

BYG R-435, 2017

Imprægneringsmidlers indvirkning på betons holdbarhed

Del 1: Undersøgelse af effekten af imprægnering på
fugtindholdet i beton under forskellige eksponeringsforhold

Bo Overgaard Brandt, Tai Van, Bent Grelk, Kurt Kielsgaard Hansen, Svend Bødker Hansen



Imprægneringsmidlers indvirkning på betons holdbarhed

The effect of hydrophobic impregnation on the durability of concrete

DTU Byg



Del 1:

Undersøgelse af imprægneringsbehandlings effekt på fugtindholdet i beton, under forskellige eksponeringsforhold

INDHOLD

1.	INDLEDNING	
2.	BAGGRUND	
3.	FORMÅL	
4.	IMPRÆGNERING	
4.1	Generelt	3
4.1.1	Silan	4
4.1.2	Siloxan	5
4.1.3	Silikone	5
4.2	Produkter	5
4.2.1	Produkt A	6
4.2.2	Produkt B	6
4.2.3	Produkt C	6
4.2.4	Produkt D	6
4.3	Udføringsmæssige forudsætninger	6
5.	PRØVEEMNER	
5.1	Prøveemner	7
5.2	Fremstilling af prøveemner	7
5.3	Betonsammensætning	8
5.4	Imprægnering af prøveemner	9
5.4.1	Prøveforberedelse	9
5.4.2	Fremgangsmåde ved imprægnering	10
5.4.3	Påført imprægneringsmængde	10
5.4.4	Produkt A	10
5.4.5	Produkt B	10
5.4.6	Produkt C	10
5.4.7	Produkt D	11
5.5	Bestemmelse af spild fra imprægneringen	11
5.6	Imprægneringsdybde	11
5.7	Eksponeringsforhold	12
6.	FUGTOPTAGELSESFORSØG	
6.1	Fugtoptagelse ved udendørs eksponering for sol og direkte slagregn	13
6.2	Fugtoptagelse ved udendørs eksponering afskærmet for direkte regn og sol	15
6.3	Fugtoptagelse klimakammer ved 95-100 % RF, ved stuetemperatur (20 °C)	18
6.4	Fugtoptagelse ved nedsænket i vandbad ved stuetemperatur	19
7.	DISKUSSION	
8.	KONKLUSION	

1. Indledning

Denne rapport er et uddrag af et diplomafgangsprojekt for studieretningen diplom-bygning, udarbejdet på Danmarks Tekniske Universitet Lyngby, ved Institut for Byggeri og Anlæg.

Projektet er gennemført af Bo Overgaard Brandt og Tai Van, i perioden februar til juni 2016. Projektets overordnede titel er "Imprægnerings indvirkning på materialers holdbarhed". Kurt Kielsgaard Hansen, Bent Grelk, fra DTU Byg og Svend Bødker Hansen, All Remove Danmark har været vejledere på projektet.

Denne rapport indeholder udvalgte resultater af en række fugtundersøgelser af beton, mht. effekten af imprægnering på fugt-indholdet i beton, under forskellige eksponeringsforhold. I denne rapport er det primært resultater af effekten af imprægnering på betoner med v/c-forholdet 0,40 og 0,55, som er behandlet. Den samlede diplomafgangsrapport indeholder også resultater af betoner med v/c-forhold på 0,43 og 0,57, men disse er af overskuelighedsmæssige hensyn ikke medtaget i denne rapport.

2. Baggrund

Betonbranchen har i årtier kæmpet med problemer omkring betons manglende holdbarhed. Tidligere (før ca. 1986 (udgivelsen af Basisbetonbeskrivelsen BBB)) skyldtes den manglende holdbarhed ofte et samspil mellem brug af dårlige tilslagsmaterialer, frost, AKR og/eller utilstrækkelig kvalitet af cementpastaen (højt v/c-forhold og manglende luft).

I dag stilles der derimod krav om særlig lang holdbarhed af vore konstruktioner, såsom for Storebælt og Øresundsforbindelsen, hvor kravet til holdbarheden er på 100 år og den nye Femern Belt forbindelse med et krav til en holdbarhed på min. 125 år.

De nedbrydningsmekanismer som i dag stadig volder problemer er:

- **Alkaliselreaktioner (AKR)**
Relevant for de betonbygværker som typisk blev opført før 1986
- **Frost**
Ligeledes primært relevant for betonbygværker opført før 1986.
- **Kloridinitieret armeringskorrosion**
Er relevant for såvel ældre som nyere bygværker, idet der til sidstnævnte ofte er stillet krav til en levetid, som er op til 125 år, mod tidligere 25-50 år.

Alle tre nedbrydningsmekanismer, er ligesom næsten alle øvrige nedbrydningsmekanismer, som findes omkring beton, afhængige af vand for at de kan/vil kunne indtræffe i beton. I alle tre tilfælde er vand et kritisk parameter.

I dette projekt ser vi nærmere på i hvilken grad en række imprægneringsmidler kan forhindre eller mindske betons vandoptagelse, således at risikoen for såvel AKR, frost og kloridinitieret korrosion (læs: kloridindtrængning) kan mindskes i en grad, som enten forhindrer nedbrydningen i at finde sted eller i bedste fald reducerer skadesomfanget/hastigheden og derved forlænger levetiden af en udsat (fugt, tørsalte og frost) betonkonstruktion.

3. Formål

Formålet med denne rapport er at undersøge:

- Effekten af 4 forskellige typer imprægneringsmidlers indvirkning på fugtindholdet i beton, under forskellige eksponeringsforhold.
- Vurdering af forhold, som har betydning for imprægneringens effekt som vandafvisende middel på beton.

De 4 undersøgte produkter er:

1. A
2. B
3. C
4. D

Der er i alle 4 tilfælde tale om silanprodukter.

I denne rapport ses nærmere på, om imprægnering kan forhindre, at beton kan blive fugtmættet i en grad, hvor der er en risiko for, at denne kan blive frostskaadet, hvilket typisk vil kunne ske, dersom betonen opnår en vandmætning på 90 % eller højere, samtidigt med, at den bliver udsat for frostpåvirkninger.

I det aktuelle projekt ses nærmere på følgende forskellige eksponeringsmiljøer:

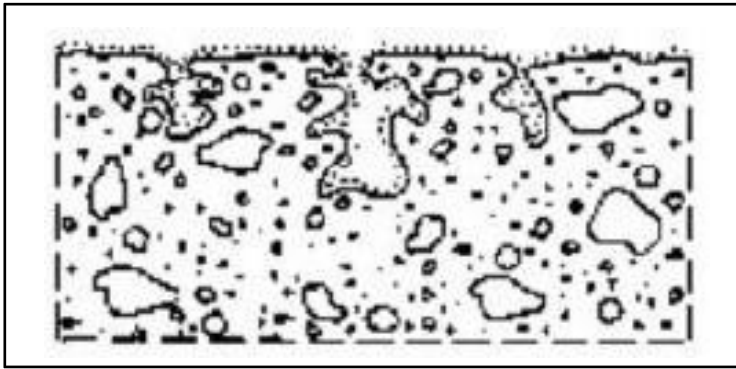
1. Udendørs eksponering for sol og direkte slagregn (placeret på drænende underlag).
2. Udendørs eksponering afskærmet for direkte regn og sol (placeret på drænende underlag).
3. Klimakammer ved 95-100 % RF, ved stuetemperatur (20°C).
4. Nedsænket i vandbad ved stuetemperatur.

4. Imprægnering

4.1 Generelt

Hydrofobe imprægneringsmidler bruges til at forhindre vand og vandopløste stoffer fra at trænge ind i det underliggende materiale, såsom beton, natursten og tegl. En sådan hydrofob behandling sænker typisk materialets overfladespænding i en grad, så det skaber en vandafvisende overflade på det pågældende materiale, hvorved det vil reducere vandoptagelsen, inklusiv evt. opløste salte, såsom klorider, i materialet.

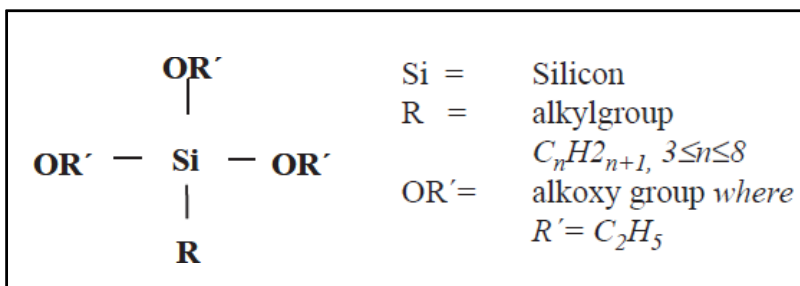
Figur 1 i DS/EN 1504-2:2006 viser en skematisk gengivelse af, hvordan en typisk hydrofobisk imprægnering virker på et porøst materiale, såsom beton. Porerne og kapillærerne får en indvendig belægning, men de udfyldes ikke. Der er ingen film på betonens overflade og betonens udseende ændres ikke eller kun lidt.



Figur 1. Skematisk tegning af en hydrofob imprægnering.

4.1.1 Silan

Langt de fleste imprægneringsmidler som anvendes på beton i dag udgøres af silaner bestående af alkyltriethoxysilan med tre til otte kulstofatomer i alkyl-gruppen.



Figur 2 Den kemiske struktur af triethoxy(alkyl)silan. R-gruppen består typisk af 3, 4 og 8 kulstofatomer.

Der er flere typer af silaner på markedet. Silaner, såsom triethoxy-silaner, der består af meget små molekyler (ca. 0,4 til 1,5 nm) som typisk er stærkt alkali-resistente men også meget flygtige. Triethoxy-silaner er således meget velegnede til beton. De har evnen til at penetrere dybt ind i underlaget, men pga. af den høje flygtighed, så er en høj koncentration ofte nødvendigt. Der findes en lang række typer på markedet, fra næsten ren silan (99 % aktivt stof) til fortyndede vandbaserede emulsioner (> 20 % aktivt stof), som ofte har hver deres anvendelsesområde og egenskaber.

