



LUNDS
UNIVERSITET

Strukturutveckling och fuktbindning i cementbundna material där delar av Portlandcementet ersatts med flygaska

OSKAR LINDEROTH



Projektet

Doktorand:

Oskar Linderoth Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Universitet

Handledare:

Peter Johansson Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Universitet

Lars Wadsö Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Universitet

Katja Fridh Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Universitet

Tidsplan:

2015-10 – 2020-10

Finansiering:



SKANSKA

CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group



LUNDS
UNIVERSITET

Mål med projektet

Fördjupa kunskapen om hur porstrukturen utvecklas och hur vatten binds – kemiskt och fysikaliskt – i cementbundna material med flygaskainblandade bindemedel.

Användbarhet:

- Kunna prediktera *självuttorkningen* hos betongkonstruktioner
- Bedöma risken för fuktberoende nedbrytning
- Kunskap till framtida beständighetsmodeller



Projektstruktur

Bindemedelssammansättning och härdningstemperatur



Hydratationen (reaktions hastighet, kemiskt bundet vatten och fasfördelning)



Porstruktur (fysikaliskt bundet vatten, porositet och porstorleksfördelning)



Fuktegenskaper (självuttorkning, fukttransport)



Material

Cementpasta och bruksprov med kvartssand

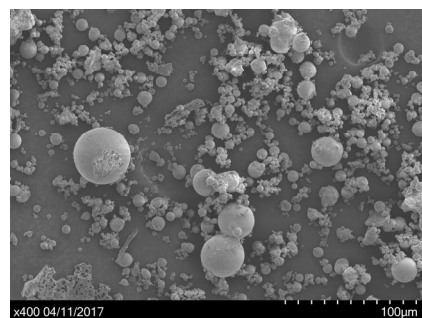
- Portlandcement (OPC) eller OPC med flygaskaersättning (10-70 vikts-%)
- Härdningstemperatur: 5, 20 eller 35 °C
- Vatten-bindemedelstal (w/b) 0.45



LUNDS
UNIVERSITET

Flygaska (FA)

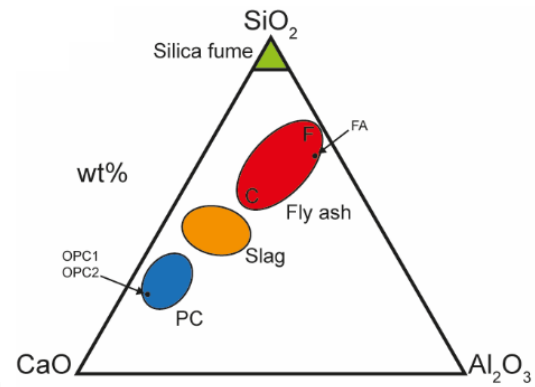
- Restprodukt från kolkraftverk
- Puzzolan:
 - Liten förmåga till spontan reaktion med vatten
 - Beroende av OPC för sin egen reaktion
 - Kräver högt pH (>13)
- Signifikant reaktion först efter >14 dygn
ex. Berodier, Scrivener (2015)
- Delvis inert – kan inte reagera till samma grad som ex. OPC



LUNDS
UNIVERSITET

Kemisk sammansättning – OPC, FA

- **OPC:**
 - Klinker + vatten₁ → C-S-H_{OPC} + *Portlandit*_{OPC}
 - Start: vid kontakt med vatten
- **FA:**
 - *Portlandit*_{OPC} + SiO_{FA} + vatten₂ → C-S-H_{FA}
 - Start: >14 dygn (högt pH, Portlandit)
- FA använder till stor del redan bundet vatten
- Betydande skillnader mellan slagg, flygaska och silika



LUNDS
UNIVERSITET

Vatten i cementbundna material

Blandningsvattnet kommer antingen...

- Bindas kemiskt i de hydratiserade faserna (C-S-H, Portlandit osv)
- Bindas fysikaliskt i porstrukturen (utrymmena mellan de hydratiserade faserna)

...eller avdunsta till omgivande klimat



LUNDS
UNIVERSITET

Vatten i cementbundna material

Blandningsvattnet kommer antingen...

