



Cementhydration

Cement i Betong | Visby | Cementhydration | José Aguirre C.
2026.05.20



- 1. Hydratation**
Vad är hydratation?
- 2. Hydratation av klinkermineraler**
Vad bildas från klinker?
- 3. Tidsförlopp**
Värmeutveckling, bindetid, mm
- 4. Fysikaliska egenskaper**
Porstruktur, vattencementtal, mm
- 5. Tillsattsmaterial typ II (SCM)**
Pozzolanska och latent hydrauliska tillsattsmaterial



Hydratation

Kemiska definitionen

- Reaktion av ett ohydratiserat material med vatten som genererar ett nytt material, en hydrat
 - $\text{Fri CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$

Cement definitionen

- Cement är ett hydrauliskt bindemedel, dvs. ett finmalet oorganiskt material som vid blandning med vatten bildar en pasta som binder och hårdnar på grund av hydratation och som efter hårdnandet behåller sin hållfasthet och stabilitet också i vatten (SS-EN 197-1:2011)



Smeaton's Tower, 1846



Cementkemi

Kemiska förkortningar

- $\text{CaO} = \text{C}$
- $\text{SiO}_2 = \text{S}$
- $\text{H}_2\text{O} = \text{H}$
- $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$
- $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$
- $\text{H}_2\text{O} = \text{H}$
- $\text{SO}_3 = \bar{\text{S}}$
- $\text{CO}_2 = \bar{\text{C}}$

Namn	Förkortning	Kemisk formel
Alit	C_3S	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$
Belit	C_2S	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$
Aluminat	C_3A	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$
Ferrit	C_4AF	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$
kalciumsulfatdihydrat / gips	$\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$	$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$
kalciumkarbonat	$\text{C}\bar{\text{C}}$	CaCO_3
Kalciumsilikathydrat	C-S-H	$(\text{CaO})_x\cdot\text{SiO}_2\cdot(\text{H}_2\text{O})_y$
Portlandit	CH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Ettringit / AFt	$\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32}$	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$
Monosulfat / AFm	$\text{C}_3\text{A}\bar{\text{S}}\text{H}_{11}$	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$