4.1.2 Siloxan

En siloxan bliver ofte også kaldt for en "polysilan", da de i princippet er af samme art/type, men har en langt mere kompleks molekylestruktur. Siloxaner er ligesom silaner meget små (ca. 3 til 30 nm) men kan ikke penetrere lige så dybt ind i underlaget grundet deres kompleksitet og form.

De er mindre flygtige, hvorfor det er muligt at bruge en lavere koncentration for at opnå det ønskede resultat. Det maksimale aktive indhold overstiger sjældent 10-15 %, idet der ved brug af en højere koncentration er risiko for, at overfladen vil blive mørkere, idet en del af molekylerne vil "sætte sig" på overfladen.

Ligesom silaner, er siloxaner også alkali-resistente. De kan bruges til beton, men grundet deres mindre indtrængningsdybde, så bruges de som regel til mere porøse mineralske underlag, såsom tegl og visse typer porøse natursten og kunststen.

I nogle tilfælde er imprægneringsmidlerne ofte blandingsprodukter af f.eks. silan og siloxan, da dette giver muligheden for at få et produkt, der er bedre tilpasset et bestemt materiale end hvis man bruger et rent silanprodukt.

Eksempelvis vil en blanding, hvori siloxan indgår give en større molekylestruktur, der kan være mere velegnet til meget porøse mineralske underlag end f.eks. et rent silanprodukt.

4.1.3 Silikone

Dette har meget små molekyler (ca. 0,3 til 0,6 nm) og den enkleste struktur af de tre typer. De er siliciumholdige polymerer, hvis kemiske formel kan angives som $[R_2SiO]_n$, hvor R er organiske grupper (f.eks. methyl).

Imidlertid kan de, grundet deres polaritet, ikke trænge lige så godt ind i underlaget som de øvrige. Her-til kommer, at silikone ikke er stabilt i alkaliske forhold (højt pH), hvorfor de derfor kun bruges på ikke-alkaliske mineralske underlag, såsom tegl og visse typer af natursten.

4.2 Produkter

I forbindelse med dette projekt har vi undersøgt effekten af 4 forskellige silanbaserede imprægneringsprodukter, jf. nedenstående tabel 1.

De valgte produkter fremgår af tabel 3.

Tabel 1. Produkt- og silanetyper samt opløsningsmiddel for valgte produkter.

Produkt	Type Silan	Opløsningsmiddel
A	Triethoxy(isobutyl)silan	Vand
B	Triethoxy(isooctyl)silan	Vand
C	Triethoxy(isobutyl)silan	Vand
D	Triethoxy(isooctyl)silan	Vand

4.2.1 Produkt A

Produkt A er baseret på triethoxy(isobutyl)silan. Produktet er ifølge producenten velegnet til porøse byggematerialer, såsom beton, tegl og visse typer af natursten.

4.2.2 Produkt B

B har et aktivt silan indhold på 80 % og 20 % vand. Ifølge producenten er produktets særpræg en høj indtrængningsdybde, god resistans mod alkali (højt pH).

Produktets effektivitet varierer afhængig af hvilke betontyper, der skal beskyttes samt betonens relative fugtighed og temperatur. Derudover spiller påføringsmængden også en stor rolle, eftersom jo mere der påføres, jo dybere er indtrængningen.

4.2.3 Produkt C

Produkt C er et silanbaseret produkt og består af >20 % silan og <5 % 2-diethylaminoethanol. Ifølge producenten er produktet velegnet til porøse byggematerialer, herunder beton, visse natursten og tegl.

4.2.4 Produkt D

Produkt D har et aktivt silan indhold på 100 %. Dens egenskaber er stort set de samme som produkt B, med undtagelse af indtrængningsdybden. Som denne undersøgelse bl.a. viser, så er D bedre til at trænge ind i beton med høje vand-cementtal.

4.3 Udføringsmæssige forudsætninger

For at få en imprægnering til at udvise sin maksimale effekt mod vandindtrængning i et materiale, er det nødvendigt at se på, hvilke faktorer der har betydning og som medvirker til at imprægneringen bliver så effektiv som muligt.

I det følgende omtales nogle af de faktorer som er af afgørende betydning for imprægneringens effektivitet.

Beton:

- Betonens porøsitet og permeabilitet (v/c-forholdet)
- Betonens aktuelle vandindhold (mætningsgrad) og temperatur

Imprægneringsmiddel:

- Type silan (produktets kemi skal passe til betonens kemi)
- Holdbarhed overfor UV-stråling
- pH (f.eks. har betonens porevæske normalt et pH: 13-14)
- Afvaskning grundet regn
- Eksponeringstid/kontaktid (den tid imprægneringsmidlet er i kontakt med prøveemnet)
- Antal påføringer (synlig tør overflade, men vådt i vådt)
- Fortyndingsgrad (koncentreret, fortyndet)
- Hærdetid (tiden fra prøveemnet er imprægneret til det udsættes for undersøgelser)

For en succesfuld imprægnering arbejdes med tre faktorer:

1. Tid (eksponerings- og hærdetid for imprægneringsmidlet)
2. Betonens porøsitet
3. Betonens vandindhold og mætningsgrad.

Eksponeringstiden beskriver, hvor længe kontakten mellem imprægneringen og betonen skal være, for at mætningsgraden af imprægneringsmidlet er opnået.

Herudover afhænger mætningsgraden desuden af fugtigheden i det tidsrum, hvor imprægneringen udføres. Således ved vi, at beton ved en lavere relativ fugtighed og derved lavere vandmætningsgrad, vil medvirke til en større imprægneringsdybde og mætningsgrad end ved høje relative fugtigheder.

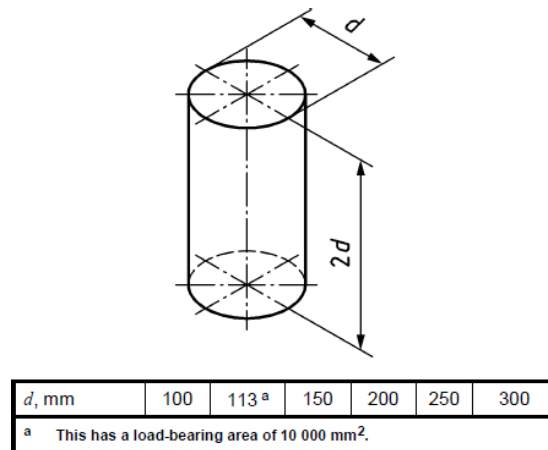
5. Prøveemner

5.1 Prøveemner

Der er i forbindelse med dette projekt fremstillet en række betonprøveemner med varierende v/c-forhold, og varierende indhold af reaktive korn i sandfraktionen.

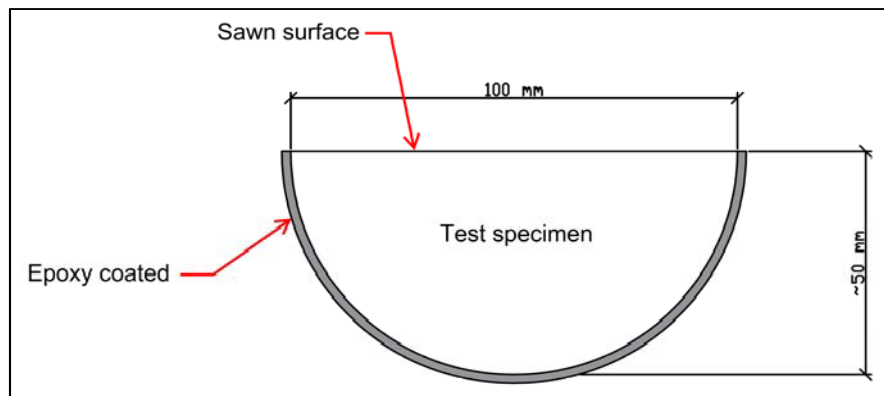
5.2 Fremstilling af prøveemner

Der er udstøbt prøveemner med dimensionen $\varnothing 100 \times 200$ mm, som det fremgår af Figur 3.



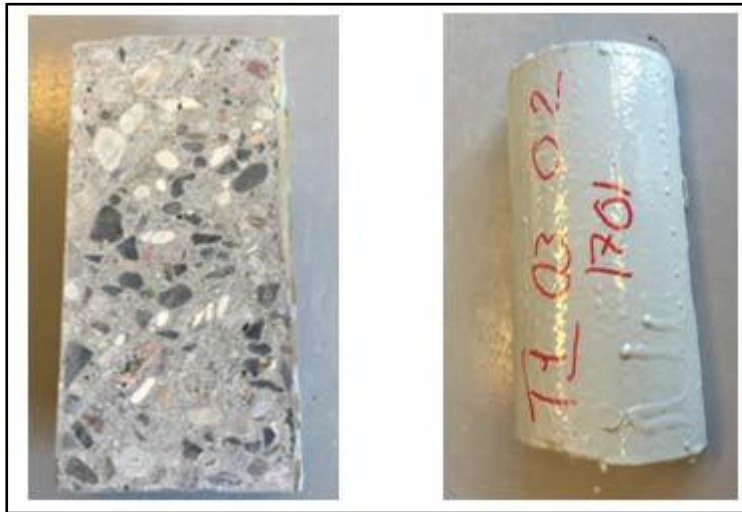
Figur 3. Princip af fremstilling af prøveemner med dimensionen $\varnothing 100 \times 200$ mm.

De enkelte prøveemner består af halve betoncylindre, som efter hærdning og epoxycoating, er blevet gennemskåret på langs, jf. figur 4. I det efterfølgende beskrives fremstillingen af prøveemnerne mere i detaljer.



Figur 4. Principskitse af prøveemne som består af en halv betoncylinder med de angivne mål.