- Bindas **kemiskt** i de hydratiserade faserna (C-S-H, Portlandit osv)
- Bindas **fysikaliskt** i porstrukturen (utrymna mellan de hydratiserade faserna)

...eller avdunsta till omgivande klimat



LUNDS
UNIVERSITET

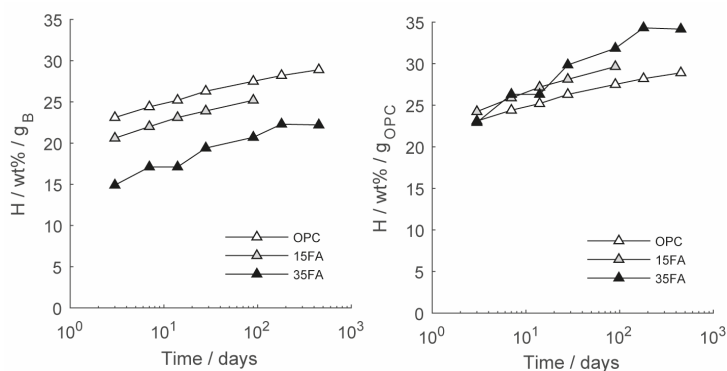
Kemiskt bundet vatten

Mätning:

- Härdning vid 20°C
- 3 dygn → 15 mån

Resultat:

- Minskar med ökad FA-ersättning
- Per gram OPC (högra figuren):
 - >14 dygn FA bidrar till den kemiska bindningen



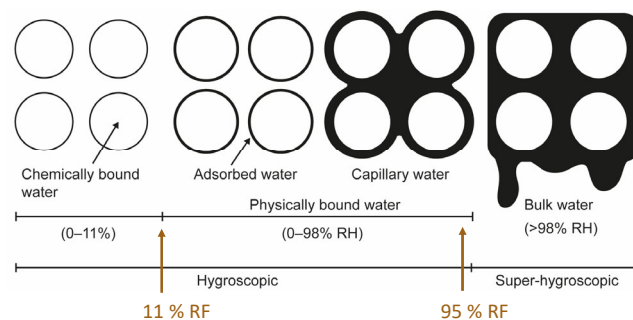
De hydrat som binder vatten kemiskt bildar tillsammans materialets struktur och formar dess porstruktur.



LUNDS
UNIVERSITET

Fysikaliskt bundet vatten

Vatten som inte binds kemiskt i hydrat binds fysikaliskt i materialets porer.



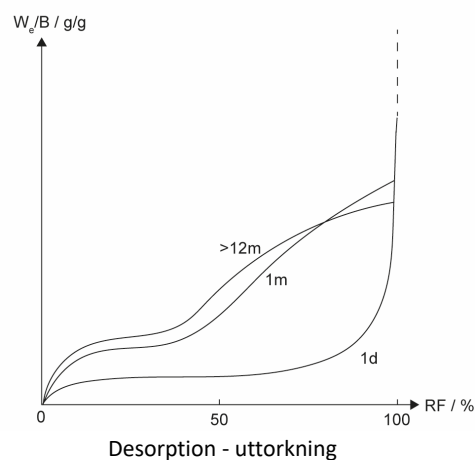
LUNDS
UNIVERSITET

Fysikaliskt bundet vatten

- Beskrivs ofta med en *Sorptionsisoterm*.
- Fysikaliskt bundet vatten (W_e) som funktion av den relativa fuktigheten (RF).

RF	Porositet	Porstorlek
>90%	Kapillärporer	>10 nm
90–80%	"Inter-hydrate spaces"	8–10 nm
80–50%	Stora gel porer	3–8 nm
50–25%	Små gel porer	1–3 nm
25–0%	"Inter-layer water"	<1 nm

Cementreaktionen stannar i princip när RF <80% (dvs. utan vattenfyllda kapillärporer).



