



## **Imprægneringsmidlers indvirkning på betons holdbarhed**

Del 2: Undersøgelse af effekten af imprægnering på kloridindtrængning i beton udsat for varierende kloridbelastning

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

*Publication date:*  
2018

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*

Brandt, B. O., Van, T., Grelk, B., Hansen, K. K., & Hansen, S. B. (2018). *Imprægneringsmidlers indvirkning på betons holdbarhed: Del 2: Undersøgelse af effekten af imprægnering på kloridindtrængning i beton udsat for varierende kloridbelastning*. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering.

---

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

BYG R-436, 2018

# Imprægneringsmidlers indvirkning på betons holdbarhed

Del 2: Undersøgelse af effekten af imprægnering på  
kloridindtrængning i beton udsat for varierende  
kloridbelastning

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



Rapport BYG R-436

2018

Af Brandt, B.O., Van, T., Grell, B., Hansen, K.K., Hansen, S.B.

Copyright: Hel eller delvis reproduktion af denne rapport er tilladt med kildehenvisning  
Forsidebillede: Forsøgsopstilling af betoncylindre. Foto: Bo Brandt  
Publiceret af: Institut for Byggeri og Anlæg, Brovej  
Rekvireres fra: [www.dtu.dk](http://www.dtu.dk)

ISBN: 8778775353

## Indhold

<b>1.</b>	<b>Indledning</b> .....	<b>2</b>
<b>2.</b>	<b>Baggrund</b> .....	<b>2</b>
<b>3.</b>	<b>Formål</b> .....	<b>3</b>
<b>4.</b>	<b>Imprægnering</b> .....	<b>4</b>
4.1	Generelt .....	4
4.1.1	Silan .....	4
4.1.2	Siloxan .....	5
4.1.3	Silikone .....	5
4.2	Produkter.....	5
4.3	Udføringmæssige forudsætninger .....	6
<b>5.</b>	<b>Prøveemner</b> .....	<b>7</b>
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
5.5	Bestemmelse af spild fra imprægneringen .....	11
5.6	Imprægneringsdybde .....	11
5.7	Eksponeringsforhold .....	13
<b>6.</b>	<b>Fugtoptagelsesforsøg</b> .....	<b>13</b>
6.1	Fugt- & kloridoptagelse ved konstant eksponering .....	13
6.2	Fugt- & kloridoptagelse ved periodisk eksponering .....	15
<b>7.</b>	<b>Undersøgelse af kloridindtrængning</b> .....	<b>17</b>
7.1	Kloridindtrængningsdybde ved konstant og periodisk eksponering ..	17
7.2	kloridoptagelse ved periodisk eksponering .....	18
7.3	kloridoptagelse ved konstant eksponering .....	19
<b>8.</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>20</b>
<b>9.</b>	<b>Konklusion</b> .....	<b>20</b>
<b>6.</b>	<b>Bilag Kloridindtrængningsdybde efter 43 dage</b> .....	<b>21</b>

## 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 Grell, fra DTU Byg og Svend Bødker Hansen, All Remove Danmark har været vejledere på projektet.

Denne rapport, som er den delrapport (nr. 2) af en række delrapporter udarbejdet af den samlede projektrapport, indeholder udvalgte resultater af en række fugtundersøgelser af beton, mht. effekten af imprægnering på indtrængningen af klorider under forskellige eksponeringsforhold. Den første delrapport indeholdt primært udvalgte resultater af en række fugtundersøgelser af beton, mht. effekten af imprægnering på fugt-indholdet i beton, under forskellige eksponeringsforhold. Denne delrapport indeholder dog en lang række beskrivelser af prøveforberedelserne, materialer og udførelse, da disse har være fælles for alle prøverne og analyserne i de enkelte delrapporter.

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:

- Alkalikiselreaktioner (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 (ofte baseret på det tidspunkt hvor der kan initieres korrosion på armeringen pga. klorider), som er op til 125 år, mod tidligere 25-50 år.

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

I dette projekt så 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 delrapport nr. 2 er at undersøge:

- Effekten af 4 forskellige typer imprægneringsmidlers indvirkning på fugtindholdet i beton under forskellige eksponeringsforhold – og samtidigt vurdere om imprægneringen kan eller ville kunne have betydning for indtrængningen af klorider i saltholdige miljøer, hvor betonen kan blive udsat for kloridholdigt vand (tøsalholdigt vand, havvand, svømmebadsvand mm).

De 4 undersøgte produkter er:

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

Der er i alle 4 tilfælde tale om silanprodukter.

I denne delrapport ses alene nærmere på, om hvorvidt og i hvilken grad imprægnering kan reducere optagelsen af klorider via indtrængende vand i betonen.

I det aktuelle delprojekt ses nærmere på følgende to eksponeringsmiljøer:

1. Nedsænket i en NaCl-opløsning ved stuetemperatur.
2. Periodisk nedsænket i vandbad (Splash Zone) 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.

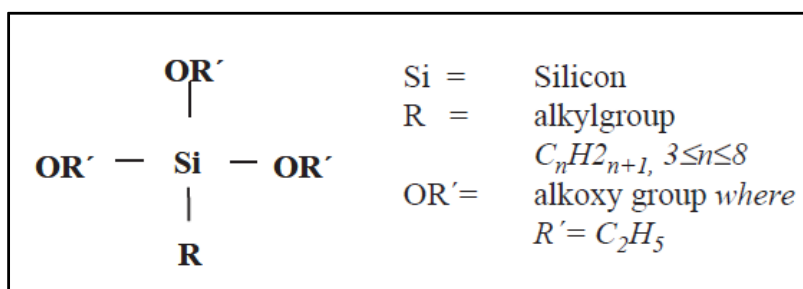
Figur 1 i DS/EN 1504-2:2006 viser en skematisk gengivelse af, hvordan en typisk hydrofobisk imprægnering virker på et porøst materiale, såsom beton. Porerne og kapillærerne får en indvendig belægning, men de udfyldes ikke. Der er ingen film på betonens overflade og betonens udseende ændres ikke eller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

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



## IMPRÆGNERINGSMIDLERS INDVIRKNING PÅ BETONS HOLDBARHED

### 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.

### 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.

### 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.

### 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 Udførelsmæssige 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 på mellem 13 og 14 i ukarboniseret beton)
- 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.

