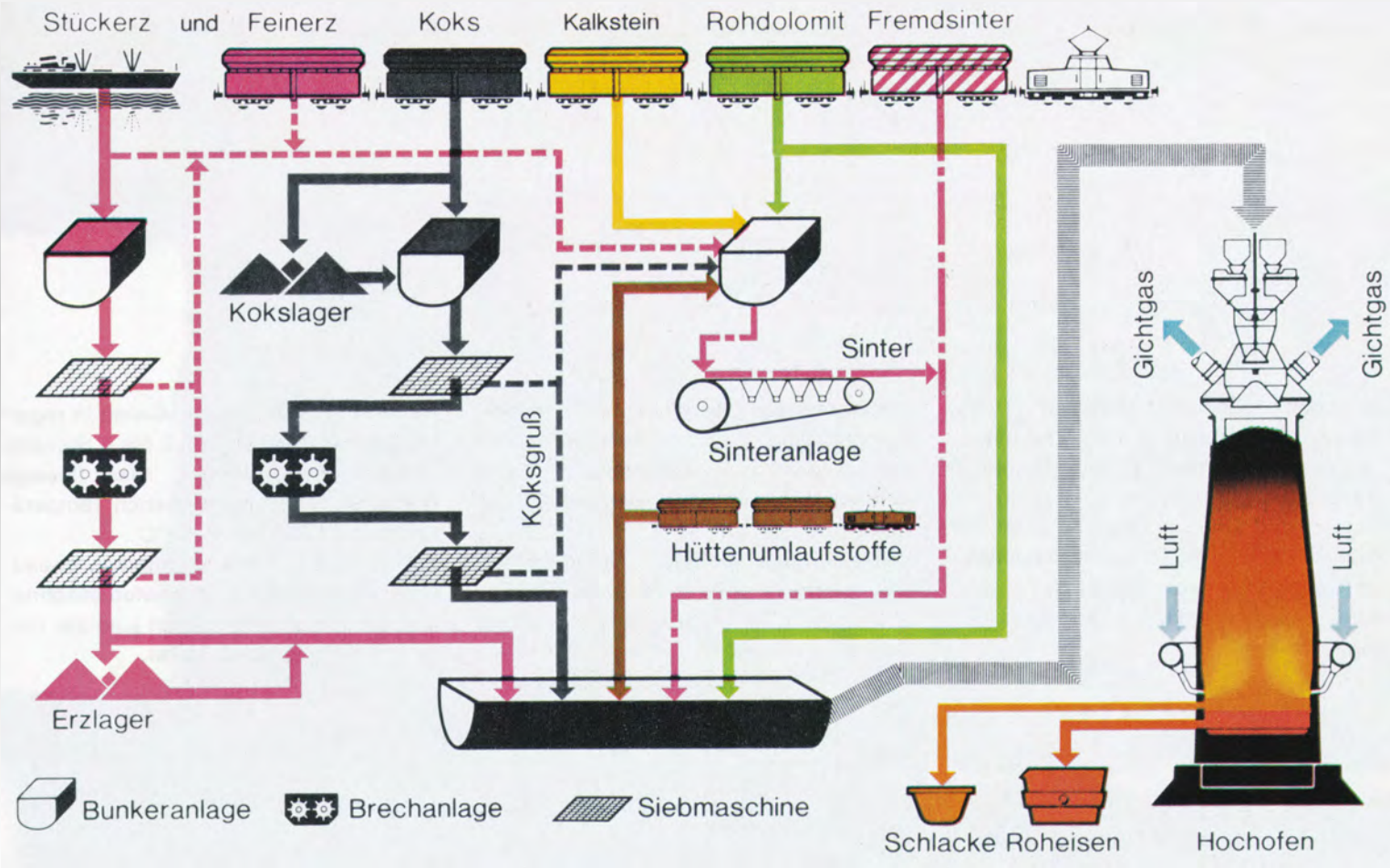


# Baustoffkreislauf Hüttensand

# Hochofen



# Gewinnung von Hochofenschlacke



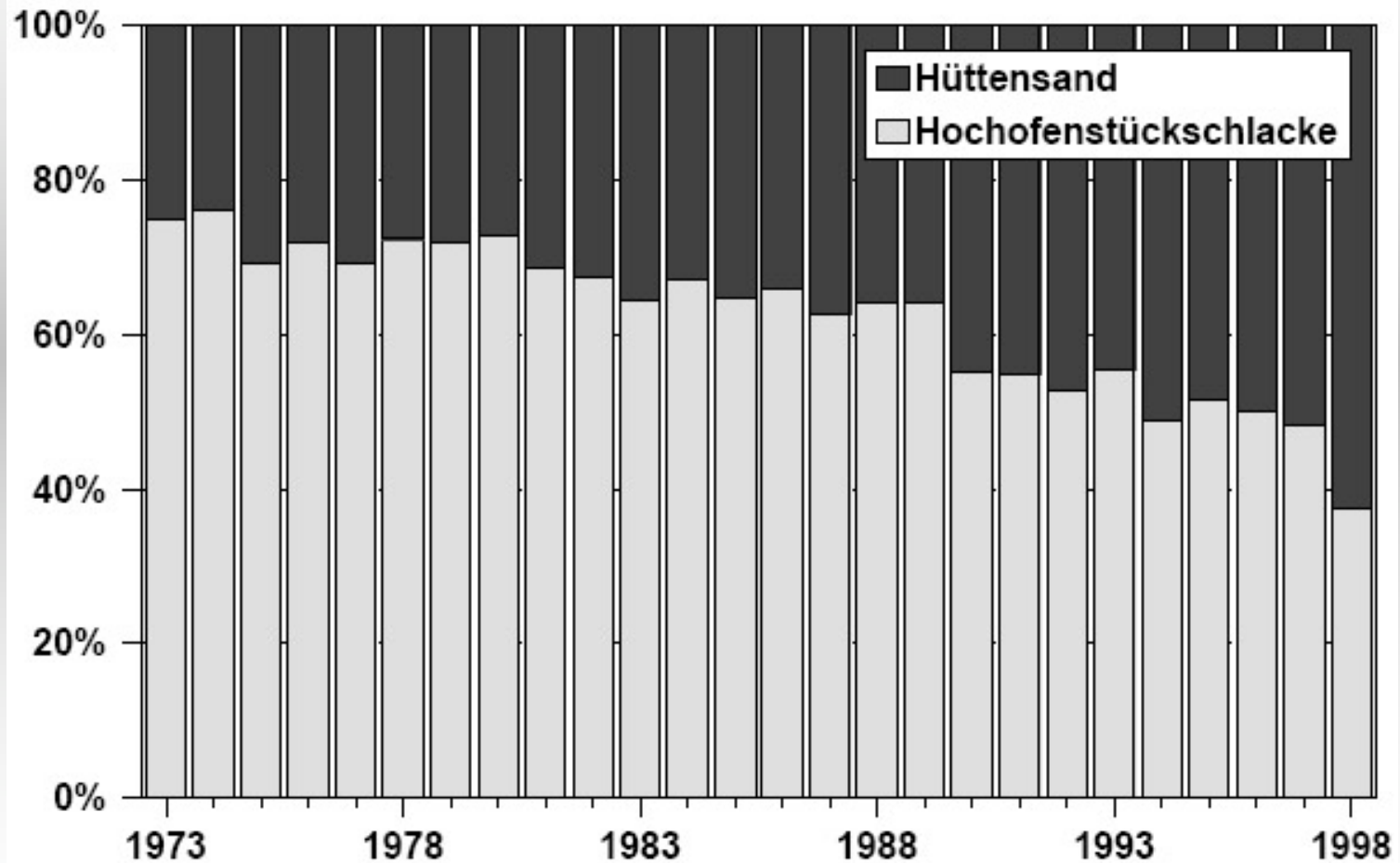
# Einsatzgebiete von Hochofenschlacke

- Hochofenstückschlacke
- Hüttenand als Bestandteil von Zement
- Hüttenand als Betonzusatzstoff

