sup> From VDZ database

<sup>2)</sup> Not contained in BIS

OPC: Ordinary Portland Cement

PSC: Portland Slag Cement

PPC: Portland Pozzolana Cement

## 7.2.2 Beispiel Indien

ECRA erstellte im Auftrag der Cement Sustainability Initiative (CSI) eine Studie [5] zu der Frage, inwieweit die Eigenschaften von Zementen nach indischer Zementnorm (Bureau of Indian Standard, BIS) und ihre Anwendung mit den Eigenschaften von Zement nach europäischer Norm EN 197-1 (EN) vergleichbar sind und welchen Einfluss dies auf den Energiebedarf der Zementherstellung hat.

Table 5 zeigt den Vergleich von typischen Feinheitswerten der drei hauptsächlich in Indien produzierten Zementarten und der entsprechenden Zemente gemäß der EN 197-1. Anhand dieser Daten kann man erkennen, dass die indischen Zemente z.T. erheblich gröber sind als die entsprechenden europäischen Zemente. Besonders OPC/CEM I zeigen den deutlichen Unterschied zwischen 3 000 cm<sup>2</sup>/g nach Blaine in Indien und Werten von 3 600 cm<sup>2</sup>/g nach Blaine für Zemente der Festigkeitsklasse 42,5 bzw. rd. 5 000 cm<sup>2</sup>/g für Zemente der Festigkeitsklasse 52,5.

Beim Vergleich der Festigkeitsklassen muss berücksichtigt werden, dass die in den entsprechenden Normen festgelegten Prüfverfahren zu unterschiedlichen Ergebnissen führen:

- ▶ die Festigkeitsprüfung nach BIS wird bei einer Temperatur von 27 statt 20 °C (EN) ausgeführt
- ▶ die Festigkeitsprüfung nach BIS wird auf der Basis einer Standardkonsistenz anstelle eines festgelegten Wasserzementwertes (EN) ausgeführt.

Beide Aspekte führen dazu, dass derselbe Zement geprüft nach BIS eine höhere Druckfestigkeit zeigen würde als wenn er nach EN 197-1 bzw. EN 196 getestet würde. Als Faustregel und unterstützt durch einige veröffentlichte indische Artikel kann man sagen, dass z. B. eine Festigkeitsklasse 43 OPC nach BIS mit einer Festigkeitsklasse CEM I 32,5 nach EN 197-1 vergleichbar wäre. Eine Festigkeitsklasse 53 OPC von guter Qualität (nach BIS) könnte einer Festigkeitsklasse 42,5 (N) nach EN 197-1 entsprechen. Außerdem sollte erwähnt werden, dass die indische Norm nicht die Festigkeitsklassen 43 oder 53 PSC und PPC beinhaltet. Besonders die hüttensandhaltigen Zemente höherer Festigkeitsklassen (42,5 N) sind in Europa weit verbreitet und erfordern eine höhere Mahlfineinheit.

Die indische Zementnorm ist somit den dortigen Bedingungen in Bezug auf den Markt, die verfügbaren Materialien

Table 6: Concrete requirements (examples) – basis: [5], (amended)

Tabelle 6: Betonanforderungen (Beispiele) – Basis: [5], ergänzt

	EN 206-1 (DIN 1045-2)			IS 458: 2000		
	Minimum cement content [kg/m <sup>3</sup> ]	Maximum w/c value	Exposure class	Minimum cement content [kg/m <sup>3</sup> ]	Maximum w/c value	Required strength
Interior components	260 (240) <sup>1)</sup>	0.65 (0.75)	XC1	300 <sup>2)</sup>	0.55	low
Exterior components	300 (280) <sup>1)</sup>	0.50/0.55 (0.60)	XC4/XF1	300 <sup>2)</sup> 320 <sup>2)</sup>	0.50 0.45	moderate high

<sup>1)</sup> Average cement content in Germany according to ERMCO statistics: approx. 300 kg/m<sup>3</sup>

<sup>2)</sup> According to information from Indian experts there are essentially three types of concrete used in construction with cement contents of 330, 400 and 500 kg/m<sup>3</sup> respectively

imum w/c value in the Indian standard is also sometimes substantially lower than the European values.

### 7.3 Potential for further reduction of the clinker/cement factor

#### 7.3.1 General

Any further reduction of the average clinker/cement factor is ultimately rewarding from the point of view of application of the cement in concrete if at the same time the durability properties of the concrete can be kept at a high level during ecologically and economically efficient utilization of the Portland cement clinker. An evaluation of the results in the literature carried out at the Research Institute of the Cement Industry and the results of in-house investigations produced the relationship shown in Fig. 23 between the clinker content relative to the concrete compressive strength and the concrete compressive strength itself. The specific clinker content, relative to the concrete compressive strength, decreases with rising compressive strength.