Ohydratiserat material

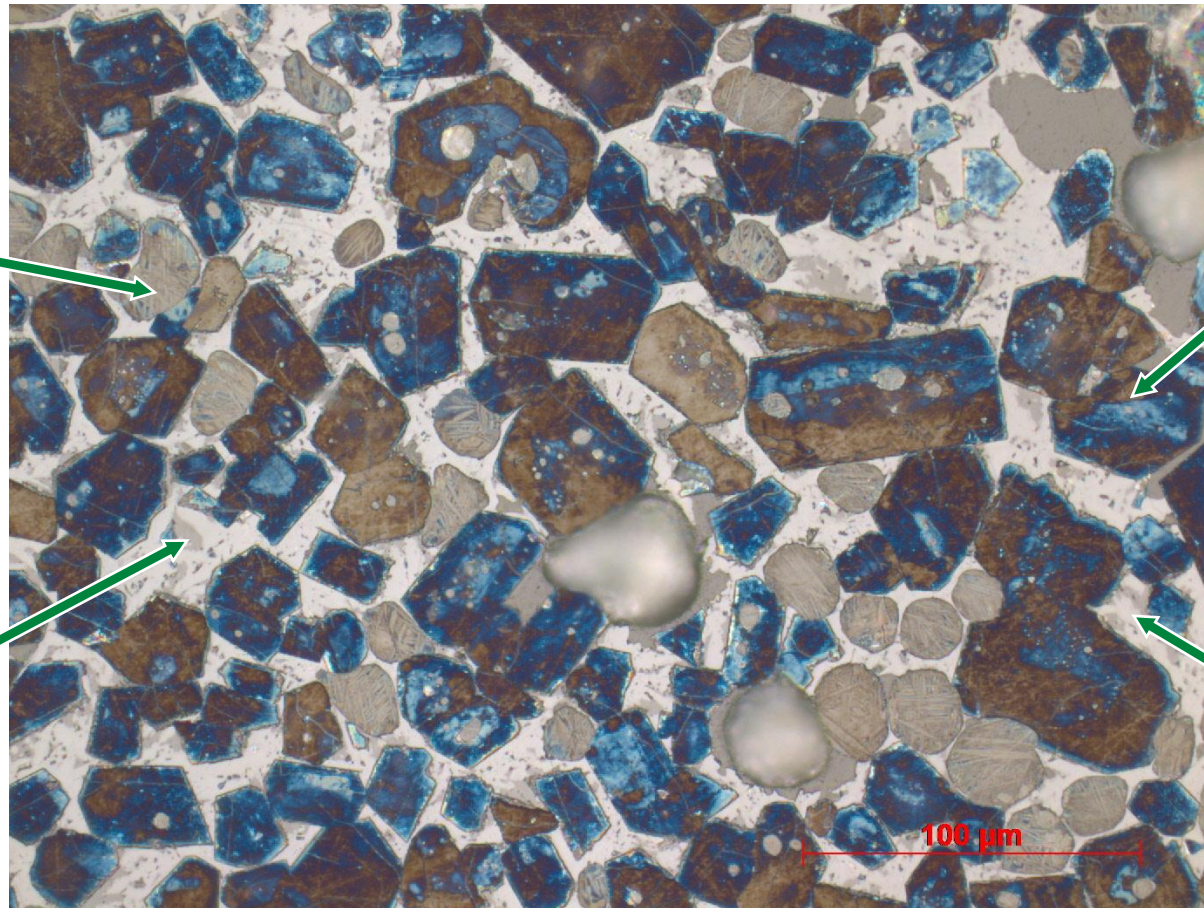
Klinker

Belit / C_2S

Alit / C_3S

Aluminat / C_3A

Ferrit / C_4AF



Degerhamn Ugn 3



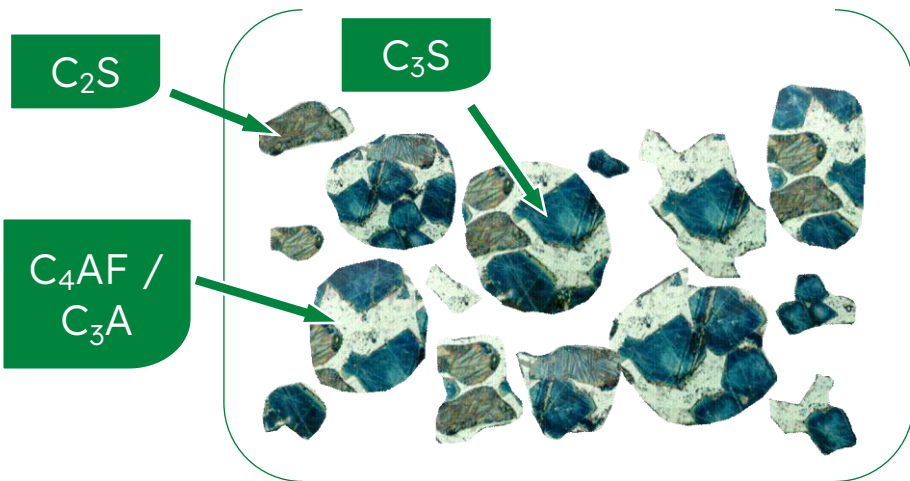
Ohydratiserat material

Cementets beståndsdelar

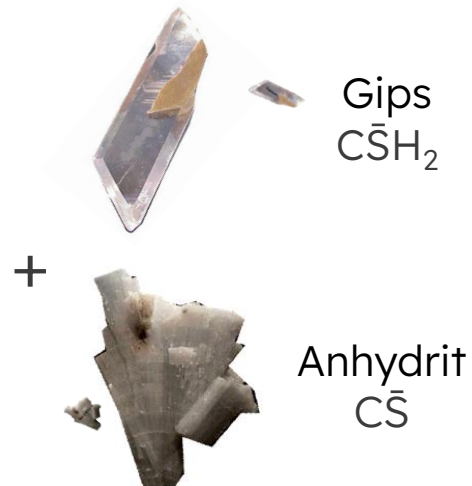
- Klinker + Sulfat + Tillsattsmaterial + Filler



Cementklinker



Sulfat



Tillsattsmaterial typ II



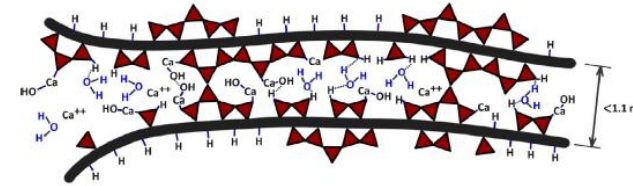
Tillsattsfiller



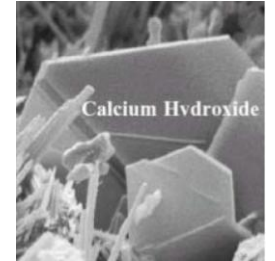
Hydratation - Silikaterna

Silikaternas reaktion med vatten

- $C_3S + 5,3 H \rightarrow C_{1,7}\text{-S-H}_4 + 1.3CH$
- $C_2S + 4,3 H \rightarrow C_{1,7}\text{-S-H}_4 + 0.3CH$

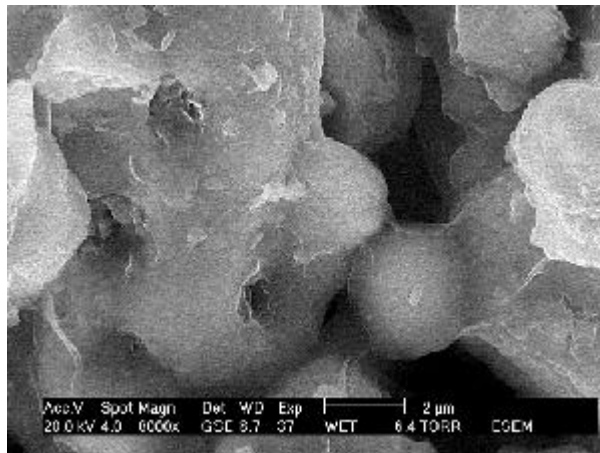


C-S-H - Kalcium-silikat-hydrat

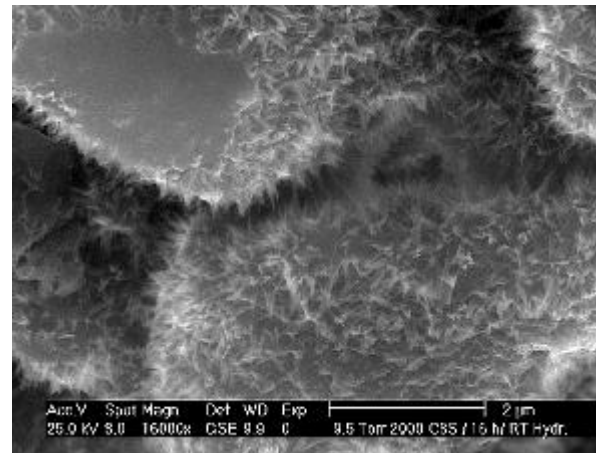


Portlandit - CH

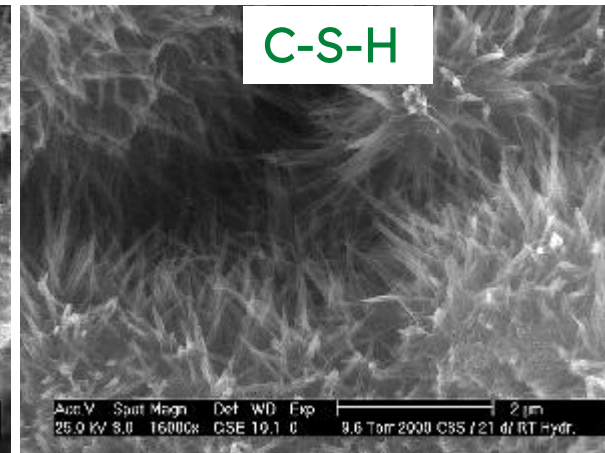
Högre hållfasthet →



5 min: Ett hölje av gelformig silikathydrat



16 h: Nålförmiga hydrater med längd upp till 400 nm



21 dygn: Mer nålförmiga hydrater (upp till 900 nm)