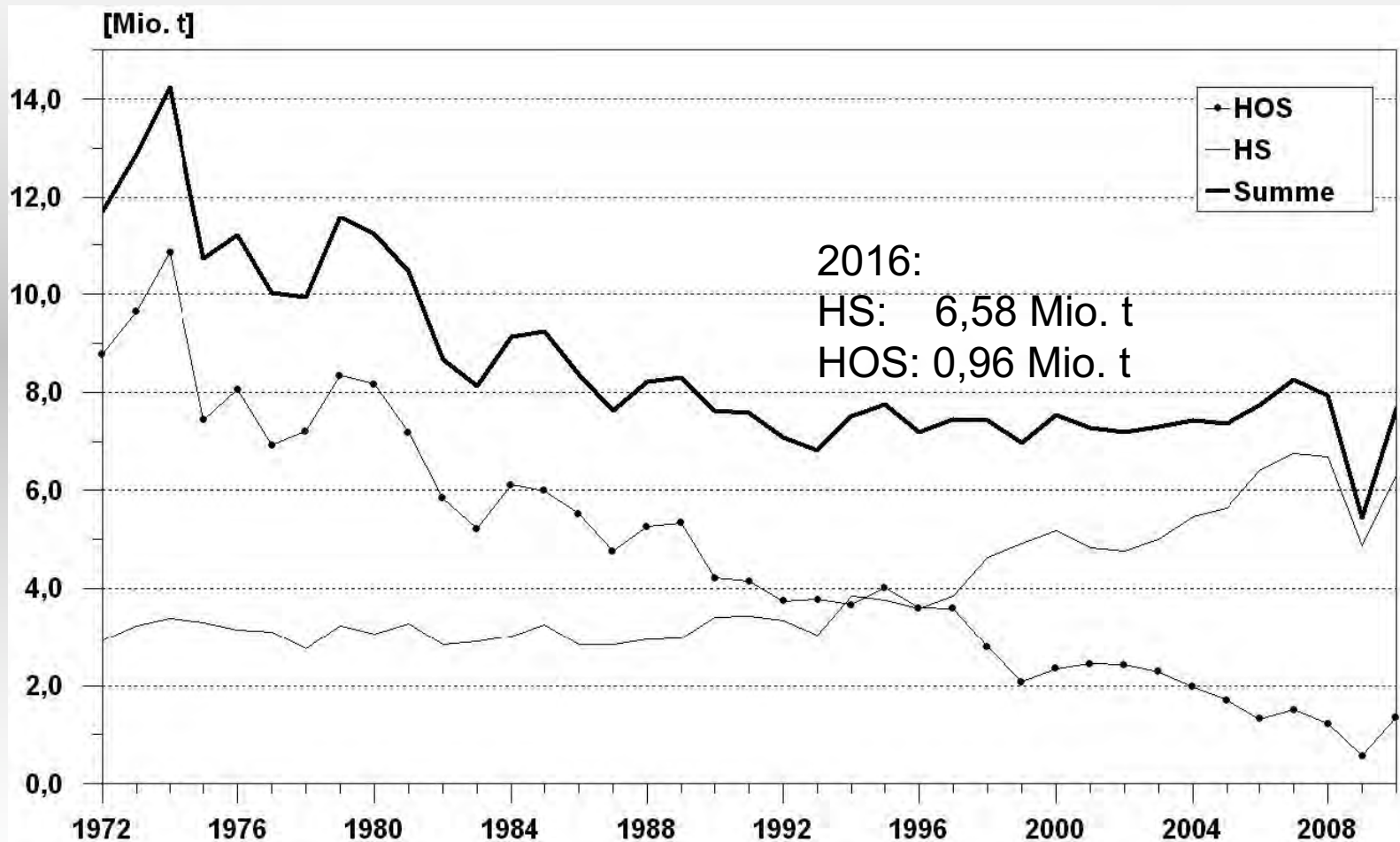
# Geschichte des Hüttenandes

- Nutzung bereits im Altertum
- 1861 Herstellung von Hüttenand (HÜS) durch Emil Langen
- 1865 Hüttenand zur Herstellung von Mauersteinen
- 1879 zur Herstellung von Zement
- 1909 Normung des Eisenportlandzements ( $\leq 30\%$  HÜS)
- 1917 des Hochofenzements ( $\leq 95\%$  HÜS)

# Einsatzgebiete HOS



# Erzeugung von Hochofenschlacke (Hochofenstückschlacke und Hüttensand)



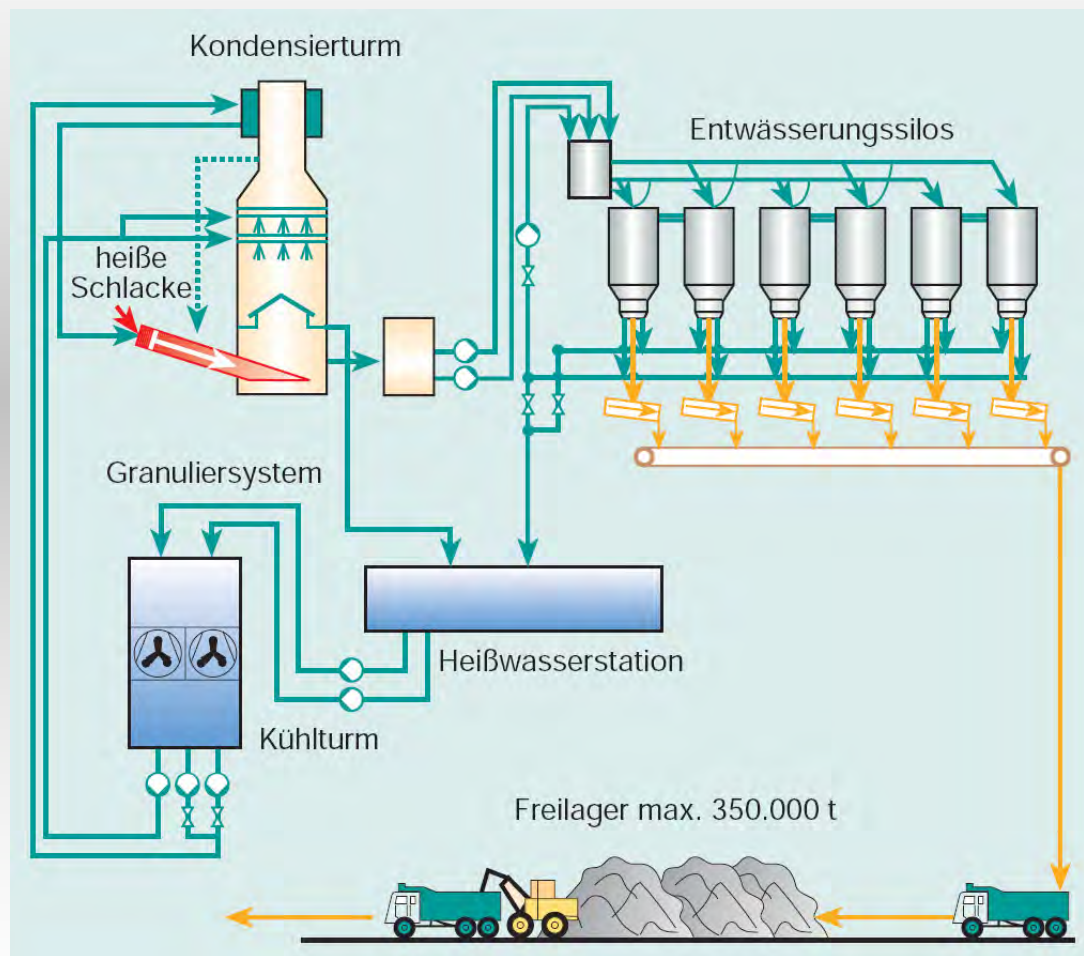


# Erzeugung von Hüttensand

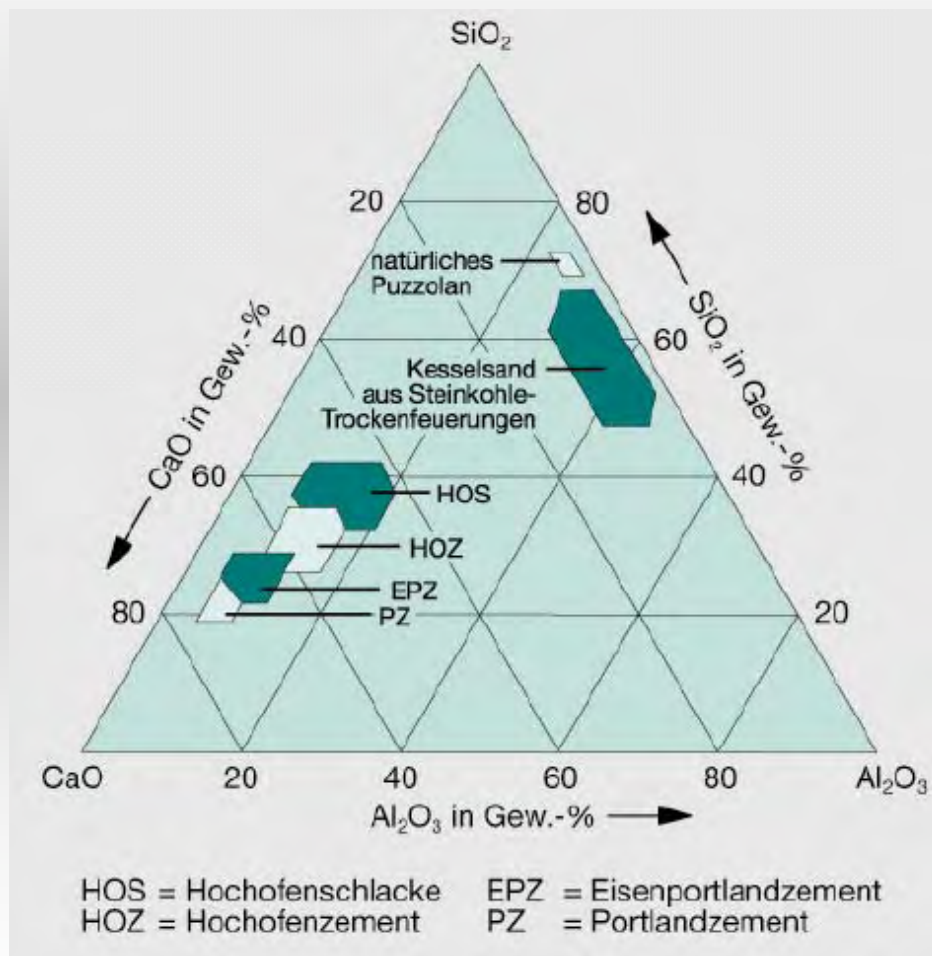




# Granulationsanlage zur Erzeugung von Hüttenand



# Hüttensand Dreistoffdiagramm



# Gemahlener Hüttensand

## EN 15167-1

(Ground granulated blast furnace slag (GGBS))

- $\geq 70$  M.-% ( $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2$ )
- $(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2) \geq 1$
- Oberfläche:  $\geq 275$  m<sup>2</sup>/kg (abZ  $\geq 450$  m<sup>2</sup>/kg)
- Aktivitätsindex (50 % GGBS, 50 % CEM I)
  - 45 % (abZ 60 %) nach 7 d,
  - 70 % (abZ 90 %) nach 28 d

# Gemahlener Hüttensand

## EN 15167-1

(Ground granulated blast furnace slag (GGBS))

- Hüttensandmehl (Kurzzeichen: h)
- Einsatz für die gleichen Zementarten erfolgen wie bei Verwendung von Flugasche
- der Gehalt ( $z + h$ ) darf die Mindestzementgehalte nicht unterschreiten
- Hüttensandmehl darf mit  $k = 0,6$  auf den äquivalenten Wasserzementwert  $w/z_{eq}$  angerechnet werden

# Gemahlener Hüttensand

## EN 15167-1

(Ground granulated blast furnace slag (GGBS))

- maximal anrechenbaren Hüttensandmengen:
  - für Zemente ohne P, V und D:  
 $h \leq 0,33 \cdot z$
  - für Zemente mit P oder V:  
 $h \leq 0,25 \cdot z$
  - für Zemente mit D:  
 $h \geq 0,15 \cdot z$

# Gemahlener Hüttensand

## EN 15167-1

(Ground granulated blast furnace slag (GGBS))

- Hüttensandmehl darf für XF2 und XF4 nicht auf den Mindestzementgehalt und den w/z-Wert angerechnet werden.
- Die gleichzeitige Verwendung von Hüttensandmehl und Flugasche und/ oder Silikastaub als Zusatzstoff sind **nicht** zulässig.
- Die Regelungen für Flugasche zur Herstellung von Beton mit hohem Sulfatwiderstand dürfen **nicht** für Hüttensand angewendet werden.
- Die Regelungen für die Verwendung von Flugasche in Unterwasserbeton gelten **nicht** für Hüttensand.



