



## Flugasche - Verfügbarkeit, Logistik, Potential

Dr.-Ing. Heinz-Peter Backes  
Dipl.-Ing. Dirk Brandenburger  
Dr.-Ing. Matthias Meißner  
BauMineral GmbH, Herten

# 1 EINFÜHRUNG

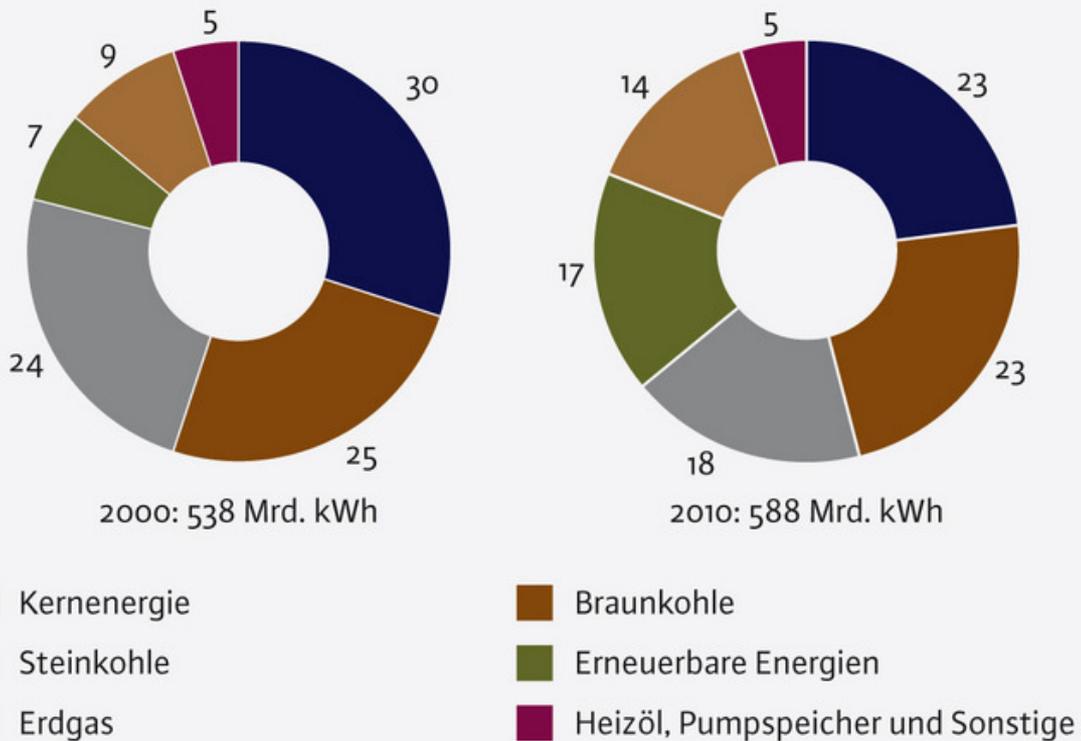
Deutschland ist nach wie vor weltweit führend bei der Verwertung von Steinkohlenflugasche, insbesondere als Betonzusatzstoff. Dies ist das Ergebnis jahrzehntelanger Forschungen zum Nachweis ihrer positiven bautechnischen Eigenschaften sowie der Verbandsarbeit zu ihrer Etablierung im bautechnischen Regelwerk. Nun rückt als Folge der Unsicherheiten in der Wirtschaft im Allgemeinen und der Energiewirtschaft im Besonderen die nachfragegerechte Verfügbarkeit in den Vordergrund.

Die Findung von Lösungen erfordert zunächst eine Betrachtung der Rahmenbedingungen. Innerhalb von nur elf Jahren wird zurzeit die dritte so genannte Energiewende in Deutschland eingeleitet. Gemeint ist damit der Umbau der gesamten Energieversorgung in Deutschland. Dieser Anlauf sollte nun verlässlich und belastbar sein. Für Bürger und Unternehmen dieses Landes ist nichts schlimmer als weitere Planungsunsicherheit.

Doch fehlende Akzeptanz von Großprojekten und überlange Planungsverfahren behindern den für die Energiewende dringend erforderlichen Bau von Netzen, Speichern und Kraftwerken.

Um den Anteil erneuerbarer Energien von zurzeit ca. 17 Prozent am Stromverbrauch in neun Jahren - wie von der Bundesregierung angestrebt - zu verdoppeln, werden, wie der Vergleich der Energieträger-Anteile für 2010 mit denjenigen für 2000 zeigt, enorme Anstrengungen erforderlich sein (Bild 1).

## Anteile der Energieträger an der Netto-Stromerzeugung in Deutschland in Prozent



Quelle: BDEW

<sup>1)</sup> vorläufig

Bild 1: Energiemix 2010 im Vergleich zu 2000

Kleinteilig strukturierte Solarstromanlagen und kommunale Kraft-Wärme-Kopplungs(KWK)-Anlagen reichen nicht aus, um den stromintensiven Industrien sowie den Haushalten in Deutschland eine zuverlässige und bezahlbare Stromversorgung zu gewährleisten.

So müssten, um die jährlich von einem Kernkraftwerk in Grundlastbetrieb gelieferte Strommenge zu ersetzen, ca. 3.000 Windräder an Land oder 1.500 Windräder im Meer gebaut und sicher betrieben werden. Wenn Flaute herrscht und die Sonne nicht scheint, nutzen selbst 44 GW - das sind mehr als ein Viertel der Gesamtleistung aller Stromerzeugungsanlagen - installierte Leistung an Windkraft- und Solarstromanlagen wenig (Bild 2). Gesichert zur Verfügung stehen bei Wind nur ca. 1/10 und bei Photovoltaik nur ca. 1/100 der installierten Leistung [1.1].

