

## 2.2 Anorganische Bindemittel

pulverförmige anorganische Verbindungen

Erhärtung einer Bindemittel-Wasser-Suspension durch chemische Reaktionen, Lösungsvorgänge und Kristallisationsprozesse

Unterteilung in

→ nicht hydraulische Bindemittel

Erhärtung an der Luft

→ hydraulische Bindemittel

Erhärtung sowohl an der Luft wie auch unter Wasser → wasserbindend, wasserfest, unter Wasser erhärtend

Einbindung von Gesteinskörnungen

→ Bildung eines künstlichen Steines

Lehm: Urbaustoff und ältestes Bindemittel der Menschheit Chr.

Verwendung vor über 10.000 Jahren, Lehmziegel 9.000 v.

Noch heute lebt 1/3 der Erdbevölkerung in Lehmhäusern

- Kalk

gebräuchliche Bezeichnung für  $\text{CaO}$ ,  
gebrannter Kalk

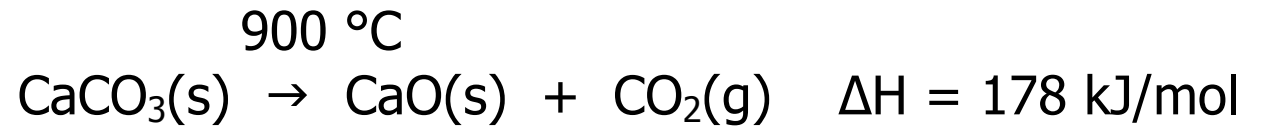
häufig ebenfalls für  $\text{CaCO}_3$ , Kalkstein  
und  $\text{Ca(OH)}_2$ , gelöschter Kalk, verwendet

hinsichtlich der Erhärtung als Bindemittel  
in Kalkmörteln wird unterschieden

- Luftkalk (Erhärtung von  $\text{Ca(OH)}_2$   
und evtl.  $\text{Mg(OH)}_2$  durch Luftzutritt)
  - Weißkalk (CL - calcium lime)
  - Dolomitkalk (DL - dolomitic lime)
- Wasserkalk (veraltet, zusätzlich gerin-  
ge hydraulisch erhärtende Anteile)
- hydraulischer Kalk (zusätzlich hydrau-  
lisch erhärtende Anteile, HL - hydrau-  
lic lime →  $\beta_{D 28}$  : HL 2, HL 3,5, HL 5)

# Luftkalk

Brennen von Kalkstein



Entsäuerung oder Calcinierung des Kalksteins

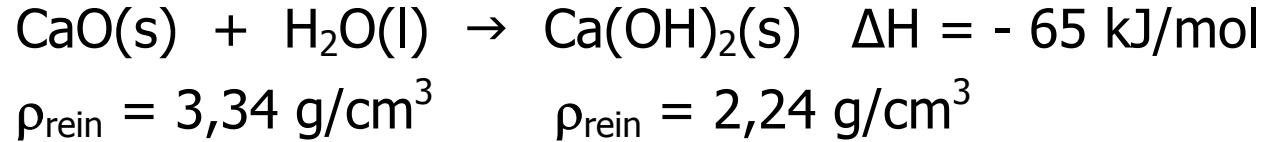
poröses Reaktionsprodukt (CO<sub>2</sub>-Verlust), bei  
Volumenkonstanz theoretisches Porenvolumen  
von 52 Vol.-%!

zunehmende Brenntemperatur ermöglicht  
schnelleres Brennen, führt jedoch zu größeren  
CaO-Kristallen unter Sinterung

Weichbranntkalk (900 °C) → Mittelbranntkalk  
→ Hartbranntkalk (1400 °C) → Sinterkalk



## Löschen von Branntkalk



exotherme Reaktion ( $T > 100 \text{ }^\circ\text{C}$ , Spritzgefahr!),  
Volumenvergrößerung  $\rightarrow$  Zerfall des Stückkalks zu  
kleinsten  $\text{Ca(OH)}_2$ -Teilchen

Löschen mit stöchiometrischer Wassermenge  
(einschließlich Verdunstungswasser)  
 $\rightarrow$  **Trockenlöschen**, Kalkpulver (Werk)

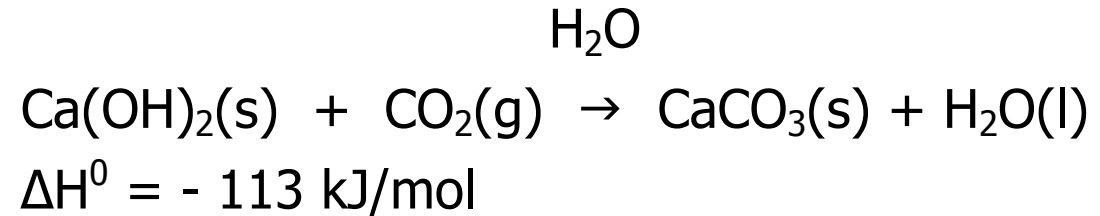
Löschen mit mäßigen Überschuss an Wasser  
 $\rightarrow$  **Nasslöschen**, Kalkbrei (Baustelle)