# Gemahlener Hüttensand

## EN 15167-1

(Ground granulated blast furnace slag (GGBS))

- Die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen ist noch nicht geregelt und bedarf daher einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung.
- Der Beitrag von Hüttensandmehl zum wirksamen Alkaligehalt kann vernachlässigt werden (DAfStB-Alkalirichtlinie)

# Gemahlener Hüttensand

## EN 15167-1

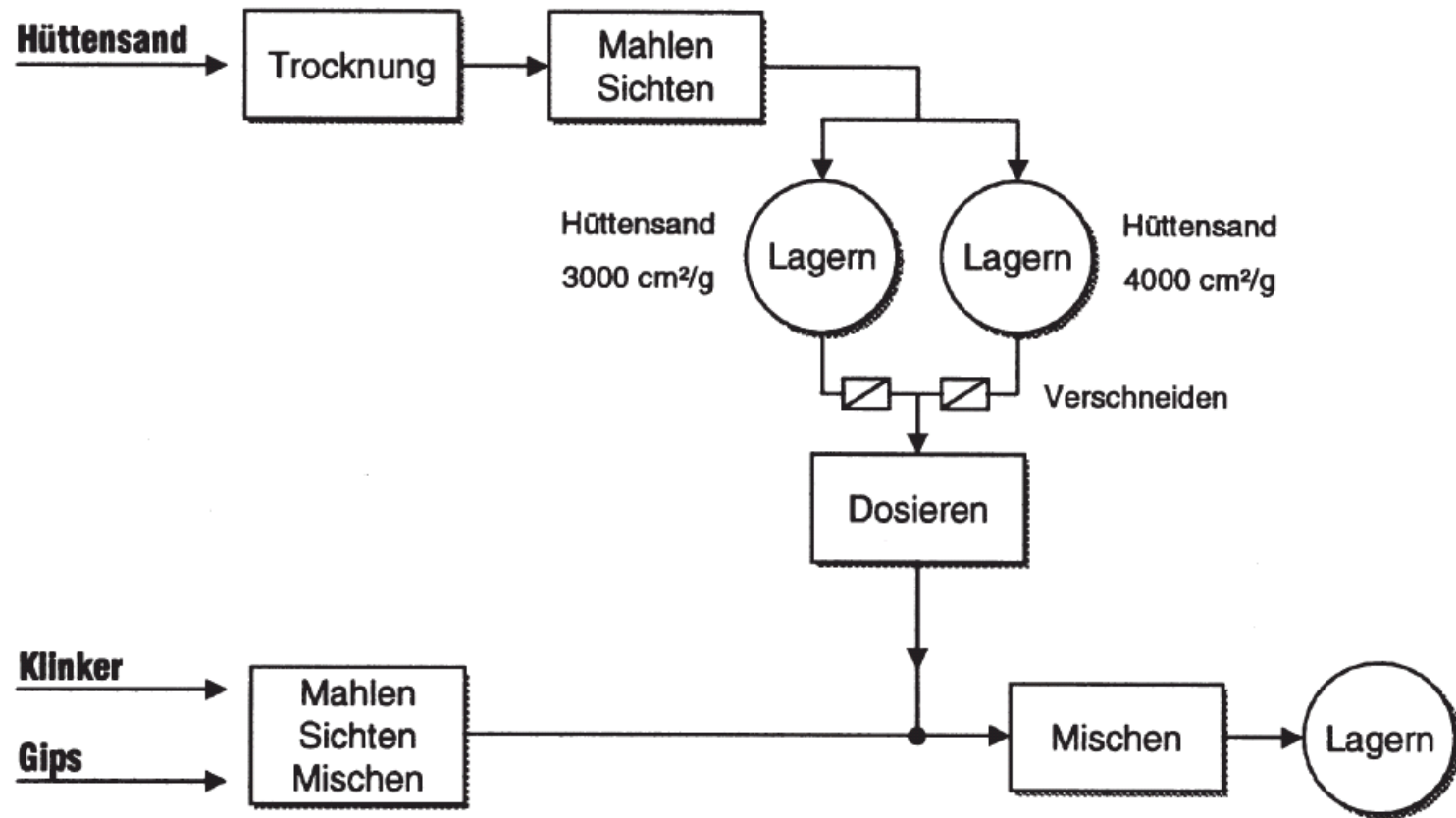
(Ground granulated blast furnace slag (GGBS))

Property	Test reference	Requirements <sup>a</sup>
magnesium oxide	EN 196-2	≤ 18 %
sulfide	EN 196-2	≤ 2,0 %
sulfate	EN 196-2	≤ 2,5 %
loss on ignition, corrected for oxidation of sulfide	EN 196-2	≤ 3,0 %
chloride <sup>b</sup>	EN 196-2	≤ 0,10 %
moisture content	Annex A	≤ 1,0 %

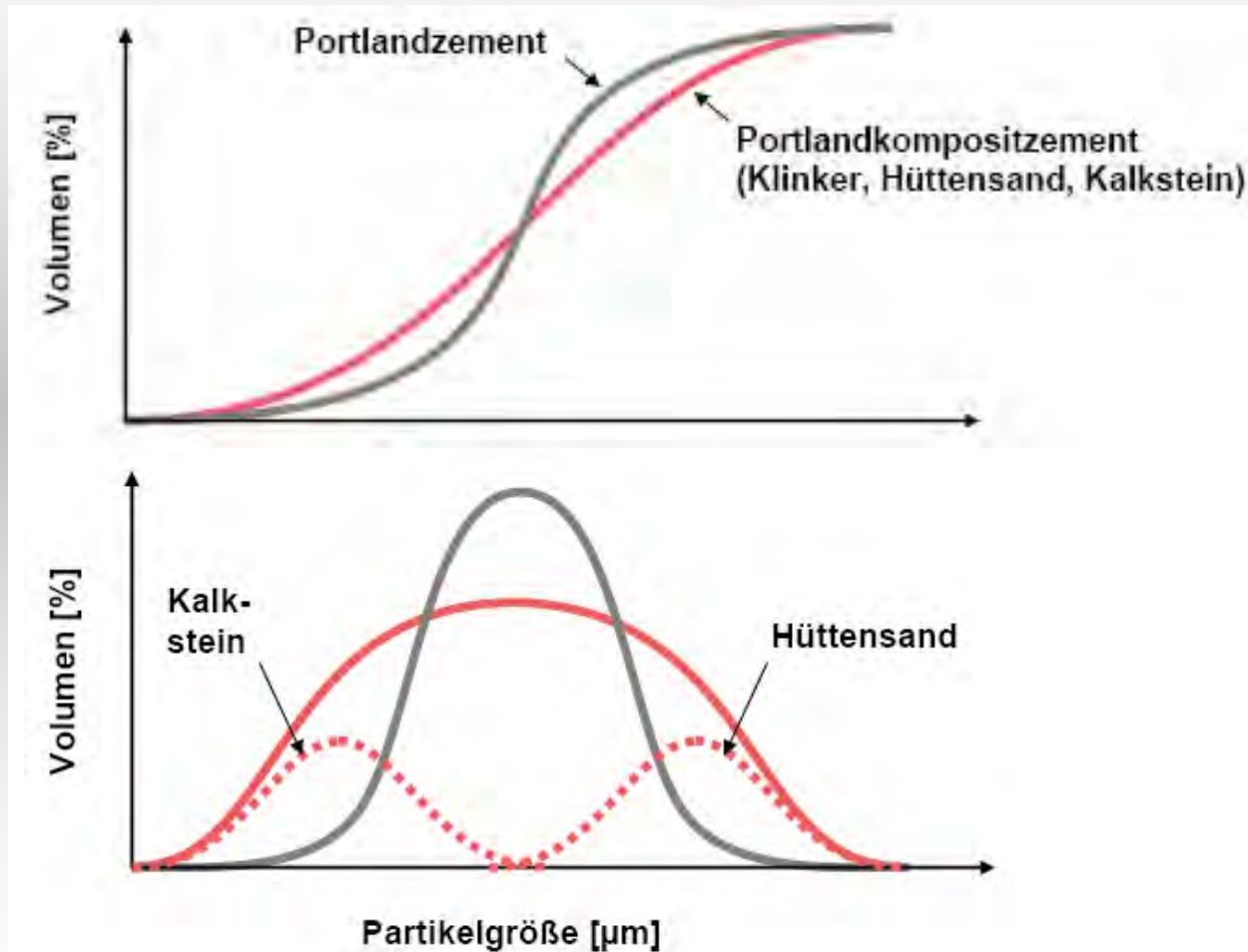
<sup>a</sup> Requirements are given by mass of the ground granulated blastfurnace slag.

<sup>b</sup> Ground granulated blastfurnace slag may contain more than 0,10 % chloride but in that case the maximum chloride content, as a value not to be exceeded, shall be stated on the packages or the documents (see Clause 6).