The concrete technology reasons for this relationship are well known: the increase in the concrete compressive strength is achieved by reducing the effective water/cement ratio, optimizing the granulometry of the fines and using effective concrete admixtures. If the compressive strength range of  $40 \pm 5$  N/mm<sup>2</sup> in this diagram is analyzed with respect to composition of the main constituents used then material combinations are found with relatively low clinker contents

und die Umgebungsbedingungen angepasst. Das erlaubt es den indischen Zementherstellern im Vergleich zu anderen Weltregionen, ihre Zemente z.T. deutlich gröber zu mahlen. Hierdurch wird der Strombedarf der Zementmahlung erheblich reduziert. Der beschriebene Zusammenhang führt zu der Annahme, dass für eine vergleichbare Leistung des Zements im Beton ggf. andere betontechnische Randbedingungen, z. B. geringerer Wasserzementwert und damit mehr Zement pro Kubikmeter Beton, benötigt werden. Ein Vergleich der indischen Betonnorm IS 456: 2000 und der europäischen Betonnorm EN 206-1 bzw. des zugehörigen deutschen Anwendungsdokuments (DIN 1045-2) zeigt, dass das tatsächlich der Fall ist. Auch wenn die Regelungen nicht in allen Details vergleichbar sind, verdeutlicht Tabelle 6 im exemplarischen Vergleich für zwei unterschiedliche Arten von Bauteilen und unterschiedliche Beanspruchungsklassen die grundlegenden Unterschiede. Der Vergleich des Mindestzementgehalts pro Kubikmeter Beton zeigt höhere Werte für die indische Norm. Außerdem ist der maximale w/z-Wert in der indischen Norm verglichen mit den europäischen Werten z.T. erheblich niedriger.

### 7.3 Potenziale für eine weitere Reduzierung des Klinker/Zement-Faktors

#### 7.3.1 Allgemeines

Eine weitere Reduzierung des mittleren Klinker/Zement-Faktors ist aus Sicht der Anwendung des Zements im Beton letztlich dann zielführend, wenn bei ökologisch wie ökonomisch effizienter Verwendung des Portlandzementklinkers zur gleichen Zeit die Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons auf hohem Niveau gehalten werden können. Aus einer im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführten Auswertung von Literaturergebnissen und eigenen Untersuchungsergebnissen ging der in Bild 23 dargestellte Zusammenhang zwischen dem auf die Betondruckfestigkeit bezogenen Klinkergehalt und der Betondruckfestigkeit hervor. Der spezifische, auf das Leistungsmerkmal Betondruckfestigkeit bezogene Klinkergehalt nimmt mit steigender Druckfestigkeit ab.

Die betontechnischen Gründe für diesen Zusammenhang sind bekannt: die Erhöhung der Betondruckfestigkeit wird durch die Reduzierung des effektiven Wasserzementwerts, die Optimierung der Granulometrie der Feinstoffe und den Einsatz wirksamer Betonzusatzmittel erreicht. Analysiert man in dieser Darstellung beispielhaft den Bereich der Druckfestigkeit von  $40 \pm 5$  N/mm<sup>2</sup> im Hinblick auf die Zusammensetzung der verwendeten Hauptbestandteile, findet man unter anderem Stoffkombinationen mit relativ geringen Klinkergehalten und sehr hohen Kalksteingehalten. Wie bereits ausgeführt, liegt Kalkstein als Hauptrohstoff des Portland-

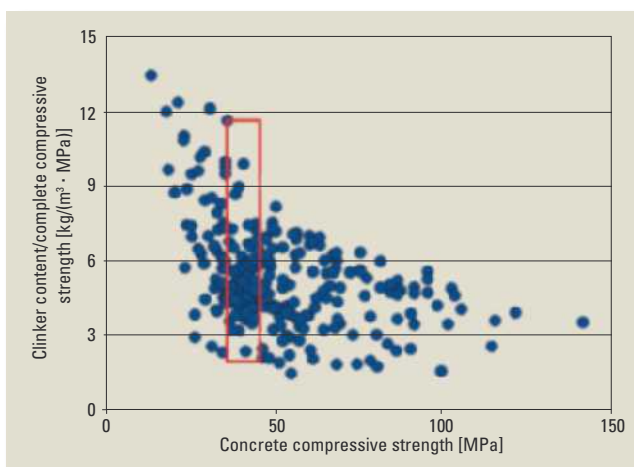


Figure 23: Relationship between the clinker content relative to the concrete compressive strength and the concrete compressive strength itself – marked area: compressive strengths of  $40 \pm 5$  N/mm<sup>2</sup> [6]

Bild 23: Zusammenhang zwischen dem auf die Betondruckfestigkeit bezogenen Klinkergehalt und der Betondruckfestigkeit – markierter Bereich: Druckfestigkeit von  $40 \pm 5$  N/mm<sup>2</sup> [6]



# Sustainable refractory solutions – brick by brick

Photo: Verlag Bau-Technik, Düsseldorf

TOPMAG® A1

ALMAG® A1

PERILEX® CF



In order to match the increasing mechanically and operationally induced challenges in today's cement production, Refratechnik provides sustainable, proven products and services.

Your trouble-shooters:

- TOPMAG® A1
- PERILEX® CF
- ALMAG® A1

**You load it, we line it!**

# REFRA<sup>TECHNIK</sup>

Refratechnik Cement GmbH  
Rudolf-Winkel-Strasse 1  
37079 Göttingen  
Germany  
Phone +49 551 69410  
Fax +49 551 6941104  
refra@refra.com  
www.refra.com

and very high limestone contents. As already mentioned, limestone is available at every cement plant site as the main raw material for Portland cement clinker, which means that there are no transport costs or transport-related emissions when it is used as a main cement constituent. However, in order to be able to utilize this option in practical construction work it is essential to consider not only the compressive strength but also other parameters, such as the uniformity of the cement properties, the robustness of the concrete during the construction work and, in particular, the durability of the concrete. Investigations by the VDZ have, for example, shown that widely varying results that in no way could be deduced from the strength development of the cements were obtained in freeze-thaw trials with cements containing 30 mass % of the same limestone as a main cement constituent due to granulometric effects [10].