Hydratation - Aluminaterna

Hydratation av aluminat (ferrit) faser

Sulfatinnehåll ↑

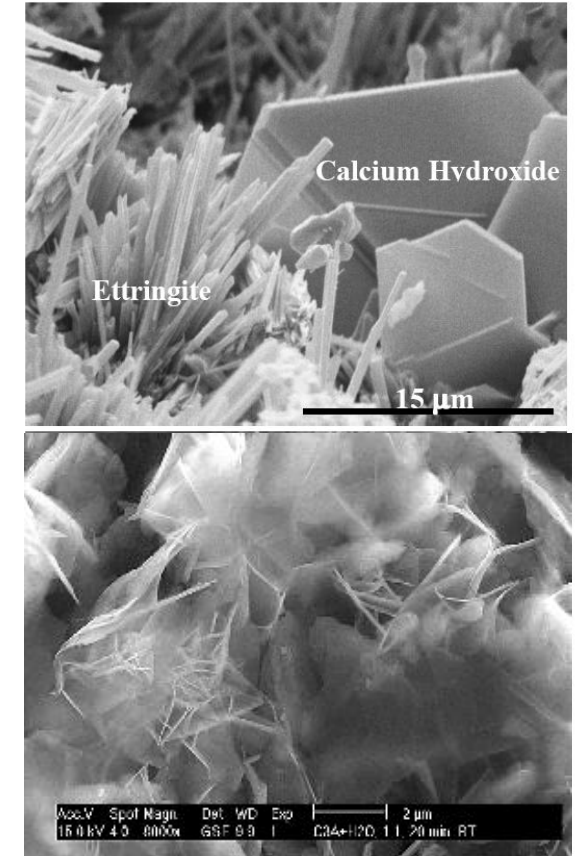
- $C_3A + 3\bar{C}\bar{S}H_2 + 26H \rightarrow C_6A\bar{S}_3H_{32}$ (**ettringit / AFt**)
- $2C_3A + C_6A\bar{S}_3H_{32} + 4H \rightarrow 3C_3A\bar{S}H_{12}$ (**monosulfat / AFm**)
- $C_3A + CH + 11H \rightarrow C_4AH_{12}$

Kalkfiller

- $C_3A + C\bar{C} + 11H \rightarrow 2C_4A\bar{C}H_{11}$ (**monokarbonat / AFm**)
- $C_3A + 0.5C\bar{C} + 11H \rightarrow 2C_4A\bar{C}_{0.5}H_{11}$ (**hemikarbonat / AFm**)

AFt: Alumina Ferric trisulfate

AFm: Alumina Ferric monosulfate



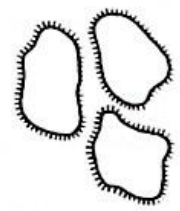
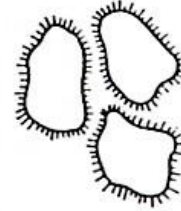
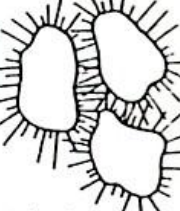
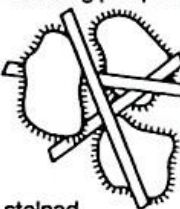
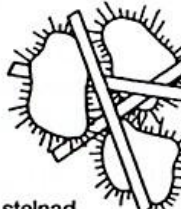
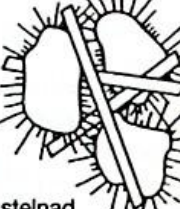
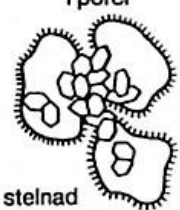
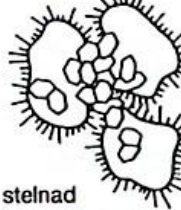

Hydratation – Inverkan av SO_3

Falsk bindning

- Överreaktivitet hos sulfat i förhållande till aluminaten (C_3A)
- Låter sig lösas upp vid fortsatt blandning

Snabbbindning

- Kan inträffa pga. överreaktivitet hos aluminaten i förhållande till sulfaten
- Bindningen låter sig inte upphävas utan är permanent

Sulfat i lösning C_3A :s reaktivitet	Hydratationstid		
	10 min	1 h	3 h
Balans	Ettringitskal  plastisk	 plastisk	 stelnad
För hög	Ettringitskal Utfäld gips i porer  stelnad	 stelnad	 stelnad
För låg	Ettringitskal CAH och monosulfat i porer  stelnad	 stelnad	 stelnad



Sen ettringit-bildning (DEF)