Prøveemnerne er fremstillet af de udstøbte betoncylindre, som efterfølgende er skåret midt igennem, således at der af hver udstøbt kerne blev fremstillet to identiske prøveemner, se figur 4 + 5.



Figur 5. Af billedet til venstre fremgår skærefladen på en af de producerede prøveemner, efter at betoncylindrerne er blevet epoxycoatede. Billedet til højre viser bagsiden af prøveemnet med epoxy coating samt deres nummerering.

5.3 Betonsammensætning

I dette projekt er der fremstillet betoner med samme type og mængde delmaterialer (søsand, søsten og Rapid cement), men med varierende v/c-forhold på henholdsvis: 0,40, 0,43, 0,55 og 0,57. Derudover er der fremstillet en beton med v/c-forhold på 0,55 og med tilsætning af en skadelig mængde porøs flint i sandfraktionen.

Tabel 2. Oversigt over de to betonblandinger som der primært er refereret til i denne rapport.

Komponent	Blanding A2	Blanding C2
<u>Cement</u> CEM I, Rapid	438 kg/m ³	318 kg/m ³
<u>Søsand</u> 0-4 mm	705 kg/m ³	858 kg/m ³
<u>Sten</u> 4-8 mm 8-16 mm	346 kg/m ³ 702 kg/m ³	328 kg/m ³ 667 kg/m ³
<u>Vand</u>	185 l/m ³	185 l/m ³
<u>Luft</u> Indblandet	Nej	Nej
V/C-forhold	0,40	0,55
Reaktive korn* Tilsat til sandet	Nej	Nej
Tilsat ekstra alkalier Na(OH)	Nej	Nej

5.4 Imprægnering af prøveemner

5.4.1 Prøveforberedelse

Betoncylinderne (Ø100 x 200 mm) blev afformet 24 timer efter støbningen, hvorpå de blev anbragt i et vandbad ved ca. 20°C i 7 døgn, hvor de har opnået en styrke, der svarer nogenlunde til $\approx 83\%$ af deres 28 døgns styrke.



Figur 6. Klimakammer. Prøverne er anbragt opretstående på trælisteunderstøtninger med tilstrækkeligt mellemrum for at sikre friluftcirkulation.

Betoncylindrene tages op efter de 7 døgn, hvorpå de placeres i et klimakammer ved 23°C og med en RF på 65 %. Betoncylindrene tages ud af klimakammeret efter 14 døgn og vejes, hvorefter der påføres en forseglende epoxy i 2 lag over de følgende 3 uger.



Figur 7 Laboratorie. Epoxy forsegling. Prøverne er anbragt på små understøtninger på et plastik underlag med deres individuelle nummerering. Prøveemnerne placeres med tilstrækkelig mellemrum for at sikre friluftcirkulation under behandlingen.

Efter epoxyen er tør, vejes prøveemnerne og de skæres midt over således, at der fremkommer 2 prøveemner ud af hver cylinder. (se Figur 5) Herefter blev prøveemnerne anbragt i en ovn ved 40°C i 48 timer for at gøre emnerne overfladetørre. Prøverne undersøges og der blev påført yderligere epoxy på siderne ved "savsporet" efter behov, hvis savningen har "flosset" noget af den først påførte epoxy. Prøveemnerne blev vejet og målt inden skærefladerne fik påført imprægnering.

5.4.2 Fremgangsmåde ved imprægnering

Prøveemnerne blev behandlet med de 4 typer af imprægneringsmidler på vertikale flader, dvs. i opretstående tilstand. Dette skete på en plastikdug placeret i et stinkskab. Oven på dugen ligger der messingunderstøtninger, der sørger for at eventuelt overskydende imprægnering løber af og derfor ikke påvirker prøveemnet, se Figur 8.



Figur 8. Forsøgsopstilling. Prøverne er anbragt opretstående på messingunderstøtninger på et plastikunderlag. De lodrette skæreflader blev herefter imprægneret. De to prøver til højre er netop blevet imprægneret for første gang, mens de to prøver til venstre venter på at få anden behandling (vådt i vådt).

5.4.3 Påført imprægneringsmængde

Imprægneringen af prøveemnerne er sket i h.t. producenterens anvisninger om påføringsmængder, antal påføringer og eksponeringstid mv.

Fremgangsmåden for de fire anvendte imprægneringsmidler, er specifikt angivet i det følgende.

5.4.4 Produkt A

Der startes med påføring af 3 lag på betonoverfladen, så denne mættes. Påføring af første lag sker på tør overflade. Derefter påføres yderligere 3 lag med 10 minutters mellemrum, mellem hvert lag. Jf. leverandørens anvisninger er imprægneringsmængden sat til 180-230 g/m². Det besluttes, at anvende 4 gram pr. lag da der antages at være et vist imprægneringsspill ved vertikal påføring. Påføring af første lag sker på tør overflade, derefter påføres efterfølgende lag vådt i vådt.

Imprægneringsmængden for prøveemner med et eksponeringsareal på 0,02 m²:

$$\text{Imprægneringsmængde} = 1200 \text{ g/m}^2$$

5.4.5 Produkt B

Der påføres 1 lag efter leverandørens specifikationer med en imprægneringsmængde sat til 200-400g/m² dvs. 4 gram i dette forsøg. Påføring af første lag sker på tør overflade.

Imprægneringsmængden for prøveemner med et eksponeringsareal på 0,02 m²:

$$\text{Imprægneringsmængde} = 200 \text{ g/m}^2$$

5.4.6 Produkt C

Først påføres 4 lag på betonoverfladen, derefter påføres yderligere 3 lag med 10 minutters mellemrum mellem hvert lag. Påføring af første lag sker på tør overflade, derefter påføres efterfølgende lag vådt i vådt. Jf. leverandørens anvisninger er imprægneringsmængden sat til 3-6 lag af $180 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$ til $230 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$ pr. lag.

Dette er beregnet for prøveemner til at være 3,6 svarende til ca. 4 gram pr. lag.

Deraf bestemmes imprægneringsmængden for prøveemner med et eksponeringsareal på 0,02 m²:

$$\text{Imprægneringsmængde} = 1400 \text{ g/m}^2$$

5.4.7 Produkt D

Produktet påføres i 2 lag med en mængde på 200-400 g/m². Det besluttes, at anvende 4 gram pr. lag, da der antages at være et vist imprægneringsspill ved vertikal påføring. Påføring af første lag sker på tør overflade, påføring af andet lag er vådt i vådt.

Imprægneringsmængden for prøveemner med et eksponeringsareal på 0,02 m²:

$$\text{Imprægneringsmængde} = 400 \text{ g/m}^2$$

5.5 Bestemmelse af spild fra imprægneringen

Der er i forbindelse med tidligere undersøgelser konstateret, at der kunne være et ikke ubetydeligt spild ved imprægnering af især lodrette overflader. For at sikre at prøveemnerne får de anbefalede imprægneringsmængder er dette spild, derfor undersøgt i dette projekt.

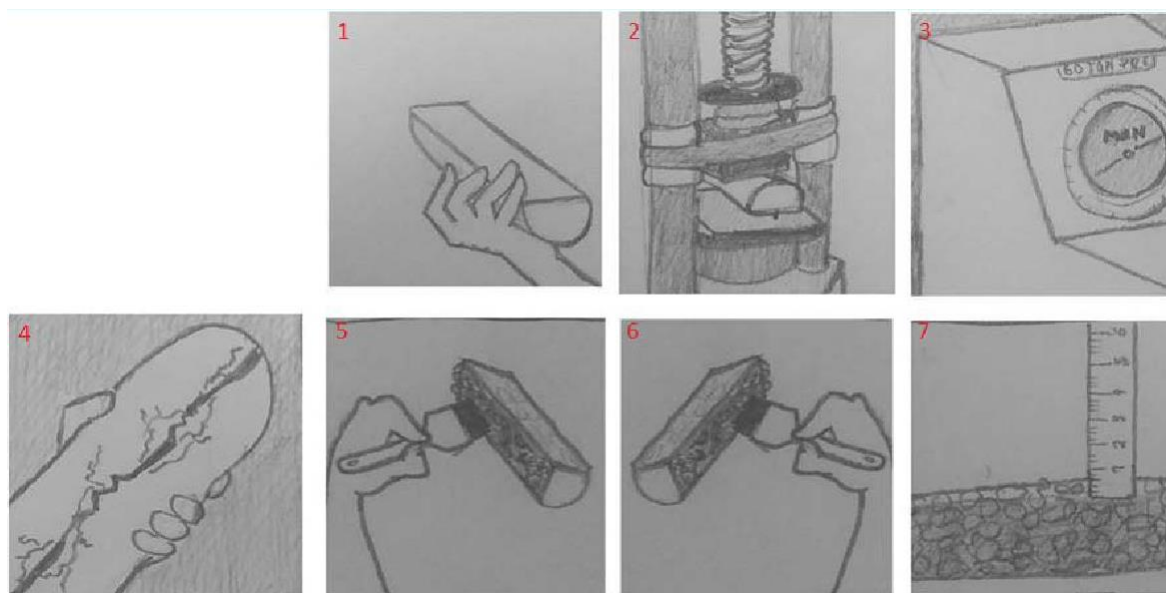
Et eksempel fra vores undersøgelse, er et prøveemne med en imprægneringsmængde på 28 gram, hvoraf 15 gram løber af prøveemnet (spild) og 13 gram bliver optaget af prøveemnet, hvilket er indenfor leverandørens anvisninger.

For A og B kunne man under imprægneringen af prøveemnerne konstatere, at spildet ved imprægnering var lavest ved første imprægnering og højest ved sidste imprægnering. Dette indikerer, at prøveemner var tilstrækkeligt mættet.

Endvidere er leverandørens specifikationer ikke angivet iht. et specifikt vand/cement forhold og betons fugtighed. Derfor antages det, at den maksimalt anbefalede mængde er beregnet for høje vand/cement forhold ($\geq 0,60$). Da B og D skal have færre påføringer og mængde, er der for de produkter et mindre spild end for A og C.