### 7.3.2 Spotlight on durability

Carbonation tests, among other things, were carried out to provide information about the durability of cements containing elevated levels of limestone in concrete [9]. Mortar prisms with constant paste content were stored for 7 days under water and then for 140 days in the 20/65 climatic chamber. **►** Fig. 24 shows the carbonation in relation to the limestone content in the cement and the water/cement ratio. A mortar made with limestone cement containing 50 mass % limestone and with a water/cement ratio of 0.35 exhibited comparable carbonation to a mortar made with CEM II/B-LL cement and  $w/c = 0.50$ . This means that very demanding concrete technology measures (low-water concrete with corresponding addition levels of admixtures) would therefore be necessary when using a cement of this type.

According to [8] the production of such a concrete with a limestone content of the cement of 50 mass % and a water/cement ratio  $w/c = 0.35$  would be associated with a global warming potential of about 184 kg  $\text{CO}_2$ -equivalent. Current concrete technology practice indicates that the global warming potential of a corresponding structural concrete with comparable properties in the durability tests lies between about 232 and 265 kg  $\text{CO}_2$ -equivalent on the basis of eco-balance calculations (cf. [3, 9]). The reduction would therefore be about 25 % [9]. There would be a reduction in primary energy usage of about 2 %. The main reason for the lower improvement potential in the primary energy is the additional grinding energy that has to be used for producing these cements.

However, it will first be necessary to prove the practical usability and robustness of these optimized, and therefore demanding, mix formulations.

## 8 Role of energy demand in the sustainability evaluation of structures

### 8.1 General

Certification systems to assess the sustainability of buildings were developed worldwide to stimulate environmentally compatible and sustainable construction. The BREEAM system (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), which was introduced in Great Britain in 1990, and the LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) certification system can be cited as examples. LEED was developed by the US Green Building Council (USGBC) and is now the internationally most widespread certification system. It started in 1998 with the first version for new commercial buildings.

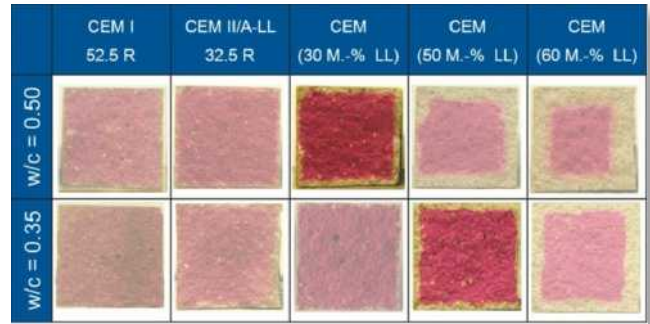


Figure 24: Carbonation of cement mortars with constant paste volume (results from Darmstadt Technical University) [11]

Bild 24: Carbonatisierung von Zementmörteln mit konstantem Leimvolumen (Ergebnisse der TU Darmstadt) [11]

zementklinkers an jedem Standort eines Zementwerks vor, sodass bei seiner Verwendung als Zementhauptbestandteil Transportkosten sowie mit dem Transport verbundene Emissionen entfallen. Um diese Option baupraktisch nutzen zu können, sind aber neben der Druckfestigkeit zwingend auch weitere Parameter wie die Gleichmäßigkeit der Zementeigenschaften, die Robustheit des Betons im Baubetrieb und besonders die Dauerhaftigkeit des Betons zu betrachten. So haben Untersuchungen des VDZ gezeigt, dass bereits bei Zementen mit 30 M.-% des gleichen Kalksteins als Zementhauptbestandteil aufgrund granulometrischer Effekte sehr unterschiedliche Ergebnisse in Frostversuchen in keiner Weise aus der Festigkeitsentwicklung der Zemente abzuleiten waren [10].

### 7.3.2 Dauerhaftigkeit im Fokus

Um Aussagen zur Dauerhaftigkeit von Zementen mit erhöhten Kalksteingehalten im Beton treffen zu können, wurden u.a. Prüfungen zur Carbonatisierung durchgeführt [9]. Mörtelprismen mit konstantem Leimgehalt wurden 7 Tage unter Wasser und anschließend 140 Tage im Klima 20/65 gelagert. Die Carbonatisierung in Abhängigkeit vom Kalksteingehalt im Zement und vom Wasserzementwert zeigt **►** Bild 24. Ein Mörtel mit dem Kalksteinzement mit 50 M.-% Kalkstein weist bei einem Wasserzementwert von 0,35 eine vergleichbare Carbonatisierung auf wie ein Mörtel mit CEM II/B-LL und  $w/z = 0,50$ . Für die Verwendung eines derartigen Zements wären also sehr anspruchsvolle betontechnologische Maßnahmen (wasserarmer Beton mit entsprechenden Zusatzmitteldosierungen) erforderlich.