Vid sulfat-attack



- (Aluminat + Sulfat + Vatten → Ettringit) → Monosulfat

| Normal process - Ettringit övergår till monosulfat |

Vid hög temperatur

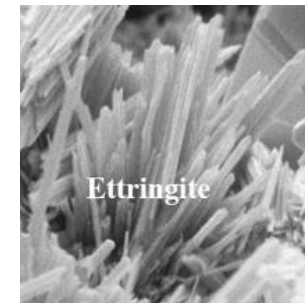


- Aluminat + Sulfat + Vatten → Monosulfat + Sulfat

| Ettringit bildas inte vid temperaturer över 60 °C |
eller vid hög fukthalt

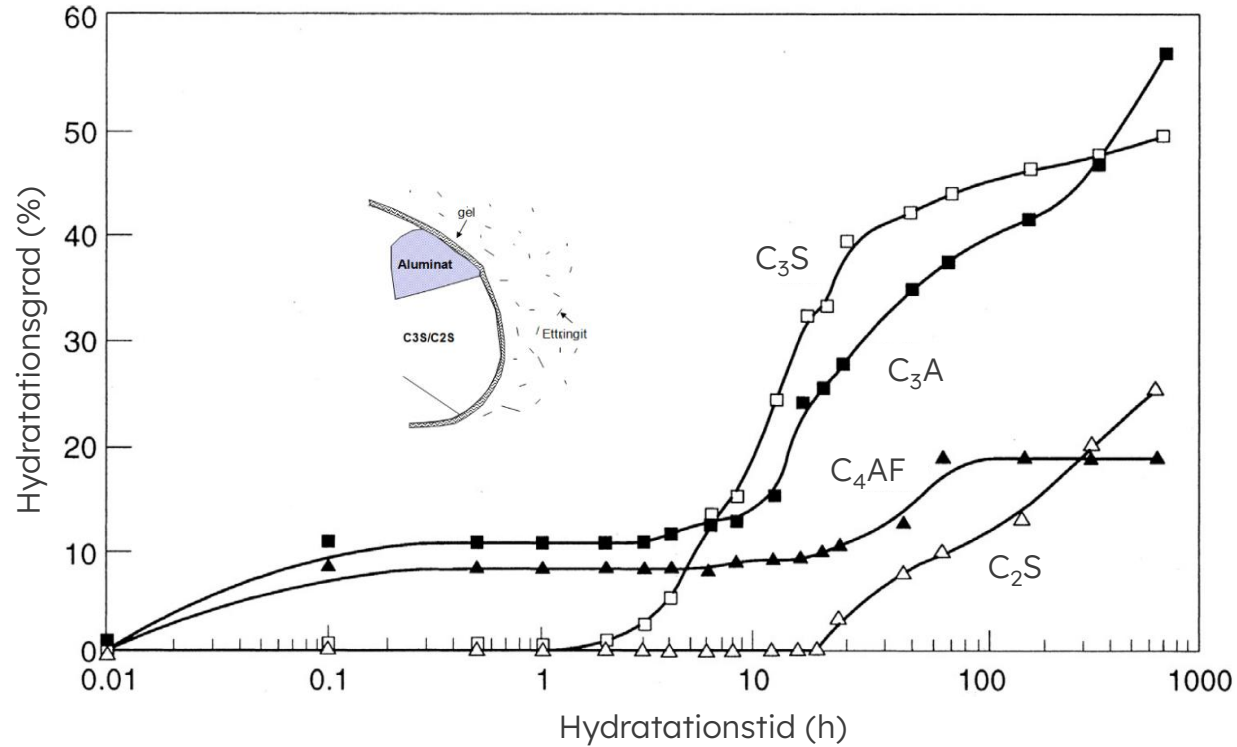
Sen/sekundär Ettringit-AFt

- AFt behöver plats att växa vid kristallisering
- Kristallisering av AFt genererar inre spänningar i betongen som kan leda till sprickor