# Herstellen von Hochofenzement

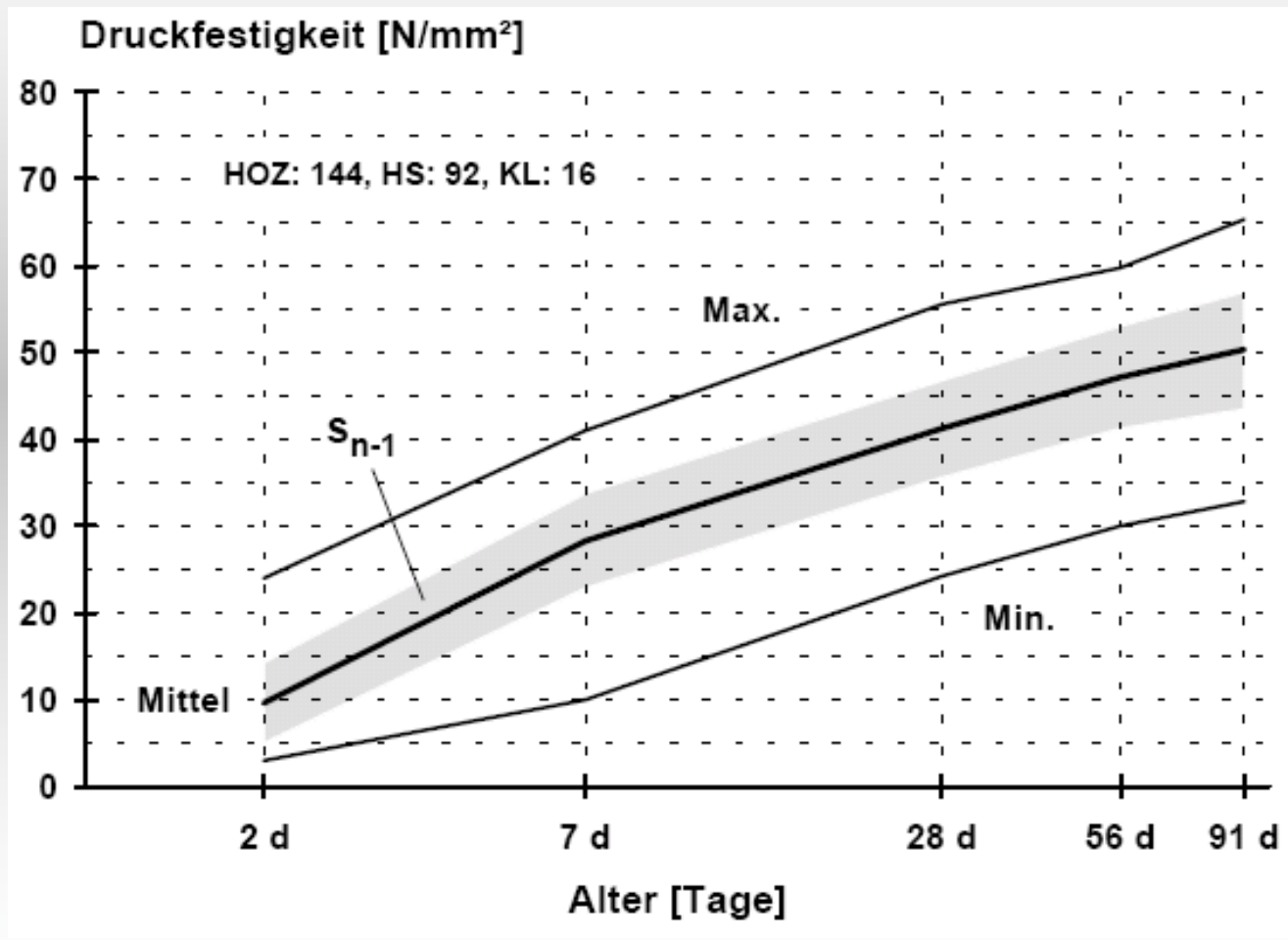


# Herstellen von Hochofenzement Partikelgrößen



# Herstellen von Hochofenzement

## Prognose der Festigkeitsentwicklung



# Zement – Hauptbestandteile nach DIN EN 197-1

- Portlandzementklinker (K)
- Hüttsand (S)
- Puzzolane
  - Natürliches Puzzolan (P)
  - Natürliches getempertes Puzzolan (Q)
- Flugasche
  - Kieselsäurereiche Flugasche (V)
  - Kalkreiche Flugasche (W)



# Zement – Hauptbestandteile nach DIN EN 197-1

- Gebrannter Schiefer (T)
- Kalkstein
  - TOC < 0,20 M.-% (LL)
  - TOC < 0,50 M.-% (L)
- Silicastaub (D)
- Mischung aus mehreren Komponenten (nicht Portlandzementklinker) (M)

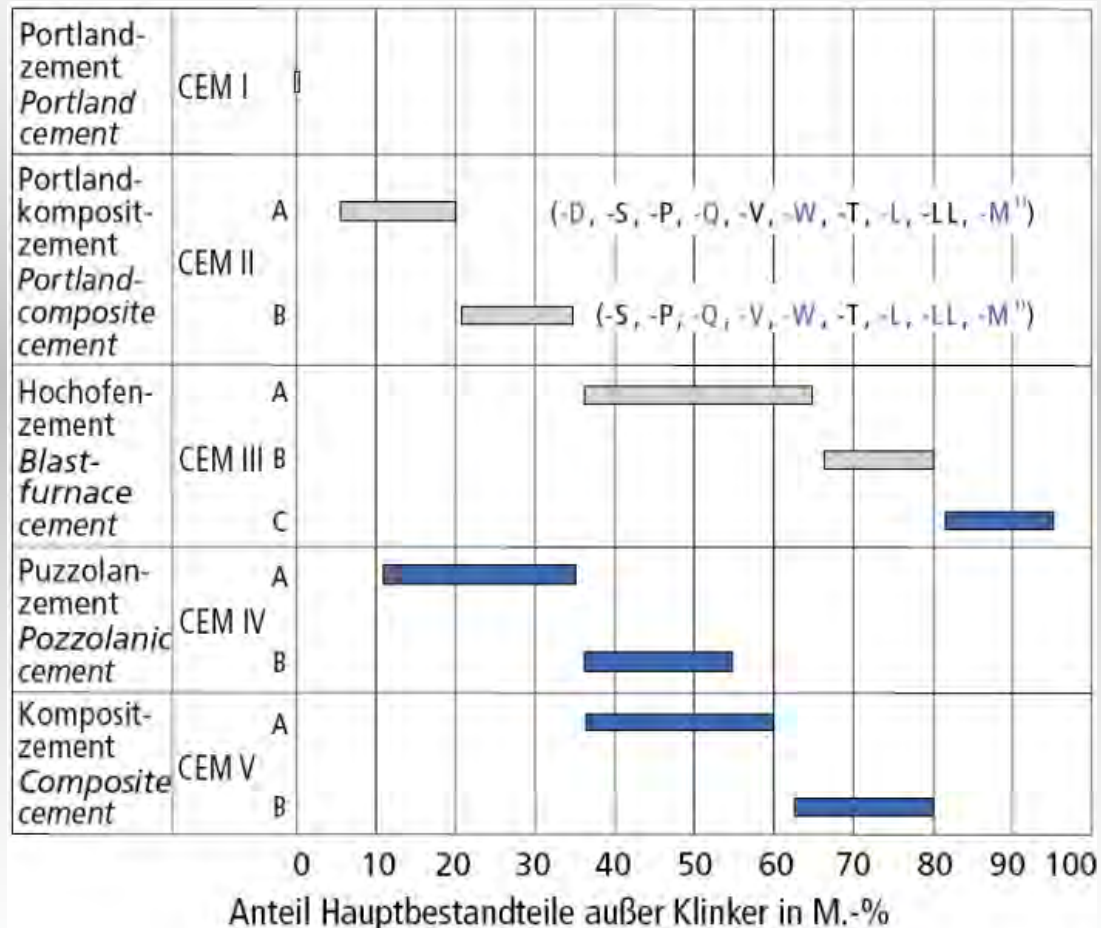
# Zementbezeichnungen nach DIN EN 197-1

- Hauptzementarten
  - CEM I: Portlandzement
  - CEM II: Portlandkompositzement
  - CEM III: Hochofenzement
  - CEM IV: Puzzolanzement
  - CEM V: Kompositzement
- Bei CEM II bis CEM V mit sinkendem Klinkeranteil :
  - Zusatz „A“  $\Rightarrow$  CEM II/A
  - Zusatz „B“  $\Rightarrow$  CEM II/B
  - Zusatz „C“  $\Rightarrow$  CEM III/C

# Hüttensandhaltige Zemente nach DIN 1164-1 / DIN EN 197

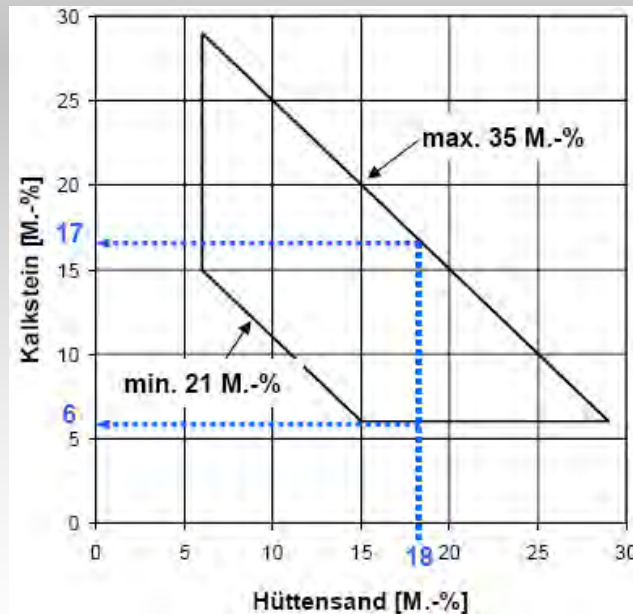
Zementart	Kurz- bezeichnung	Hauptbestandteile			Neben- bestandteile
		Portland- zementklinker	Hüttensand	Sonstige	
		K	S		
Portland- hütten- zement	CEM II/A-S	80 – 94	6 - 20	-	0 - 5
	CEM II/B-S	65 - 79	21 - 35	-	0 - 5
Portland- komposit- zement	CEM II/A-M	80 – 94	6 - 20 <sup>1</sup>		0 - 5
	CEM II/B-M	65 - 79	21 - 35 <sup>1</sup>		0 – 5
Hochofen- zement	CEM III/A	35 – 64	36 – 65	-	0 - 5
	CEM III/B	20 - 34	66 – 80	-	0 - 5
	CEM III/C	5 - 19	81 - 95	-	0 - 5
Komposit- zement	CEM V/A	40 - 64	18 - 30	18 - 30 <sup>2</sup>	0 – 5
	CEM V/B	20 - 38	31 - 50	31 - 50 <sup>2</sup>	0 – 5