# Kapazität und Erzeugung 2010

## Gesamte Elektrizitätswirtschaft

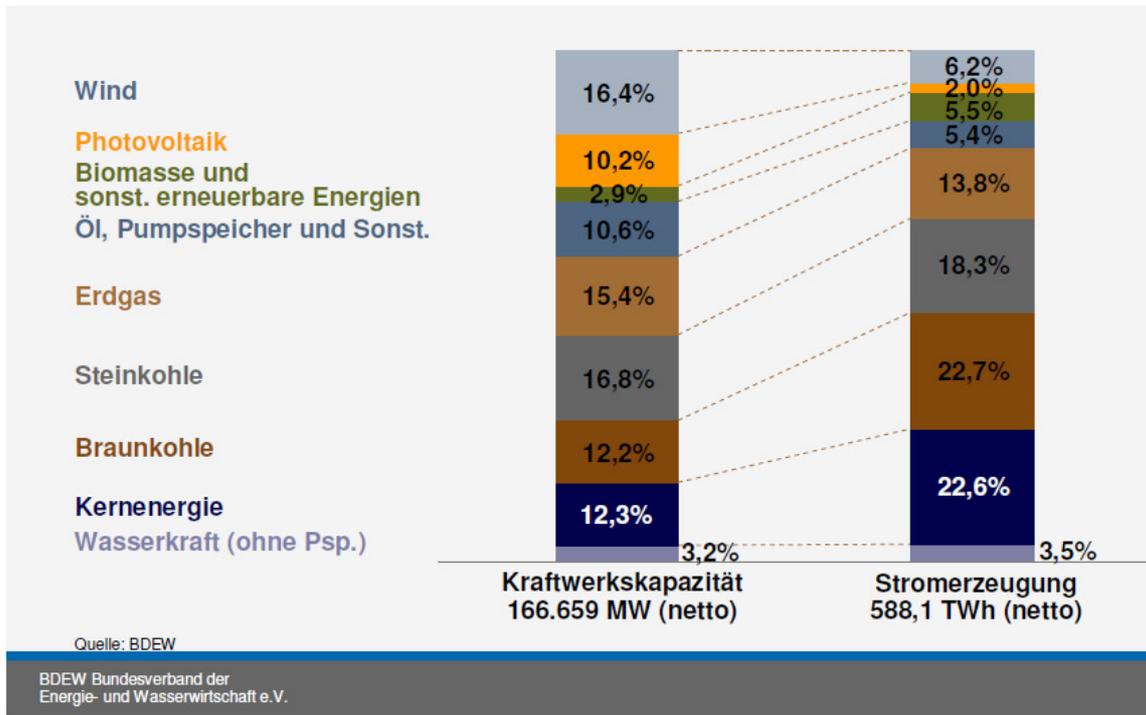


Bild 2: Anteile der Energieträger nach Kapazität und Erzeugung

Gas-, Biomasse- und Kohlekraftwerke verfügen dagegen über eine gesicherte Leistung von ca. 90 %. Das Energiekonzept "Leitlinien für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung" der Bundesregierung unterstellt ein Szenario, das zu einer deutlichen Veränderung des heutigen Energiemixes (Bild 3) führen wird. Bereits bis 2020 wäre demnach eine Halbierung des Steinkohleeinsatzes zur Stromerzeugung zu erwarten. Nur in Verbindung mit KWK und später zunehmend mit der Technologie der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (CCS) wäre der Betrieb von Steinkohlekraftwerken zukünftig möglich.

## Brutto-Stromerzeugung nach Energieträgern 2010

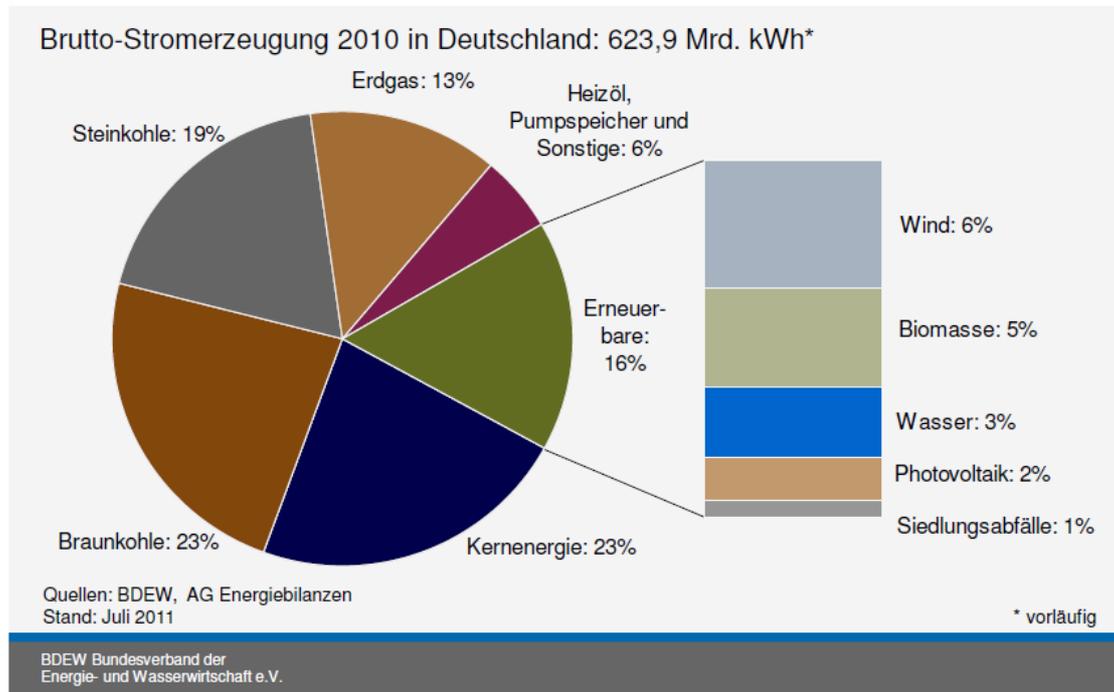


Bild 3: Anteile der Erneuerbaren am Energiemix 2010

Maßnahmen zur Gewährleistung hinreichender Kohlekraftwerkskapazitäten sind im Energiekonzept allerdings nicht enthalten. Außer der Kohleindustrie selbst haben die IG BCE, aber auch die Kohle fördernden Bundesländer und der BDI die fehlenden Kohleperspektiven des Energiekonzeptes bemängelt.

Neben der Wirtschaftlichkeit - ohne an dieser Stelle näher darauf eingehen zu wollen - kommt auch die Versorgungssicherheit im Energiekonzept zu kurz. Letzteres zeigt sich unter anderem daran, dass die deutsche Stromversorgung erstmals in der Geschichte gemäß dem unterstellten Szenario ab 2020 und dann zunehmend auf beträchtliche Importe angewiesen sein wird; im übrigen eine Annahme, die bisher nicht mit Deutschlands Nachbarn abgestimmt wurde.

Zurückkommend auf die Thematik Kohlekraftwerkskapazitäten ist festzustellen, dass sich die Fertigstellung einiger der insgesamt acht im Bau befindlichen Steinkohlekraftwerke (Tabelle 1) aufgrund massiver Qualitätsmängel vor allem bei den Kesseln, zum Teil aber auch aus juristischen Gründen erheblich verzögert. Fast

alle Genehmigungen sind beklagt. So ist der Weiterbau des zu mehr als 80 % fertig gestellten E.ON-Kraftwerkes Datteln 4 mit einer Leistung von rd. 1.100 MW nach Aufhebung des Bebauungsplanes gefährdet.

Tabelle 1: Steinkohlekraftwerksprojekte

<b>Im Bau befindliche bzw. genehmigte Kohlekraftwerke</b>		
<b>Betreiber</b>	<b>Standort</b>	<b>Kapazität in MW</b>
EnBW	Karlsruhe	912
E.ON	Datteln 4	1.055
Evonik Steag / EVN	Duisburg-Walsum	790
GDF Suez	Wilhelmshaven	800
GKM	Mannheim	911
RWE Power	Hamm	1.600
Trianel	Lünen	750
Vattenfall	Hamburg-Moorburg	1.640
<b>Summe Bruttoleistung</b>		<b>8.392</b>

Quelle: Verein der Kohleimporteure, Jahresbericht 2011

## **2 STROMERZEUGUNG AUF STEINKOHLEBASIS**

Zur zukünftigen Entwicklung der Stromerzeugung wurden umfangreiche Studien durchgeführt, die von verschiedenen Institutionen, Organisationen und Unternehmen in Auftrag gegeben wurden. Diese betrachten mögliche Szenarien der Versorgung mit Energie und somit auch mit Strom in Deutschland teilweise bis zum Jahr 2030 auf der Basis einer Vielzahl von beeinflussenden Faktoren. Die wesentlichen Einflüsse auf die zukünftig anzusetzenden Versorgungsszenarien sind: Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes, Umfang der Kernenergienutzung, Verfügbarkeit von Primärenergieträgern, Entwicklung der Weltmarktpreise für Primärenergieträger, Reduzierung des Stromverbrauchs.