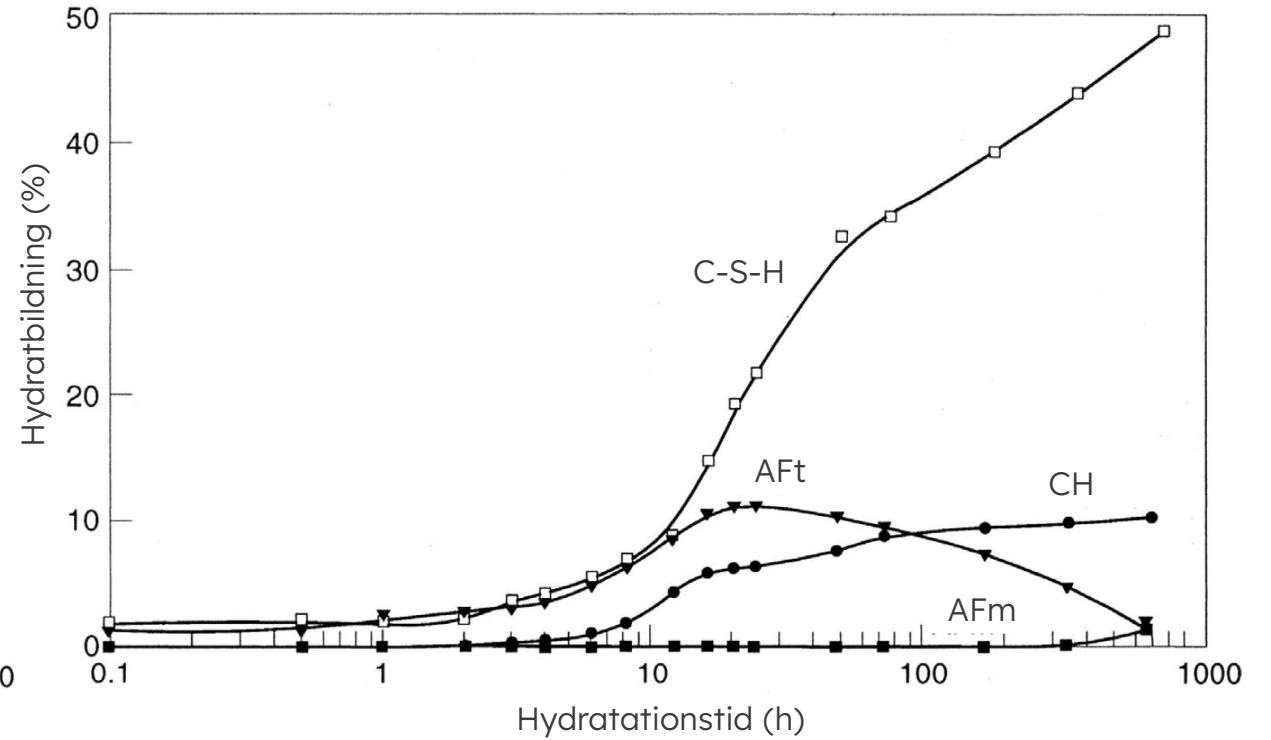


Hydratationskinetik

Klinkermineraler

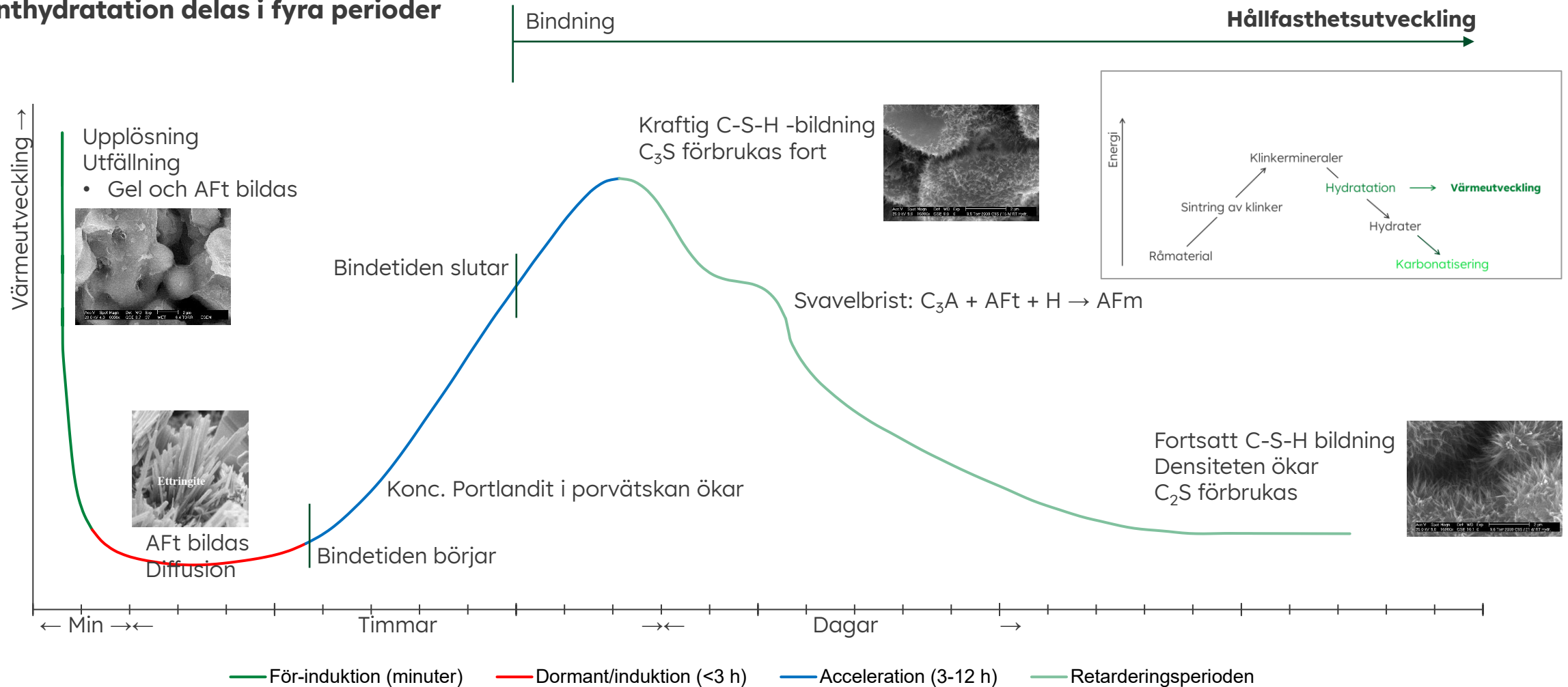


Hydrater



Hydratation - Tidsförlopp

Cemthydratation delas i fyra perioder



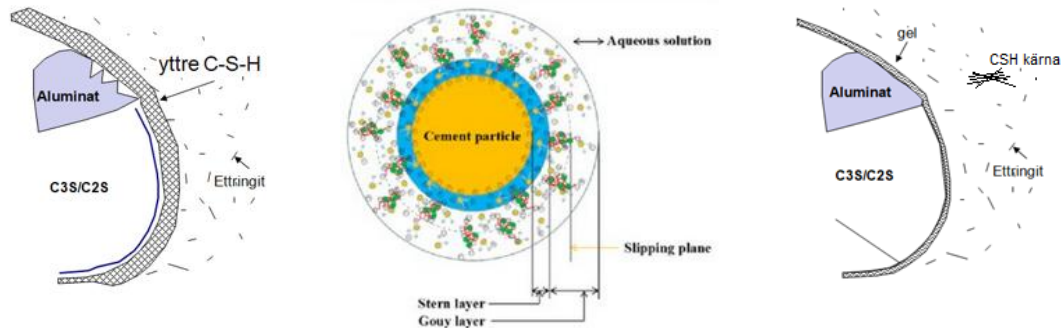
Processer under dormantperioden

1. Bildning av ett gellager

- Gellager med låg diffusion
- Elektriskt dubbellager

2. Gelvattnets sammansättning ändras

- CH fälls ut i vätskan
- CH löser sig i vätskan utan att fällas ut initialt
- Ett ”andrastegs” C-S-H bildas långsamt i vätskan



3. Skyddslagret sönderfaller

- Fäsförändringar
- Osmotisk tryckskillnad
- Elektriskt dubbellager bryts upp
- CH i gelvattnet uppnår kritisk koncentration
- Andrastegs C-S-H uppnår kritisk storlek

4. Hydratation fortsätter

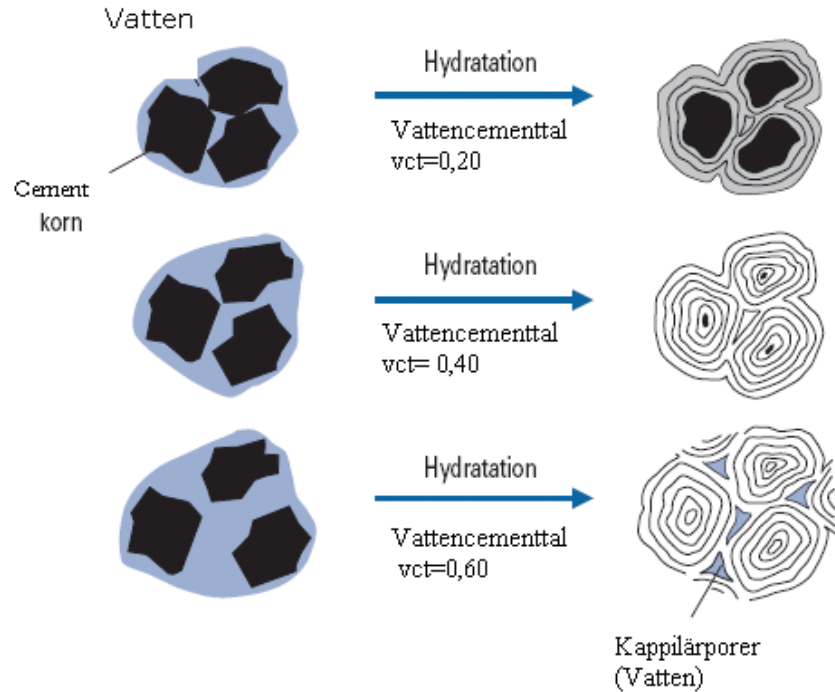
- C_3S förbrukas fort → Kraftig C-S-H bildning → Bindning



Porstruktur

Vattencementtal, vct

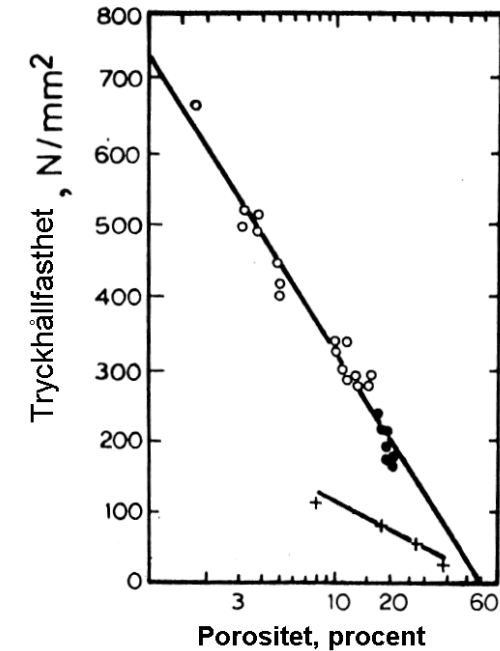
- Hydratationsgrad – andel cement som har reagerat
- Reologi