Löschen mit hohem Wasserüberschuss, Kalkmilch

$\text{Ca(OH)}_2$  mit geringer Löslichkeit, alkalische  
Lösung, Kalkwasser

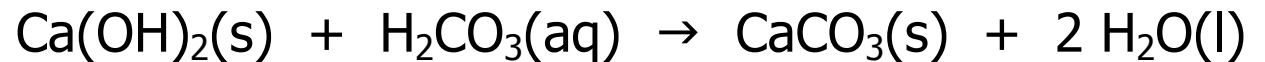
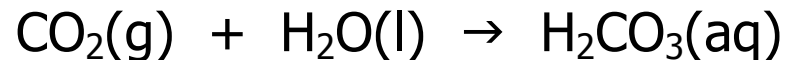
Löschgeschwindigkeit sinkt mit steigender  
Brenntemperatur

Erhärten von Luftkalk



exotherme Reaktion, Carbonatisierung

Reaktion läuft nur in Gegenwart von Feuchtigkeit ab → Bildung von Kohlensäure → Neutralisation (trockenes  $\text{Ca(OH)}_2$  carbonatisiert nicht)



"Verdursten" von Kalkmörtel (Sonne, Wärme, Untergrund)

langsame Reaktion, nur 0,04 Vol.-%  $\text{CO}_2$  in der Luft, Beschleunigung durch  $\text{CO}_2$ -Anreicherung

Wasserfreisetzung durch Erhärtungsvorgang, ein Jahr oder länger → **Baufeuchtigkeit** → Problem bei Fliesen, Wandspachtel, Lacktapeten

Wie viel Kilogramm Wasser werden aus 50 kg technischem Weißkalkhydrat mit einem Gehalt von 95 %  $\text{Ca(OH)}_2$  im Verlauf der Carbonatisierung freigesetzt?

## Hydraulischer Kalk

### Natürliche Produkte

Brennen tonhaltigen Kalksteins (Kalkmergel) unterhalb 1250 °C (→ NHL, natural hydraulic lime)

Bildung von CaO und der **Hydraulfaktoren** SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (reaktionsfähige Oxide, s. Zement)

Reaktion von CaO mit Hydraulfaktoren oberhalb 900 °C (siehe Portlandzementklinker)

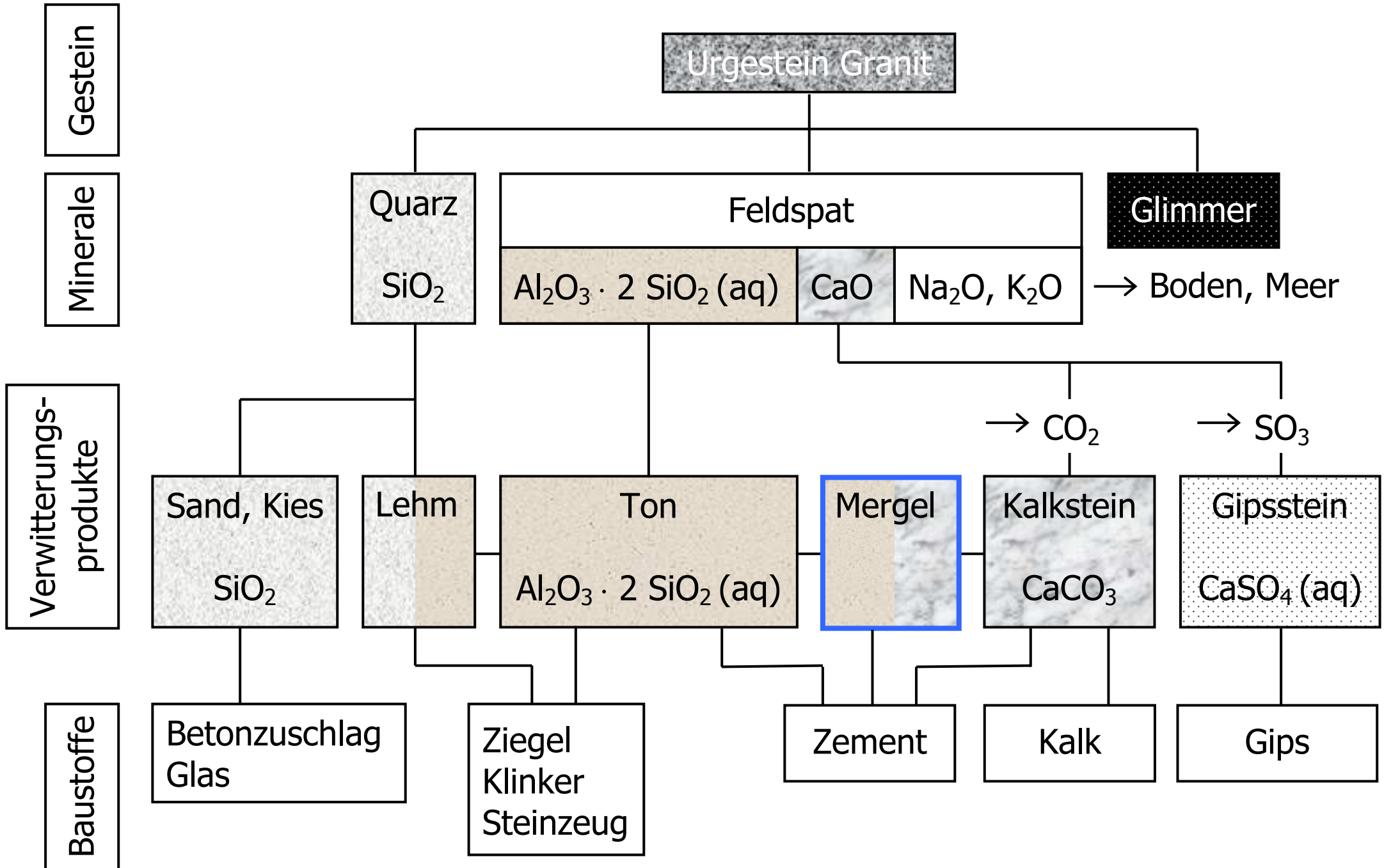
Werkseitige Hydratation des noch vorhandenen freien Kalks zu Ca(OH)<sub>2</sub> (CaO immer gelöscht)