# Bandbreite des Anteils an Hauptbestandteilen außer Portlandzementklinker nach DIN EN 197-1



# Zusammensetzung von Portlandkompositzementen CEM II-M

Sorte	Klinker	Weitere Hauptbestandteile*				Nebenbestandteile
		S	LL	V	...	
CEM II/A-M	80-94 M.-%	$\Sigma = 6-20 \text{ M.-%}$				0-5 M.-%
CEM II/B-M	65-79 M.-%	$\Sigma = 21-35 \text{ M.-%}$				



Beispiele:

CEM II/B-M (S-LL)

S+LL: min. 21 M.-%  
max. 35 M.-%

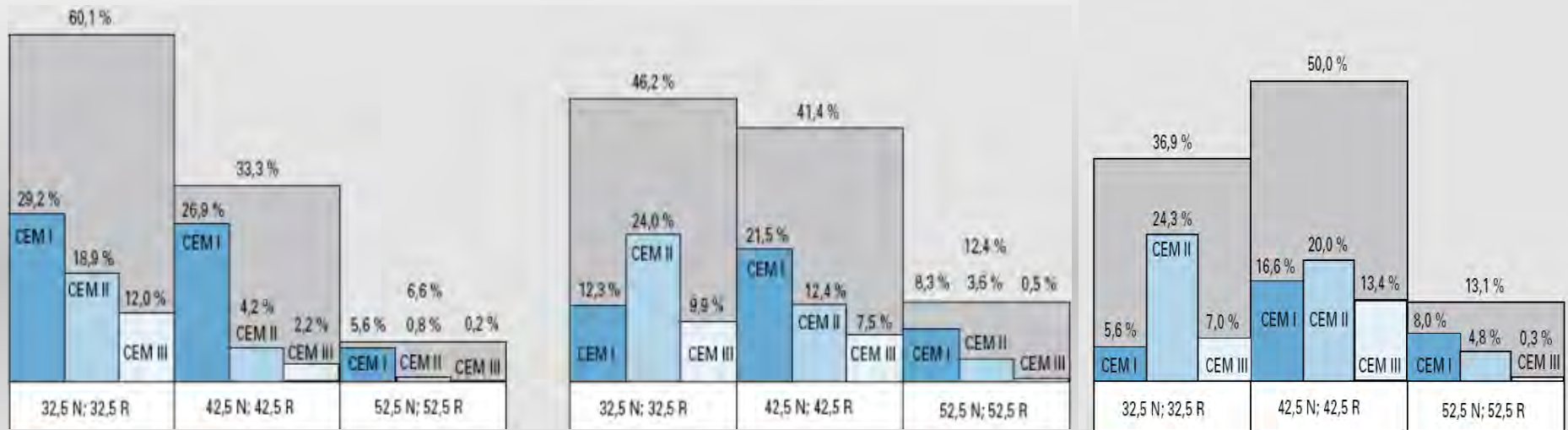
S: min. 6 M.-%  
max. 29 M.-%

# Praxisnahe Zusammensetzung von Portlandkompositzementen CEM II/B-M

CEM II/B-M	Hüttensand (S)	Flugasche (V)	Kalkstein (LL)
S-LL	15-25 M.-%	/	10-15 M.-%
V-LL	/	8-12 M.-%	10-18 M.-%
S-V	15-20 M.-%	8-12 M.-%	/
Limit	max. 35 M.-%		



# Anteil der Zementarten und Zementfestigkeitsklassen in D



2000

2006

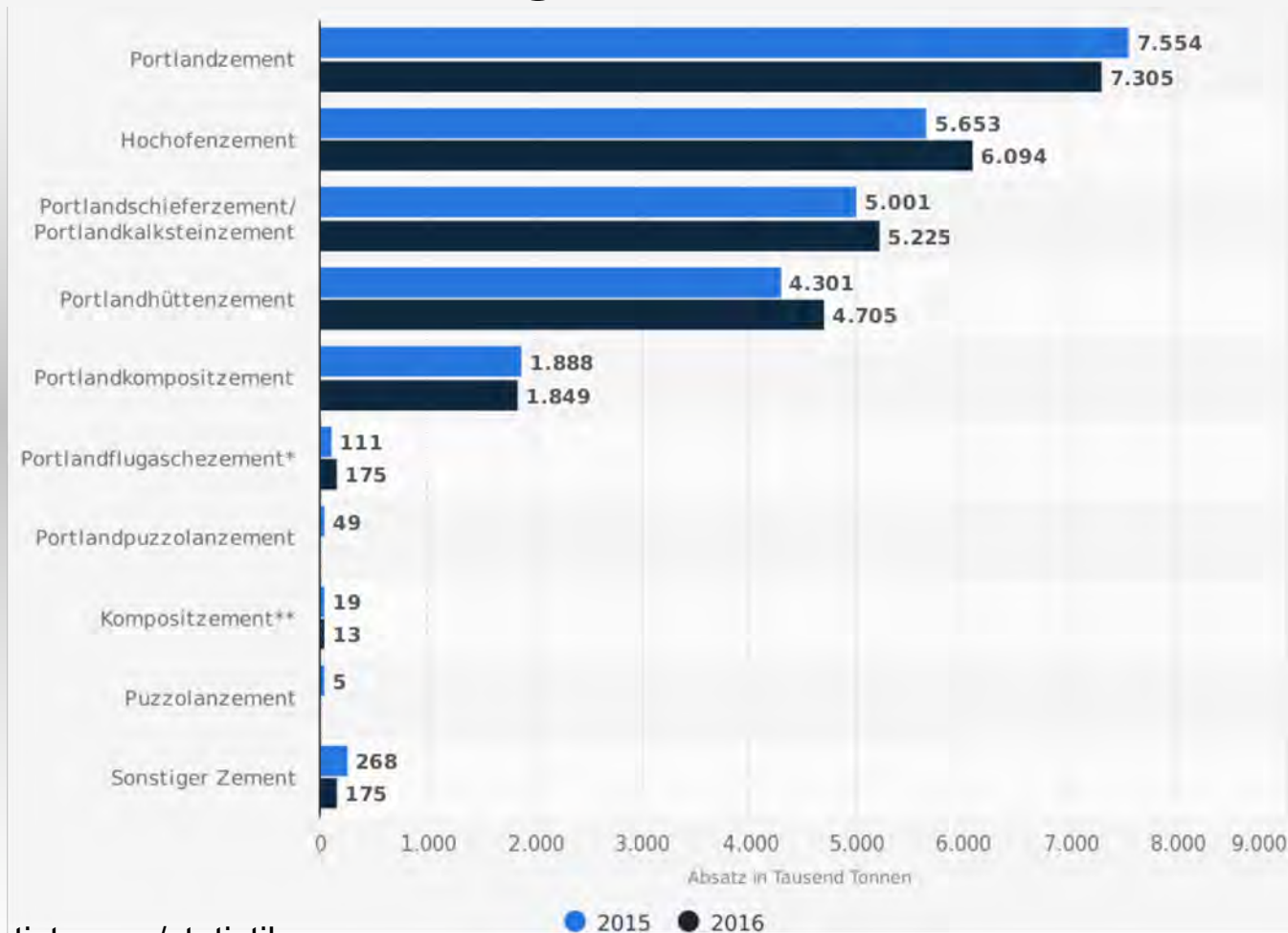
2008

CEM I: 62 %  
CEM II: 24 %  
CEM III: 14 %

CEM I: 42 %  
CEM II: 40 %  
CEM III: 18 %

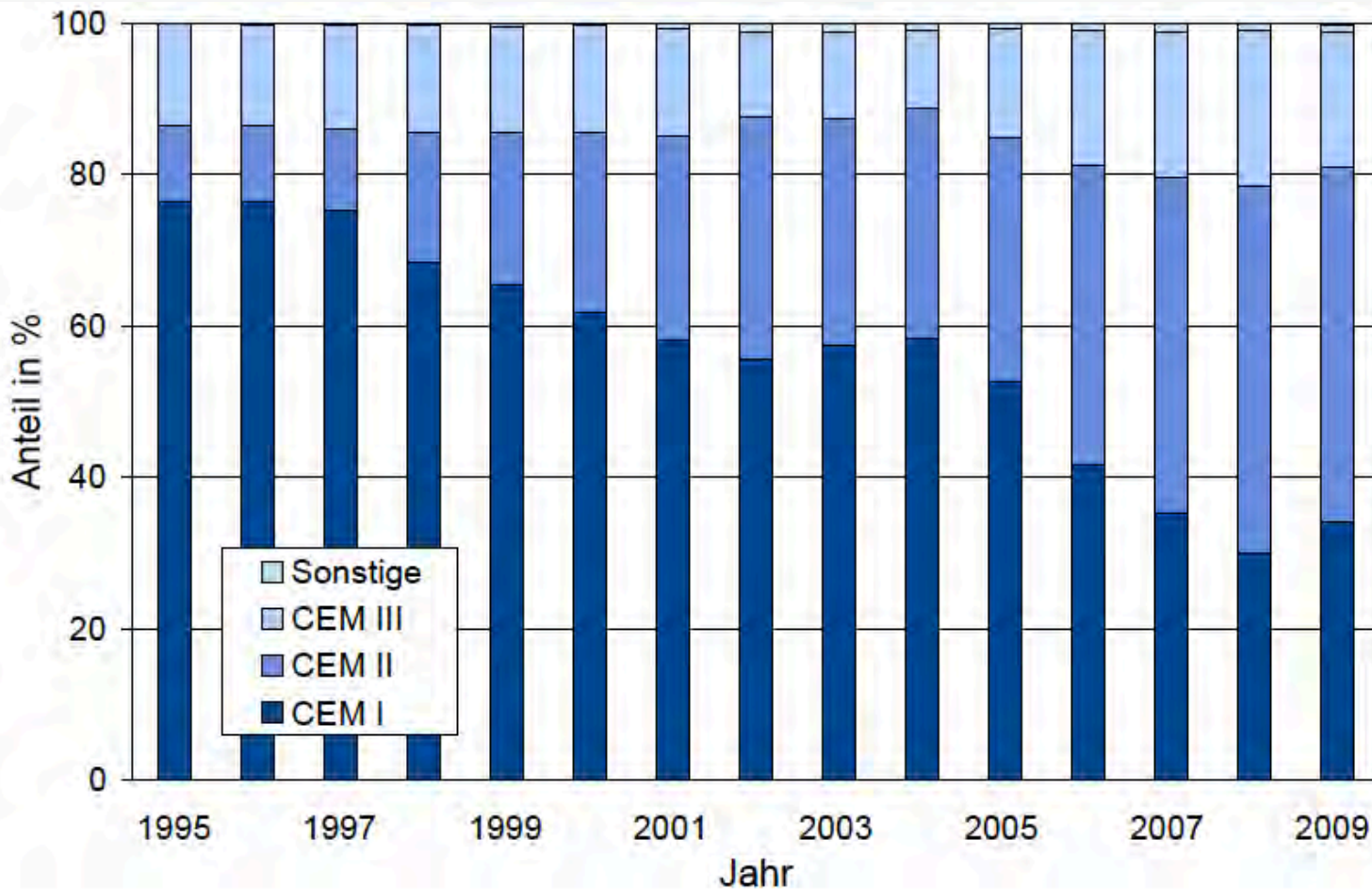
CEM I: 30 %  
CEM II: 49 %  
CEM III: 21 %