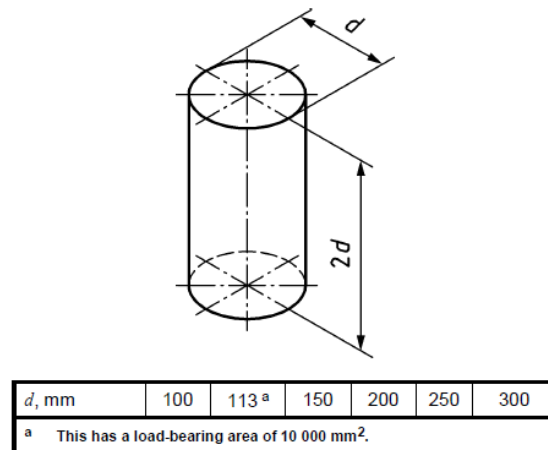
## 5. Prøveemner

### 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.

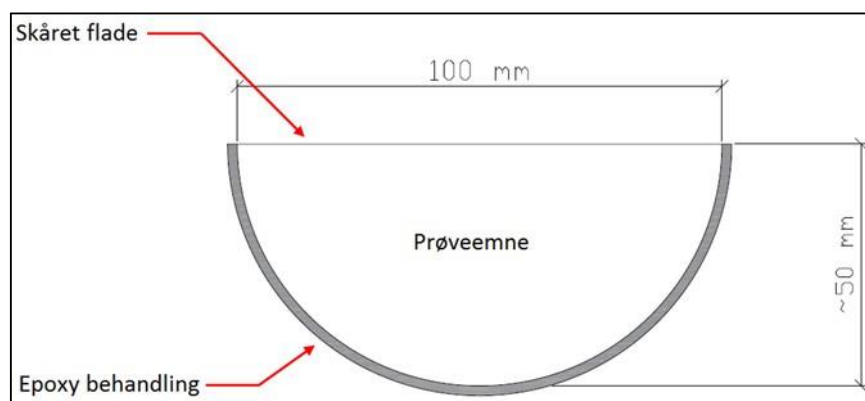
### 5.2 Fremstilling af prøveemner

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



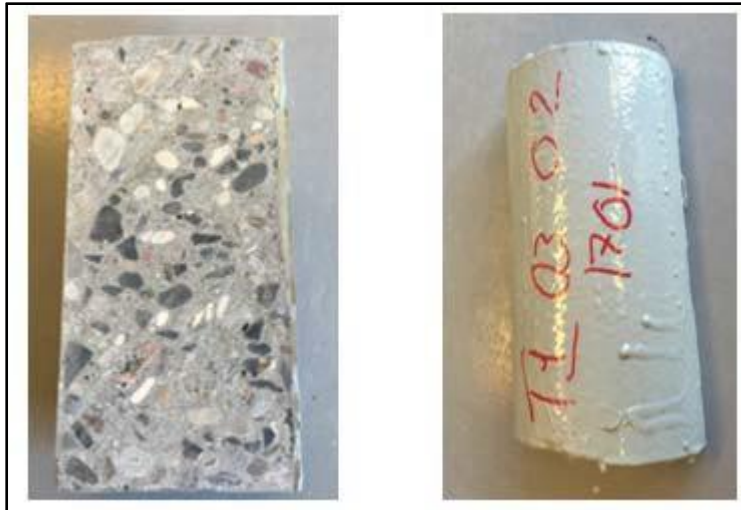
Figur 3. Princip af fremstilling af prøveemner med dimensionen  $\text{Ø} 100 \times 200 \text{ mm}$ .

De enkelte prøveemner består af halve betoncylindre som efter hærkning 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 betoncylinderne 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 forholdsvis samme 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 (=potentielt AKR-skadelige korn) i sandfraktionen, som vi ser nærmere på i en af de kommende delrapporter.

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

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

### 5.4 Imprægning af prøveemner

#### 5.4.1 Prøveforberedelse

Betoncylindrene (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 ≈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 imprægning.

#### 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. producenternes anvisninger om påføringsmængder, antal påføringer og eksponeringstid mv. For alle produkterne har vi regnet os frem til, at der bør anvendes imprægneringsmiddel i en mængde der svarede til ca. 3-4 gram pr. lag, hvorfor vi besluttede, at anvende 4 gram pr. lag ved alle produkterne, da der antages at være et vist imprægneringsspill ved vertikal påføring.

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

##### 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/m<sup>2</sup>. Påføring af første lag sker på tør overflade, derefter påføres efterfølgende lag vådt i vådt.

##### Produkt B

Der påføres 1 lag efter leverandørens specifikationer med en imprægneringsmængde sat til 200-400g/m<sup>2</sup> dvs. 4 gram i dette forsøg. Påføring af første lag sker på tør overflade.

##### 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 180-230 g/m<sup>2</sup>. Dette er beregnet for prøveemner til at være 3,6 svarende til ca. 4 gram pr. lag.

##### Produkt D

Produktet påføres i 2 lag med en mængde på 200-400 g/m<sup>2</sup>. 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.

### 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.

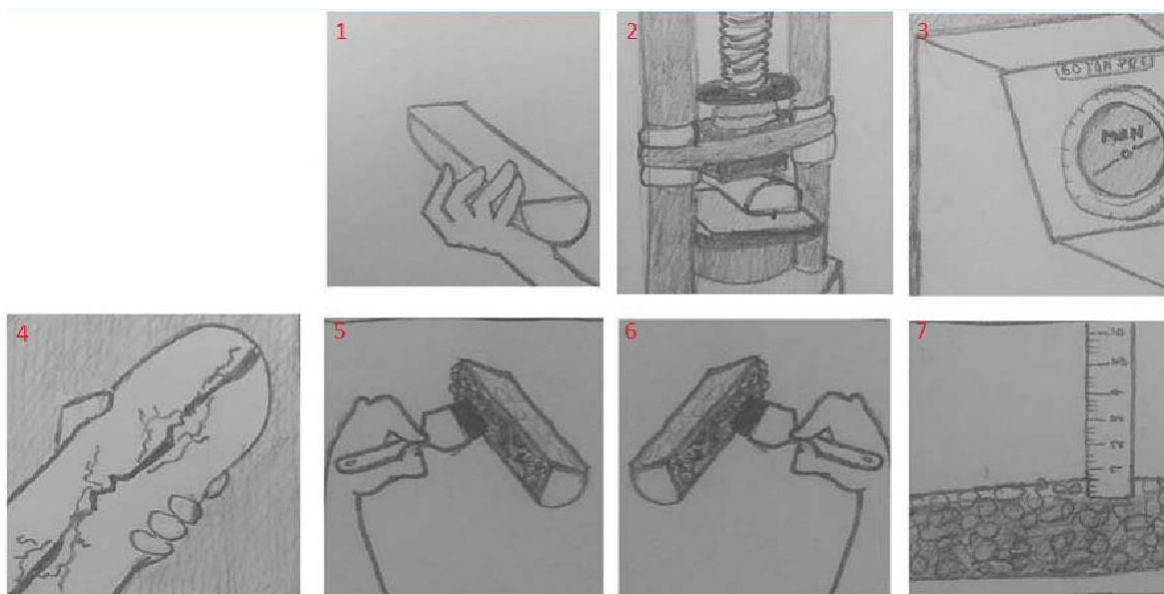
Et eksempel fra vores undersøgelse, er et prøveemne med en imprægneringsmængde på 28 gram, hvoraf 15 gram løber af prøveemnet (spild) og 13 gram bliver optaget af prøveemnet, hvilket er indenfor leverandørens anvisninger.

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.

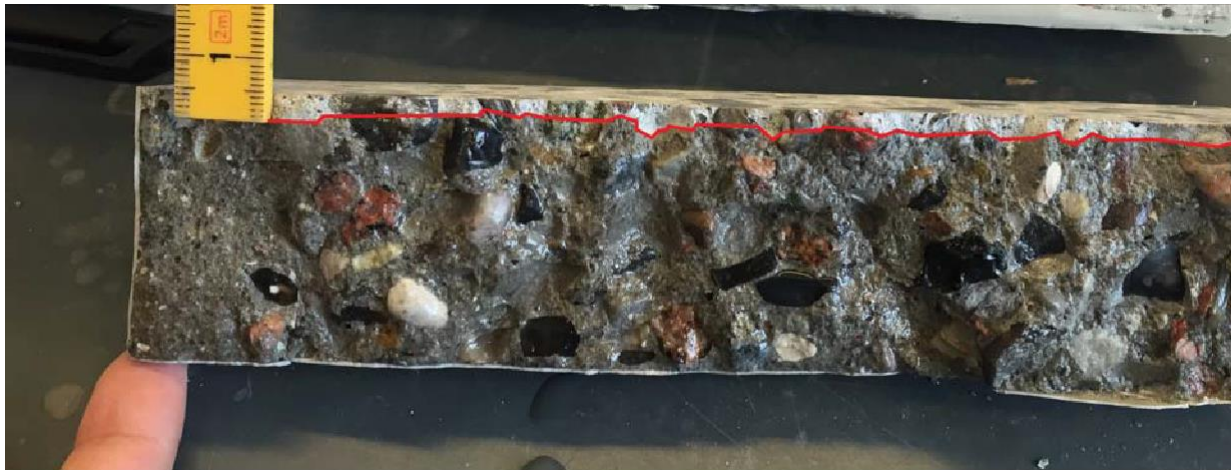
Endvidere er leverandørens specifikationer ikke angivet iht. et specifikt vand/cement forhold og beto- nens fugtighed. Derfor antages det, at den maksimalt anbefalede mængde er beregnet for høje vand/cement forhold ( $\geq 0,60$ ). Da B og D skal have færre påføringer og mængde, er der for de produk-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