Die Herstellung eines solchen Betons mit einem Kalksteingehalt von 50 M.-% im Zement und Wasserzementwert  $w/z = 0,35$  wäre gemäß [8] mit einem globalen Treibhauspotenzial von rd. 184 kg  $\text{CO}_2$ -Äq. verbunden. Das Treibhauspotenzial eines entsprechenden Konstruktionsbetons mit vergleichbaren Eigenschaften in den Dauerhaftigkeitsprüfungen nach heutiger betontechnischer Praxis liegt auf der Basis ökobilanzieller Berechnungen zwischen rd. 232 und 265 kg  $\text{CO}_2$ -Äq. (vgl. [3, 9]). Die Verminderung würde damit rd. 25 % betragen. Bzgl. des Primärenergieeinsatzes ergäbe sich eine Reduzierung von rd. 2 % [9]. Wesentlicher Grund für das geringere Verbesserungspotenzial bei der Primärenergie ist die für die Herstellung dieser Zemente zusätzlich aufzuwendende Mahlenergie.

Die Anwendbarkeit und Robustheit derartig optimierter und damit anspruchsvoller Rezepturen in der Praxis muss jedoch zunächst nachgewiesen werden.

Systems for integrated consideration and evaluation of the sustainability aspects of buildings, in which ecological, economic, social and technical criteria are taken into consideration on an equal basis, were developed in Germany in a two-year period of cooperation between the BMVBS (Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development) and the DGNB (German Association for Sustainable Building). These systems were introduced in 2009 and go beyond the simple assessment of the ecology.

## 8.2 Effect of the construction products on evaluation of the building

Standards were developed at the European level with which the producers of construction products can provide environmental information about their products so that this can be used for sustainability assessment of buildings (Environmental Product Declarations, EPDs). An Environmental Product Declaration for an average German cement [2] was published in March 2012 and is available at, among other places, the VDZ website.

The VDZ used the example of a notional five-storey office building with reinforced concrete structural framework to investigate the influence of the environmental impact (including the primary energy demand) of cement production on the result of a sustainability assessment in the DGNB system [7]. The sequence of influencing factors from the construction product EPD to the building certificate is shown in Fig. 25.

The influence of the environmental effects of cement production on the LCA (Life Cycle Assessment, a method to assess environmental impacts) for concrete for the various indicators lies between about 90 % (GWP, global warming potential) and about 70 % (AP, acidification potential of soil and water). When the indicators are weighted in accordance with the rules of the DGNB system the influence amounts to about 77 %. With the aid of the cement-bound construction materials present in the structure (in the example, concrete and cement screed) it is possible to estimate the extent of the environmental effects of these construction materials in the entire building. Within the production phase of the structure the influence in the building chosen as an example

## 8 Rolle des Energiebedarfs bei der Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken

### 8.1 Allgemeines

Zur Förderung des umweltschonenden und nachhaltigen Bauens wurden in den vergangenen Jahren weltweit Zertifizierungssysteme entwickelt, mit denen die Nachhaltigkeit von Gebäuden bewertet werden soll. Als Beispiele können das BREEAM-System („Building Research Establishment Environmental Assessment Method“), welches 1990 in Großbritannien eingeführt wurde und das Zertifizierungssystem „Leadership in Energy and Environmental Design“ (LEED) genannt werden. LEED wurde vom US Green Building Council (USGBC) entwickelt und ist heute das international am weitesten verbreitete Zertifizierungssystem. Es startete im Jahr 1998 mit der ersten Version für kommerzielle Neubauten.

In Deutschland wurden in einer zweijährigen Zusammenarbeit des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) mit der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. (DGNB) Systeme zur ganzheitlichen Betrachtung und Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten für Gebäude entwickelt, in der ökologische, ökonomische, soziale und technische Kriterien gleichwertig berücksichtigt werden. Diese Systeme, die im Jahr 2009 eingeführt wurden, gehen damit über eine reine Bewertung der Ökologie hinaus.

### 8.2 Auswirkung der Bauprodukte auf die Gebäudebewertung

Auf europäischer Ebene wurden Normen entwickelt, nach denen Bauprodukthersteller Umweltinformationen zu ihren Produkten zur Verfügung stellen können, um diese für eine Nachhaltigkeitsbewertung auf Gebäudeebene heranzuziehen (Umweltproduktdeklarationen, EPD). Eine Umweltproduktdeklaration für einen deutschen Durchschnittszement [2] wurde im März 2012 veröffentlicht und ist u. a. über die Internetseiten des VDZ verfügbar.

Der VDZ hat am Beispiel eines fiktiven fünfstöckigen Bürogebäudes mit Stahlbetontragwerk untersucht, welchen Einfluss die Umweltlasten (einschließlich des Primärenergiebedarfs) der Zementherstellung auf das Ergebnis einer Nachhaltigkeitsbewertung im DGNB-System haben [7]. In Bild 25 ist die Einflusskette von der Bauprodukt-EPD bis zum Gebäudezertifikat dargestellt.