Samband mellan porositet och hållfasthet

- Högre porositet ger en minskad densitet och styrka
- Porositeten påverkar materialets beständighet

Hållfasthet hos härdad pasta



Cementpastans sammansättning

100% Hydratationsgrad vid olika vct

Ohydratiserat cement

- C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF , $CaSO_4 \cdot (H_2O)_x$
- Cementgel
- C-S-H, Portlandit, Aft, Afm

Gelvatten

- Adsorberad H_2O i små gelporerna

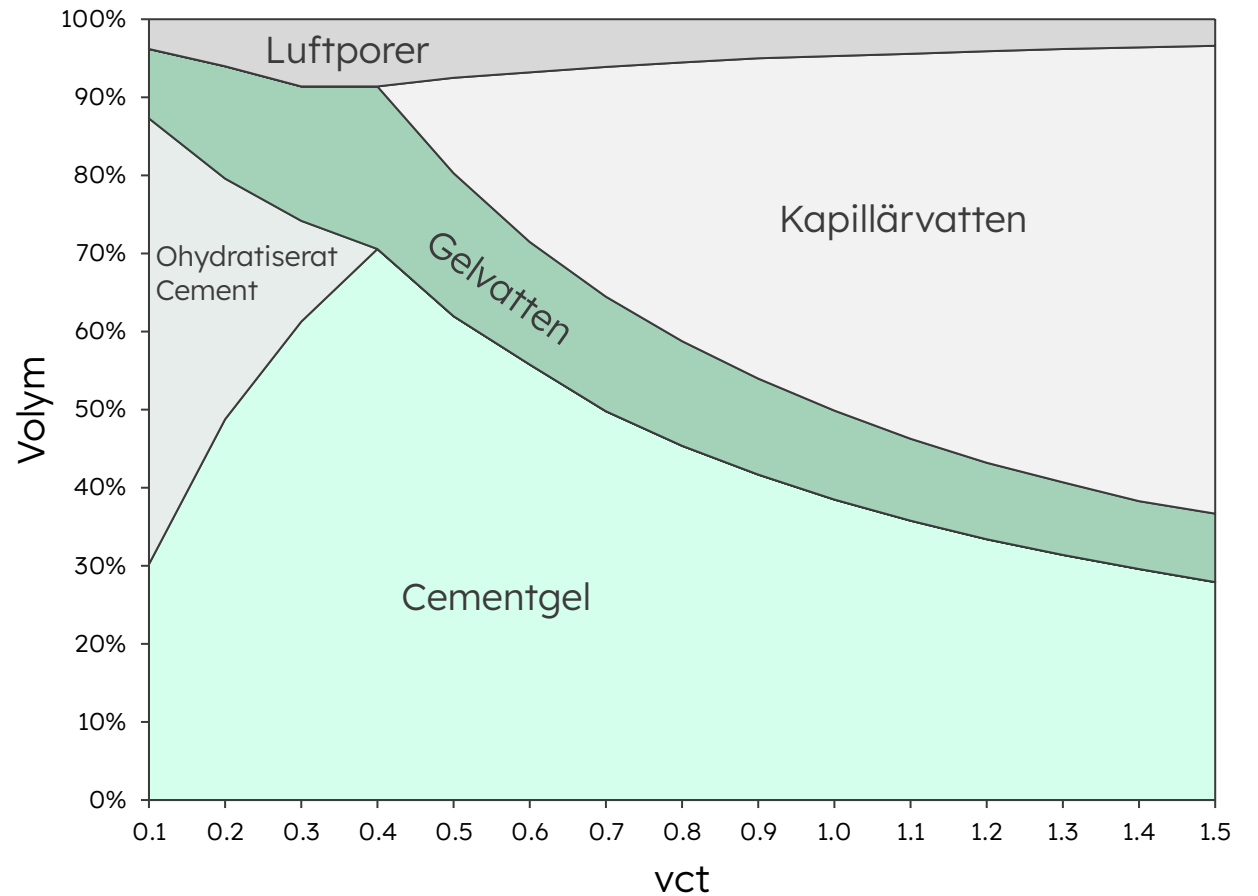
Kapillärvatten

- H_2O i större kapillärporer

Luftporer

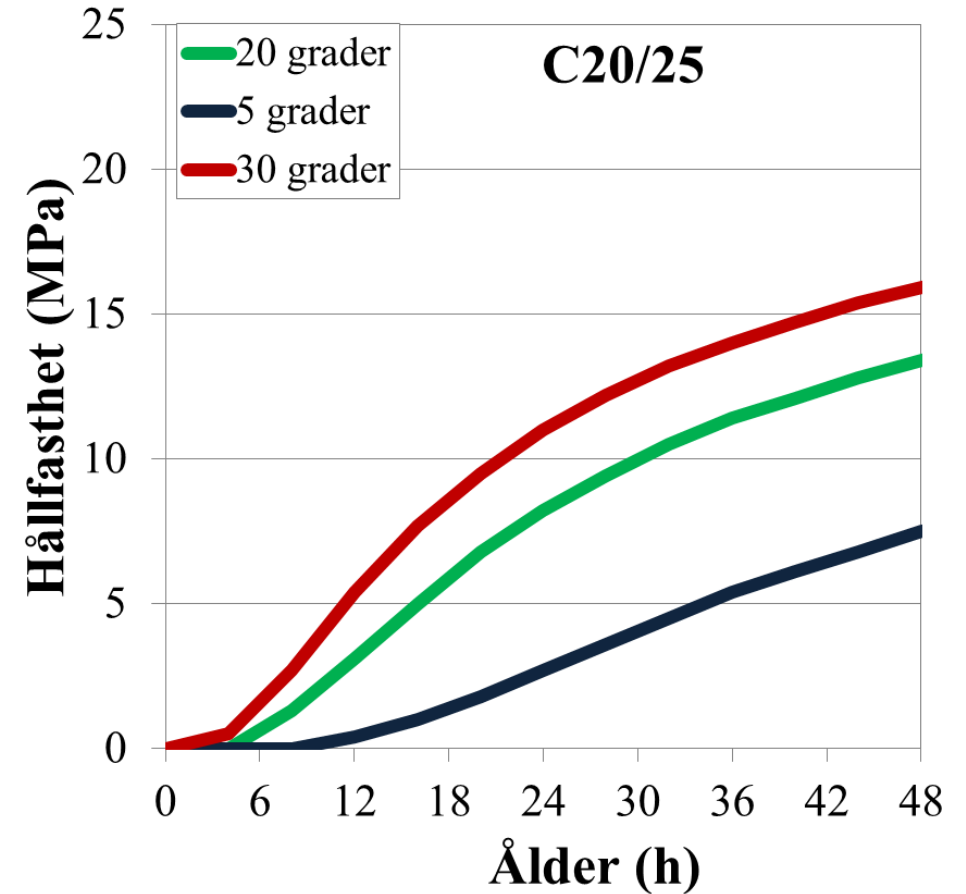
- Hålrum fyllda med luft

Cementpastans sammansättning vid 100% hydrataation



Temperaturens inverkan

- Hydratationsgraden ökar med temperaturen, särskilt i de tidiga stadierna, men effekten minskar med tiden
- Vid högre temperaturer bildas C-S-H med högre CaO/SiO₂-kvot
- Sulfatkoncentrationer minskar, vilket leder till mer AFm och mindre Aft