Erhärtung durch Carbonatisierung und Hydratation

### Künstliche Mischungen

Heute überwiegend Mischungen von Luftkalk mit Zement (hydraulisch), Hüttensand (latent hydraulisch) oder Puzzolanen (Trass, Flugasche) (→ HL)

# Gesteinsverwitterung, Verwitterungsprodukte und Baustoffe





- Zement

größte Gruppe anorganischer Bindemittel, nach Vermischen mit Wasser ("Anmachen") hydraulisch erhärtend

enthält, je nach Zusammensetzung, verschiedene Hauptbestandteile und insgesamt bis zu 5 M.-% Nebenbestandteile

unterschiedliche Erhärtungsvorgänge

Hauptzementarten (DIN EN 197-1)

Portlandzement .....	CEM I
Portlandkompositzement .....	CEM II
Hochofenzement .....	CEM III
Puzzolanzement .....	CEM IV
Kompositzement .....	CEM V

Zuordnung von 27 Normalzementen, je nach Zusammensetzung, möglich

Hauptbestandteile der Zemente (DIN EN 197-1)

Portlandzementklinker...	K
Hüttensand .....	S
natürliches Puzzolan .....	P
natürliches, getempertes Puzzolan .....	Q
gebrannter Schiefer .....	T
kieselsäurereiche Flug- asche .....	V
kalkreiche Flugasche .....	W
Kalkstein .....	L / LL
Silicastaub .....	D
CEM II mit mehr als 2 Hauptbestandteilen .....	M

## Herstellung, Zusammensetzung, Eigenschaften von Portlandzementklinker

Trocknen und Aufmahlen von ca. 70 % Kalkstein ( $\text{CaCO}_3$  bzw.  $\text{CaO} \cdot \text{CO}_2$ ) und 27 % Ton ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ) bzw. ihrer natürlichen Gemische sowie evtl. Korrekturstoffen (Quarzmehl, Eisenerz) → Rohmehle ( $< 90 \mu\text{m}$ )

Kalkstein:  $\text{CaCO}_3$  bzw.  $\text{CaO} \cdot \text{CO}_2$

Ton:  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$

Brennen in 50 - 100 m langen Drehrohröfen, Erhitzen bis auf  $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ , rasches Abkühlen bis auf  $200 \text{ }^\circ\text{C}$

geringer Spielraum für die Zusammensetzung des Rohmehls ergibt sich aus

- der prozentualen Zusammensetzung des Zementes an Klinkermineralien
- den stöchiometrischen Verhältnissen der Oxide  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  in den entstehenden Klinkermineralien

Nutzung von Kalkkennwerten wie **Hydraulemodul** (HM) und **Kalkstandard** (KSt I) zur Berechnung der chemischen Klinkerzusammensetzung

→ zu geringer Kalkgehalt führt zu Abfall der Festigkeit

→ zu hoher Kalkgehalt verursacht Kalktreiben

$$\text{HM} = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

→ HM 2,0 ... 2,4

$$\text{KStI} = \frac{100 \cdot \text{CaO}}{2,8 \cdot \text{SiO}_2 + 1,1 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,7 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