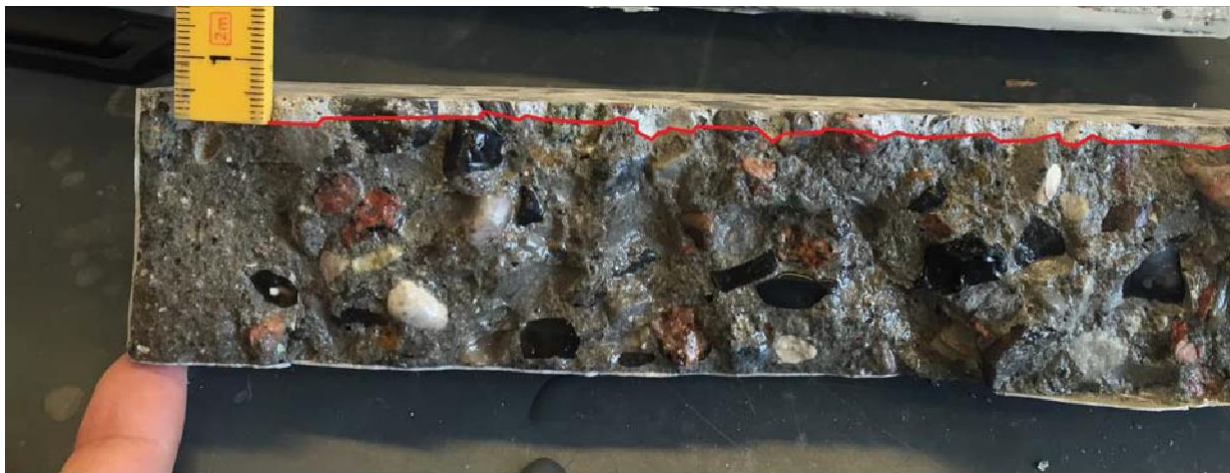
5.6 Imprægneringsdybde

Imprægneringsdybden bliver bestemt iht. DS/EN 1504-2 tabel 3 på de undersøgte betoner. Indtrængningsdybden er helt målt med en nøjagtighed på ca. 0,5 mm ved at bryde de behandlede prøvelegemer (halve betoncylindre) i en trykpresse, og derpå sprøjte vand på brudfladen. Dybden af det tørre område tages som den effektive dybde af imprægneringen, jf. figur 9.



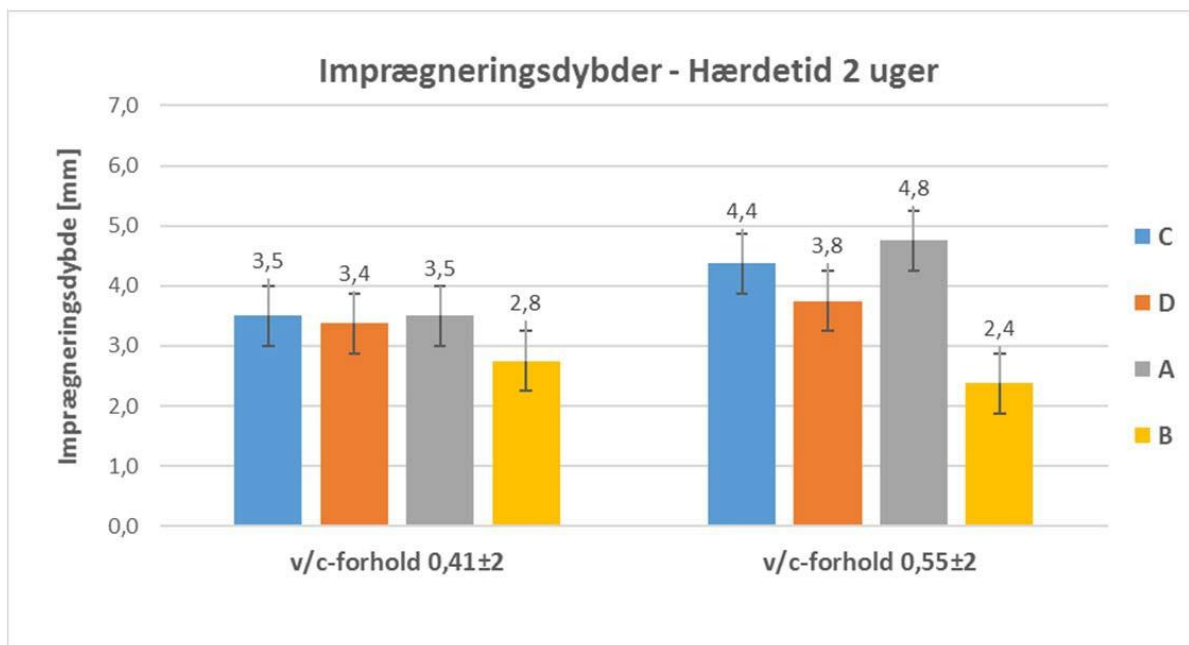
Figur 9. Viser princippet for hvordan imprægneringsdybden bestemmes. 1. Imprægneret prøveemne i form af en halv cylinder tages op og 2. placeres i prøvemaskinen, hvorefter 3. trykket øges og 4. spaltebrud opstår på langs af cylinderen 5. og

6. de to brudflader påføres vand, hvorefter 7. begge sider måles (en i hver ene og to på midten).



Figur 10. Imprægneringsdybden bestemmes ud fra DS/EN 1504-2. På billedet ses imprægneret prøveemne i form af en halv cylinder, der efter spaltebrud er påført vand på brudfalden. Her ses måling af imprægneringsdybden.

(målingen foretages dels i hver ende og dels på midten)



Figur 11. Imprægneringsdybde. For produkterne C, D, A og B. Imprægneringsdybden angivet i mm ved v/c forhold 0,40, 0,43, 0,55 og 0,57. Standardafvigelsen er fastlagt til 0,5mm jvf. DS/EN 1504-2.

5.7 Eksponeringsforhold

Prøveemnerne bliver i det følgende udsat for følgende forskellige eksponeringsforhold:

1. Udendørs eksponering for sol og direkte slagregn (placeret på drænende underlag).
2. Udendørs eksponering afskærmet for direkte regn og sol (placeret på drænende underlag).
3. Klimakammer ved 95-100 % RF, ved stuetemperatur (20°C)
4. Nedsænket i vandbad ved stuetemperatur.

Undersøgelse er foretaget på betonprøver uden reaktivt sand, som er undersøgt og behandlet i en særskilt rapport.

6. Fugtoptagelsesforsøg

6.1 Fugtoptagelse ved udendørs eksponering for sol og direkte slagregn

Denne del af undersøgelsen drejer sig om at vurdere fugtoptagelsen i prøveemner med og uden Imprægnering og som udsættes for direkte slagregn og sol. Dette er for, at afspejle de påvirkninger som vejrlig typisk har på udendørs lodrette betonoverflader.

Betonens fugtoptagelse vurderes at spille en stor rolle for AKR-relaterede revnedannelser og risikoen for frostskeer, idet forudsætningerne for såvel AKR som frostskeer, er vand. I denne del af undersøgelsen ses primært på, hvorvidt imprægnering kan reducere fugtoptagelsen i betonen, og dermed vil kunne forhindre betonen i at opnå en kritisk vandmætningsgrad, og således minimere risikoen for frostskeer. Effekten som opnås ved imprægnering af beton, ifm. alkalikiselreaktioner, vil blive behandlet i en efterfølgende rapport.

Prøveemnerne i undersøgelsen består som tidligere nævnt af beton med v/c forhold 0,40 til 0,55.

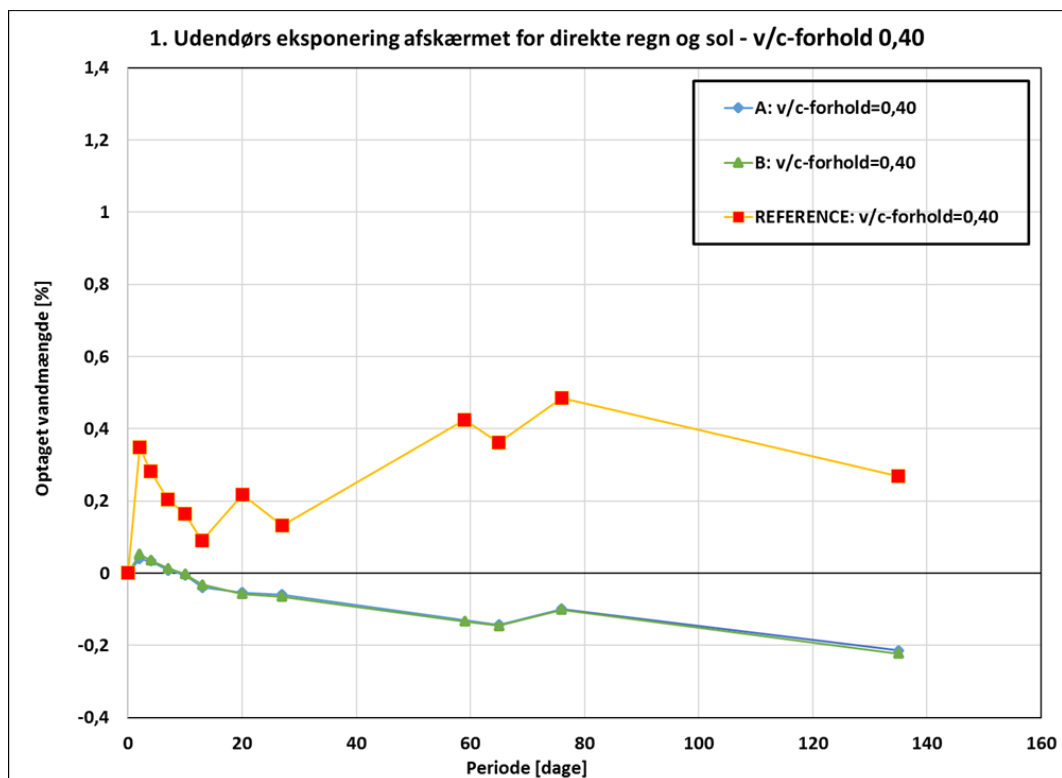
Fugtoptagelsen i prøveemnerne måles ved løbende at måle prøveemnernes vægtændring. Derudover registreres deres overfladetemperatur med en infrarød termaturmåler. Det blev besluttet, at målingerne af prøveemnerne blev foretaget med følgende frekvens: 0 dage, 2 dage, 4 dage, 7 dage, og derefter efter behov, afhængig af vejrforholdene i perioden. For at undgå vandoptagning fra underlaget, blev prøveemnerne placeret på grus, der fungerede som et drænende underlag.