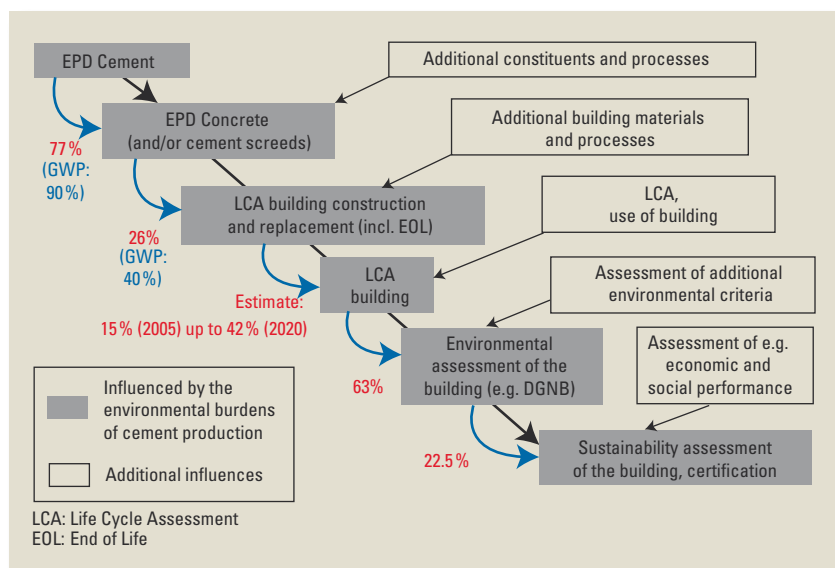


Figure 25: Effect of the product EPD for cement on the evaluation of a building [12]

Bild 25: Auswirkung der Produkt-EPD für Zement auf eine Gebäudebewertung [12]

Der Einfluss der Umweltwirkungen der Zementherstellung auf die Ökobilanz von Beton liegt für die verschiedenen Indikatoren zwischen ca. 90 % (Treibhauspotenzial GWP) und ca. 70 % (Versauerungspotenzial von Boden und Wasser AP). Werden die Indikatoren gemäß der Vorgaben des DGNB-Systems gewichtet, beträgt der Einfluss ca. 77 %. Anhand der im Bauwerk vorhandenen zementgebundenen Baustoffe (im Beispiel Beton und Zementestrich) kann der Anteil der Umweltwirkungen dieser Baustoffe am Gesamtgebäude abgeschätzt werden. Innerhalb der Herstellungsphase des Bauwerks beträgt der Einfluss im gewählten Beispielgebäude 37 %. Bezieht man nötige Instandsetzungszyklen über die Lebensdauer bzw. das End-of-life (EOL) des Bauwerks mit ein, wird der Einfluss geringer (26 %), da

is 37 %. If essential maintenance cycles over the lifetime and End of Life (EOL) of the structure are included the influence becomes less (26 %) as the lifetime of cement-bound construction materials corresponds to at least the reference study period (50 years) and in practice there are no renewals or repairs. For many other construction materials it may be necessary to include several maintenance cycles in this period.

If the proportion of the energy demand that is necessary for the provision of construction products and the construction of the building is compared with the energy demand required over the service life of the building then at present the proportion due to the construction materials comes to about 15 %. It can be assumed that this proportion will rise if buildings that are increasingly more energy-efficient are constructed in the future [14]. It has been assumed that the proportion due to the environmental impact from production and maintenance on the overall LCA of the building will be at a similar level for other indicators, such as the global warming potential.

The proportion of the parameters in the "Environmental Assessment" section of the building sustainability assessment, which can be expressed by the LCA indicators from the EPD, is about 63 % as other factors, such as the land use, are also taken into account. In the DGNB system the environmental assessment accounts for 22.5 % of the overall sustainability assessment. If the values shown are considered as a whole it is found that in the chosen example the environmental effects of cement production account for about 20 % of the total of all the environmental impact from the production of the construction products, the construction of the building and the maintenance of the building. The proportion amounts to 0.4 to 1.2 % in the certified evaluation of the entire building over its life cycle bearing in mind all the other aspects of sustainability because many of the aspects do not concern the production of the cement. Technical criteria such as fire protection or sound insulation are in some cases given a greater weighting in the DGNB system than indicators from the LCA such as the global warming potential [7, 13].

The evaluation in the DGNB system is based on a reference study period for office buildings of 50 years. Theoretically, no maintenance of the concrete structural elements was carried out for the example building as their lifetime corresponds to at least this period. The durability of the concrete is therefore of great importance for the LCA of such a building. The technical properties of the concrete, and therefore also of the cement, are correspondingly of crucial importance for the LCA of a structure over its entire life cycle. The construction materials should not be ecologically optimized at the expense of their durability and cause the concrete structural elements to need repairs within the lifetime (50 years).

In the overall assessment of sustainability in the DGNB system the influence of concrete production on the LCA remains in the single figure percentage range even with significantly improved ecological values.

From this examination it therefore emerges that average EPDs can be used for assessing the sustainability of a building in the planning phase. The error in the sustainability assessment of the construction works over its life cycle that arises from the use of average data for the environmen-

die Lebensdauer zementgebundener Baustoffe mindestens dem Betrachtungszeitraum (50 Jahre) entspricht und praktisch keine Erneuerungen oder Reparaturen anfallen. Für viele andere Bauprodukte müssen in diesem Zeitraum z.T. mehrere Instandsetzungszyklen mit einbezogen werden.

Betrachtet man den Anteil des Energiebedarfs, der für die Bereitstellung der Baustoffe und Bauprodukte nötig ist, im Vergleich zum nötigen Energiebedarf über die Nutzungsdauer des Gebäudes, so beträgt der Anteil der Baustoffe derzeit ca. 15 %. Wenn Gebäude zukünftig zunehmend energieeffizienter gebaut werden, ist davon auszugehen, dass dieser Anteil ansteigen wird [14]. Es wurde angenommen, dass für andere Indikatoren wie das Treibhauspotenzial der Anteil der Umweltlasten aus Herstellung und Instandhaltung an der Gesamtökobilanz des Gebäudes ähnlich hoch ist.