Eine zielsichere Prognose für die zukünftige Entwicklung der Stromerzeugung auf Steinkohlebasis wird bei dieser Komplexität nicht einfacher. Außerdem wirken sich politische Entscheidungen innerhalb und ebenso außerhalb Deutschlands auf das innerdeutsche Versorgungsszenario aus.

Die Abwägung von Chancen und Risiken sowie eine saubere Kosten-Nutzen-Analyse führt zwangsläufig zu dem Schluss, dass es auf absehbare Zeit weiterhin Steinkohlekraftwerke geben muss, damit die die deutsche Wirtschaftskraft begründenden stromintensiven Industrien zuverlässig und bezahlbar mit Strom versorgt werden können (siehe auch Tabelle 2). Denn es muss eine Energiequelle geben, die weder von der Witterung noch von der Tageszeit abhängt.

Tabelle 2: Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern

<b>Energieträger</b>	<b>2007 TWh</b>	<b>2008 TWh</b>	<b>2009 * TWh</b>	<b>2010 * TWh</b>
Braunkohle	155,1	150,6	145,6	145,9
Kernenergie	140,5	148,8	134,9	140,6
<b>Steinkohle</b>	<b>142,0</b>	<b>124,6</b>	<b>107,9</b>	<b>117,4</b>
Erdgas	75,9	86,7	78,8	83,7
Mineralöl	9,6	9,2	9,6	8,1
Erneuerbare, darunter:	87,5	92,4	94,1	102,3
Windkraft	39,7	40,6	38,6	36,5
Wasserkraft	21,2	20,4	19,1	20,6
Biomasse	19,1	22,3	25,5	28,4
Photovoltaik	3,1	4,4	6,6	12,0
Übrige	26,6	24,7	21,5	26,1
<b>Bruttoerzeugung</b>	<b>637,2</b>	<b>637,1</b>	<b>592,4</b>	<b>623,9</b>
Stromimport	44,3	40,2	40,6	42,2
Stromexport	63,4	62,7	54,9	59,9
Stromaustausch- saldo	- 19,1	- 22,4	- 14,3	- 17,7
<b>Stromverbrauch einschließlich Netzverluste</b>	<b>618,1</b>	<b>614,6</b>	<b>578,1</b>	<b>606,2</b>

\* Vorläufige Angaben

Stand: 01.08.2011

Quellen: Statistisches Bundesamt, BDEW-PGr "Strombilanz"

Ausgehend von den beschriebenen Rahmenbedingungen folgt, dass es im gleichen Betrachtungszeitraum ein entsprechendes Angebot an Steinkohlenflugasche geben wird. Sicher war die Erwartung nicht nur einiger Flugaschenutzer überzogen, dass zukünftig bei Inbetriebnahme der leistungsstarken Großkraftwerke neuer Generation ein Überangebot an Steinkohlenflugasche herrschen werde. Bereits in den letzten fünf Jahren haben die Flugaschevermarkter teils drastische Veränderungen hinsichtlich der standortbezogenen und damit regional verfügbaren Produktionsmengen durch logistische Maßnahmen zur Gewährleistung einer bedarfsgerechten Marktbelieferung abfangen müssen. Trotz weit entwickelter und hocheffizienter logistischer Möglichkeiten ist dies nicht voll umfänglich gelungen.

Selbst die in erheblicher Größe geschaffenen Silo- und Zwischenlagerkapazitäten haben beim erzwungenen Umbau der Versorgungslogistik häufig nur unzureichend weitergeholfen.

### 3 ENTWICKLUNG DER PRODUKTION VON STEINKOHLENFLUGASCHE UND GRENZEN DER LOGISTIK

Der Wechsel der Brennstoffversorgung der deutschen Kohlekraftwerke von heimischer Steinkohle auf Importkohle als Folge politisch gewollten Auslaufens der deutschen Steinkohleförderung hat eine deutliche Veränderung im regionalen Mengenaufkommen nach sich gezogen (Tabelle 3).

Tabelle 3: Steinkohle in Deutschland

<b>Herkunft und Verbrauch in Mio. t</b>				
	<b>Förderung</b>	<b>Export</b>	<b>Import</b>	<b>Σ</b>
<b>2005</b>	28	0	36	64
<b>2010 gesamt</b>	14	0	40	54
<b>davon</b>	-----	-----	-----	-----
<b>in KW</b>	11,5	--	33,1	44,6

Quelle: Verein der Kohleimporteure, Jahresbericht 2011

Ballastreiche heimische Steinkohle aus kraftwerksnahen Bergwerken wurde gegen ballastarme Importkohle aus verschiedenen Regionen der Erde ausgetauscht (Tabelle 4). Niedrige Ballastgehalte führen bekanntlich auch zu niedrigen Aschemengen.

Tabelle 4: Kesselkohle in 2010

<b>Herkunft und Aschegehalte</b>		
<b>aus</b>	<b>in %</b>	<b>Aschegehalt</b>
Russland	30	11-15
Kolumbien	23	4-15
Polen	12	8-16
Südafrika	11	8-15
USA	9	5-15
Norwegen	3	9-12
Venezuela	1	6- 8
Australien	1	8-15
Sonstige EU	3	
Sonstige Drittländer	7	
<b>Heimische Steinkohle (Aschegehalte aktuell)</b>		
- Ballastkohle	20 %	
- Feinkohle	7-8 %	

Quelle: Verein der Kohleimporteure und eigene Daten

Die Verlagerung des Produktionsschwerpunktes von Steinkohlenflugasche von Nordrhein-Westfalen in Nordrichtung ist die Folge. Dieser Schwerpunkt wird sich weiter nach Norden und Nord-Westen verlagern, wenn die geplanten und im Bau befindlichen neuen Großkraftwerke an der deutschen und niederländischen Nordseeküste ihren Betrieb aufnehmen werden.

Es gilt zunächst diese Flugaschemengen durch einen optimierten Kraftwerksbetrieb in der erforderlichen Baustoffqualität zu produzieren und dann durch eine den veränderten Gegebenheiten angepasste Logistik bedarfsgerecht verfügbar zu halten und frei Verbrauchsstelle zu liefern.

Aufgrund des Ausbaus der erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten wird der Betrieb der neu gebauten Steinkohlekraftwerke nicht in dem Umfang möglich sein, wie es ursprünglich geplant war.

Bereits im Jahr 2010 betrug die in deutschen Steinkohlekraftwerken gefahrenen Volllaststunden mit 3.870 Stunden lediglich 44 % der theoretischen und 53 % der von Kernkraftwerken im Durchschnitt erzielten Jahresvolllaststunden, aber immerhin das 2,8fache der von Windkraft- und das 4,3fache der von Photovoltaik im Durchschnitt erzielten Jahresvolllaststunden (Bild 4).