- En högre temperatur kan leda till en grövre porstruktur och högre porositet, vilket kan minska hållfastheten
- Snabb uppvärmning kan orsaka sprickor på grund av termisk expansion av porvattnet

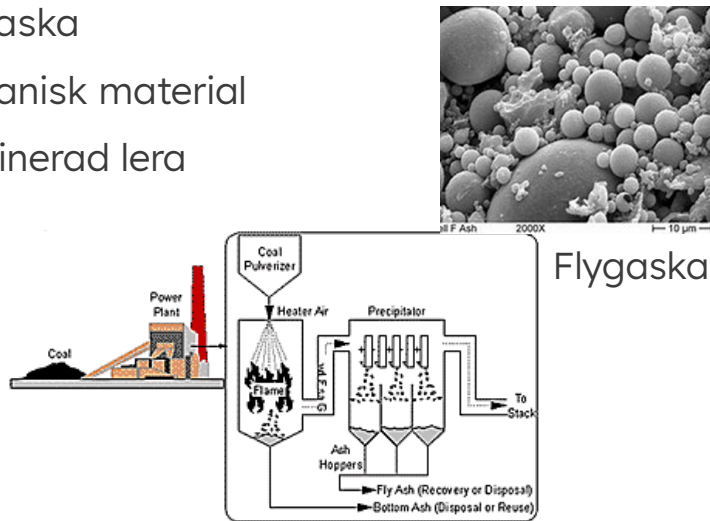


Tillsattsmaterial typ II

Supplementary cementitious materials (SCM)

Puzzolan material

- Kisel eller aluminium-kisel haltig
- Reagerar tillsammans med CH och vatten
- Bildar C-S-H och andra hydratationsprodukter
- Exempel på material:
 - Flygaska
 - Vulkanisk material
 - Kalcinerad lera



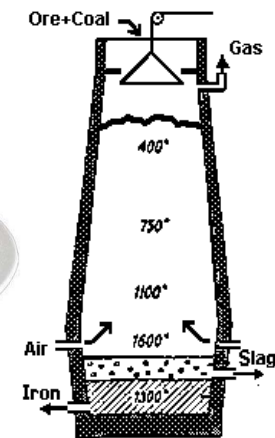
Flygaska

Latent hydrauliska material

- Aluminium-kisel haltig
- Behöver en alkalisk aktivator, som kan vara en annan än CH
- Bildar C-S-H och andra hydratationsprodukter
- Exempel på material:
 - Granulerad masugnsslagg (GGBS)



Slagg (GGBS)



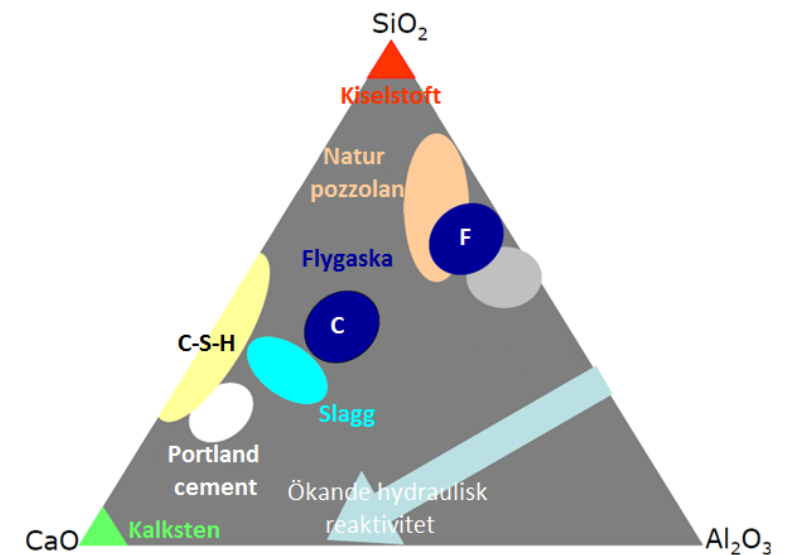
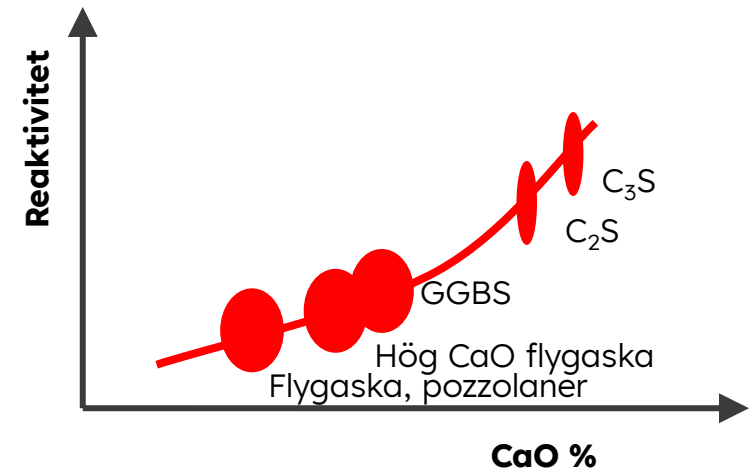
Tillsattsmaterial typ II - Hydratation