### 5.6 Imprægneringsdybde

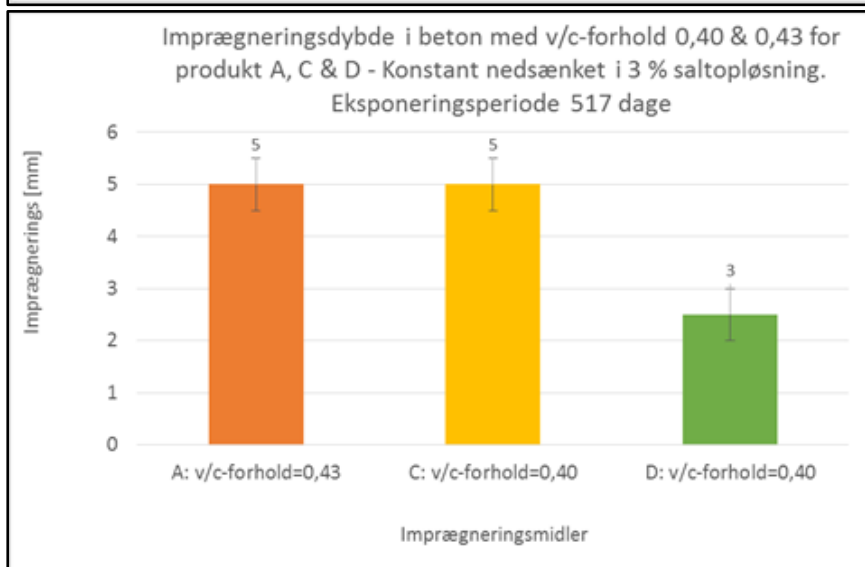
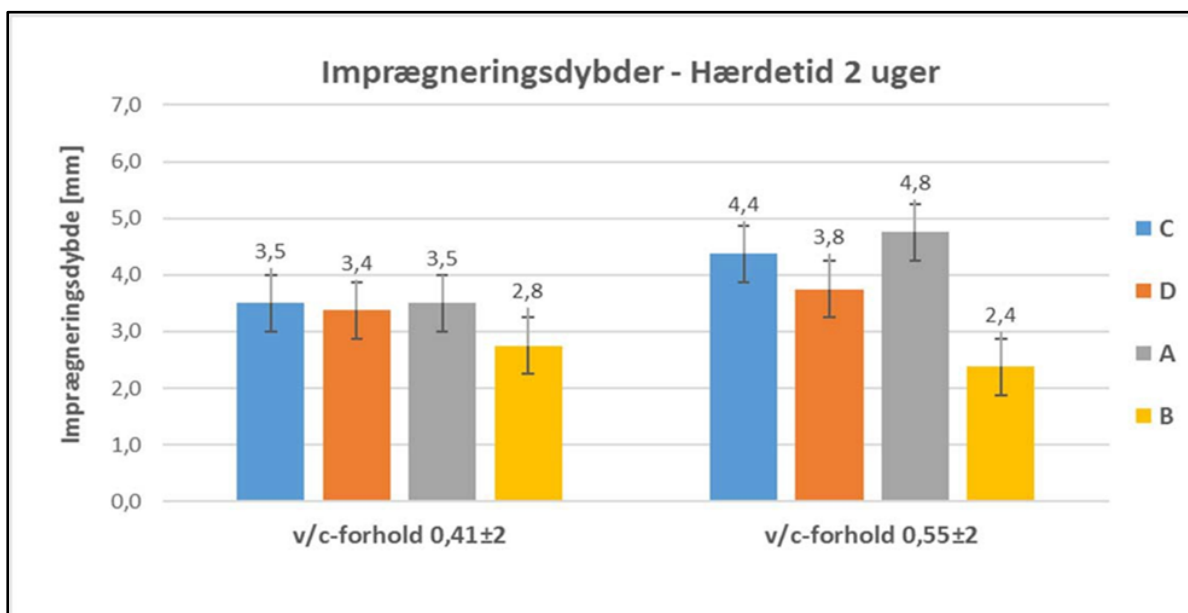
Imprægneringsdybden bliver bestemt iht. DS/EN 1504-2 tabel 3 på de undersøgte betoner. Indtrængningsdybden er helt målt med en nøjagtighed på ca. 0,5 mm ved at bryde de behandlede prø- velegemer (halve betoncylindre) i en trykpresse, og derpå sprøjte vand på brudfladen. Dybden af det tørre område tages 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 tre steder: på midten og i hver ende).



Figur 11a og 11b. Imprægneringsdybde. For produkterne A, B, C & D. Imprægneringsdybden angivet i mm ved v/c forhold 0,40, 0,41, 0,43 & 0,55. Standardafvigelsen er fastlagt til 0,5mm jvf. DS/EN 1504-2. Figur 11b viser den aktuelle måling som er foretaget på de emner som er eksponeret for klorider og efter 517 dage, mens figur 11a er foretaget på emner som har været hærdnet i 2 uger.

### 5.7 Eksponeringsforhold

Prøveemnerne bliver i det følgende udsat for følgende forskellige eksponeringsforhold:

1. Nedsænket i en 3 % NaCl-opløsning ved stuetemperatur.
2. Periodisk nedsænket i en 3 % NaCl-opløsning (simulering af Splash Zone forhold) ved stuetemperatur.

Undersøgelse er foretaget på betonprøver uden reaktivt sand. Der udføres også undersøgelser på betonprøver med reaktivt sand, som beskrives i en særskilt rapport.

## 6. Fugtoptagelsesforsøg

### 6.1 Fugt- & kloridoptagelse ved konstant eksponering

Denne del af undersøgelsen drejer sig om at vurdere fugt og NaCl-optagelsen i prøveemner med og uden Imprægnering og som udsættes for konstant saltvandbelastning (3 % NaCl-opløsning). Dette er for at afspejle de påvirkninger, som konstruktioner vil have dersom de konstant er under vand niveau. Denne type belastning ses typisk ved brosjøler under vandniveau.

I denne del af undersøgelsen ses primært på, hvorvidt imprægnering kan reducere fugt- og kloridoptagelse i betonen, og dermed vil kunne nedsætte hastigheden for hvornår klorider i en vis koncentration vil kunne nå ind til armeringen. Effekten som opnås ved imprægnering af beton, ifm. alkaliskreaktioner, vil blive behandlet i en efterfølgende rapport.