Prøveemnerne bringes en af gangen til laboratoriet, hvor de blev vejet og eftersat for skader. Efter hver måling blev emnerne sat tilbage på samme måde og sted, som de stod inden målingerne.

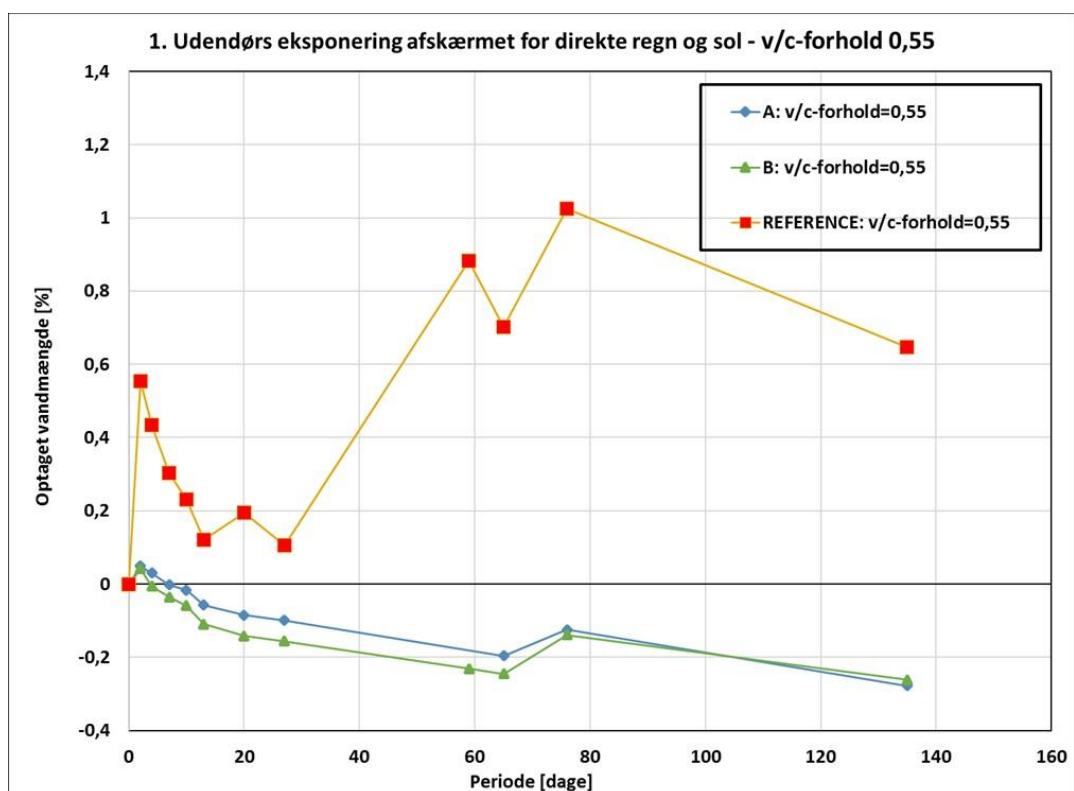


Figur 3. Forsøgsopstilling for 1. udendørs eksponering for sol og direkte slagregn. Prøveemnerne står lodret vendt direkte mod syd. For at undgå vandoptagning fra underlaget blev prøveemnerne anbragt på et drænende grusunderlag.

I det følgende bringes resultatet af to af imprægneringsmidlerne for henholdsvis v/c-forhold på 0,40 og 0,55. Der er desuden undersøgt to andre imprægneringsmidler og to andre v/c-forhold på 0,43 og 0,57. Disse resultater viser i princippet helt de samme tendenser (fugtoptagelse som funktion af tid/eksponering) som dem, der er vist på figur 9 og 10.

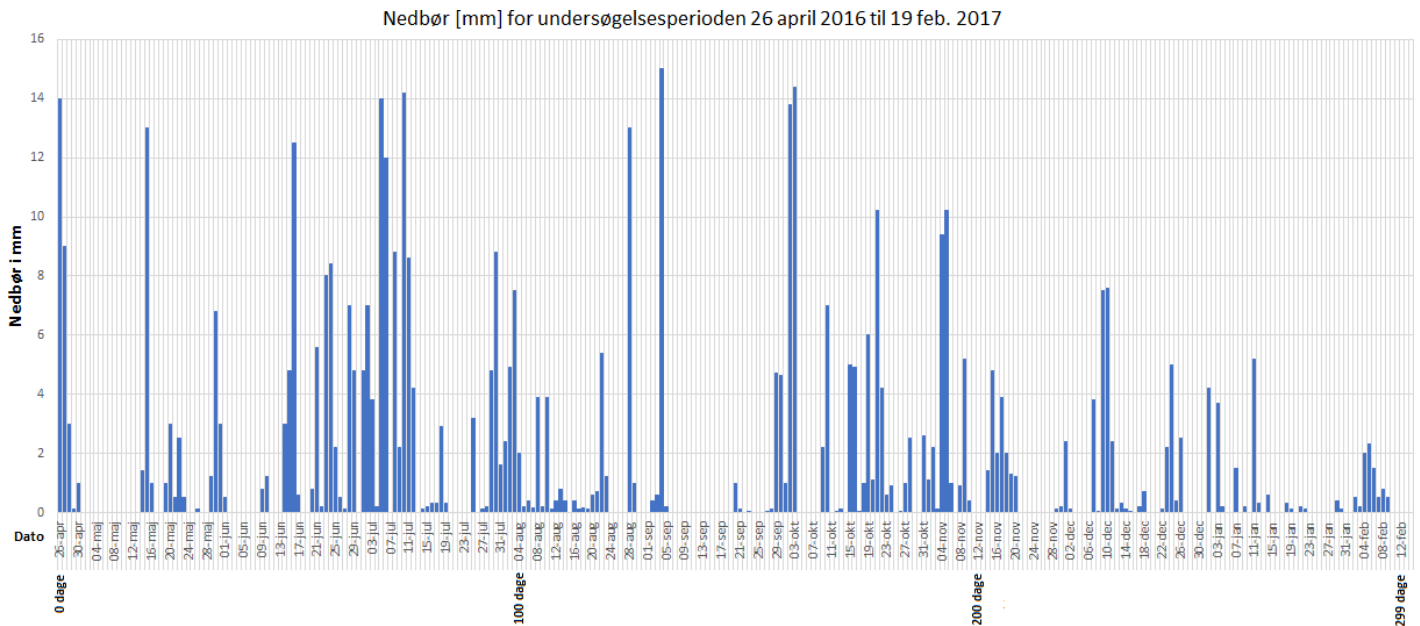


Figur 12. Fugtoptagelse (=optaget vandmængde) i procent for to af de undersøgte imprægneringsmidler samt en reference- prøve med v/c-forholdet på 0,40. De to imprægneringstyper viser helt identisk fugtoptagelse i den undersøgte periode.



Figur 13. Fugtoptagelse (=optaget vandmængde) i procent for to af de undersøgte imprægneringsmidler samt en reference- prøve med v/c-forholdet på 0,55. Det bemærkes, at de to imprægneringstyper også ved v/c-forholdet på 0,55 viser næsten identisk fugtoptagelse.

For at kunne vurdere forskellen mellem imprægnerede prøveemner og ikke-imprægnerede emner er det vigtigt at se nærmere på det aktuelle vejrlig i perioden. Det er derfor at studere DMI's angivne nedbørsmængder i den samme periode (første ca. 130 dage) på figur 14.



Figur 14. Nedbørsmængder i perioden april 2016 til februar 2017.

Det kan være svært at sammenligne vandoptagelsesforløbet præcist med de tilhørende nedbørsmængder. Men de forholdsvis store fugtoptagelser i referenceprøverne uden imprægnering svarer tydeligvis til den tilsvarende store nedbørsmængde i den samme periode. Det er interessant at bemærke, at de imprægnerede prøveemner samlet set taber fugt i de første ca. 130 dage, og at fugtniveauet er væsentligt lavere end for de ikke-behandlede prøveemner.

6.2 Fugtoptagelse ved udendørs eksponering afskærmet for direkte regn og sol

Denne del af undersøgelsen drejer sig om at vurdere fugtoptagelsen i prøveemner med og uden imprægnering, og som ikke udsættes for direkte slagregn og sol. Dette er for, at afspejle de påvirkninger, vejrlig typisk har på beskyttet udendørs lodrette betonoverflader.

Betonens fugtoptagelse vurderes at spille en stor rolle for AKR-relaterede revnedannelser og risikoen for frostskafer, idet forudsætningerne for såvel AKR som frostskafer, er vand. I denne del af undersøgelsen ses primært på, hvorvidt imprægnering overhovedet har en effekt på fugtoptagelsen i betonen, som ikke udsættes for direkte slagregn – og som derfor primært udsættes for den omgivende lufts relative luftfugtighed.

Prøveemnerne i undersøgelsen består som tidligere nævnt af beton af v/c forhold 0,40 til 0,55.