# Anteil der Zementarten und Zementfestigkeitsklassen in D



<https://de.statista.com/statistik>

# Entwicklung der Versandmengen in D



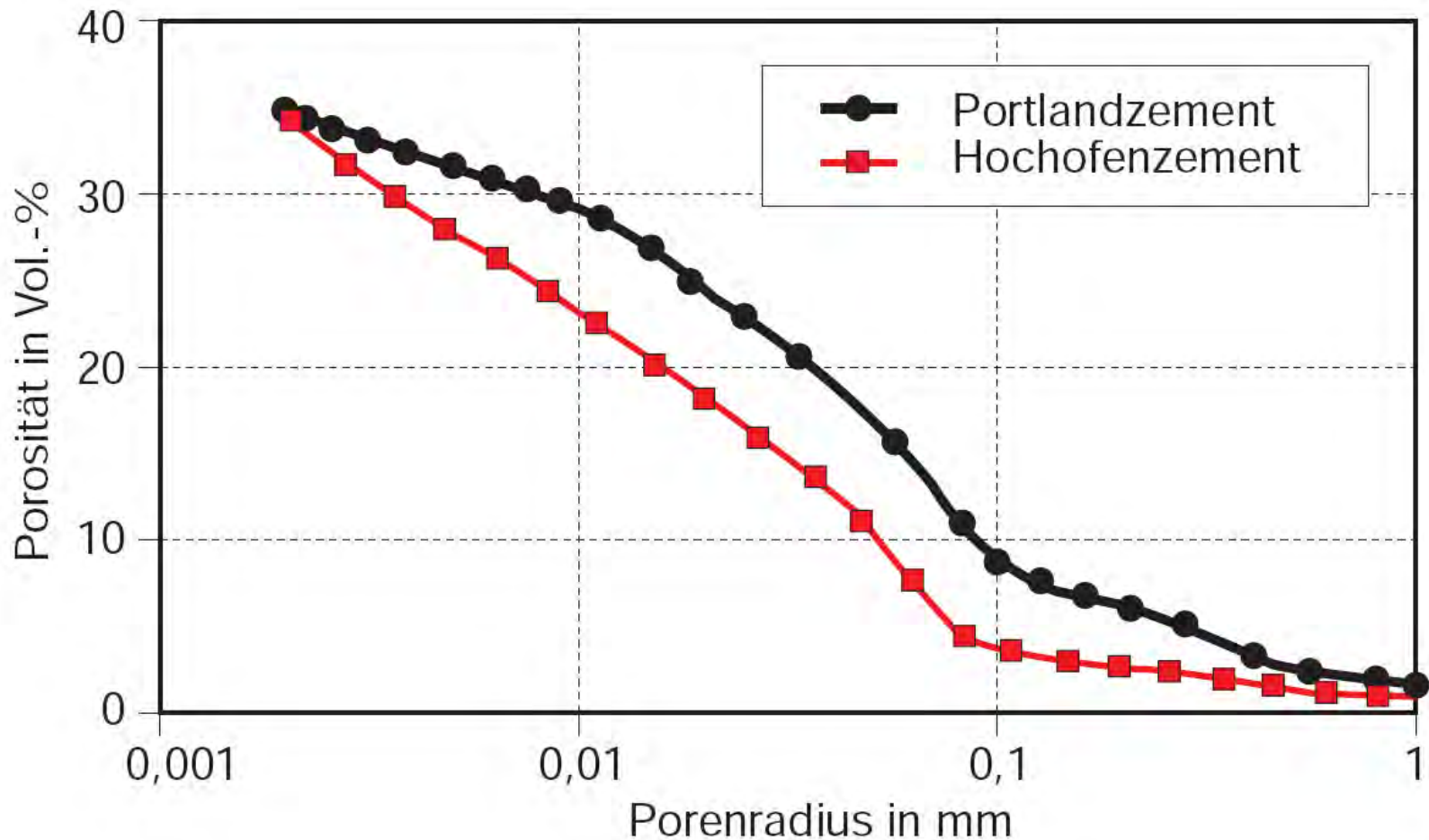
2017  
CEM I: 28,6 %  
CEM II: 46,8 %  
CEM III: 23,9 %

Quelle: BDZ Zahlen und Daten, Tabelle C.7, bis 2008 Tabelle C.9

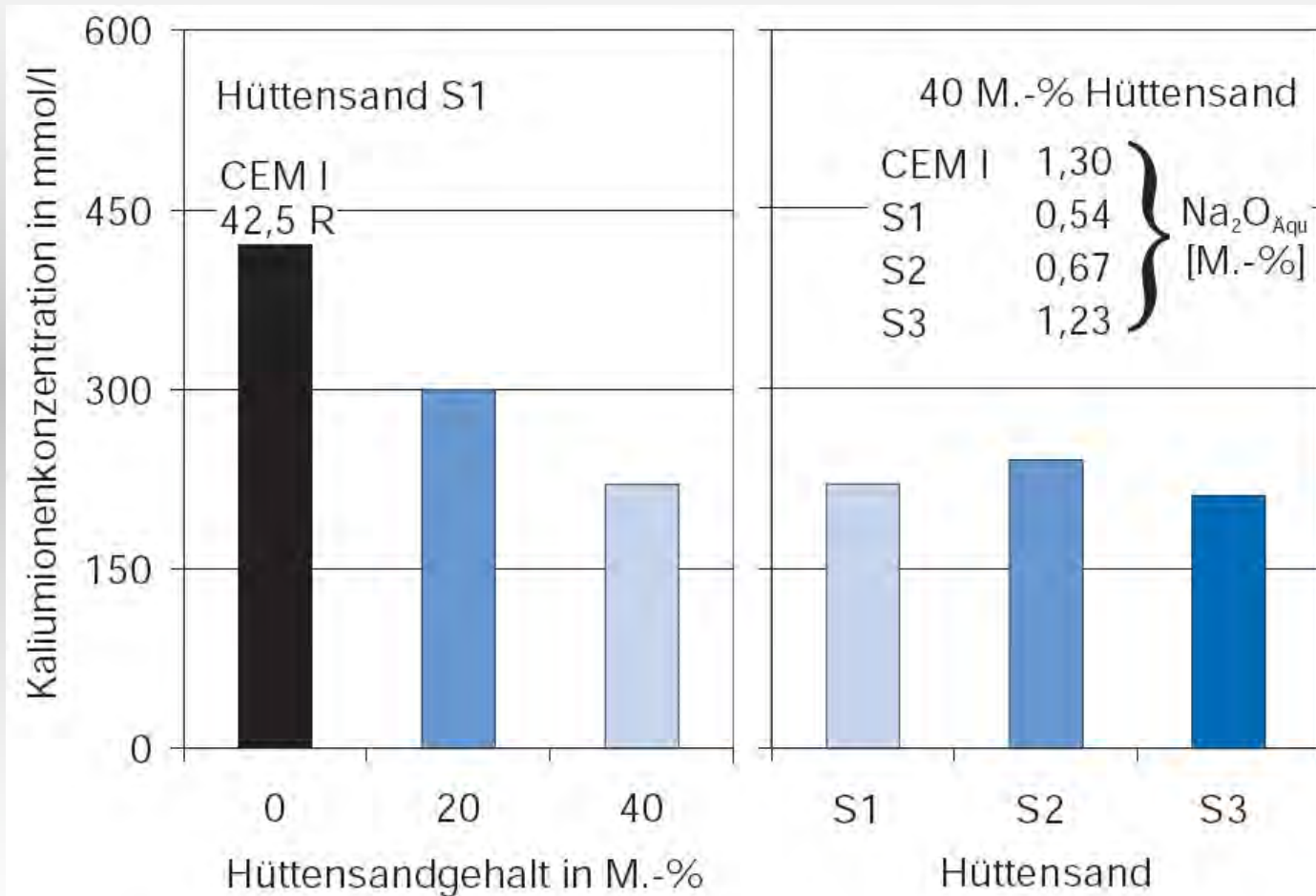
# Einfluss des Hüttensandes Betoneigenschaften

Veränderung der Betoneigenschaften	
Hüttensandanteil zunehmend	<ul style="list-style-type: none"><li>↓ langsamere Erhärtung</li><li>↓ geringere Anfangsfestigkeit</li><li>↑ größere Nacherhärtung</li><li>↑ niedrigere Wärmeentwicklung</li><li>↑ dichteres Gefüge</li><li>↑ höherer Widerstand gegen chemischen Angriff</li><li>↓ zunehmende Nachbehandlungsempfindlichkeit</li></ul>

# Einfluss des Hüttenandes Porenradienverteilung



# Einfluss des Hüttensandes Kaliumkonzentration





# Einfluss des Hüttensandes Blaufärbung



Reaktion der Sulfide im Hüttensand während der Hydratation zu Calciumhydrogensulfid ( $\text{Ca}(\text{SH})$ ) und Calciumpolysulfid (z. B.  $\text{CaS}_4$ ) führt zu grünlich-blauer Färbung. Spätere Oxidation führt zu farblosen Metallverbindungen.