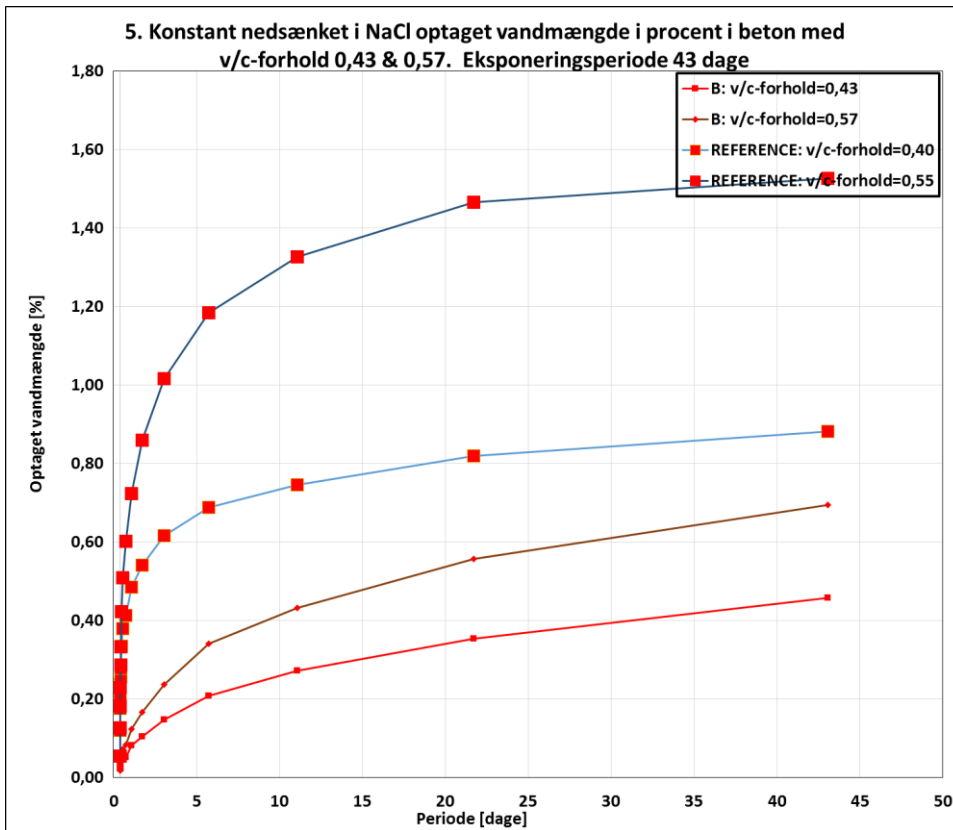
Prøveemnerne i undersøgelsen består som tidligere nævnt af beton med v/c forhold 0,40 til 0,55.

Fugtoptagelsen i prøveemnerne måles ved løbende at måle prøveemnernes vægtændring.

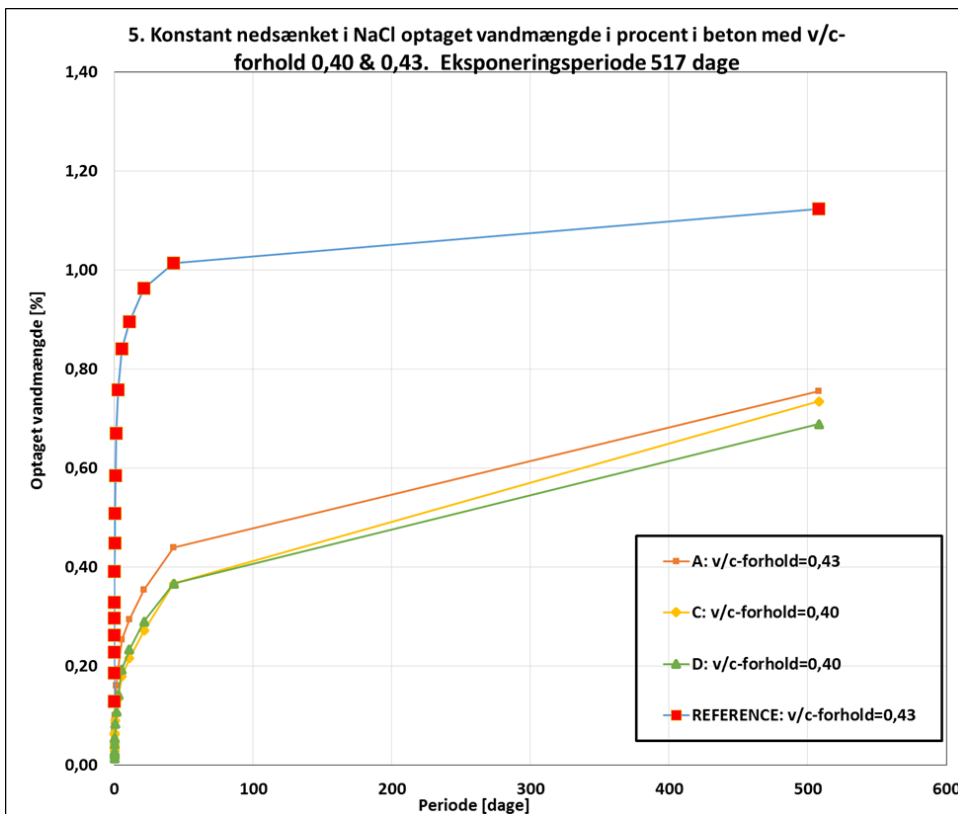


Figur 12. Forsøgsopstilling for prøveemner nedsænket i en 3 % -NaCl-opløsning. Prøveemnerne er placeret i NaCl-opløsning med ca. 3 cm frit vand over. Emnerne er kassevis inddelt iht. tidtagning og opmærkning. Ligeledes har hvert prøveemne sin egen klud, som bruges til at fjerne frit vand på emnets overflade umiddelbart efter optagelse og vejning, hvorpå de atter placeres i NaCl-opløsningen.





Figur 13. Fugtoptagelse (=optaget vandmængde) i procent for et af de undersøgte imprægneringsmidler på beton med v/c-forholdet 0,43 og 0,57 samt en referenceprøve med v/c-forholdet på 0,40 og 0,55. Selvom man ikke direkte kan sammenligne de imprægnerede prøver med referenceprøverne fordi der er en mindre forskel i v/c-forholdene, så viser det alligevel, at der sker en betydelig nedsættelse af kloridindtrængningen når betonen er imprægneret.



Figur 14. Fugtoptagelse (=optaget vandmængde) i procent for tre af de undersøgte imprægneringsmidler på beton med v/c-forholdet 0,40 og 0,43 samt en referenceprøve med v/c-forholdet på 0,43.

## 6.2 Fugt- & kloridoptagelse ved periodisk eksponering

I denne undersøgelse udsættes 4 forskellige typer imprægneringsmidler for periodevis eksponering for en 3 % NaCl-opløsning. I følgende undersøgelse afspejler eksponeringstypen en bropille ved periodisk havvandsbelastning (splashzone), klorid indtrængningen sker ved en kombination af kapillarsugning og diffusion.

Dette sker ved at eksponeringsforholdene ændres for prøveemnet. Prøveemnet vil være delvist udtørret ved start og derefter nedsænkes i en NaCl-opløsning, her vil ske kapillarsugning, efter en periode tages prøveemnet op, vandet i prøveemnet fordamper langsomt og vil efterlade NaCl tilbage, her vil være diffusion.