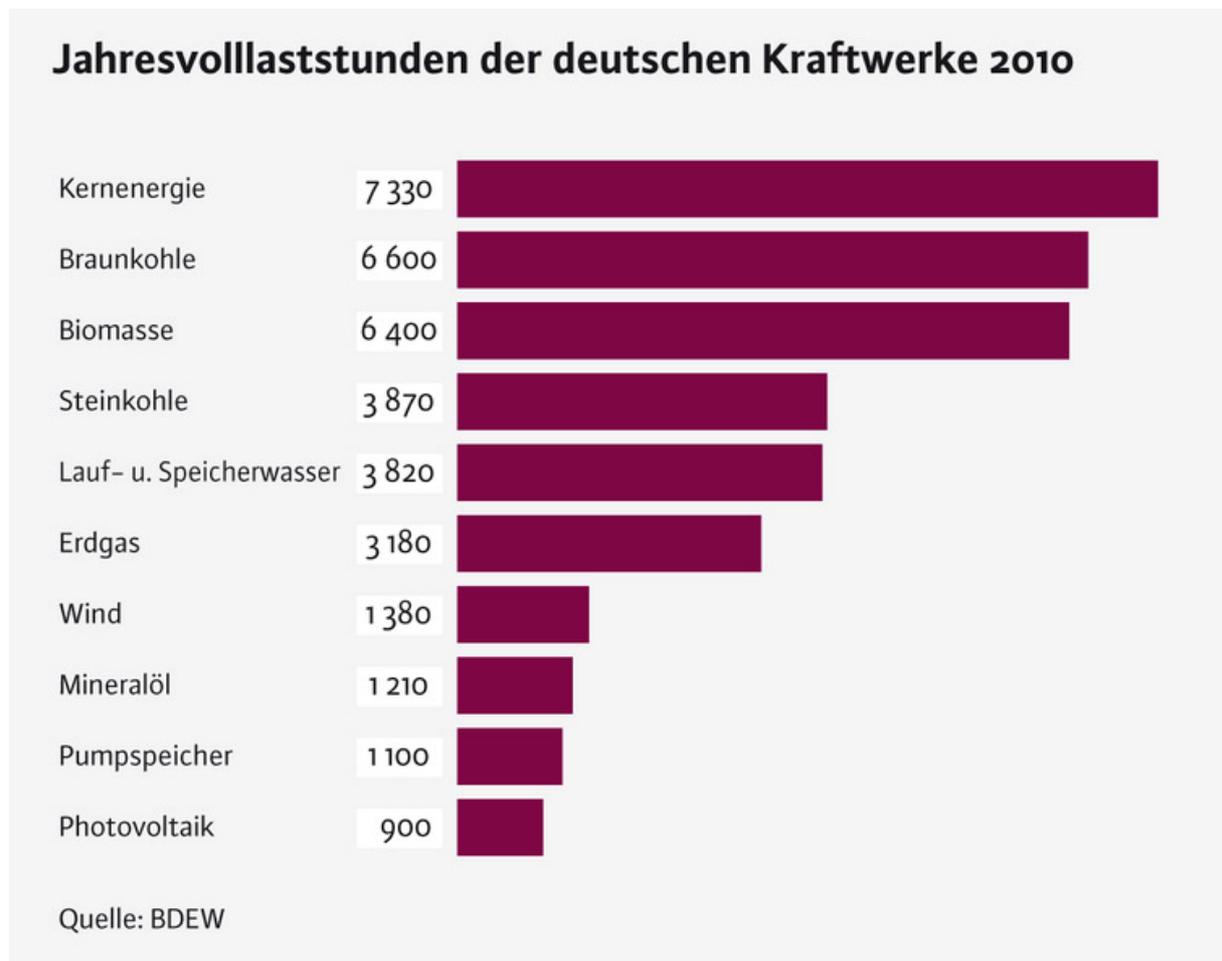


Bild 4: Vergleich der Betriebsstunden von Kraftwerken nach Energieträgern

Auch wird es an den neuen Kraftwerksstandorten im Ruhrgebiet und entlang der Nordseeküste mit einer Ausnahme nur äußerst begrenzte Silokapazitäten für die Zwischenlagerung von Steinkohlenflugasche geben.

Die Verfügbarkeit der dort produzierten Steinkohlenflugaschen für den deutschen Markt wird weiterhin dadurch eingeschränkt, dass die Mengen überwiegend nicht per Silo-LKW sondern per Schiff abtransportiert werden müssen. Es ist derzeit nicht davon auszugehen, dass einmal auf seegängige Schiffe verladene Steinkohlenflugasche wieder in Deutschland angelandet wird (Bild 5).

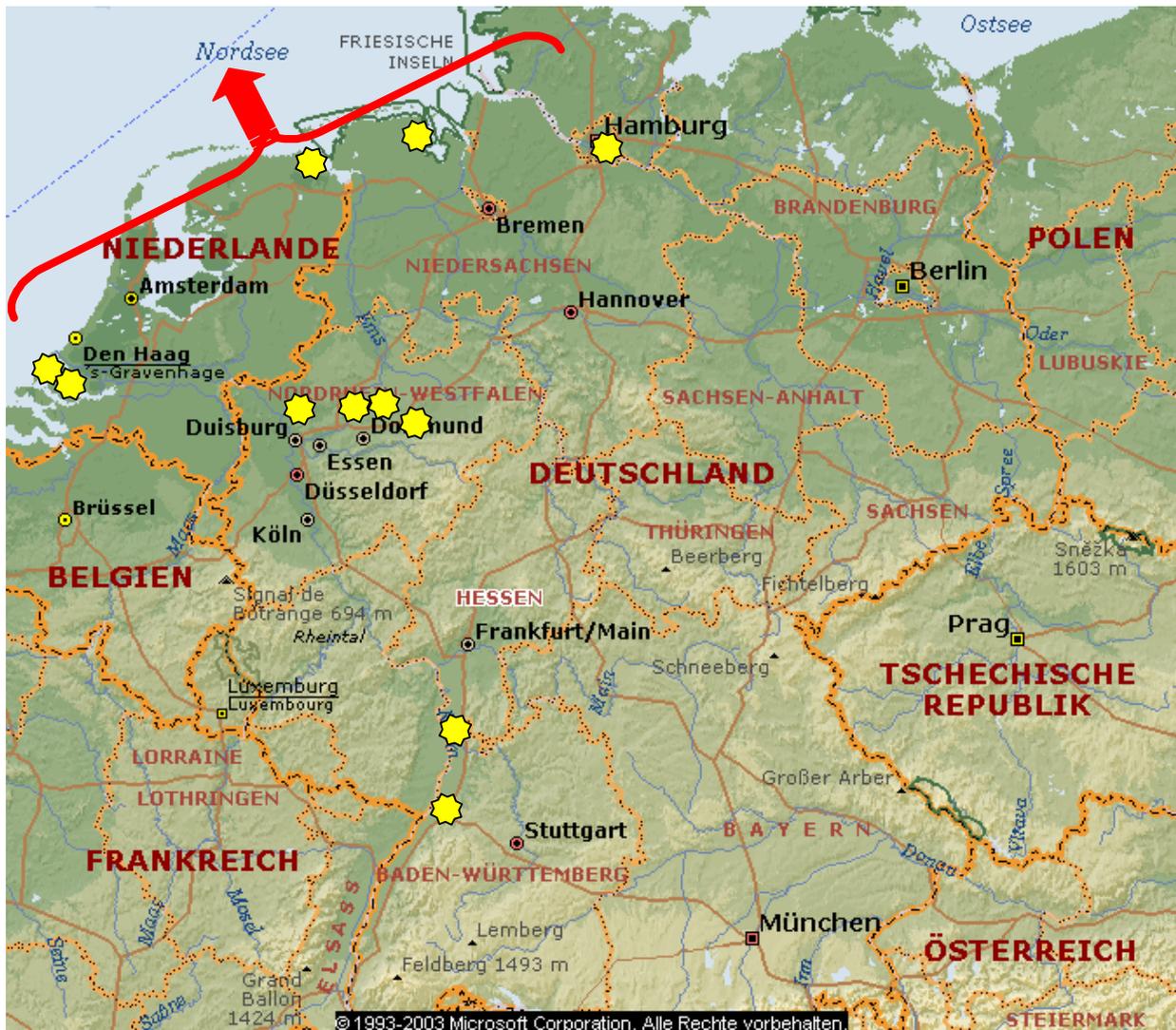


Bild 5: Neue Kraftwerksstandorte und Schiffstransportoptionen für Steinkohlenflugasche

Eine zusätzliche mit logistischen Mitteln zu lösende Aufgabe folgt aus dem Umstand, dass selbst an der Küste gelegene und per Schiff mit Kohle versorgte Neubaukraftwerke nicht über einen Zugang zum Wasserstraßennetz verfügen, der Abtransport und Lieferung von Steinkohlenflugasche auf dem Wasserweg erlauben würde.