Der Anteil der Parameter im Teil „Ökologische Bewertung“ der Gebäudenachhaltigkeitsbewertung, der sich durch die Ökobilanzindikatoren aus der EPD darstellen lässt, beträgt ca. 63 %, da auch andere Faktoren wie z. B. die Flächeninanspruchnahme Berücksichtigung finden. An der Gesamtnachhaltigkeitsbewertung hat die ökologische Bewertung im DGNB-System einen Anteil von 22,5 %. Werden die dargestellten Werte zusammen betrachtet, ergibt sich, dass im betrachteten Beispiel die Umweltwirkungen der Zementherstellung einen Einfluss von ca. 20 % auf die Summe aller Umweltlasten der Herstellung der Bauprodukte, der Errichtung des Bauwerks und der Instandhaltung des Bauwerks haben. An der zertifizierten Bewertung des gesamten Gebäudes über den Lebenszyklus und unter Berücksichtigung aller anderen Aspekte der Nachhaltigkeit beträgt der Anteil 0,4 bis 1,2 %, da viele dieser Aspekte die Herstellung des Baustoffs Zement nicht betreffen. Technische Kriterien wie Brandschutz oder Schallschutz werden im DGNB-System z.T. höher bewertet als Indikatoren aus der Ökobilanzierung wie z. B. das Treibhauspotenzial [7, 13].

Der Bewertung im DGNB-System liegt ein Betrachtungszeitraum für Bürogebäude von 50 Jahren zugrunde. Rechnerisch wurde für das Beispielgebäude keine Instandsetzung der Betonbauteile angesetzt, da deren Lebensdauer mindestens dem Betrachtungszeitraum entspricht. Die Dauerhaftigkeit des Betons ist somit von erheblicher Bedeutung für die Ökobilanz eines solchen Gebäudes. Entsprechend sind für die Ökobilanz eines Bauwerks über seinen gesamten Lebenszyklus die technischen Eigenschaften des Betons und damit auch des Zements von entscheidender Bedeutung. Die ökologische Optimierung der Baustoffe sollte nicht zulasten der Dauerhaftigkeit gehen und dazu führen, dass Bauteile aus Beton innerhalb der Lebensdauer (50 Jahre) instandgesetzt werden müssten.

In der Gesamtbewertung der Nachhaltigkeit im DGNB-System bliebe der Einfluss der Zementherstellung auf die Ökobilanz auch bei deutlich verbesserten ökologischen Werten im einstelligen Prozentbereich.

Aus dieser Betrachtung folgt damit auch, dass zur Bewertung der Gebäudenachhaltigkeit in der Planungsphase Durchschnitts-EPDs herangezogen werden können. Der Fehler in der Nachhaltigkeitsbewertung des Bauwerks über seinen Lebenszyklus, der durch die Verwendung von Durchschnittsdaten für die Umweltqualität entsteht, dürfte in vielen Fällen gering sein. Sind im Einzelfall produktspezifische Angaben notwendig – z. B. zur Bewertung von Infrastrukturbauber-



**KiMA CEMCON®**



**ELEKTROTECHNIK  
MIT PERSPEKTIVEN – WELTWEIT**



**KiMA**

Tel.: +49 2565 9346-0  
[www.kima.de](http://www.kima.de)

Anna-Merian-Str. 3 - 5  
D-48599 Gronau-Epe

KiMA Gesellschaft für elektronische  
Steuerungstechnik und Konstruktion mbH

tal quality should in many cases be slight. If product-specific data are needed in an individual case – for example, for evaluating infrastructural structures made of concrete – these can also be made available for a product group (e.g. a type of cement) or an individual construction product (e.g. a certain cement).

## 9 Final comment

The examination carried out in this publication on the energy efficiency in cement production used the example of the German cement industry and its specific boundary conditions. However, it can be applied to the cement industries in other countries or world regions if the respective local boundary conditions are taken into account. They are particularly important if comparisons of energy efficiency in different regions are being carried out. The investigations have shown that it is unrewarding to consider individual process stages or sub-systems. The entire process chain should be incorporated in this type of evaluation. The main reason for this is that ultimately the cement properties are determined by the market requirements and the respective standards for concrete and cement, and the properties of the cements that are produced must conform to them.

The cement was chosen as the reference variable for considering the efficiency of cement production. The concrete that is used in the construction industry is included in a more comprehensive survey.

Process-related consideration of energy efficiency normally employs the final energy expended, while it is usual to take the primary energy as the basis in lifecycle analysis. The final energy was therefore considered in this study when evaluating the cement production process and the primary energy was used in the evaluation of concrete as a construction material. This leads to different weightings of the importance of the power demand which in turn has to be taken into account in optimization measures for reducing the power demand. The investigations have shown that under these boundary conditions the power demand for cement production plays only a secondary role in the consideration of the efficiency.