→ KSt I 90 ... 100 %

hochwertige Klinker > 97 %

## Mineralogische Zusammensetzung von [Portlandzementklinker](#)

Klinkerphase	Oxidschreibweise	Abkürzung Bauchemie	Farbe reine Phase	Anteil in %	
				Bereich	Mittelwert
Alit Tricalciumsilicat	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	weiß	40...80	65
Belit Dicalciumsilicat	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	weiß	2...30	13
Aluminatphase Tricalciumaluminat	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	weiß	3...15	11
Ferritphase Calciumaluminatferrit	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_2(\text{A},\text{F})$	dunkel- braun *	4...15	8

\* durch MgO-Einschlüsse graugrün

Chemische Zusammensetzung  
(gerundete Mittelwerte)

CaO	65 %
SiO <sub>2</sub>	21 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,5 %
SO <sub>3</sub>	1 %

## Kurzschreibweise im Bauwesen

CaO : C

SiO<sub>2</sub> : S

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : A

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : F

H<sub>2</sub>O : H

SO<sub>3</sub> : s

CO<sub>2</sub> : c

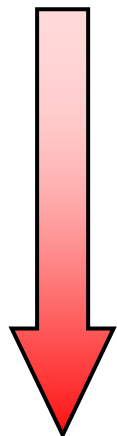
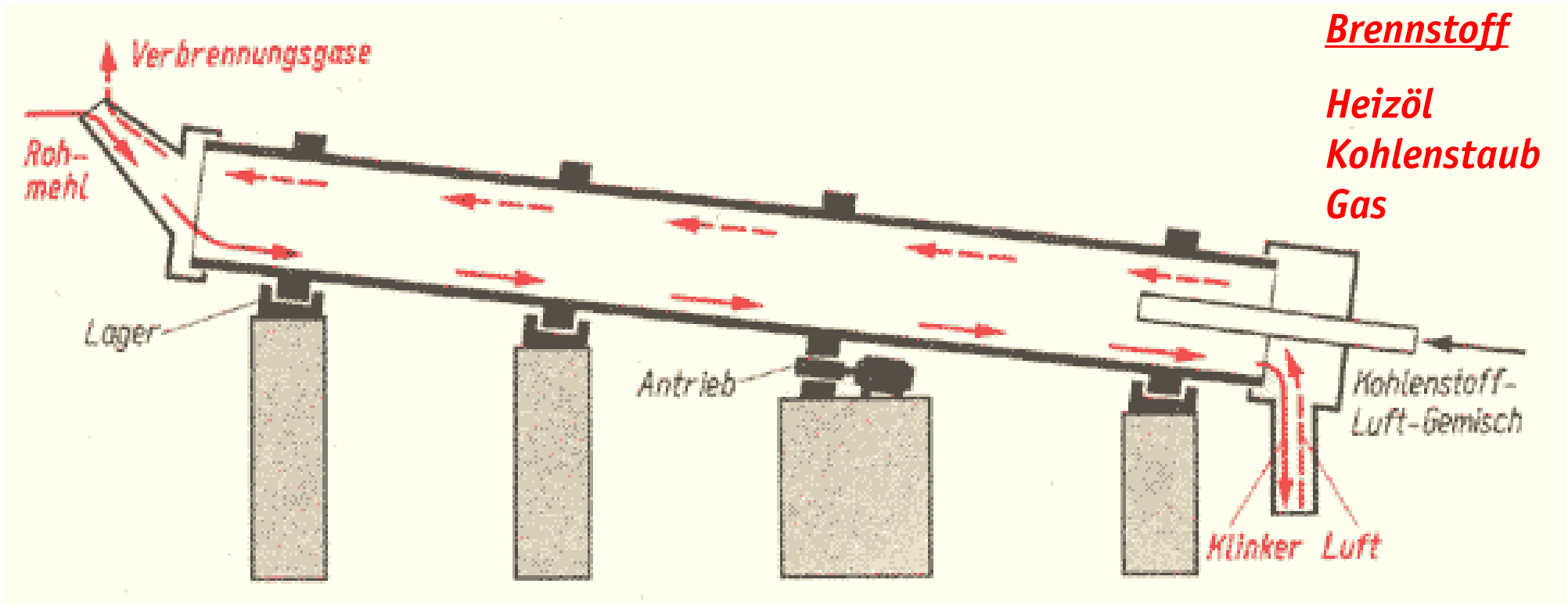
Dicalciumsilicat ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ): aufgebaut aus  $\text{Ca}^{2+}$ - und  $\text{SiO}_4^{4-}$ - Ionen