#### 4 EINSATZ VON STEINKOHLENFLUGASCHE

Die Produktionsmenge von Transportbeton, dem bedeutendsten Einsatzbereich von Steinkohlenflugasche, ist in Deutschland tendenziell rückläufig (Bild 6).

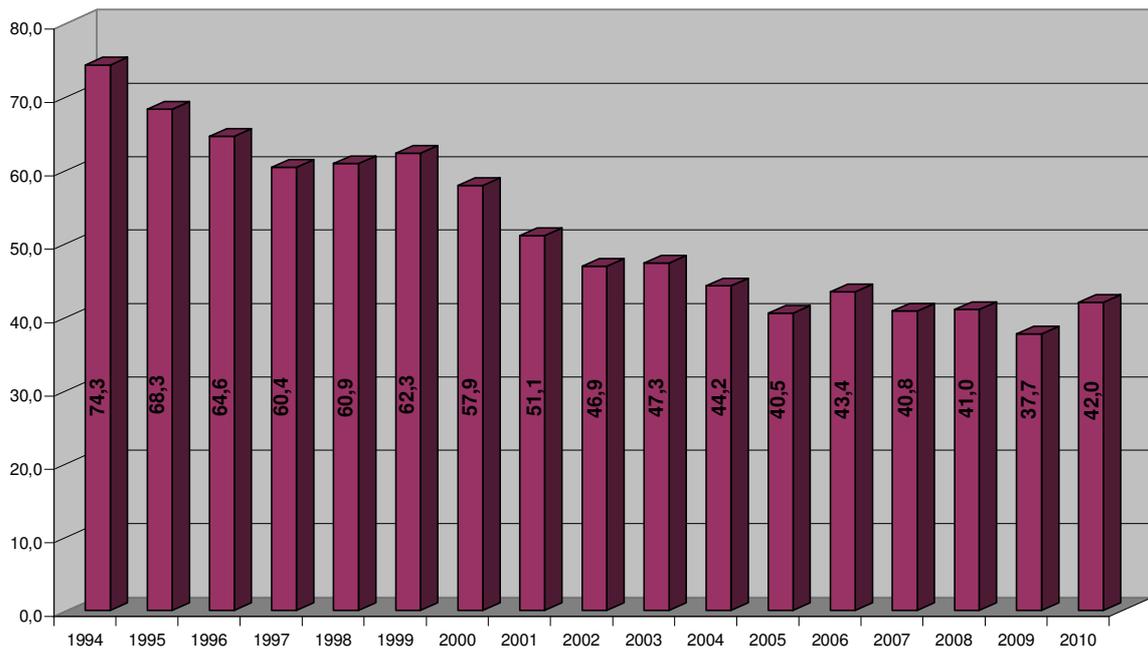


Bild 6: Produktion von Transportbeton in Deutschland, 1994 - 2010 in Mio. m<sup>3</sup> [4.1]

Verlässliche statistische Daten zur Produktion von Betonen für andere Anwendungszwecke liegen nicht vor. Jedoch ist davon auszugehen, dass sich die Entwicklung der Produktionsmengen zum Beispiel für Betonwaren nicht anders darstellen wird, da die Bautätigkeit in Deutschland generell keinen progressiven Trend aufweist.

Ungeachtet der Entwicklung der Betonproduktion ist der Bedarf an Steinkohlenflugasche nahezu konstant geblieben. Seit mehr als 40 Jahren wird Steinkohlenflugasche erfolgreich im Beton eingesetzt. Dies trug bereits lange bevor Emissionen an Treibhausgasen in den Fokus der öffentlichen Wahrnehmung gerückt wurden zu einer erheblichen Reduzierung des Klimagases CO<sub>2</sub> und zu einer Schonung von natürlichen Ressourcen bei.

Steinkohlenflugasche substituiert im Beton seit der ersten bauaufsichtlichen Zulassung als Betonzusatzstoff für EFA-Füller<sup>®</sup> RM im Jahre 1970 einen Teil des Zements. Ihr Einsatz als Hauptbestandteil von Zement hat sich aus unterschiedlichen Gründen bis heute in Deutschland nicht durchsetzen können.

Einzig limitierender Faktor für eine weitere Steigerung der Einsatzmengen ist die Produktion an Steinkohlenflugasche selbst. So ist der geradezu dramatische Rückgang bei den Einsatzmengen im Jahr 2009 nicht auf eine sinkende Nachfrage zurückzuführen (Bild 7).

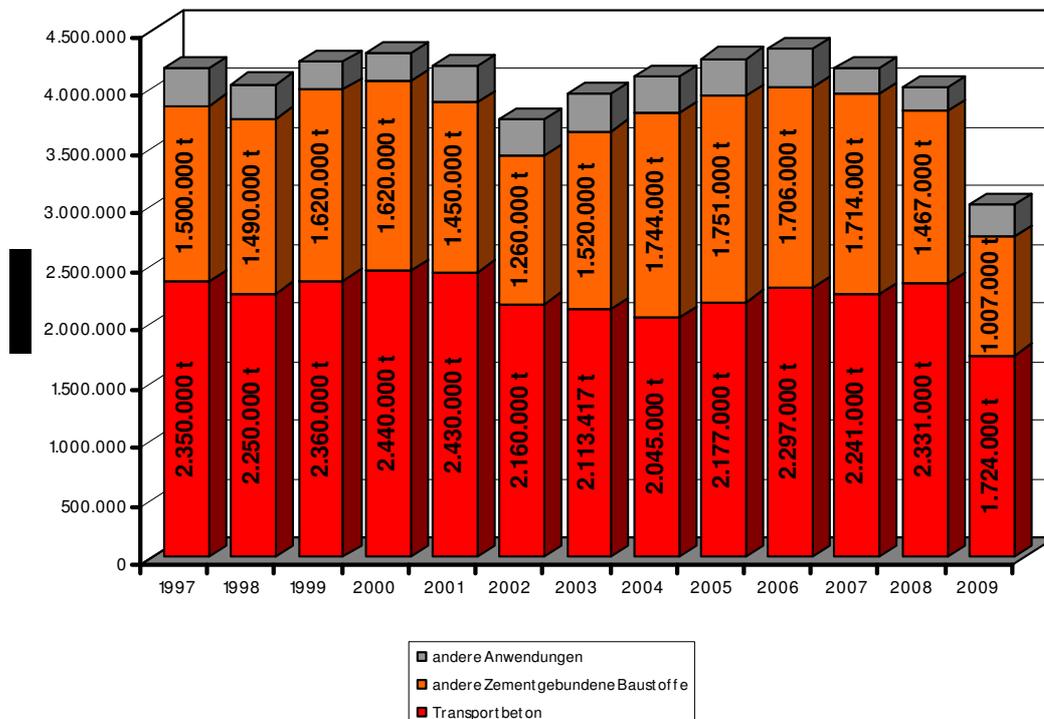


Bild 7: Steinkohlenflugasche in Deutschland nach Einsatzbereichen, 1997-2009 [4.2]

Hingegen ist in Folge der Finanz- und der Wirtschaftskrise und der damit verbundenen weltweiten Abschwächung der Konjunktur die deutsche Wirtschaft eingebrochen. Als Konsequenz daraus ist die Nachfrage nach Strom gesunken und der geringere Strombedarf hat sich überdurchschnittlich auf die Beschäftigung der deutschen Steinkohlekraftwerke ausgewirkt.