The cement industry itself can hardly exert any influence on certain influencing variables, such as the market requirements for cements or environmental protection requirements. For the German cement industry it has been found that the power demand up to 2030 will rise under the conditions of the reference assumptions that have been made. The greater fineness of the cements required by the market plays a particularly important role in this. For the use of fuel energy it was assumed that in the reference case continuous improvement through current optimization measures will lead to a reduction by about 5 % by 2030. Part of this will be offset by the expected further increase in the use of alternative fuels. On the other hand, this effect will lead to a further reduction of the fuel related CO<sub>2</sub> emissions. However, it will also save the energy demand for drying the replaced lignite outside the cement plant. An important criterion for whether this case actually occurs is the availability of alternative fuels, especially with respect to quality and biogenic fraction.

In some regions of the world, such as China and India, the equipment in the cement industry has been extended in recent years by new plants with high kiln capacities but

ken aus Beton – können diese auch für eine Produktgruppe (z. B. eine Zementart) oder ein einzelnes Bauprodukt (z. B. ein bestimmter Zement) zur Verfügung gestellt werden.

## 9 Schlussbetrachtung

Die in dieser Veröffentlichung durchgeführten Betrachtungen zur Energieeffizienz bei der Zementherstellung wurden am Beispiel der deutschen Zementindustrie und deren spezifischen Randbedingungen durchgeführt. Sie sind aber auf die Zementindustrie in anderen Ländern bzw. Weltregionen übertragbar, wenn die jeweiligen dortigen Randbedingungen berücksichtigt werden. Insbesondere sind sie von Bedeutung, wenn Vergleiche hinsichtlich der Energieeffizienz zwischen verschiedenen Regionen durchgeführt werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es nicht zielführend ist, einzelne Prozessschritte oder Teilanlagen zu betrachten. Vielmehr ist die Gesamtprozesskette in eine solche Bewertung einzubeziehen. Wesentlicher Grund hierfür ist, dass letztlich die Marktanforderungen sowie die jeweiligen Normen für Beton und Zement die Zementeigenschaften bestimmen und sich die Eigenschaften der hergestellten Zemente daran orientieren müssen.

Als Bezugsgröße für die Effizienzbetrachtung der Zementherstellung wurde der Zement gewählt. Eine weitere Betrachtung schließt den Beton ein, der in der Bauindustrie Verwendung findet.

Bei der prozessbezogenen Betrachtung der Energieeffizienz wird üblicherweise die verwendete Endenergie betrachtet. Bei der ökobilanziellen Betrachtung ist es üblich, die Primärenergie zugrunde zu legen. Deshalb wurde in dieser Studie bei der Bewertung des Zementherstellungsprozesses die Endenergie betrachtet, bei der Bewertung des Baustoffs Beton dagegen die Primärenergie. Das führt zu einer unterschiedlichen Gewichtung der Bedeutung des Strombedarfs, was wiederum bei Optimierungsmaßnahmen im Hinblick auf eine Verminderung des Strombedarfs zu berücksichtigen ist. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass unter diesen Randbedingungen der Strombedarf der Zementherstellung bei der Effizienzbetrachtung nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Bestimmte Einflussgrößen, wie die Marktanforderungen an Zemente oder Anforderungen an den Umweltschutz, können von der Zementindustrie selbst kaum beeinflusst werden. Für die deutsche Zementindustrie hat sich gezeigt, dass der Strombedarf bis zum Jahr 2030 unter den Bedingungen der getroffenen Referenzannahmen ansteigen wird. Dabei spielt vor allem die vom Markt geforderte höhere Feinheit der Zemente eine wichtige Rolle. Für den Brennstoffeneinsatz wurde angenommen, dass im Referenzfall eine kontinuierliche Verbesserung im Rahmen laufender Optimierungen zu einer Verminderung um ca. 5 % bis zum Jahr 2030 führen wird. Ein Teil hiervon wird durch den erwarteten weiteren Anstieg des Einsatzes alternativer Brennstoffe kompensiert. Dieser Effekt wird dagegen zu einer weiteren Verminderung der brennstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen führen. Allerdings wird dadurch zusätzlich der Energiebedarf für die außerhalb des Zementwerks erfolgende Trocknung der substituierten Braunkohle eingespart. Wesentliches Kriterium dafür, ob dieser Fall so eintritt, ist die Verfügbarkeit alternativer Brennstoffe, insbesondere im Hinblick auf Qualität und biogene Anteile.

Während in manchen Weltregionen, wie z. B. China oder Indien, der Anlagenpark der Zementindustrie in den vergangenen Jahren durch neue Anlagen mit hohen Ofenleistungen erweitert wurde, sind vergleichbare Investitionen in bestehende Anlagen

comparable capital investment is not economically feasible in existing plants in Europe. However, a calculation was carried out in order to find the maximum potential that could be achieved with respect to reducing the energy demand by completely re-building all the kiln and cement grinding plants in Germany on greenfield sites. Under these boundary conditions this maximum potential is just under 14 % relative to the 2011 reference year. However, the capital investment of the order of several billion euros that this would require could not be implemented cost-effectively in Germany.

The greatest reduction potential with respect to the energy demand of cement production lies in lowering the clinker/cement factor. Both the fuel energy and the power demand for the clinker that has been replaced are saved if the clinker is replaced by other main cement constituents. Varying amounts of electrical energy are also used for grinding the cement depending on the nature of the material. The granulated blastfurnace slag mainly used in Germany, is harder to grind than clinker; however, the additional quantities that can be used are limited as they depend ultimately on the steel production. Fly ash is only used in small quantities in cement in Germany so there is considerable potential, particularly with the increased use of the readily grindable limestone as a main cement constituent. The potential for reducing the energy demand is determined principally by the requisite cement properties in the concrete and the requirements for its durability.