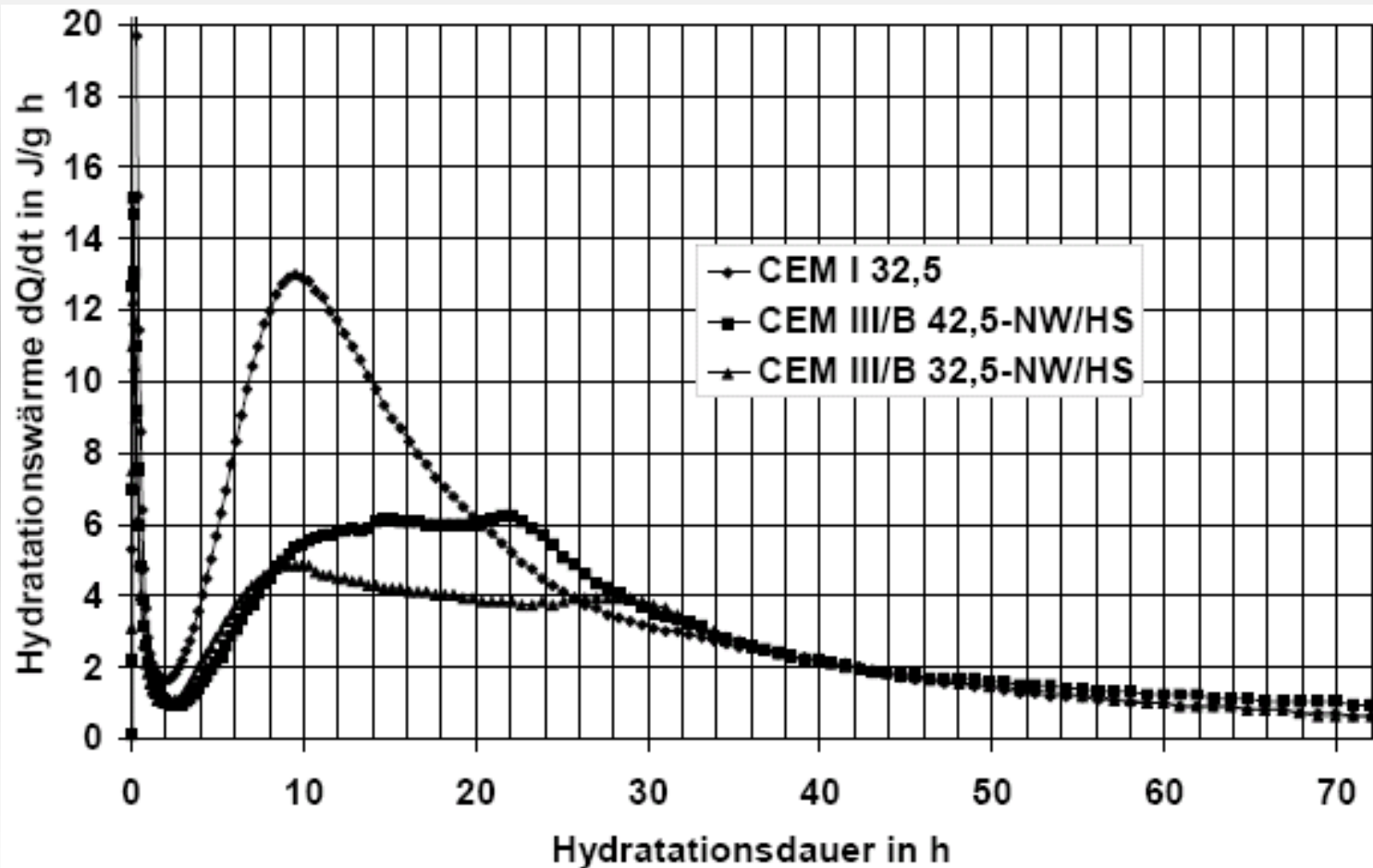
# Hydratationswärme von Zement

## Anforderung an NW-Zement

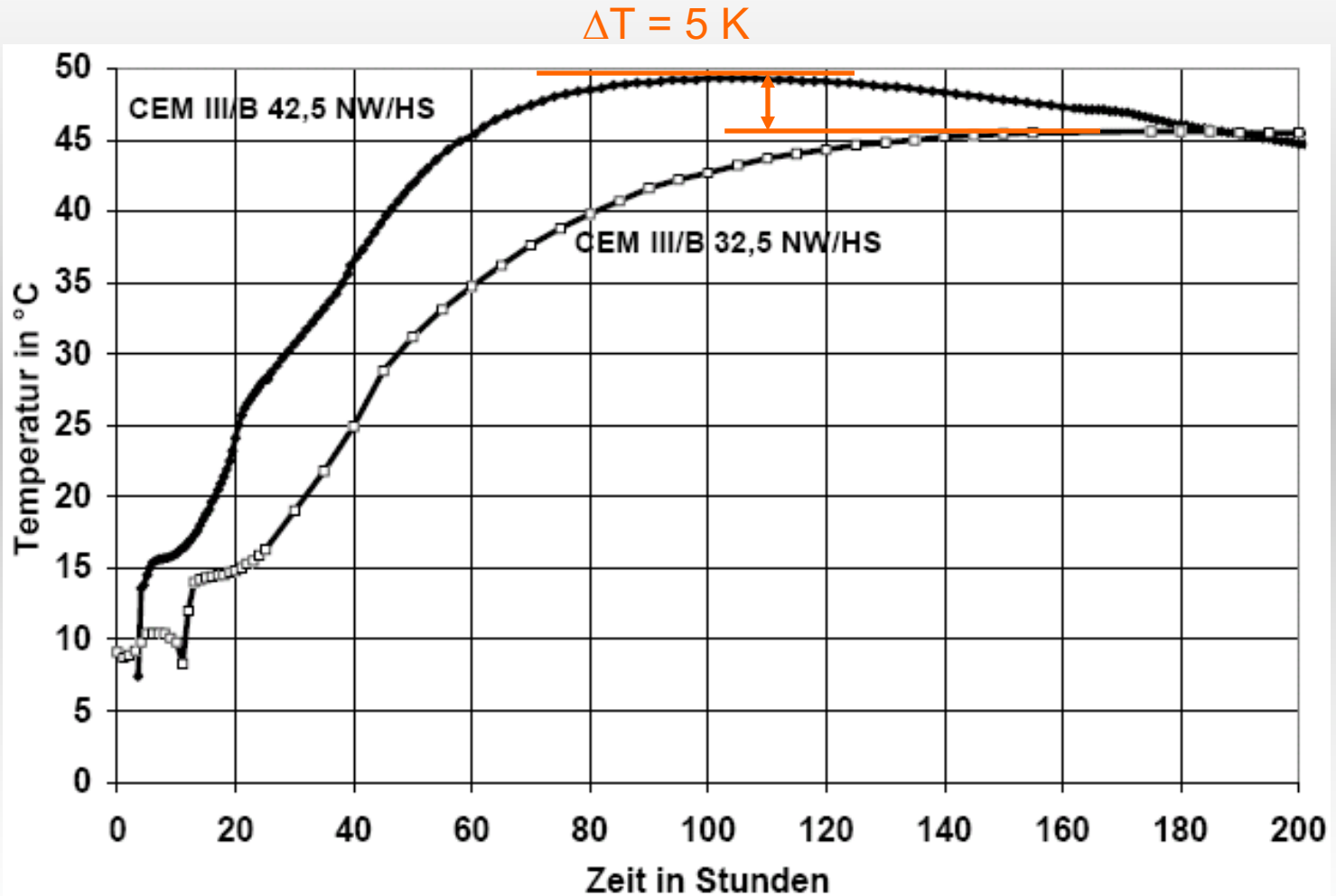
- freigesetzte Hydratationswärme nach 7 Tagen  $\leq 270$  J/g

Zement- festigkeits- klasse	Hydratationswärme in J/g nach Tagen			
	1	3	7	28
Z 25, Z 35 L	60 - 175	125 - 250	150 – 300	200 - 375
Z 35 F, Z 45 L	125 - 200	200 – 235	275 – 375	300 – 425
Z 45 F, Z 55	200 - 275	300 - 350	325 - 375	375 - 425