Fugtoptagelsen i prøveemnerne måles ved løbende at måle prøveemnernes vægtændring. Derudover registreres deres overfladetemperatur med en infrarød termometer. Det blev besluttet, at målingerne af prøveemnerne blev foretaget med følgende frekvens: 0 dage, 2 dage, 4 dage, 7 dage, og derefter efter behov afhængig af vejrforholdene i perioden. For at undgå vandoptagning fra underlaget, blev prøveemnerne placeret på grus, der fungerede som et drænende underlag.

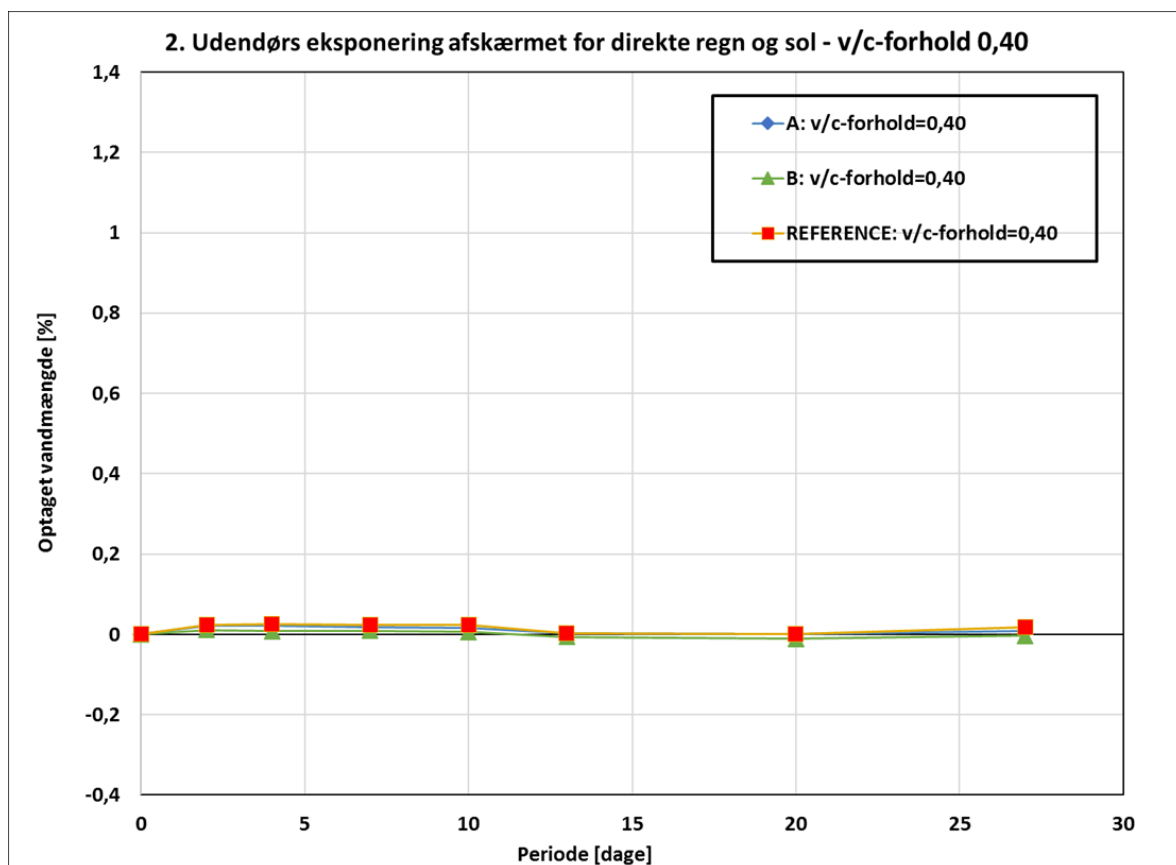
Prøveemnerne bringes en af gangen til laboratoriet, hvor de blev vejlet og eftersat for skader. Efter hver måling blev emnerne sat tilbage på samme måde og sted, som de stod inden målingerne.



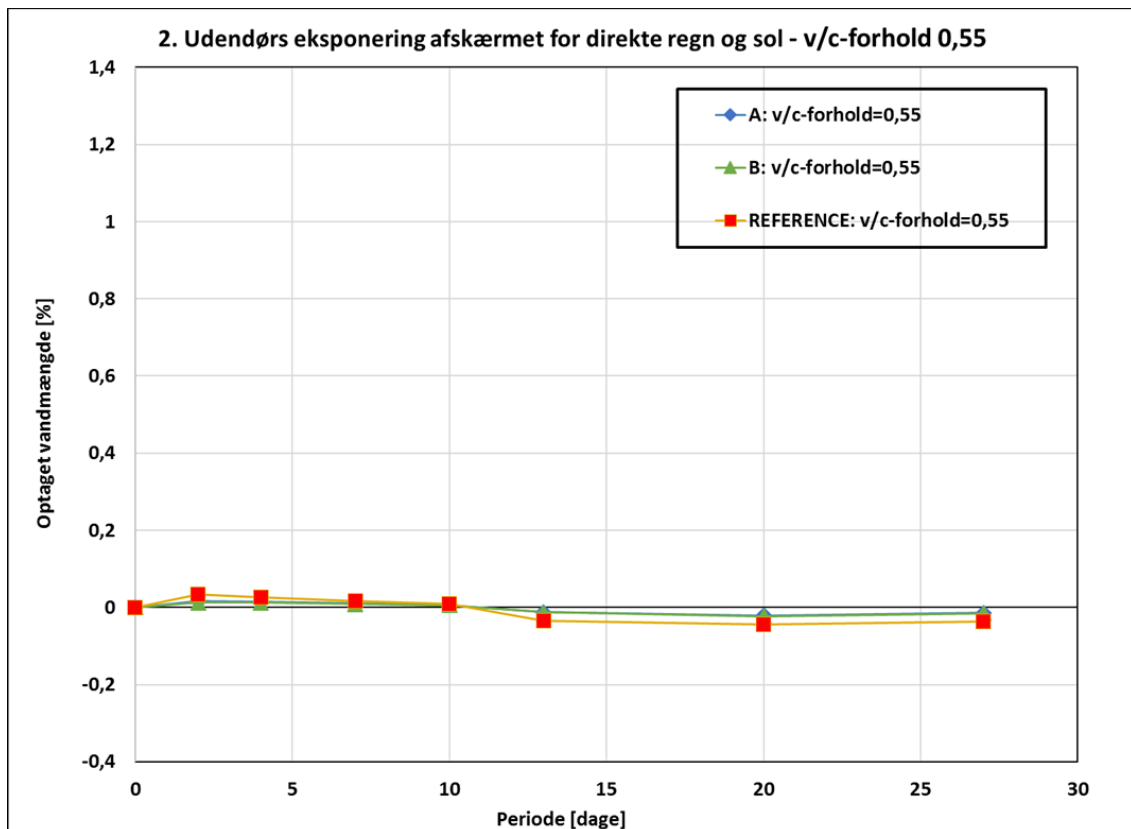
Figur 15. Forsøgsopstilling for prøveemner som er placeret udendørs men afskærmet for direkte regn og sol. Prøveemnerne står lodret vendt direkte mod syd afskærmet for direkte regn og sol. For at undgå vandoptagning fra underlaget blev prøve- emnerne på et drænde grusunderlag.

I det følgende bringes test resultatet for to af imprægneringsmidlerne med henholdsvis v/c -forhold på 0,40 og 0,55.

Der er desuden undersøgt to andre imprægneringsmidler med to andre v/c -forhold på 0,43 og 0,57. Disse resultater viser i princippet de samme tendenser som dem, der er vist på figur 16 og figur 17.

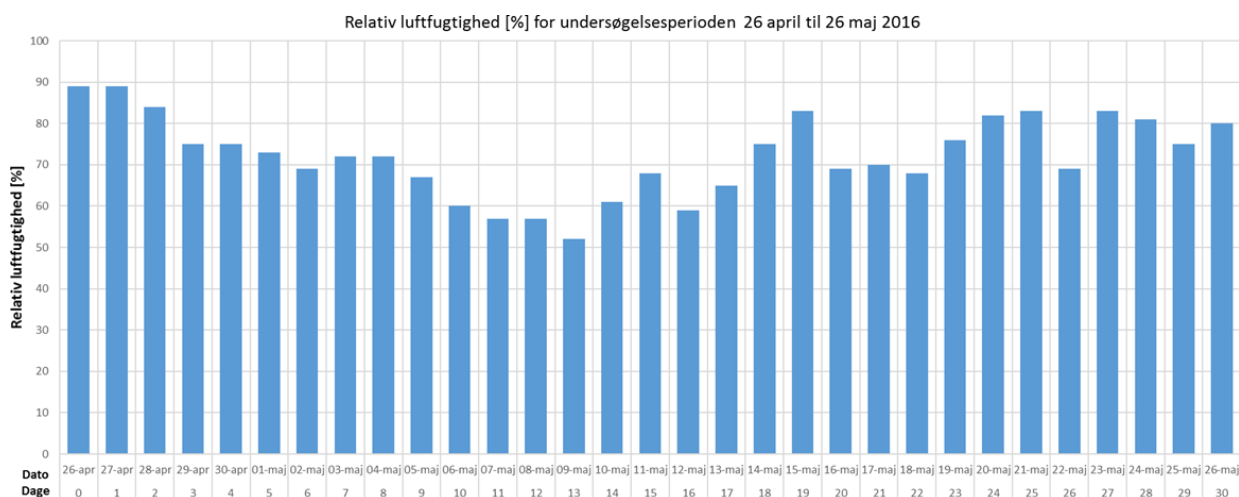


Figur 16. Fugtoptagelse (= optaget vandmængde) i procent for to af de undersøgte imprægneringsmidler samt en reference- prøve med v/c -forholdet på 0,40.



Figur 17. Fugtoptagelse (= optaget vandmængde) i procent for to af de undersøgte imprægneringsmidler samt en reference- prøve med v/c-forholdet på 0,55.

Såvel figur 16 som 17 viser, at der tydeligvis ikke er nogen målbar forskel i vandoptagelsen mellem referenceprøver uden imprægnering og prøver med imprægnering i et udendørs miljø beskyttet med direkte slagregn og sollys.