Tricalciumsilicat ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ): aufgebaut aus  $\text{Ca}^{2+}$ -,  $\text{SiO}_4^{4-}$ - und  $\text{O}^{2-}$ - Ionen

Tricalciumaluminat ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ):

aufgebaut aus  $\text{Ca}^{2+}$  - und  $\text{Al}_6\text{O}_{18}^{18-}$  - Ionen

# Brennen von Rohmehl



Wasserverlust (bis 450 °C)

Tonzersetzung (450 - 600 °C) und Oxidbildung (600 - 950 °C),  
Kalksteinzerersetzung (600 - 1000 °C)

Bildung von CS und CA (800 - 1000 °C)

Kalkaufnahme (1000 - 1300 °C), Bildung von C<sub>2</sub>S und C<sub>2</sub>(A,F)

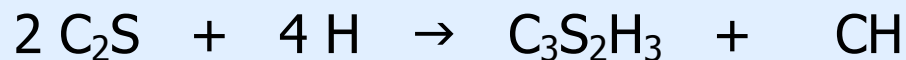
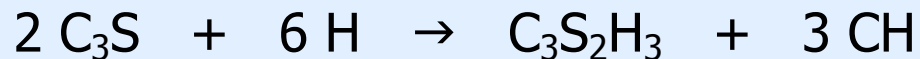
weitere Kalkaufnahme (1300 - 1450 °C), Bildung von C<sub>3</sub>S, Sinterung



## Erhärtung von Portlandzement (Partikelgröße < 60 µm)

Hydratation von  $C_3S$  und  $C_2S$  (ca. 80 % des Phasenbestandes) →

Bildung von Monosilicaten → Disilicaten → kalkärmeren polymeren Calciumsilicathydraten, sogenannten **C-S-H-Phasen**, z. B.:



Zusammensetzung schwankt innerhalb bestimmter Grenzen

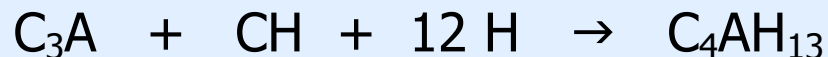
Einflussgrößen

- Zementzusammensetzung
- w/z-Wert
- Temperatur
- Mahlfineinheit

Hydratation von  $C_3A$  →  
Bildung von Aluminathydraten



In Gegenwart von CH



"Löffelbinder"

Zement ohne Anhydrit/Gips

Abdichten bei Wasseranfall

- Erstarrung nach 2 min,
- Erhärtung nach 4 bis 5 min!

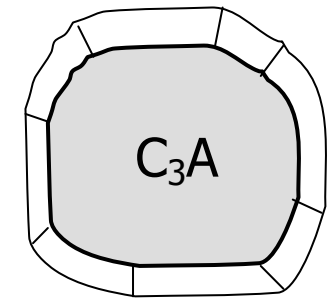
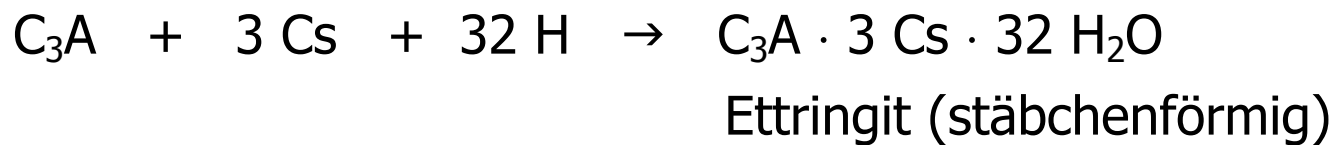
## Hydratation von C<sub>3</sub>A in Gegenwart von Calciumsulfat

Im Zement als Erhärtungsverzögerer Calciumsulfat enthalten (1 % SO<sub>3</sub> = 1,7 % Cs bzw. 2,2 % CsH<sub>2</sub>)

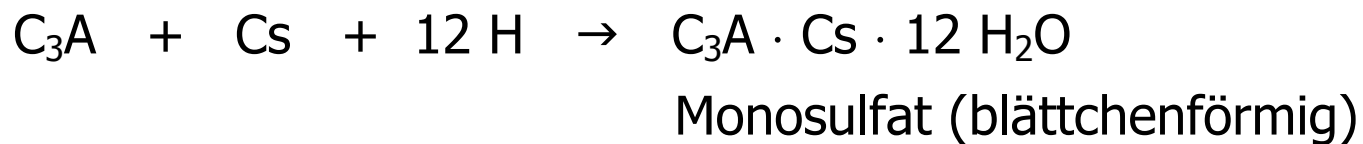
→ Zugabemenge abhängig von C<sub>3</sub>A-Gehalt und Mahlfineinheit

→ Zusammensetzung des **Sulfatträgers** (Cs, CsH<sub>0,5</sub>, CsH<sub>2</sub>) beeinflusst Erstarrungsbeginn