LUNDS
UNIVERSITET

Desorption – OPC, 15FA

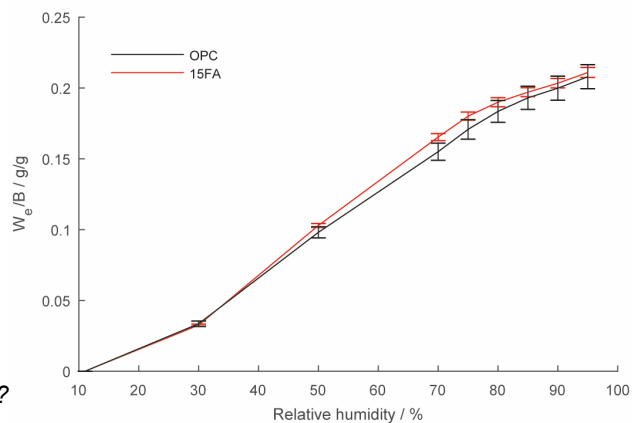
Mätning:

- Efter ca 15 mån i 20°C.
- W_e per gram bindemedel (B)
- 3 replikat

Resultat:

- 15FA mer porös (ej statistiskt signifikant)
- Liknande porstorleksfördelning

Vad säger detta om självuttorkningen?



LUNDS
UNIVERSITET

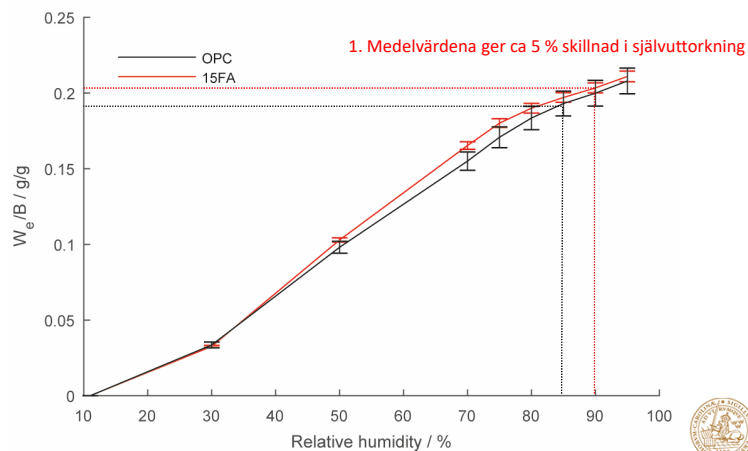
Desorption – OPC, 15FA

Kan vi räkna på självuttorkningen?

- Antar OPC – 85% RF
- 15FA binder ca 8-10% mindre vatten kemiskt

→ 15FA ca 90% RF

Men, signifikant spridning mellan replikat...



LUNDS
UNIVERSITET

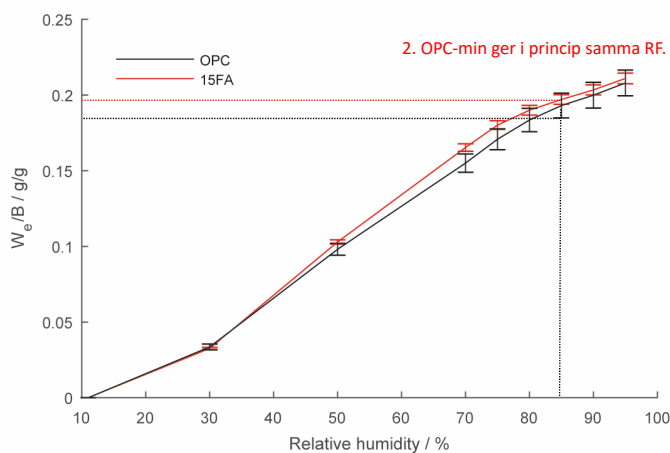
Desorption – OPC, 15FA

Kan vi räkna på självuttorkningen?

- Antar OPC – 85% RF
- 15FA binder ca 8-10% mindre vatten kemiskt

→ 15FA ca 85% RF

Men, signifikant spridning mellan replikat...



Desorption – OPC, 15FA

Kan vi räkna ut självuttorkningen?

Svårt att utifrån ett fåtal observationer av kemiskt och fysikaliskt bundet vatten göra noggranna beräkningar av självuttorkningen.