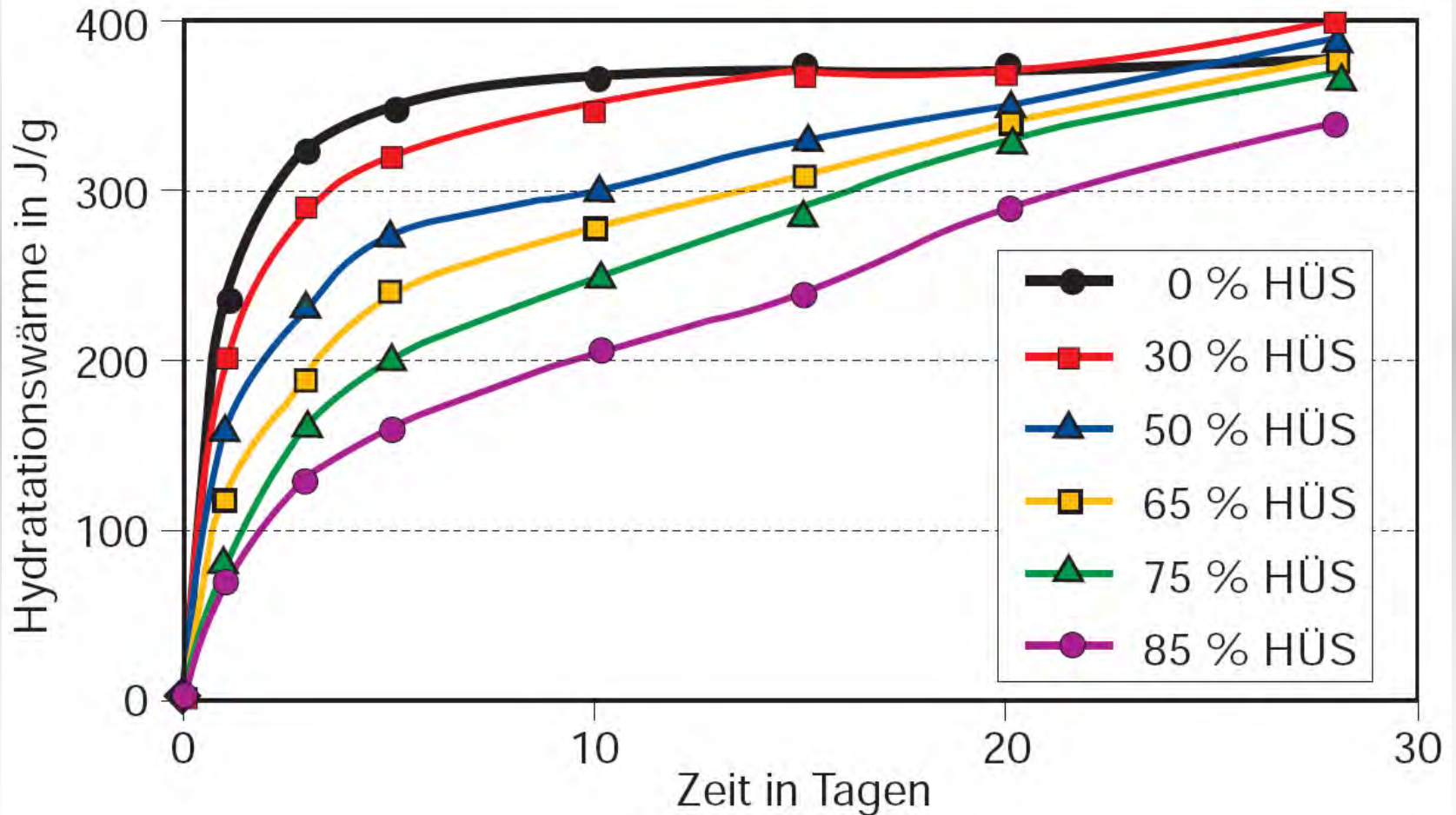
# Einfluss des Hüttenandes Hydratationswärme



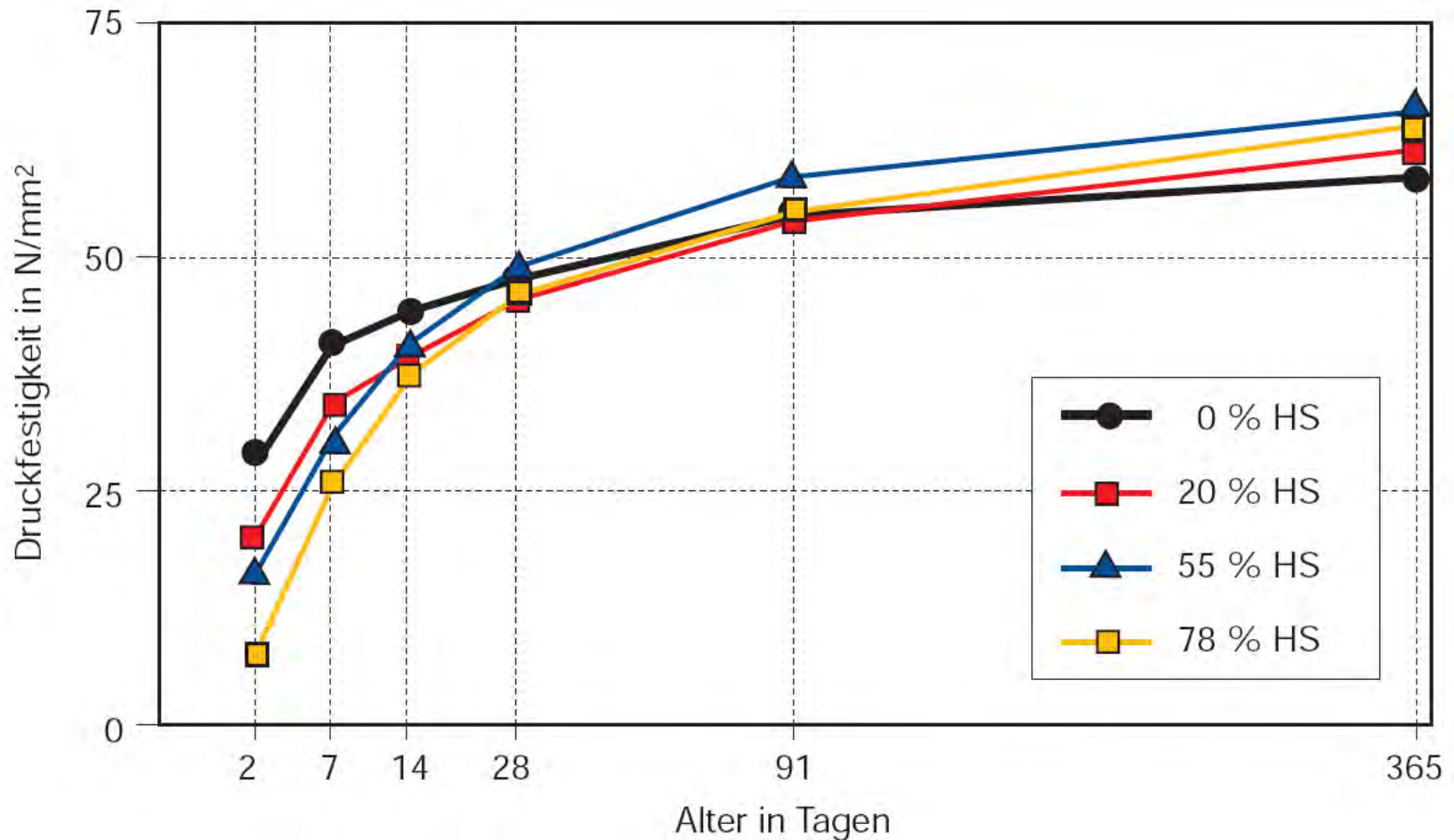
# Einfluss des Hüttensandes Hydratationswärme



# Einfluss des Hüttensandes Hydratationswärme



# Einfluss des Hüttensandes Festigkeitsentwicklung





# Einfluss des Hüttensandes Festigkeitsentwicklung

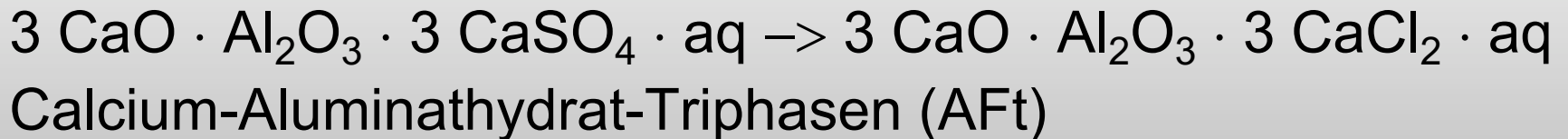
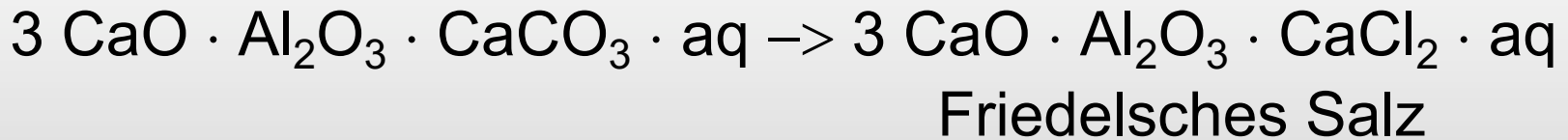
- Die Nacherhärtung nimmt mit steigendem HÜS-Gehalt zu.
- Die langsamere Anfangserhärtung erfordert eine längere Nachbehandlung.



# Carbonatisierung

- Die Carbonatisierung schreitet in hüttensandhaltigem Beton schneller voran, als in Beton mit Portlandzement.
- Das dichtere Gefüge verhindert dennoch eine Bewehrungskorrosion.

# Chloridbindung und Chloriddiffusion



Zementart	Hüttensandanteil [M.-%]	Diffusionskoeffizient [%]
Portlandzement	-	100
Hochofenzement	40	25
	60	5
	80	1

# Widerstand gegen Ammoniumsalze

- Mörtel mit Hochofenzement ist in Versuchen bis zu einer Konzentration von 120 mg  $\text{NH}_4^+$ /l quasi unempfindlich
- Mörtel mit Portlandzement verliert etwa 40 % seiner Ausgangsfestigkeit

# Widerstand gegen sulfathaltige Wässer

- Sulfationen reagieren mit den Klinkerphasen  $C_3A$  und  $C_4AF$  bzw. den Hydratphasen  $C_3AH_6$  oder Monosulfat unter Volumenzunahme zu Ettringit.
- Hüttensandgehalt < 60 - 65 %:
  - Sulfatwiderstand sinkt zunächst mit steigendem Hüttensandanteil unabhängig vom  $C_3A$  –Gehalt
- Hüttensandgehalt > 65 %:
  - Sulfatwiderstand steigt auf hohe Werte
  - Ursache: Hoher Diffusionswiderstand des erhärteten Hochofenzements gegen Sulfationen

# Widerstand gegen Alkalireaktion

- Alkalien im Hochofenzement sind im glasigen Hüttensand gebunden. Sie gehen sehr langsam in Lösung
- AKR findet erst ab einer bestimmten Schwelle statt

Zementart	CEM I-NA	CEM II-NA	CEM III/A-NA		CEM III/B-NA
			Hüttensandgehalt [M.-%]		
			< 50	50 ... 65	≥ 66
Na <sub>2</sub> O-Äquivalent [M.-%]	≤ 0,60	≤ 0,60	≤ 0,60	≤ 1,10	≤ 2,00

# Widerstand gegen Frost und Frost-Taumittel Angriff

- Frost Angriff
  - Maßgebend ist die Dichtigkeit des Gefüges
  - Ab  $S = 50 - 60 \%$  übertrifft hüttensandhaltiger Beton einen Beton mit Portlandzement
- Frost-Taumittel Angriff
  - Ab einem Hüttensandgehalt von etwa  $50 \%$  wirken durch LP-Mittel künstlich eingeführte Mikroluftporen nicht