Hydratation av tillsattsmaterial typ II

- Hydratation av cement (**hydraulisk reaktion**)
 $\text{Klinker} + \text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2 + \text{H} \rightarrow \text{C-S-H} + \text{CH} + \text{AFt} + \text{AFm}$
- Hydratation av flygaska i cement (**pozzolansk reaktion**)
 $\text{S-A} + \text{CH} + \text{H} \rightarrow \text{C-S-H}$
- Hydratation av slagg i cement (**latent-hydraulisk reaktion**)
 $\text{S-A-C} + \text{H} \rightarrow \text{C-S-H}$
 $\rightarrow \text{C-A-S-H} / \text{C-A-H}$ (ökar betongens bindningskapacitet)

Amorfa material

- Oordnad och ostabil atomstruktur \rightarrow mottagliga för kemiska reaktioner
 - Flygaska och vulkanaska: 50-60% amorf
 - Slagg (GGBS): >85% amorf
- Högre amorf halt \rightarrow Oftast reaktiva

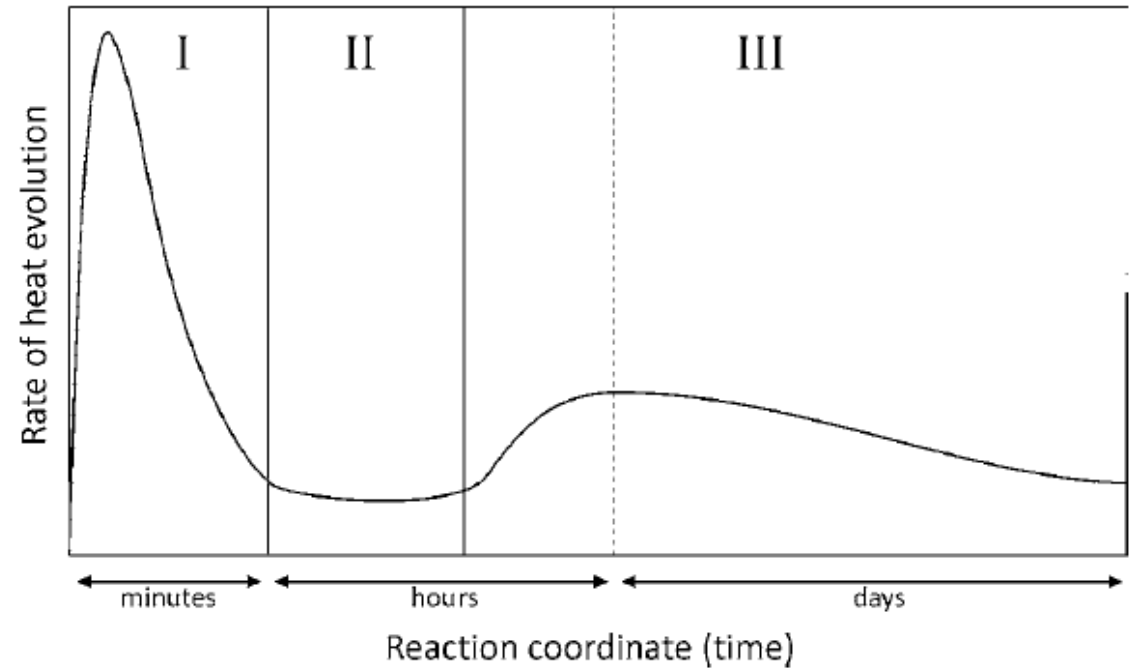


Tillsattsmaterial typ II - Hydratation

Snellings, 2012

- **I: Upplösningsperiod**
 - pH och Kinetik
 - Upplösning av silika och silikater
- **II: Induktionsperiod**
 - Teori 1: Bildning av amorf lager av Si och Al på SCM ytan som bromsar. Si och Al binder Ca långsamt tills att C-S-H och C-A-H fälls ut.
 - Teori 2: metastabil C-S-H och C-A-H bildas på ytan
- **III: Accelerationsperiod**
 - Kortlivad acceleration som bromsas av bland annat SCM partiklarnas morfologi, storlek, porstruktur hos cementpastan och tillgång på vatten

System med $\text{Ca}(\text{OH})_2$ och amorf silika



Bonus - Syntetisk SCM från återvunnet betong

Komponent F

- Innehåller S-A-gel

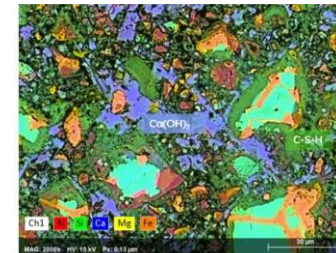
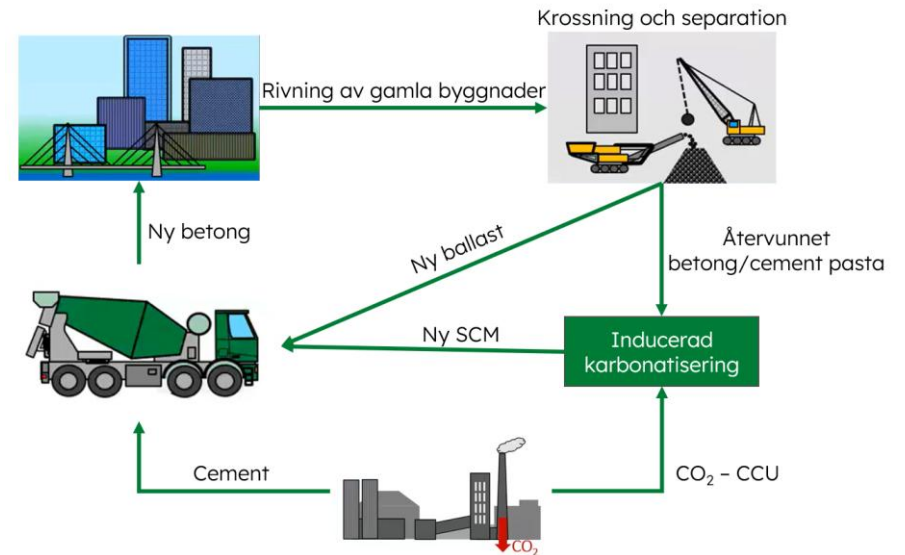
Förbehandling

- Krossad och siktad betong, <4 mm
- Klassificerade partiklar
- 30 % hydratiserat cement pasta
- Spår av klinker mineraler

Aktivering

- $C-S-H + CH + AFt + AFm + \bar{C} \rightarrow C\bar{C} + S-A-gel + H_2O$

Pozzolansk aktivitet



Frågestund