För bättre noggrannhet krävs:

- Fler replikat
- Validering mot ex. mätningar med RF-givare

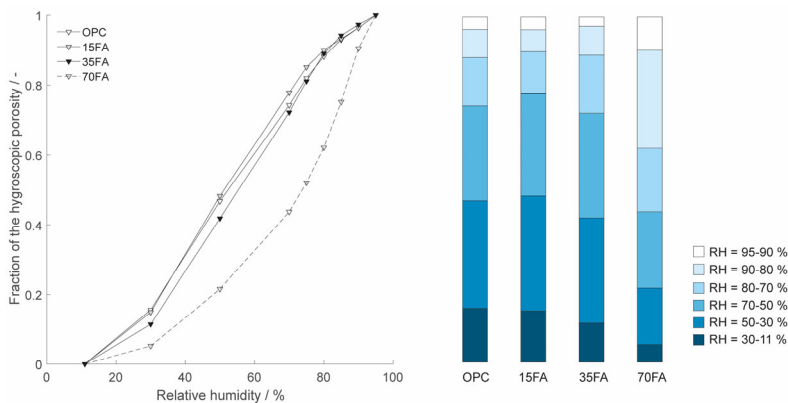
Desorption - porstorleksfördelning

Mätning:

- 15-16 mån härdning vid 20°C
- Normaliserat till fukthalten vid 95% RH.

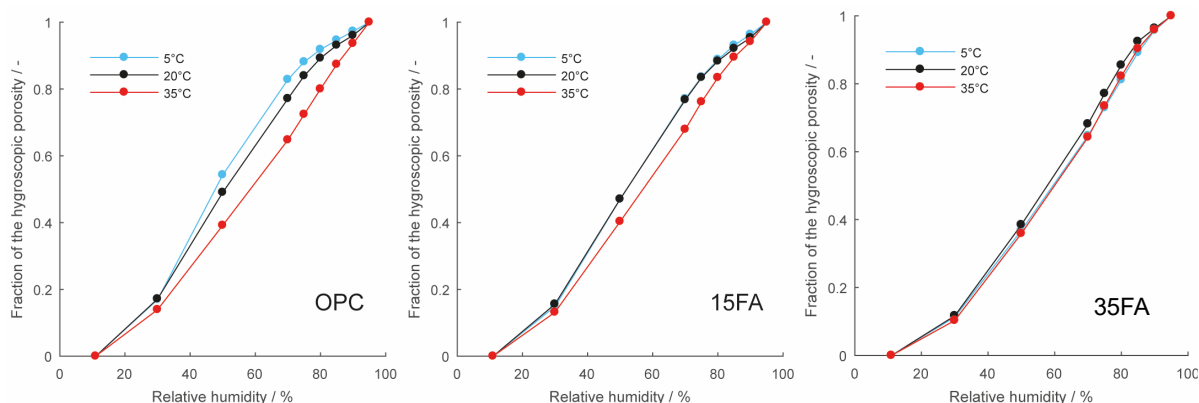
Resultat:

- OPC, 15FA, 35FA – likartad porstorleksfördelning.
- 70FA – helt annan struktur



LUNDS
UNIVERSITET

Desorption – olika härdningstemperaturer



Mätning:

Ökad inblandning av flygaska – 6 månaders härdning i 5, 20 eller 35 °C



LUNDS
UNIVERSITET

Diffusionsuttorkning

- Materialets möjlighet till uttorkning utöver självuttorkning.
- Inte kvantifierbar från enbart *fysikalisk* och *kemisk* bindning av fukt.

För att kvantifiera:

- Hur sammanhängande är porstrukturen?
- Hur "slingrig" är porstrukturen?
- ...eller mätning av **fuktransportkoefficienter**

Data för fukttransport i material med FA-inblandning saknas. Men mätningar för att ta fram sådan data pågår just nu inom detta projektet!



Sammanfattning

Ökad ersättning av OPC med FA ger bland annat:

- Mindre kemiskt bundet vatten
- Mer fysikaliskt bundet vatten (*ett mer poröst material*)
- För välhårdade prov; en likartad porstorleksfördelning
- Förändrad temperaturkänslighet
- En minskad förmåga till självuttorkning (*vilken är helt dominerande i grova konstruktioner*)



Stort tack!