When the extent of the examination is widened to include the building in which the concrete is used then the proportion of the energy demand that is required for providing the construction material becomes comparatively small when compared with the energy demand over the service life of the building. ◀

in Europa nicht wirtschaftlich. Dennoch wurde im Sinne einer Maximalabschätzung das Potenzial berechnet, das durch den vollständigen Neubau aller Ofen- und Zementmahlanlagen in Deutschland „auf der grünen Wiese“ im Hinblick auf die Minderung des Energiebedarfs zu erreichen wäre. Unter den gegebenen Randbedingungen beträgt dieses maximale Potenzial knapp 14 % bezogen auf das Referenzjahr 2011. Die hierfür erforderlichen Investitionen in einer Größenordnung von mehreren Milliarden Euro sind aber in Deutschland nicht wirtschaftlich umsetzbar.

Das größte Minderungspotenzial im Hinblick auf den Energiebedarf der Zementherstellung besteht in der Absenkung des Klinker/Zement-Faktors. Durch die Substitution des Klinkers durch andere Zementhauptbestandteile wird sowohl die Brennstoffenergie als auch der Strombedarf des substituierten Klinkers eingespart. Außerdem wird für die Zementmahlung, abhängig von der Art des Stoffes, mehr oder weniger elektrische Energie benötigt. Der v.a. in Deutschland eingesetzte Hüttensand ist schwerer mahlbar als Klinker; allerdings sind zusätzliche Einsatzmengen beschränkt, weil diese letztlich von der Stahlherstellung abhängen. Da Flugasche in Deutschland nur in geringen Mengen im Zement verwendet wird, besteht ein nennenswertes Potenzial vor allem in der vermehrten Verwendung des leichter mahlbaren Kalksteins als Zementhauptbestandteil. Das Potenzial zur Verminderung des Energiebedarfs ist dabei vor allem durch die erforderlichen Zementeigenschaften im Beton sowie die Anforderungen an dessen Dauerhaftigkeit bestimmt.

Erweitert man den Betrachtungshorizont bis auf das Gebäude, in dem der Beton verwendet wird, so ist der Anteil des Energiebedarfs, der für die Bereitstellung des Baustoffs nötig ist, im Vergleich zum nötigen Energiebedarf über die Nutzungsdauer des Gebäudes vergleichsweise gering. ◀

## LITERATURE / LITERATUR

- [1] VDZ, Zement-Taschenbuch. Verein Deutscher Zementwerke e.V., 50. Ausgabe, Düsseldorf 2002.
- [2] IBU-UMWELT-PRODUKTDEKLARATION „Zement“ nach ISO 14025, EPD-VDZ-2012111-D, Verein Deutscher Zementwerke e.V.
- [3] IBU-UMWELT-PRODUKTDEKLARATION „Beton“ nach ISO 14025 und EN 15804. InformationsZentrum Beton GmbH, Entwurf Mai 2013.
- [4] VDZ, Zahlen und Daten 2013. Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf, Mai 2013.
- [5] Technical Report-ECRA-120-2012: Technology papers for the Indian cement industry – looking behind the data – 12.08.2012, published on [www.wbcscement.org/index.php/technology/india-roadmap](http://www.wbcscement.org/index.php/technology/india-roadmap).
- [6] Müller, C.: Current regulations for concrete. *beton* 62 (2012) No. 3, pp. 68–75.
- [7] VDZ Activity Report 2009–2012. Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf 2012.
- [8] Neufert, W.; Palm, S.; Proske, T.; Hainer, S.; Rezvani, M.; Reuken, I.; Severins, K.; Weber, G.; Müller, C.; Graubner, C.-A.: Reduzierung der Umweltwirkung der Betonbauweise durch neuartige Zemente und daraus hergestellter Betone unter Verwendung hinreichend verfügbarer Ausgangsstoffe, vorläufiger Abschlussbericht. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2013.
- [9] Neufert, W.; Palm, S.; Proske, T.; Hainer, S.; Rezvani, M.; Müller, C.; Graubner, C.-A.: Zemente mit reduzierter Umweltwirkung bei effizientem Einsatz von Hüttensand. Forschungsantrag bei Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2013 (unveröffentlicht).
- [10] Severins, K.; Müller, C.: Influence regarding the mode of operation of cement grinding on the performance of cement in concrete. Internationale Baustofftagung *ibausil* 2012, Tagungsbericht Bd. 2., Weimar 2012, pp. 476–480.
- [11] VDZ-Mitteilungen Nr. 150. VDZ – Forschungsinstitut der Zementindustrie, Dezember 2012.
- [12] Reiners, J.: Nachhaltigkeit – Von der Idee zur praktischen Umsetzung. Vortrag VDZ Fachtagung *Beton-technik*, Düsseldorf 2011.
- [13] TB-BTe B2275-A-2/2011 Abschlussbericht „Effects of the enhanced European basic requirements for construction works on the regulation of harmonized technical specifications“ – 14.06.2011 Auftraggeber: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBSR), Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf 2011.
- [14] Angabe des Ingenieurbüros Drees und Sommer AG, 2010.
- [15] European Cement Research Academy (ECRA): Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to look ahead (CSI-ECRA-Technology Papers), 2009 published on: [www.wbcscement.org](http://www.wbcscement.org).