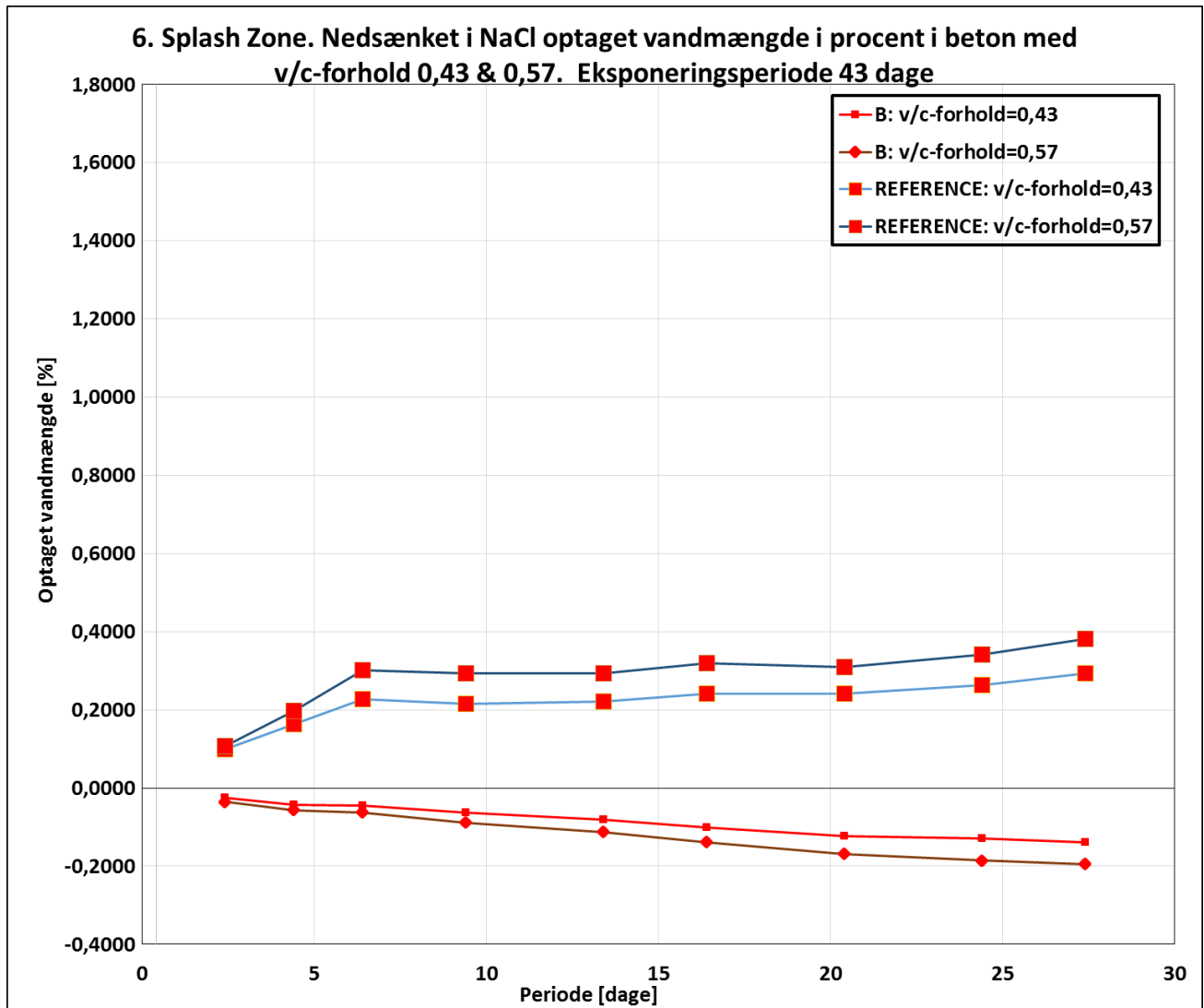
### Fremgangsmåde

Der indgår 12 prøveemner, heraf 4 referencer. Prøveemnerne har forskelligt vand/cement forhold, imprægnering og imprægneringsmængde.

I følgende undersøgelse, nedsænkedes prøveemnerne i en 3 % NaCl opløsning, prøverne tages op efter 15 minutter, hvor de står til hvile ved stuetemperatur (50-60 % RF ved 23 °C) i 15 min. dette gentages yderligere 2 gange, således at alle prøverne får 3 x 15 minutter i NaCl opløsningen og 3 x 15 minutter i hvile. Prøverne vejes kun inden den første nedsækning, med en målefrekvens på 24 timer.



Figur 14. Forsøgsopstilling. Til venstre ses prøveemner der har 15 minutters hvileperiode i hvilken de vejes. Til højre ses prøveemner der eksponeres i 15 minutter, hvorefter de tages op og vejes. Proceduren er som følger: 3 gange eksponering af 15 minutter per gang med 15 minutter hvile mellem eksponeringer.



Figur 15. Fugt- og saltoptagelse (=optaget NaCl-opløsningsmængde) i procent for et af de undersøgte imprægneringsmidler på beton med v/c-forholdet 0,43 og 0,57 samt tilsvarende referenceprøver. Kurverne viser, at de to imprægnerede betonprøver netto mister lidt vægt som funktion af tiden, hvilket må antages at skyldes en fordampning af en del af det frie vandindhold, som betonerne havde ved støbningen (0,43 og 0,57).