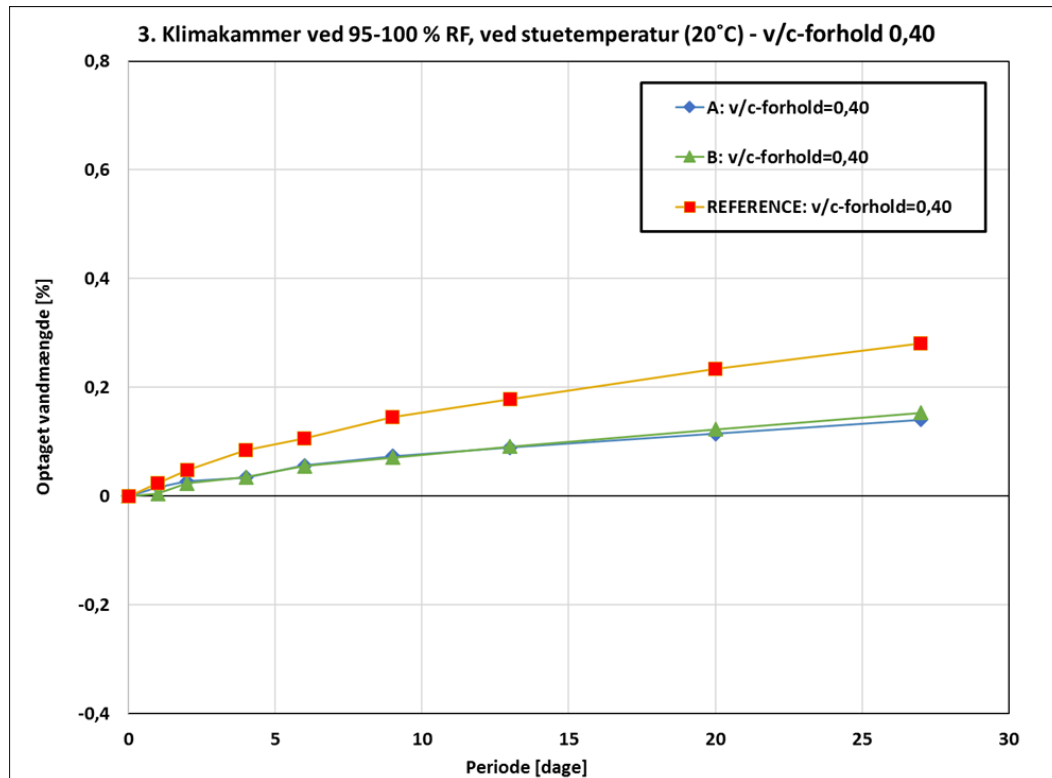


Figur 18. Den relative luftfugtighed i perioden baseret på tal fra DMI.

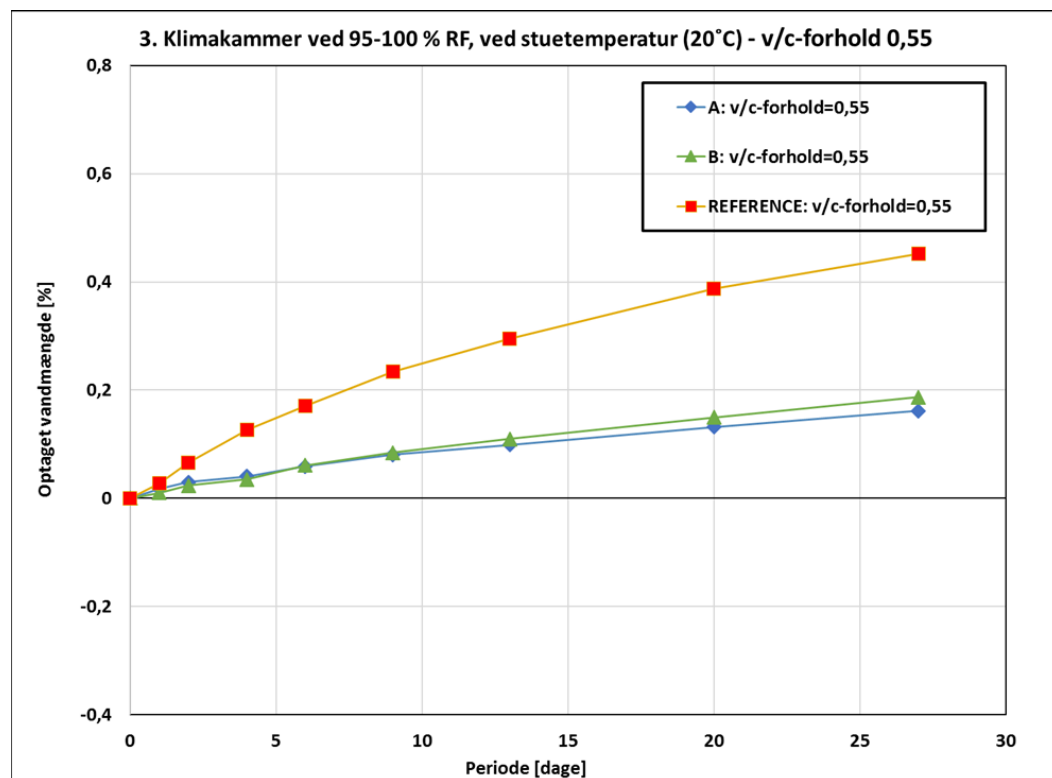
Selvom den relative luftfugtighed i perioden på de ca. 27 dage har svinget mellem ca. 50 % og 90%, så har der faktisk ikke været nogen fugtoptagelse i hverken imprægnerede som ikke-imprægnerede prøve-emner.

6.3 Fugtoptagelse klimakammer ved 95-100 % RF, ved stuetemperatur (20 °C)

I dette forsøg har prøveemner med og uden imprægnering været eksponeret i et klimaskab ved stuetemperatur og næsten 100 % RF konstant over en periode på ca. 27 døgn.



Figur 19. Fugtoptagelse (= optaget vandmængde) i procent for to af de undersøgte imprægneringsmidler samt en reference- prøve med v/c-forholdet på 0,40.



Figur 20. Fugtoptagelse (= optaget vandmængde) i procent for to af de undersøgte imprægneringsmidler samt en reference- prøve med v/c-forholdet på 0,55.

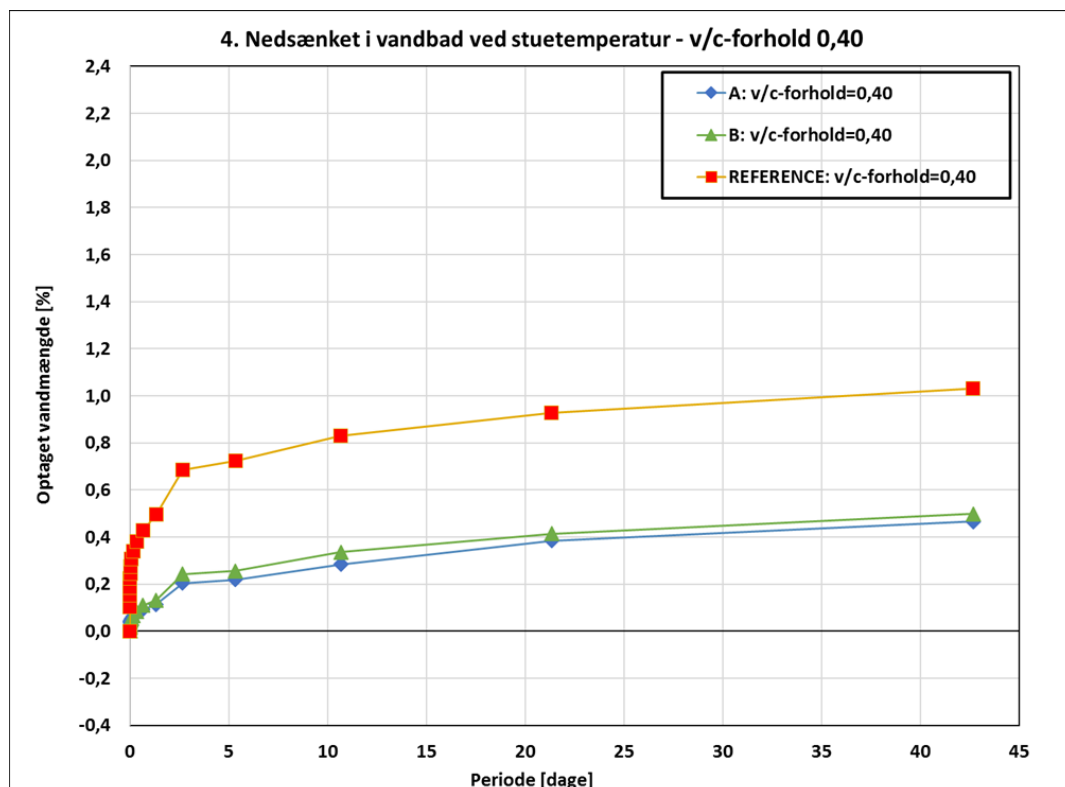
Både figur 19 og 20 viser, at der sker en fugtoptagelse af såvel referenceprøver uden imprægnering og imprægnerede prøveemner for beton med v/c-forhold på 0,40 som 0,55. Generelt viser referenceprøverne uden imprægnering en fugtoptagelse, som cirka er dobbelt så stor som de tilsvarende imprægnerede prøver.