Es entsteht zunächst Trisulfat (Ettringit):



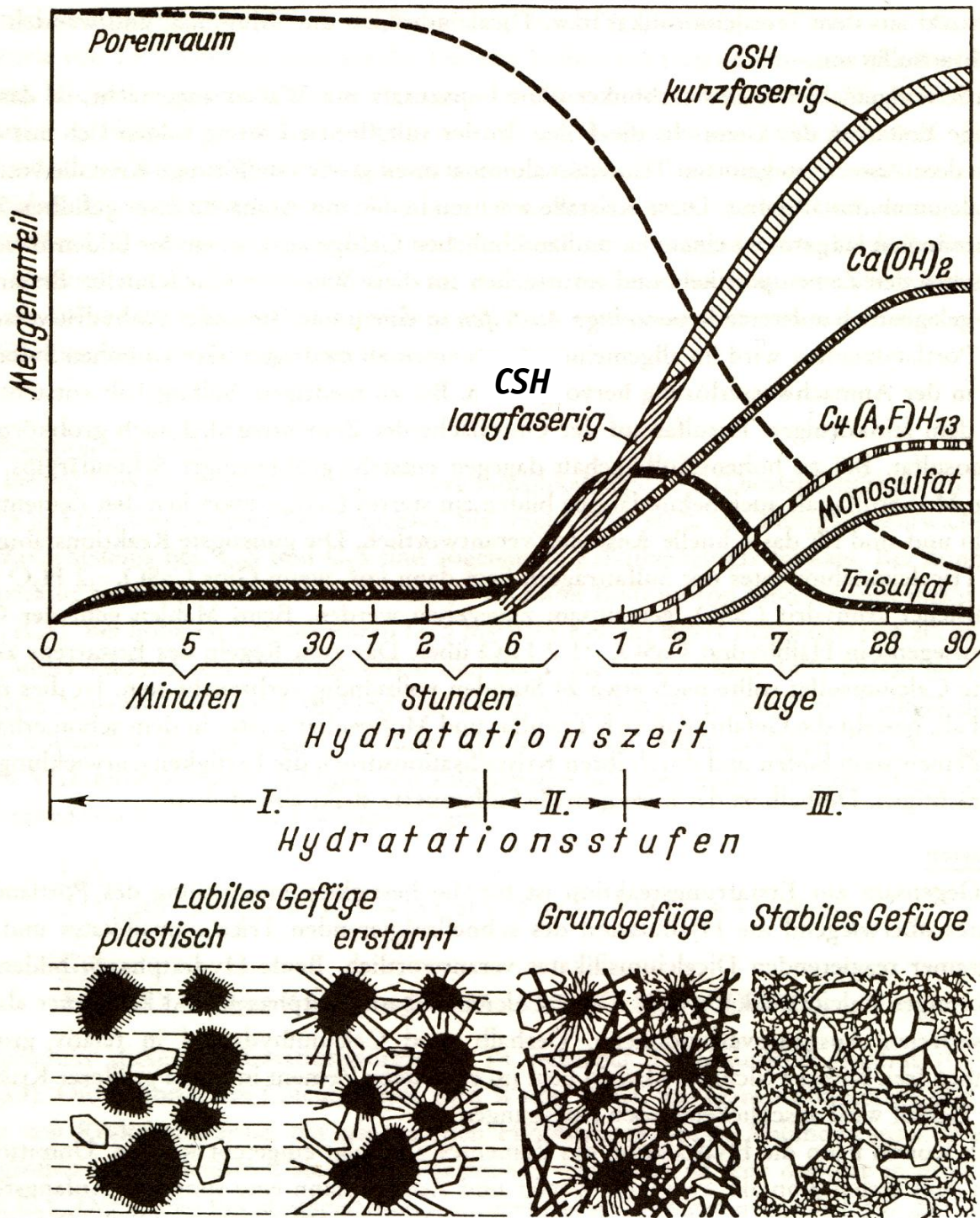
Bei niedrigem Sulfatgehalt wird Monosulfat gebildet:



Ettringithülle

Zutritt von H<sub>2</sub>O und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> beim Aufreißen

# Hydratphasen und Gefügeentwicklung des Zements (Locher, Richards, Sprung)



Ansteifen → Erstarrung → Erhärtung →  
verdichtbar

C<sub>3</sub>A  
C

Ruhe

C<sub>3</sub>S

C<sub>3</sub>S ...  
C<sub>2</sub>S ...