## 7. Undersøgelse af kloridindtrængning

### 7.1 Kloridindtrængningsdybde ved konstant og periodisk eksponering

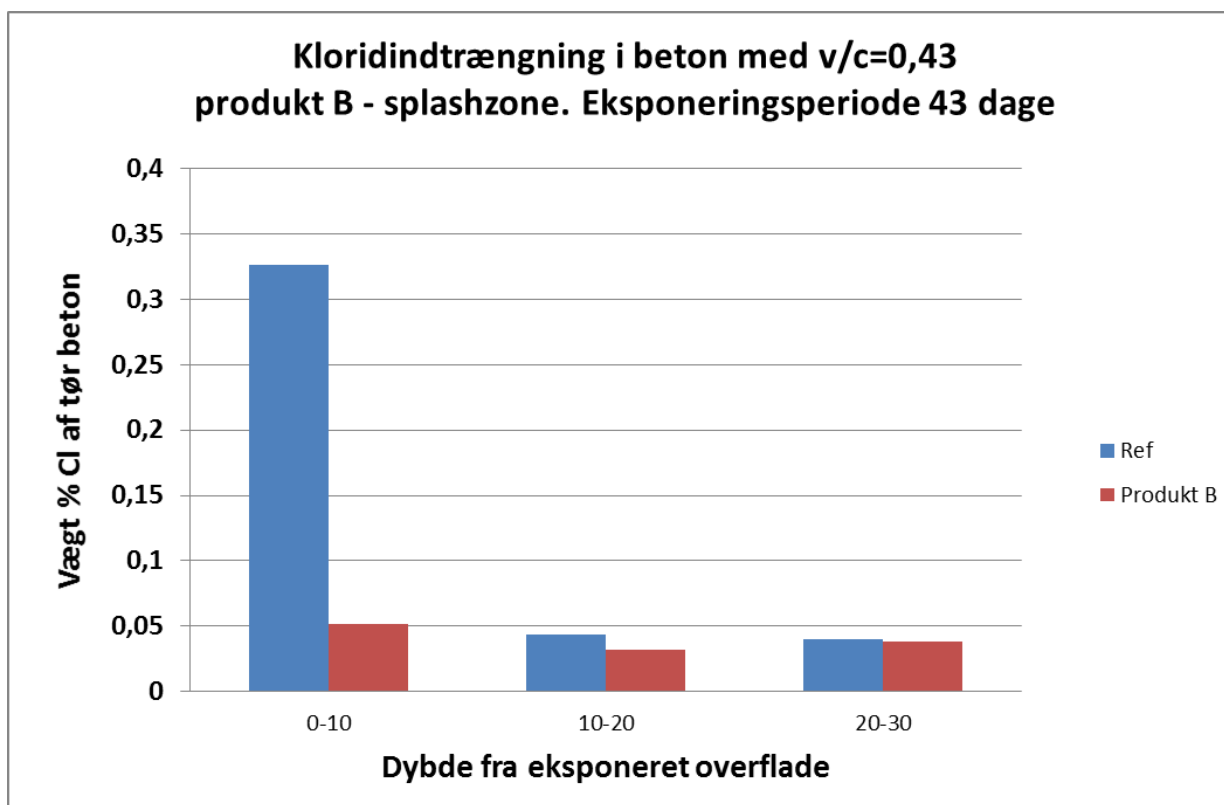
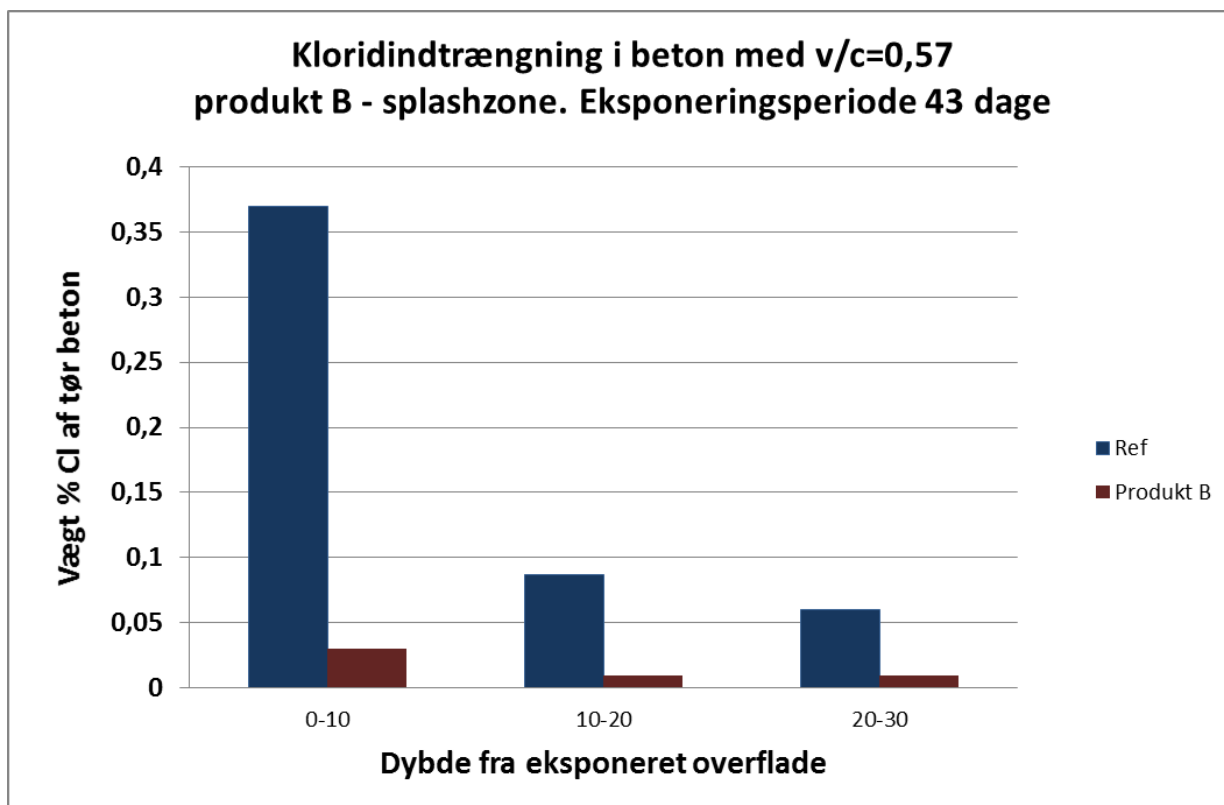
Følgende undersøgelse vedrører indtrængningsdybden af klorider. For at undersøge, hvor dybt kloriderne er trængt ind i prøveemnerne benyttes forstøvet sølvnitrat påsprøjtet en brudflade. Prøveemnerne knækkes på langs og straks efter påsprøjtes sølvnitrat på brudfladen.

Farveændringen vil indikere hvor dybt klorid er trængt ind. Prøveemnerne stammer fra undersøgelse 5 og 6, hvor begge eksponeringsforhold involverer nedsækning af prøveemnerne i NaCl-opløsning. For undersøgelse 5 udsættes prøveemnerne for konstant nedsækning i NaCl-opløsning og for undersøgelse 6 periodisk nedsækning.

Der vælges at arbejde med kun et af imprægneringsprodukterne (type B) i denne undersøgelse eftersom der ikke er nogen signifikant forskel mellem effekten af imprægneringsmidlerne med hensyn til indtrængningsdybden for klorid. Kloridindholdet i betonene er bestemt ved RCT-metoden (Rapid Chloride Test) og er bestemt som vægt % af tør beton.