6.4 Fugtoptagelse ved nedsænket i vandbad ved stuetemperatur

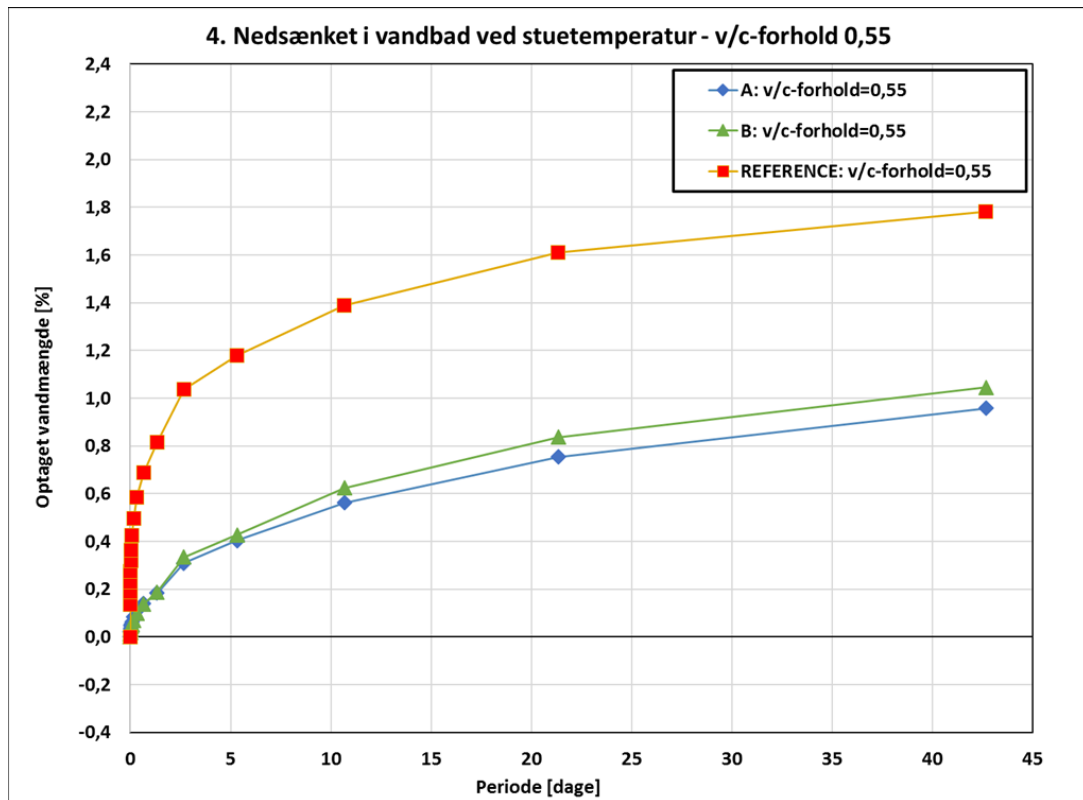
I dette forsøg udsættes såvel referenceprøver uden imprægnering som imprægnerede prøver for en konstant høj fugtbelastning, idet de er nedsænket i vand i hele forsøgsperioden.



Figur 21. Forsøgssopstilling for prøveemner nedsænket i vandbad. Prøveemnerne er placeret i vandbad med ca. 3 cm frit vand over. Emnerne er kassevis inddelt iht. tidtagning og opmærkning. Ligeledes har hvert prøveemne sin egen klud, som bruges til at fjerne frit vand på emnets overflade umiddelbart efter optagelse og vejning, hvorpå de atter placeres i vandbadet.



Figur 22. Fugtoptagelse (= optaget vandmængde) i procent for to af de undersøgte imprægneringsmidler samt en reference- prøve med v/c-forholdet på 0,40.



Figur 23. Fugtoptagelse (= optaget vandmængde) i procent for to af de undersøgte imprægneringsmidler samt en reference- prøve med v/c-forholdet på 0,55.

Figur 22 og 23 viser tydeligt, at de imprægnerede prøver har en markant lavere fugtoptagelse end de ubehandlede prøver for begge v/c-forhold (0,40 og 0,55).

Tabel 4. Fugtoptagelse. Den reducerede vandoptagelse af behandlede prøveemner ift. ubehandlede med v/c-forhold 0,41±2 ved forskellige terminer.

Reduceret vandoptagelse af behandlede prøveemner ift. ubehandlede med v/c-forhold 0,41±2 [vandprocent]						
Periode [dage]	0,4	1	5	11	21	43
A	82	78	69	65	58	54
B	83	75	65	60	56	53
C	77	76	71	67	66	61
D	87	84	74	69	65	60

Tabel 5. Fugtoptagelse. Den reducerede vandoptagelse af behandlede prøveemner ift. ubehandlede med v/c-forhold 0,55±2 ved forskellige terminer.

Reduceret vandoptagelse af behandlede prøveemner ift. ubehandlede med v/c-forhold 0,55±2 [vandprocent]						
Periode [dage]	0,4	1	5	11	21	43
A	85	79	65	58	52	45
B	87	79	62	53	46	39
C	81	82	77	73	70	66
D	85	85	79	74	69	62

I tabel 4 og 5 har vi forsøgt at kvantificere effekten af de afprøvede imprægneringsmidler i form af den %-vise reduktion i vandoptagelsen i forhold til tilsvarende ubehandlede prøver. Bemærk at vandoptagelsen for produkt C og D ikke er vist på nogen figur, men deres forløb og vægtændringer er næsten tilsvarende som for produkt A og B som er vist på figur 22 og 23.

Som det fremgår af tabellerne, så aftager de undersøgte imprægneringsmidlers reducerende egenskaber (effekt) overfor fugtoptagelse med tiden.

7. Diskussion

Der er i denne rapport undersøgt 4 forskellige typer imprægneringsmidler, som imidlertid alle er silan-baserede. De 4 produkter er udvalgt med bl.a. baggrund i tidligere forundersøgelser, hvor netop disse produkter synes at have gode fugtbremsende egenskaber. Dette er gjort for at kunne udvælge 1-2 produkter til et større in-situ forsøg med imprægnering af en AKR-skadesramt kantbjælke, som er fremstillet med potentielt frostfarlig beton.

I projektet i øvrigt har vi også undersøgt andre typer af produkter og deres egenskaber med blandet succes.

Det er klart, at vores undersøgelser er foretaget ud fra en optimal forberedelse af prøveemner og beton, og som i mange henseender ikke vil afspejle de virkelige forhold som en imprægnering af en f.eks. udendørs udsat betonkonstruktion vil ske under i praksis. Vore undersøgelser har vist, at en imprægnerings effektivitet i høj grad afhænger af de omstændigheder arbejdet udføres under, såsom underlagets tæthed/permeabilitet, fugtindhold og temperatur.

Vi har også lært, at mange af de anvisninger, som leverandørerne angiver for de enkelte produkter ofte kan være uklare eller upræcise. Dette gælder f.eks. forhold som anbefalet mængde imprægneringsmiddel per arealenhed, antal påføringer, evt. materialespild, kontakt- og hærdetider som kan variere betydeligt alt efter underlagets beskaffenhed, især porøsitet og de klimatiske forhold under udførelsen (temperatur, luftfugtighed).

8. Konklusion

Det er vigtigt at understrege, at de følgende konklusioner alene dækker urevnet traditionel beton med v/c-forhold på omkring 0,40 til 0,57.

Det kan konkluderes, at de pågældende imprægneringsmidler anvendt i undersøgelserne har haft en betydelig indflydelse på at hindre vandoptagelse i beton, som er udsat for fugt. Dette fremgår af bl.a. afsnit 6.4 (konstant nedsænket i vand) samt 6.1 (udendørs udsat for slagregn). Beton nedsænket konstant i vand repræsenterer nok det mest ekstreme eksponeringsforhold for vandoptagelse, mens beton udsat for slagregn må vurderes at være et meget realistisk eksponeringsmiljø for beton i særdeles fugtige udendørs omgivelser.

Vore beregninger viser, at imprægneret beton som bliver udsat for f.eks. konstant vandbelastning vil være væsentligt længere tid om at blive kritisk vandmættet end en tilsvarende ikke-imprægneret beton.

Heraf kan det konkluderes, at visse imprægneringsmidler reducerer vandoptagelsen i en sådan grad, at betonen i praksis aldrig kan forventes at blive fugtmættet i en grad, hvor denne er i risiko for at blive frostskaadet. Dette gælder for såvel vandrette som lodrette betonoverflader, som er udsat for slagregn, eller for beton som kun periodevis er dækket med vand (nedsænket eller i kontakt med vand).

Det kan også konkluderes fra vores mange undersøgelser, hvoraf kun en mindre del er rapporteret i denne rapport, at det absolut ikke er ligegyldigt, hvilke type silanprodukt, der anvendes, da visse produkter har meget tvivlsomme eller stærkt begrænsede fugtreducerende egenskaber, og som derfor kan føre til en næsten virkningsløs imprægnering, som hverken sikrer holdbarheden af imprægneringen eller den vandafvisende evne. Derimod har vores undersøgelser også vist, at der er flere produkter på markedet, herunder de i denne rapport undersøgte, som har endog særdeles gode fugtbremsende egenskaber på beton – både overfor beton udsat for slagregn som beton udsat for konstant vedvarende fugtbelastning. Disse produkter har også stærkt fugtbremsende egenskaber på betoner med lave v/c-forhold, såsom 0,40.

Endvidere kan det konkluderes, at en imprægnering kan falde uheldigt ud selv ved anvendelse af den rigtige type silan, dersom forholdene såsom vejrliget, betonens fugtindhold og temperatur, eksponeringstid/kontaktid, antal påføringer og hærdetid ikke er optimale.

Afslutningsvis kan det anbefales, at man inden en eventuel imprægnering skal udføres, vurderer og/eller undersøger betonens porøsitet, permeabilitet og ikke mindst det aktuelle vandindhold – ligesom de udførelsesmæssige forhold (antal påføringer, påført mængde, kontaktid) optimeres ved en evt. prøvebehandling.



DTU Byg
Institut for Byggeri og Anlæg

BYG R-435, 2017

ISBN: 8778775345

Institut for Byggeri og Anlæg, DTU
Brovej, Bygning 118
2800 Kgs. Lyngby

www.byg.dtu.dk
Tlf. 4525 1700