Seit der Finanz- und Wirtschaftskrise wird ein Abwärtstrend bei der Stromerzeugung auf Steinkohlebasis in Deutschland wahrgenommen, der jedoch lange vor der Finanz- und Wirtschaftskrise begann (Bild 8).

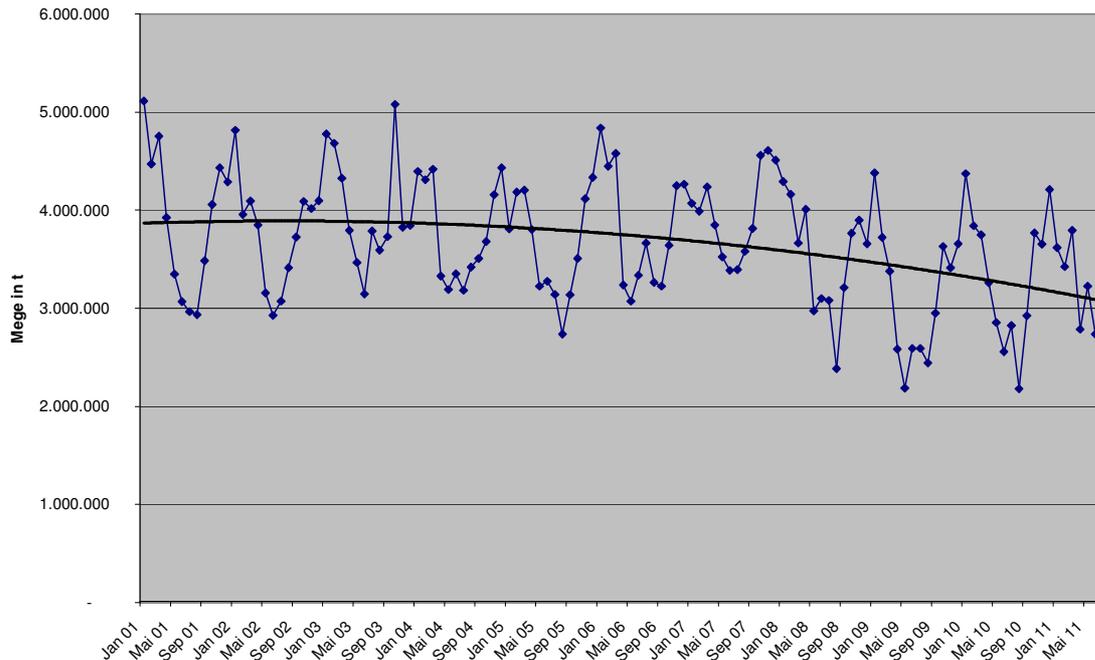


Bild 8: Monatlicher Einsatz von Steinkohle zur Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung 01/2001 bis 05/2011 [4.3]

Die Grafik zeigt, dass der Einsatz von Steinkohle schon seit 2004 rückläufig ist. Bei ansonsten gleichen Aschegehalten in der Steinkohle, was bei zunehmenden Importkohleeinsatz in den letzten Jahren als gegeben angesehen werden kann, führen geringere Verbrauchsmengen an Steinkohle zwangsläufig zu einer geringeren Produktion an Steinkohlenflugasche. Eine Trendwende ist nicht in Sicht. Auch die Abschaltung von Kernkraftwerken als Folge des Fukushima-Unglücks hat bis heute scheinbar zu keiner signifikanten Änderung der Beschäftigung deutscher Steinkohlenkraftwerke und damit des Einsatzes von Steinkohle für die Gewinnung von Elektrizität und Wärme geführt.

Umso wichtiger wird es, die produzierten Mengen an Steinkohlenflugasche möglichst vollständig dem Betonmarkt verfügbar zu machen. Es wird in der Zukunft voraussichtlich nicht machbar sein, das heutige Versorgungsniveau aufrecht zu erhalten. Die Nachfrage bleibt unverändert hoch, aber das Angebot sinkt. Die Konsequenz wird sein, dass Steinkohlenflugasche nur noch in Anwendungsbereichen eingesetzt werden kann, in denen sie einen möglichst hohen Nutzen bringt. Für andere Anwendungsbereiche wird sich der Einsatz von

Steinkohlenflugasche aus wirtschaftlichen Gründen oder Gründen der Verfügbarkeit nicht mehr lohnen.

Die veränderten Rahmenbedingungen werden eine Vielzahl von Herausforderungen für Produzenten, Lieferanten und Anwender von Steinkohlenflugasche mit sich bringen. Umso wichtiger ist es, Transparenz zu schaffen, so dass sich alle Marktteilnehmer auf die neue Situation einstellen können. Eine funktionierende Logistik, Zuverlässigkeit, sowie Planungssicherheit gewinnen für alle Beteiligten vom Kraftwerksbetreiber bis zum Anwender weiter an Bedeutung. Letztendlich kann die Vermarktung von Steinkohlenflugasche nur dann erfolgreich bleiben, wenn es gelingt, auch zukünftig die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Der Anwender muss in die Lage versetzt werden, zielsicher mit dem angebotenen Baustoff aus dem Kraftwerk zu arbeiten. Wenn zum Beispiel die Betonrezepturen für ein Bauprojekt durch Einsatz von Flugasche als Zusatzstoff optimiert werden, muss diese Flugasche auch über die Bauzeit hinweg bedarfsgerecht verfügbar sein.

## **5 ANWENDUNG VON STEINKOHLLENFLUGASCHE NACH TECHNISCHEM REGELWERK**

### **5.1 Anwendung nach dem k-Wert-Ansatz von DIN 1045-2 / DIN EN 206-1**

Die Betonnormen DIN 1045-2 / DIN EN 206-1 [5.1, 5.2] definieren verschiedene Arten und Intensitäten von lastunabhängigen, umgebungsbedingten Beanspruchungen, so genannte Expositionsklassen. Diesen Expositionsklassen werden korrespondierende Anforderungen an Betondruckfestigkeiten, Zementgehalte und Wasserzementwerte zugewiesen.