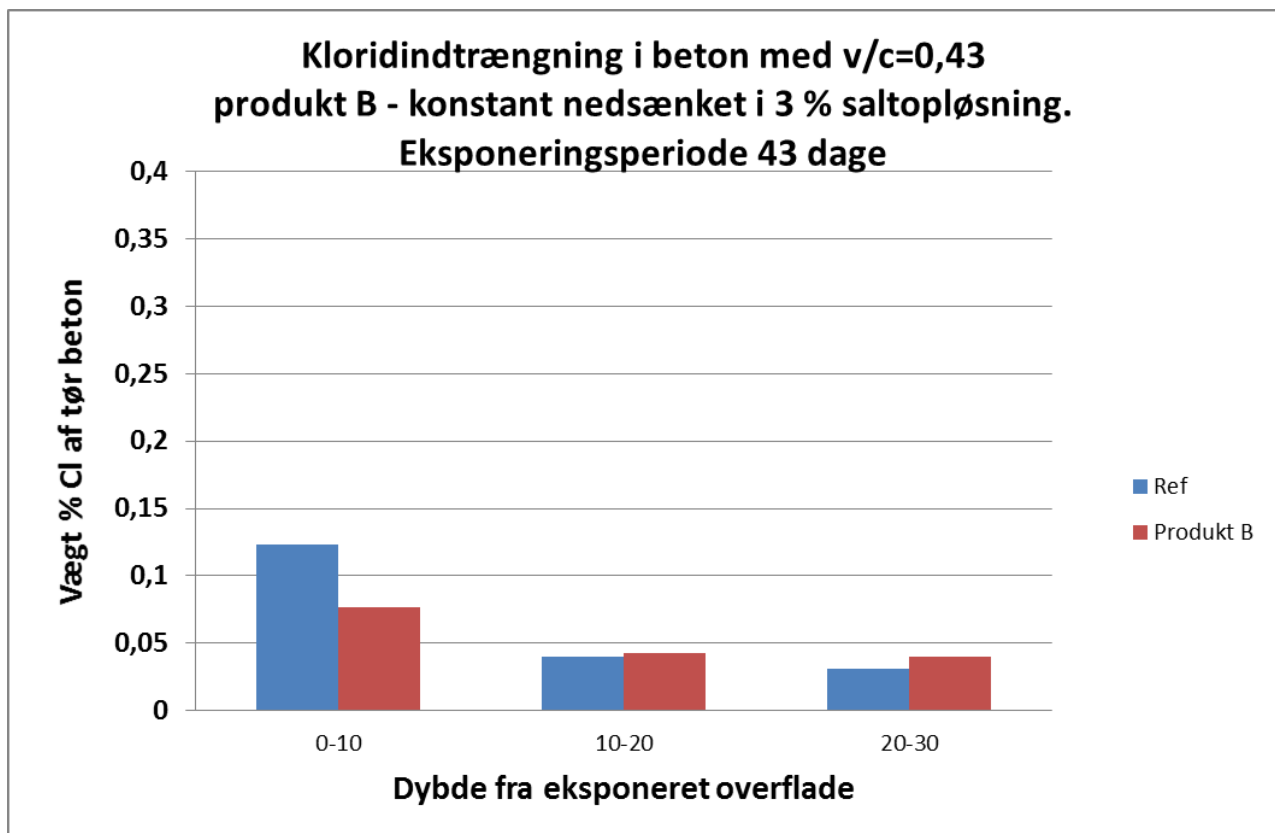
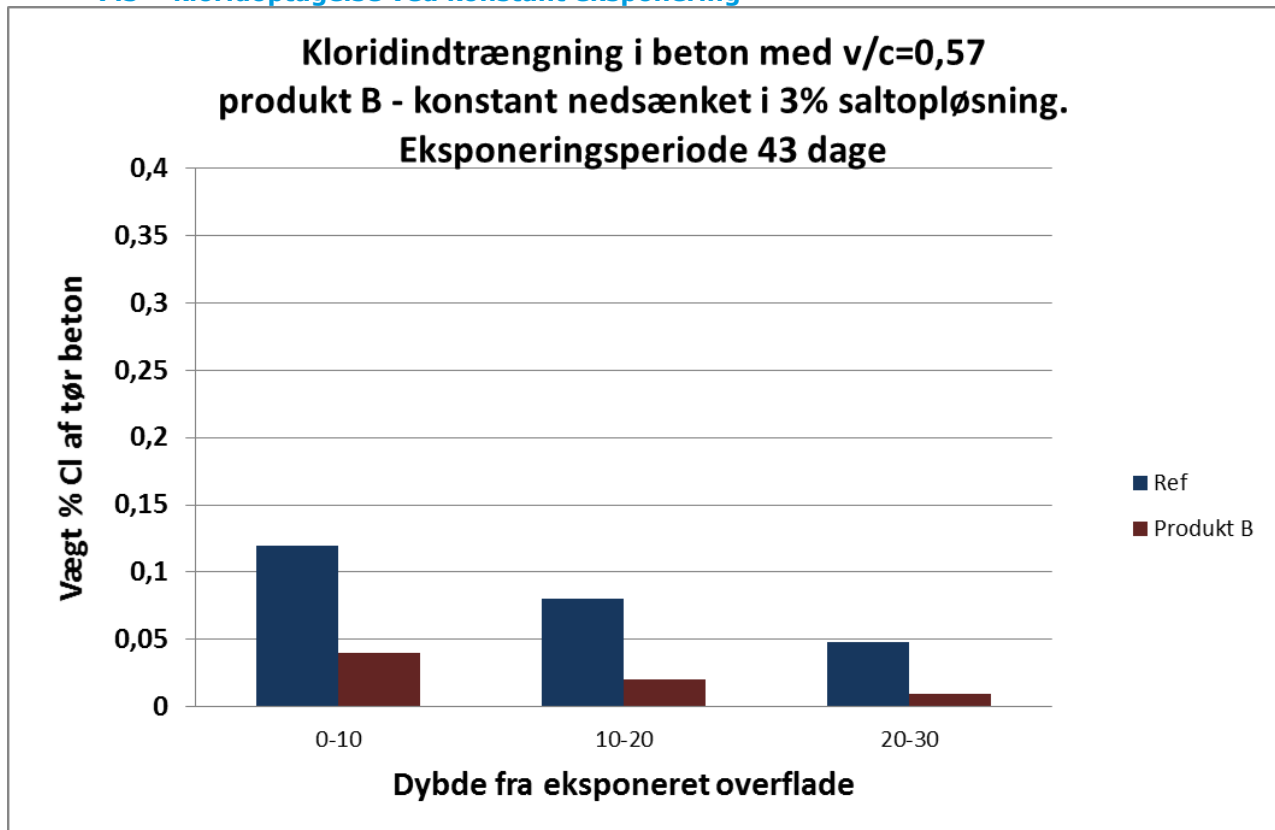
Det fremgår ikke overraskende af figurerne, at begge eksponeringer viser, at klorid indtrængningen er større for prøveemner med v/c-forhold 0,55 (ca. 20 mm) end for prøveemner med v/c-forhold 0,40 (ca. 10 mm). Endvidere viser det, at imprægnering har en betydelig bremsende effekt på klorid indtrængningen, idet klorid indtrængningen er ikke til at se på de imprægnerede prøveemner.

7.2 Kloridoptagelse ved periodisk eksponering



Figur 16. Beton som er udsat for splashzone forhold med en 3 % NaCl-opløsning. Kloridindhold i beton med v/c-forhold på hhv. 0,57 og 0,43 med/uden imprægnering. Der er tydeligvis stor forskel i kloridkoncentrationen i de yderste 0-10 mm mellem imprægneret og uimprægneret prøver.

7.3 Kloridoptagelse ved konstant eksponering



Figur 17. Beton helt nedsænket i en 3 % NaCl-opløsning. Kloridindhold i beton med v/c-forhold på hhv. 0,57 og 0,43 med/uden imprægnering. Der er tydeligvis stor forskel i kloridkoncentrationen i de yderste 0-10 mm mellem imprægneret og uimprægneret prøver.

## 8. Diskussion

Denne delrapport er et lille uddrag af en større projektrapport som omhandler udvalgte imprægneringsmidlers effekt på betons fugtoptagelse i forskellige eksponeringsmiljøer. Det overordnede formål med hovedprojektet er at vurdere, om en eventuel imprægnering vil kunne forbedre betons holdbarhed overfor frost-tø påvirkninger, udviklingen af skadelige alkalikiselreaktioner samt kloridinitieret armeringskorrosion. Da de nævnte nedbrydningsmekanismer alle er afhængig af tilstedeværelsen af fugt/vand, så er det nærliggende at tro, at dersom man mindsker indtrængningen af fugt i betonen, så vil man også nedbringe risikoen eller hastigheden hvorved sådanne nedbrydningsmekanismer foregår.

I denne delrapport har vi set nærmere på udvalgte produkter og kloridindtrængning i beton. Disse produkter har generelt vist stor modstand mod vandindtrængen i beton. Der er ikke foretaget nogen systematisk undersøgelse af disse produkter, men mere en form for stikprøveundersøgelse om disse har kunnet reducere kloridindtrængning i beton med henholdsvis lavt (0,40-0,43) og middel til højt (0,50-0,57) v/c-forhold overfor to typer af eksponeringsforhold: helt nedsænket i en 3 % NaCl-opløsning samt periodevis eksponering for en tilsvarende 3 % NaCl-opløsning.

Det er derfor ikke muligt at kunne sammenligne de enkelte imprægneringsprodukter mod præcis de samme betoners (v/c-forhold) mod hinanden, idet der forekomme mindre forskelle i betonernes v/c-forhold.

Undersøgelsen af kloridindtrængning i beton med konstant saltbelastning er primært sket i projektperioden (ca. ½ år), men er fortsat udover den oprindelige projektperiode, idet der er foretaget målinger på udvalgte emner i op til 517 dage. Denne delrapport er således baseret på de oprindelige data fra projektperiode suppleret med de målinger, som efterfølgende er foretaget på de udvalgte emner. Dette er gjort for at få en indikation af langtidseffekten.

## 9. Konklusion

Resultaterne fra denne delundersøgelse viser, at alle de undersøgte silanbaserede imprægneringsmidler har god eller særdeles god modstand mod kloridindtrængning i beton med såvel højt, middel som lavt v/c-forhold (0,40-0,57). Dette synes at gælde både ved konstant som ved periodevis kloridbelastning. Det er dog tydeligt, at den største effekt synes at være på beton som kun periodevis udsættes for saltvand.

De undersøgte produkter er nøje udvalgt på basis af en indledende screening af en lang række forskellige produkter (jf. hovedrapporten). Denne screening viste, at der kunne være overordentlig stor forskel eller effektivitet mellem de enkelte produkter, fra produkter som efter kort tid (0-45 min) er næsten virkningsløse til produkter som selv efter lang tid (517 dage) kan holde en meget stor del af vandet ude af betonen sammenlignet med uimprægnerede betonprøver.