## Zusatzstoffe Hüttensand und Silicastaub (Microsilica, Nanosilica)

HS alkalische oder sulfatische Anregung der glasigen Bestandteile, die neben  $\text{SiO}_2$  hohen  $\text{CaO}$ -,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - und  $\text{MgO}$ -Gehalt aufweisen →

Erhärtung unter Bildung von C-S-H-Phasen → latent hydraulisch

MS besteht zu 80 ... 99% aus amorphem  $\text{SiO}_2$

glasige kugelähnliche Partikeln, mittlerer Korndurchmesser 0,1 - 0,2  $\mu\text{m}$  → ca. 50...100 mal kleiner als durchschnittliche Zementpartikeln

keine hydraulischen Eigenschaften, Wirkung als Füllstoff und Erhärtung durch Reaktion mit  $\text{Ca(OH)}_2$

$\text{SiO}_2 + \text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C-S-H}$  puzzolanische Reaktion / Puzzolan

weitere Puzzolane sind Trass und Ziegelmehl

- Gips

Gips ist die gebräuchliche Bezeichnung für  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$  → Dihydrat / DH

Als natürlicher Gipsstein oder technisches Produkt → REA-Gips und Chemiegips

$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$  entsteht durch thermische Entwässerung → Halbhydrat / HH

Je nach Entwässerungsbedingungen →  $\alpha$ -HH (makro-) oder  $\beta$ -HH (mikrokristallin)

Weitere Temperaturerhöhung führt zu  $\text{CaSO}_4$  → Anhydrit / A

je nach Brenntemperatur wird AIII ( $\alpha$ - und  $\beta$ -Form), AII und AI unterschieden

Baugipse enthalten mindestens 50 % Dehydratationsprodukte

Gipstypen im Bauwesen

Stuckgips ( $\beta$ -Gips)

besteht überwiegend aus  $\beta$ -HH, wenig AIII

Putzgips<sup>1)</sup> (Mehrphasengips) aus  $\beta$ -HH,  $\beta$ -AIII und AII

→  $\beta_D$  bis 10 N/mm<sup>2</sup>

Estrichgips, Anhydritbinder

AII →  $\beta_D$  bis 30 N/mm<sup>2</sup>

Modell- und Formengips

Hartformgips aus  $\alpha$ -HH

→  $\beta_D$  bis 50 N/mm<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> frühere Versteifung, länger verarbeitbar

## Bildung von CaSO<sub>4</sub>-Phasen (Henning, Knöfel, 2002)

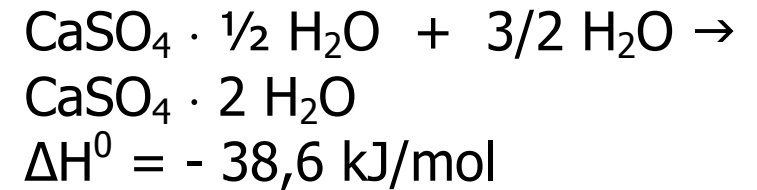
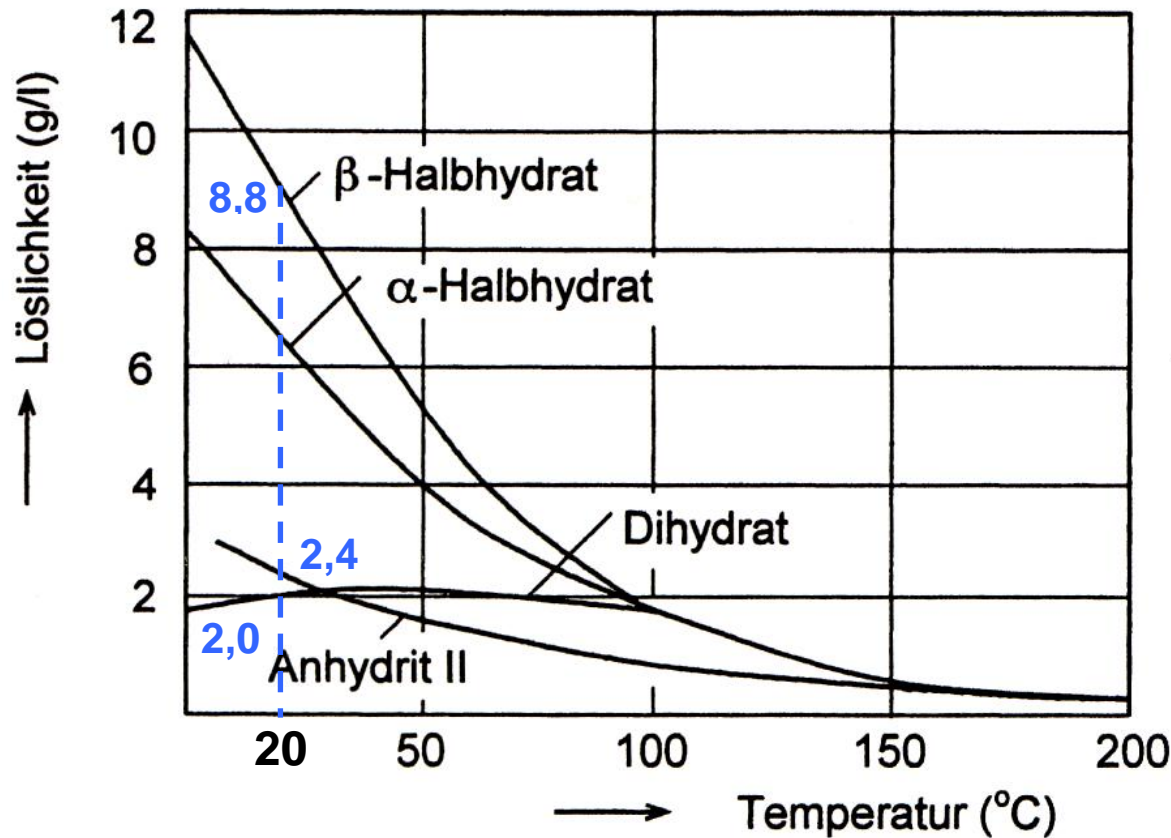
Phase	Temperatur <sup>1)</sup>	Vorgang /Bemerkungen
HH	120 - 180 °C	$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} + \frac{3}{2} \text{H}_2\text{O}$ beginnende Entwässerung bereits ab 40 °C α-HH: nasse Entwässerung (Autoklav, Dämpfer) β-HH: trockene Entwässerung (Drehrohr, Kocher)
AIII	> 180 °C	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ α-AIII: aus α-HH β-AIII: aus β-HH (löslicher Anhydrit)
AII	> 240 °C ↓ > 700 °C	$\text{CaSO}_4 (\text{AIII}) \rightarrow \text{CaSO}_4 (\text{AII})$ AII-s: schwer löslich AII-u: unlöslich (totgebrannter Gips) AII-E: Estrichgips (beginnende Bildung von CaO)
AI	> 1196 °C	$\text{CaSO}_4 (\text{AII}) \rightarrow \text{CaSO}_4 (\text{AI})$
CaO	> 1214 °C	$\text{CaSO}_4 (\text{AI}) \rightarrow \text{CaO} + \text{SO}_3$