LUNDS
UNIVERSITET

Desorption – olika härdningstemperaturer

Mätning:

- 6 mån härdning vid 5, 20 eller 35°C
- Normaliserat till fukthalten vid 95% RH.

Resultat:

- OPC: låg temperatur – finare struktur
- Effekten ändras med inblandning av FA
- FA reagerar mycket långsamt vid låg temperatur

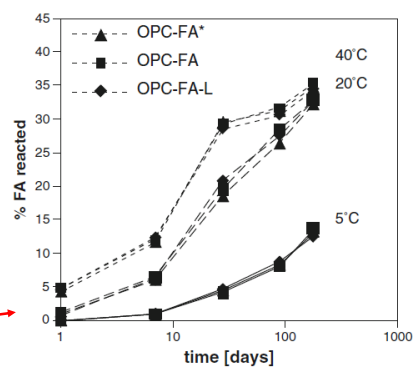


Fig. 3 FA reacted at the different curing temperatures tested

De Weerd et al. (2012)

Korrelation med kemisk bindning av vatten, densitet och hållfasthet!

Desorption – olika härdningstemperaturer

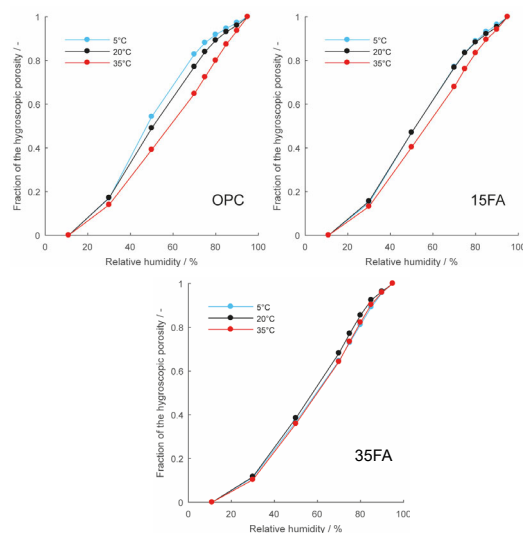
Mätning:

- 6 mån härdning vid 5, 20 eller 35°C
- Normaliserat till fukthalten vid 95% RH.

Resultat:

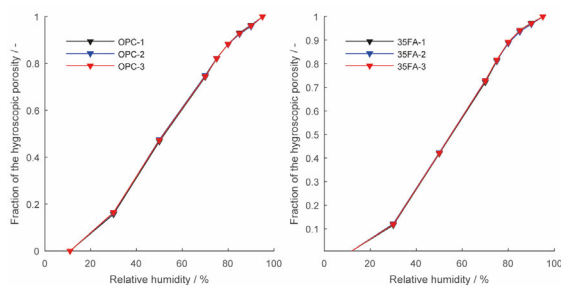
- OPC: låg temperatur – finare struktur
- Effekten ändras med inblandning av FA
- FA reagerar mycket långsamt vid låg temperatur

Korrelation med kemisk bindning av vatten, densitet och hållfasthet!



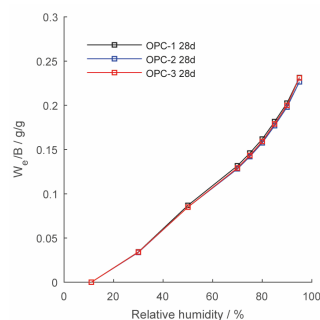
LUNDS
UNIVERSITET

Repeatability of DVS



15-16 month old 1st des. (3 replicates, 3 diff DVS-instruments)

OPC 28 days 2nd des. (3 reps)