Für die meisten Expositionsklassen gelten beim Einsatz von Flugasche folgende Bedingungen:

Mindestzementgehalt:	$270 \text{ kg/m}^3$
Anrechenbarkeit der Flugasche:	$k = 0,4,$
Anrechenbare Flugaschemenge:	$f = 0,33 \cdot z.$

Dieser k-Wert-Ansatz erkennt maximal 33,3 M.-% der Flugasche im Beton bezogen auf den Zementgehalt mit einer "Wirksamkeit" von 40 % an. Die Berücksichtigung der Flugasche erfolgt über den so genannten äquivalenten Wasserzementwert  $(w/z)_{eq} = w / (z + k \cdot f)$ . Mit dieser Regelung wird stark auf der sicheren Seite liegend berücksichtigt, dass der für die puzzolanische Reaktion maßgebende Klinkergehalt bei den hier zu betrachtenden "Zementen" zwischen rd. 30 % und 94 % schwanken kann.

Dieser Ansatz vernachlässigt, dass die unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten maßgebende Dauerhaftigkeit des Betons bei Einsatz von Flugasche bei den meisten Expositionen deutlich höher ist als bei Verwendung von Zement allein. Dies gilt vor allem bei Chloridangriff (XD), Meerwasserangriff (XS) und chemischem Angriff (XA).

## **5.2 Anwendung nach dem Betonleistungsfähigkeitsprinzip (Performance Concept)**

Die EN 206-1 gestattet Abweichungen von den im Regelfall geltenden Anforderungen an die Mindestzementgehalte und die höchstzulässigen Wasserzementwerte, wenn der abweichend zusammengesetzte Beton über eine gleichwertige Leistungsfähigkeit verfügt. In diesem Fall ist Flugasche nicht mehr nach dem k-Wert-Ansatz mit einer bezogen auf den Zement 40-prozentigen Wirksamkeit zu berücksichtigen, sondern kann als gleichwertiges Bindemittel eingesetzt werden.

Ein Beispiel für die Umsetzung des Betonleistungsfähigkeitsprinzips (Performance Concept) ist das Attestbetonkonzept gemäß der niederländischen BRL 1802 [5.3].

Basis dieses Konzeptes ist der Zusammenhang zwischen Betonfestigkeit, Wasserbindemittelwert und Dauerhaftigkeit. Expositionsklassen werden ebenfalls Mindestdruckfestigkeiten zugewiesen sowie abweichend vom k-Wert-Ansatz Mindestbindemittelgehalte und Wasserbindemittelwerte.

Zugelassen (attestiert) wird immer eine konkrete Betonrezeptur. Neben der Betonzusammensetzung ist auch die Herkunft der Ausgangsstoffe im Attest festgelegt. Nachzuweisen ist einmal im Jahr die Zuordnung zu einer

Betondruckfestigkeitsklasse. Aus dieser ergeben sich dann die Expositionsklassen für die der Beton verwendet werden darf.

Die Flugasche ist im Rahmen der zulässigen Wasser-Bindemittel-Kombination gegenüber dem Zement gleichwertig. Eine Wertung der Leistungsfähigkeit der Flugasche wie beim k-Wert-Ansatz erfolgt nicht.

Neben dem niederländischen Attestbetonkonzept wird in England, Irland und Portugal auch noch ein Performance Concept umgesetzt, das es grundsätzlich ermöglicht im Beton durch Kombination von Zement und Zusatzstoffen einen Zement mit mehreren Hauptbestandteilen abzubilden (Bindemittel-Performance-Concept) [5.4].

### **5.3 Vergleich der Anwendungskonzepte**

Im Folgenden werden für ein normal beanspruchtes Außenbauteil (Beispiel 1) und ein hoch beanspruchtes Außenbauteil (Beispiel 2) jeweils zwei Betonzusammensetzungen hinsichtlich ihrer CO<sub>2</sub>-Bilanz, ihres Rohstoffverbrauchs und ihrer Kosten miteinander verglichen (Tabelle 5). Die eine Betonzusammensetzung erfüllt die Mindestanforderungen von DIN 1045-2 / DIN EN 206-1, die andere Betonzusammensetzung erfüllt die Mindestanforderungen der BRL 1802. Sowohl in Beispiel 1 als auch in Beispiel 2 erfüllen jeweils beide Betone die aus den Beanspruchungen resultierenden Anforderungen und können somit als technisch gleichwertig betrachtet werden.

Der Vergleich der Betonzusammensetzungen zeigt in beiden Beispielen, dass technisch gleichwertige Betone nach dem Performance Concept der niederländischen BRL 1802 wirtschaftlicher und umweltfreundlicher hergestellt werden können als nach DIN 1045-2 / DIN EN 206-1.

Da in Deutschland die eingesetzten Zement- und Bindemittelgehalte in der Praxis im Mittel um ca. 10 % bis 20 % über den Mindestgehalten liegen, fallen die Unterschiede bezüglich Wirtschaftlichkeit und CO<sub>2</sub>-Emissionen noch größer aus als in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Vergleich von Betonzusammensetzungen nach DIN 1045-2/ DIN EN 206-1 mit Betonzusammensetzungen nach Performance Concept

	<b>DIN 1045-2 / DIN EN 206-1</b>	<b>Performance Concept gemäß BRL 1802</b>
<b>Beispiel 1</b>	Normal beanspruchtes Außenbauteil (z.B. Sichtbetonfassade) Expositionsklassen: XC4, XF1, XA1 Mindestdruckfestigkeitsklasse: C 25/30	
Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Flugasche	270 kg/m <sup>3</sup>	200 kg/m <sup>3</sup>
Mindestflugaschegehalt bei Zementersatz	10 kg/m <sup>3</sup>	100 kg/m <sup>3</sup>
Mindestbindemittelgehalt	280 kg/m <sup>3</sup>	300 kg/m <sup>3</sup>
Max. (w/z) <sub>eq.</sub> -Wert	0,60	-
Max. W/B-Wert	0,59	0,50
Max. Wassergehalt absolut	164 l/m <sup>3</sup>	150 l/m <sup>3</sup>
Kosten für Bindemittel	100 %	ca. 88 %
CO <sub>2</sub> -Ausstoß infolge Bindemittelproduktion	100 %	ca. 75 %
<b>Beispiel 2</b>	Hoch beanspruchtes Außenbauteil (z.B. Kaimauer im Tidebereich) Expositionsklassen: XC4, XF4, XA2, XS3 Mindestdruckfestigkeitsklasse: C 35/45	
Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Flugasche	270 kg/m <sup>3</sup>	213 kg/m <sup>3</sup>
Mindestflugaschegehalt bei Zementersatz	50 kg/m <sup>3</sup>	107 kg/m <sup>3</sup>
Mindestbindemittelgehalt	320 kg/m <sup>3</sup>	320 kg/m <sup>3</sup>
Max. (w/z) <sub>eq.</sub> -Wert	0,45	-
Max. W/B-Wert	0,41	0,45
Max. Wassergehalt absolut	130,5 l/m <sup>3</sup>	144 l/m <sup>3</sup>
Kosten für Bindemittel	100 %	ca. 88 %
CO <sub>2</sub> -Ausstoß infolge Bindemittelproduktion	100 %	ca. 75 %

#### **5.4 Umsetzung des Leistungsfähigkeitsprinzips in Deutschland**

Um in Deutschland einen Beton nach Performance Concept herstellen zu dürfen ist entweder eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich.

Eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung ermöglicht die Anwendung eines Bauproduktes wie nach einer Norm. Zur Erlangung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung sind im Rahmen von Vergleichsprüfungen für eine Vielzahl von Zement-Flugaschekombinationen neben den Druckfestigkeiten auch die mit den Expositionsclassen korrespondierenden Dauerhaftigkeitseigenschaften nachzuweisen. Um eine möglichst enge Anbindung an die DIN 1045-2 zu gewährleisten, werden in der Regel zusätzlich Nachweise für einen k-Wert gefordert. Der direkte Nachweis einer bestimmten Eigenschaft oder der Kombination von Eigenschaften reicht in der Regel nicht aus und ist in den meisten Fällen aufgrund nicht festgelegter Grenzwerte auch nicht möglich. Die Reduzierung des Nachweises der Leistungsfähigkeit auf die Betondruckfestigkeit allein ist zurzeit nicht vorstellbar.

Eine Zustimmung im Einzelfall ist objektbezogen, das heißt sie gilt für ein bestimmtes Bauvorhaben oder ein Bauteil unter exakt definierten Randbedingungen. In der Regel ist hier für eine Betonzusammensetzung, die auch in Bezug auf die Herkunft ihrer Ausgangsstoffe exakt definiert ist, die Leistungsfähigkeit nachzuweisen.

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen für Betone und Zustimmungen im Einzelfall sind baupraktisch von untergeordneter Bedeutung. Der Grund dafür ist, dass der Zeit- und Kostenaufwand in der Regel technisch und wirtschaftlich in keinem Verhältnis zur Nutzbarkeit steht. Hinzu kommt, dass ein beträchtlicher zeitlicher Vorlauf benötigt wird, der bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden muss.

So werden auch die vorhandenen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für massige Bauteile im Gründungsbereich (Massenfundamente) wenig genutzt, obwohl sich gerade bei dieser Anwendung das Leistungspotential von Steinkohlenflugasche ausschöpfen lässt. Ebenso trägt diese Anwendung von Beton mit Steinkohlenflugasche dem Nachhaltigkeitsgedanken in hohem Maße Rechnung.

Nachhaltige Betone verlangen nachhaltige Ausgangsstoffe. Diese zeichnen sich aus durch

- dauerhaft technische Eignung
- Umweltfreundlichkeit z.B. aufgrund CO<sub>2</sub>-armer Herstellung
- Wirtschaftlichkeit.

Da Steinkohlenflugasche in Verbindung mit leistungsfähigen Zementen einen Festigkeitsbeitrag leistet, die Dauerhaftigkeit eines Betons erhöht und wie kein anderer Zusatzstoff CO<sub>2</sub>-neutral ist, führt ihr Einsatz als "Zementsubstitut" zwangsläufig zu einem maximal nachhaltigen Beton. Demzufolge sollte unter Berücksichtigung der zukünftig noch verfügbaren Menge an Steinkohlenflugasche ihr Einsatz stärker als bislang unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit geplant werden.

Die wichtigste Voraussetzung dafür ist, dass im technischen Regelwerk Konzepte für "nachhaltigere Betone" verankert werden, die dann bereits in der Planungs- und Ausschreibungsphase verbindlich umzusetzen sind. Dem Nachhaltigkeitsgedanken folgt auch die neue EU-Bauproduktenverordnung durch Aufnahme einer Grundanforderung "Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen". Die Bauproduktenverordnung ist in Teilen seit dem 1. April 2011 in Kraft und wird die Bauproduktenrichtlinie ab dem 1. Juli 2013 ersetzen.

Für Steinkohlenflugasche wäre es technisch sinnvoll zukünftig generell ihren Einsatz vorzugeben

- für massive Bauteile
- bei Chlorid- und Meerwasserangriff
- bei nahezu allen baupraktisch relevanten chemischen Angriffsarten
- sowie zur Vermeidung von Alkali-Kieselsäurereaktionen (AKR).

Für Betonbauteile, die insbesondere unter Dauerhaftigkeitsgesichtspunkten nur gering beansprucht werden wie Sauberkeitsschichten, Innenbauteile oder verkleidete Bauteile, könnten nachhaltigere Betone durch Verwendung von Steinkohlenflugaschen hergestellt werden, die aufgrund höherer Glühverluste für Beton nach DIN 1045-2 nicht zugelassen sind. Somit würden die Ressourcen an

hochwertigen Steinkohlenflugaschen für die Anwendungsbereiche verfügbar gehalten, die den Einsatz von Flugasche der Glühverlustkategorie A auch technisch rechtfertigen.

## **6 ZUSAMMENFASSUNG**

Die Rahmenbedingungen für den Betrieb von Steinkohlekraftwerken haben sich im Zuge der Energiewende und dem damit verbundenen Umbau der gesamten Energieversorgung signifikant verändert.

Eine zielsichere Prognose für die zukünftige Entwicklung der Stromerzeugung auf Steinkohlebasis ist aufgrund der großen Komplexität nicht möglich. Es muss allerdings auf absehbare Zeit Steinkohlekraftwerke geben, um die stromintensiven Industrien, die die deutsche Wirtschaftskraft begründen, zuverlässig und bezahlbar mit Strom zu beliefern. Somit wird es weiterhin ein Angebot an Steinkohlenflugasche geben.

Es gilt, diese Flugaschemengen durch einen optimierten Kraftwerksbetrieb in der erforderlichen Baustoffqualität zu produzieren und durch eine angepasste Logistik, die den gegenüber der Vergangenheit deutlich veränderten Gegebenheiten Rechnung tragen muss, für den Betonmarkt verfügbar zu machen.

Voraussichtlich wird das heutige Versorgungsniveau jedoch nicht zu halten sein. Somit wird Steinkohlenflugasche nur noch in den Anwendungsbereichen eingesetzt werden können, in denen sie den höchsten Nutzen bringt.

Es ist erforderlich, das bautechnische Regelwerk weiterzuentwickeln, um das Potential von Steinkohlenflugasche ausschöpfen zu können. Dabei muss insbesondere berücksichtigt werden, dass die unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten maßgebende Dauerhaftigkeit von Beton bei Einsatz von Flugasche bei den meisten Expositionen deutlich höher ist als bei Verwendung von Zement allein.

In den Niederlanden wird bereits seit einigen Jahren Steinkohlenflugasche nach dem Betonleistungsfähigkeitsprinzip (Performance Concept) eingesetzt. Es zeigt sich, dass technisch gleichwertige Betone nach dem Performance Concept der niederländischen BRL 1802 wirtschaftlicher und umweltfreundlicher hergestellt werden können als nach DIN 1045-2 / DIN EN 206-1. Damit wird das Leistungspotential von Steinkohlenflugasche ausgeschöpft und dem Nachhaltigkeitsgedanken in hohem Maße Rechnung getragen.

## **7 QUELLENANGABEN**

- [1.1] BMU 2011: Erneuerbare Energien
- [4.1] Bundesverband Transportbeton e.V.
- [4.2] Bundesverband Kraftwerksnebenprodukte e.V.
- [4.3] Erhebung über die Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung der Stromerzeugungsanlagen für die allgemeine Versorgung - Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
- [5.1] DIN 1045-2 - Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton, Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- [5.2] DIN EN 206-1 - Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Deutsche Fassung EN 296-1:2000
- [5.3] BRL 1802-1996 - Combinatie van cement en vulstof in beton
- [5.4] TG5-170: Use of k-value concept, equivalent concrete performance concept and equivalent performance of combinations concept; CEN Technical Report 26.10.2011

BauMineral GmbH, Hiberniastraße 12, 45699 Herten

Internet: [www.baumineral.de](http://www.baumineral.de)

Telefon: +49 2366 5090

Herten, 01.12.2011