<sup>1)</sup> grobe Orientierung

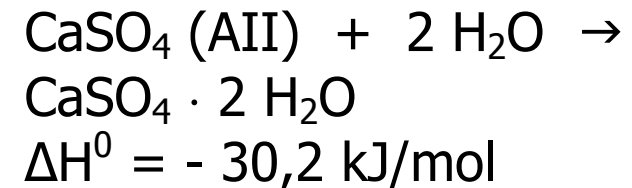


# Erhärtung von CaSO<sub>4</sub>-Phasen durch Kristallisation

Löslichkeit in Wasser (Benedix, 2011)

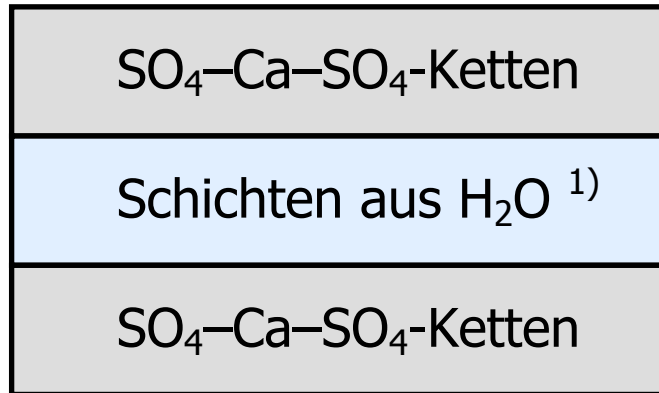


Lösung von HH und Kristallisation des schwerer löslichen DH, Verfilzung der Nadeln, geringe Volumenzunahme bis 1 %



langsame Hydratation → Hydratationsbeschleuniger (Anreger), Hydratation unvollständig  
Natürlicher Anhydrit AII → Volumenzunahme bis 60 %

## Struktur von $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$



<sup>1)</sup> Bindung über H-Brücken



## Anwendung von Gipsbaustoffen

- hohe Porosität bis 50 %
  - hohes Wassersaugvermögen
  - gute Feuchtigkeitsaufnahme und Abgabe (Speichervermögen für Wasserdampf)
  - schalldämmende und wärmeisolierende Eigenschaften
- wasserlöslich
  - Rückgang der Festigkeit und Haftfestigkeit bei Durchfeuchtung
  - problematisch für Außenbauteile und Feuchträume
  - Treibmineralbildung mit Zementbeton
- chemisch gebundenes Wasser
  - feuerhemmend durch Wasserabspaltung bei Hitzeeinwirkung (Temperaturerniedrigung)
- neutrale Reaktion
  - kein Korrosionsschutz für Bewehrungsstahl