LUNDS
UNIVERSITET

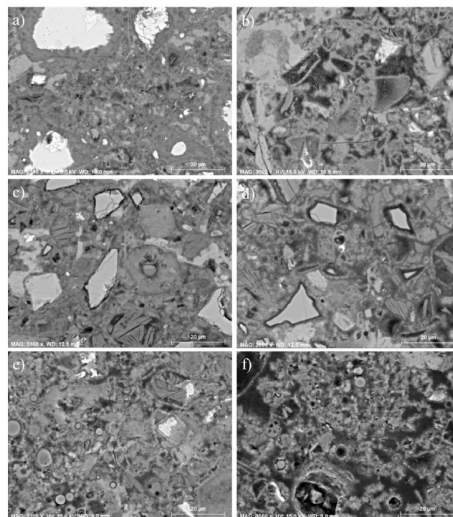
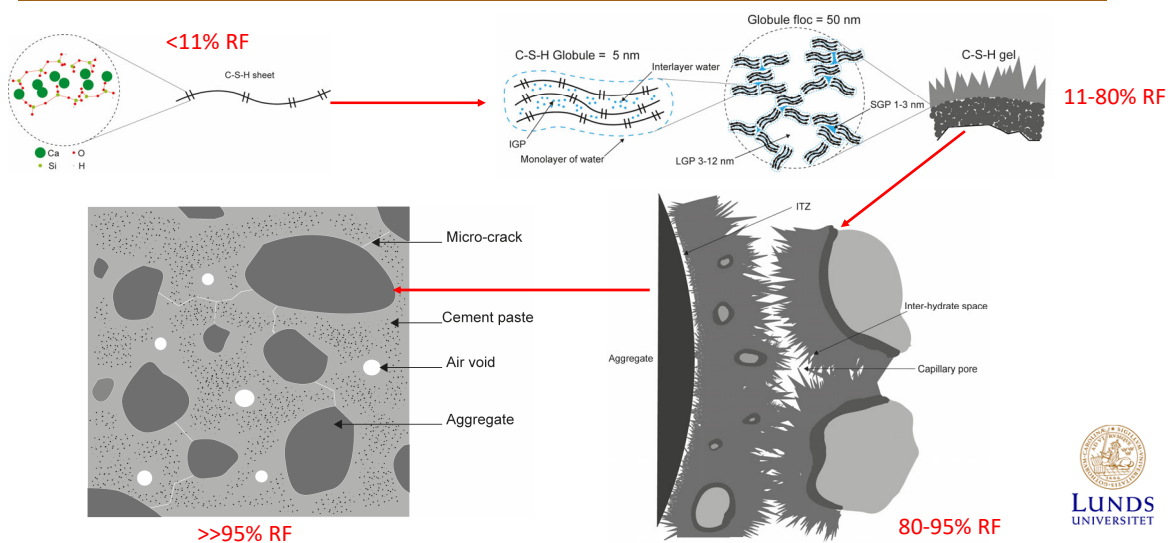


Fig. 16. Microstructure of PC at 28 days: a) w/s 0.4; b) w/s 0.6; 40% Slag at 28 days; c) w/s 0.4; d) w/s 0.6; 40% Fly ash; e) w/s 0.4; f) w/s 0.6.

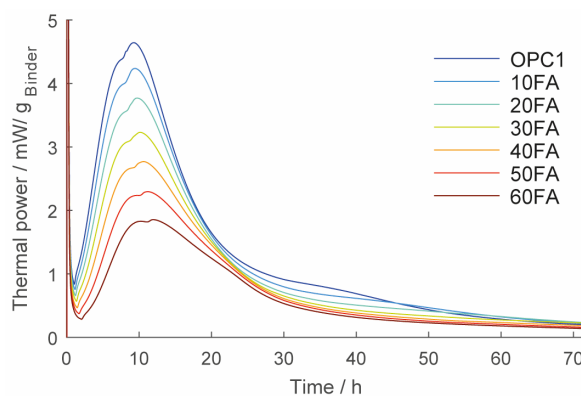


Strukturuppbyggnad



Tidigt härdningsförlopp - värmeutveckling

- Med FA – minskad värmeutveckling de första dygna
- Utspädning av OPC fördröjer reaktionstarten



LUNDS
UNIVERSITET

Sammanfattning så långt...

Partiell ersättning av OPC med FA:

- Ger ett mindre reaktivt bindemedel
- Långsammare reaktion första dygna (ex. sänkt tidig hållfasthet)
- Något accelererad OPC-reaktion (högre w/c, mer utrymme och tillgänglig yta)

Hur ser påverkan ut på längre sikt (högre ålder)?

Hur påverkas porstrukturen och fuktbindningen?



LUNDS
UNIVERSITET