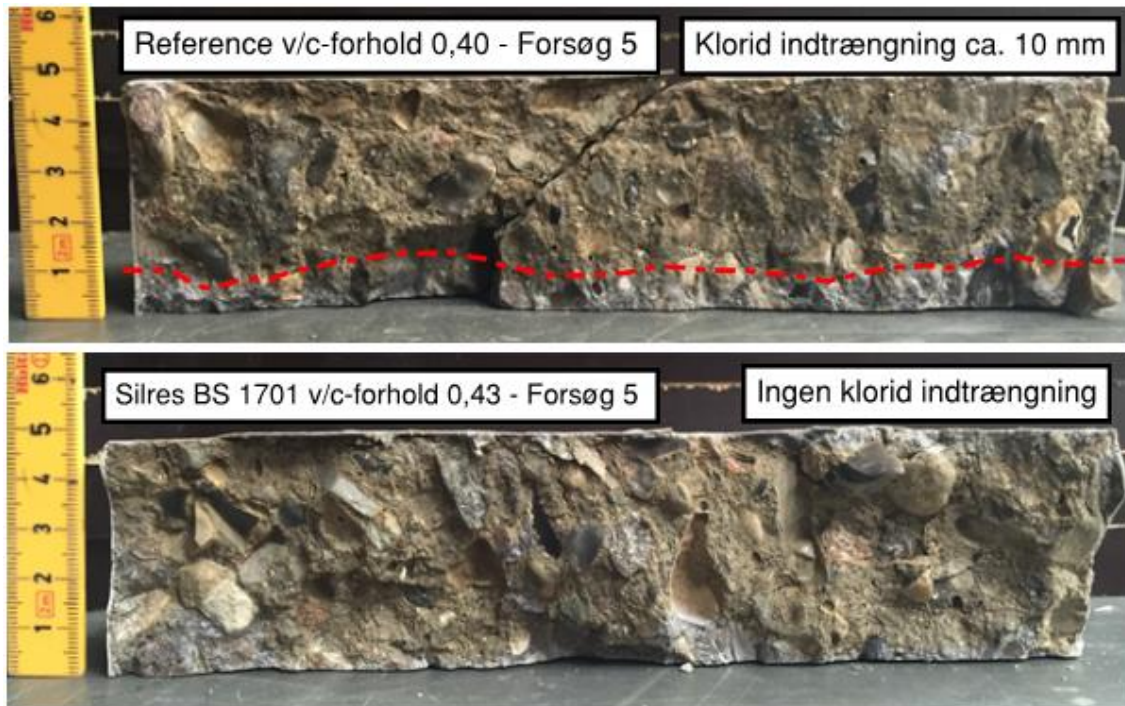
Selv med dette begrænsede forsøgsmateriale har det vist sig, at det samme produkt tilsyneladende kan have forskellig effektivitet på beton med forskelligt v/c-forhold. Om dette hænger sammen med om der er anvendt forskellig applikationsmetode -, koncentration eller mængder eller om det enkelte produktet er bedre egnet til tætte eller mere porøse beton kan ikke afgøres ud fra denne begrænsede undersøgelse.

Med baggrund i de opnåede resultater vurderes det, at imprægnering af ældre udsatte betonkonstruktioner kan være en overordentlig god forebyggende foranstaltning overfor fugt- og saltindtrængning set i relation til frost-tø skader, kloridinitieret korrosion samt udvikling af skadelige alkalikiselreaktioner. Sidstnævnte ses der nærmere på i delrapport nr. 3. Det er dog vigtigt at understrege, at ovennævnte vurderinger primært er baseret på urevnet beton, idet der kun foreligger begrænsede resultater med imprægnering af revneskadede betonkonstruktioner.

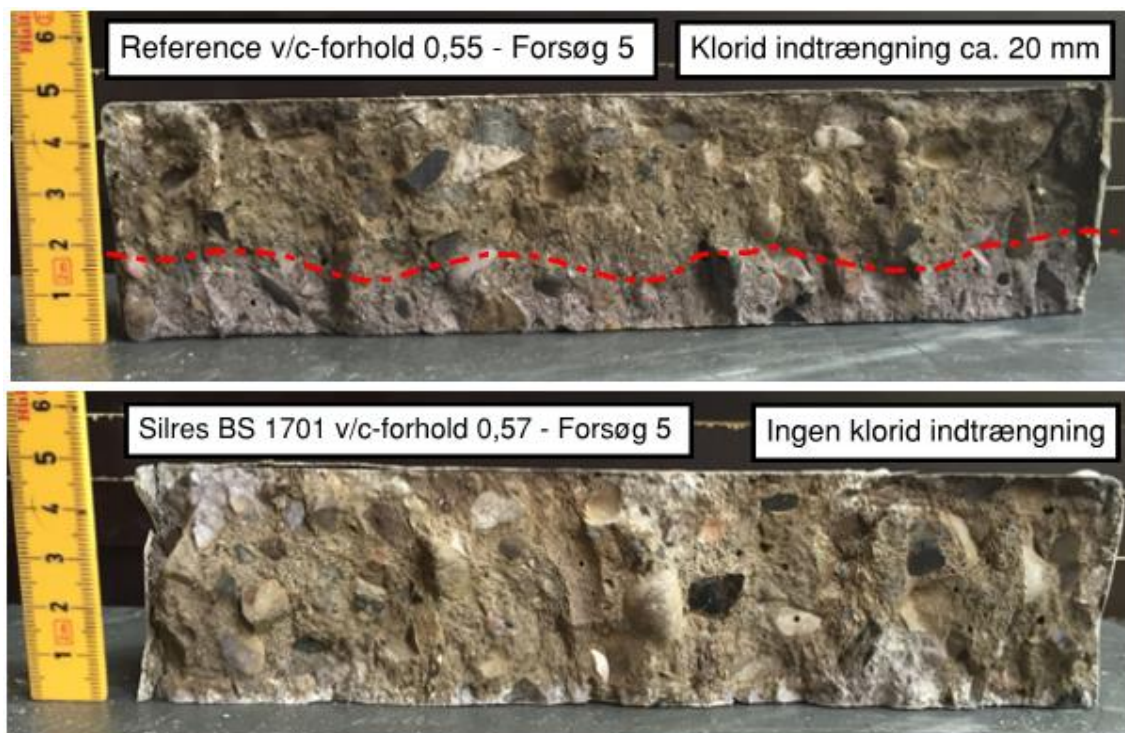
Om det giver nogen mening at imprægner nye og tætte (lavt v/c-forhold) betonkonstruktioner afhænger i høj grad af det aktuelle eksponeringsmiljø. I princippet bør en beton i et udsat miljø være designet og sammensat på en sådan måde, så holdbarheden under alle omstændigheder er i orden. Derfor vil det i de fleste tilfælde være formålsløst at imprægner ny beton alene ud fra et holdbarhedsmæssigt aspekt.

Men denne undersøgelse viser, at en omhyggelig udført imprægnering kan forbedre (=bremse) kloridindtrængningen i selv tæt beton (v/c-forhold omkring 0,40) væsentligt, ikke mindst i den første periode efter udstøbningen (der er målt kloridindtrængning i op til 517 døgn i denne undersøgelse). Dette vurderer vi kunne være meget nyttigt i de tilfælde, hvor nye betonkonstruktioner i en tidlig alder vil kunne blive udsat for klorider fra havvand eller tørsalte, idet alle undersøgelser viser, at betonens egen modstand (= mindre kloriddiffusionskoefficient) mod kloridindtrængning vokser i takt med, at betonens modenhed vokser. En imprægnering vil derved gøre betonen mere robust i en tidlig alder og derved forbedre betonens holdbarhed.

## 6. Bilag Kloridindtrængningsdybde efter 43 dage

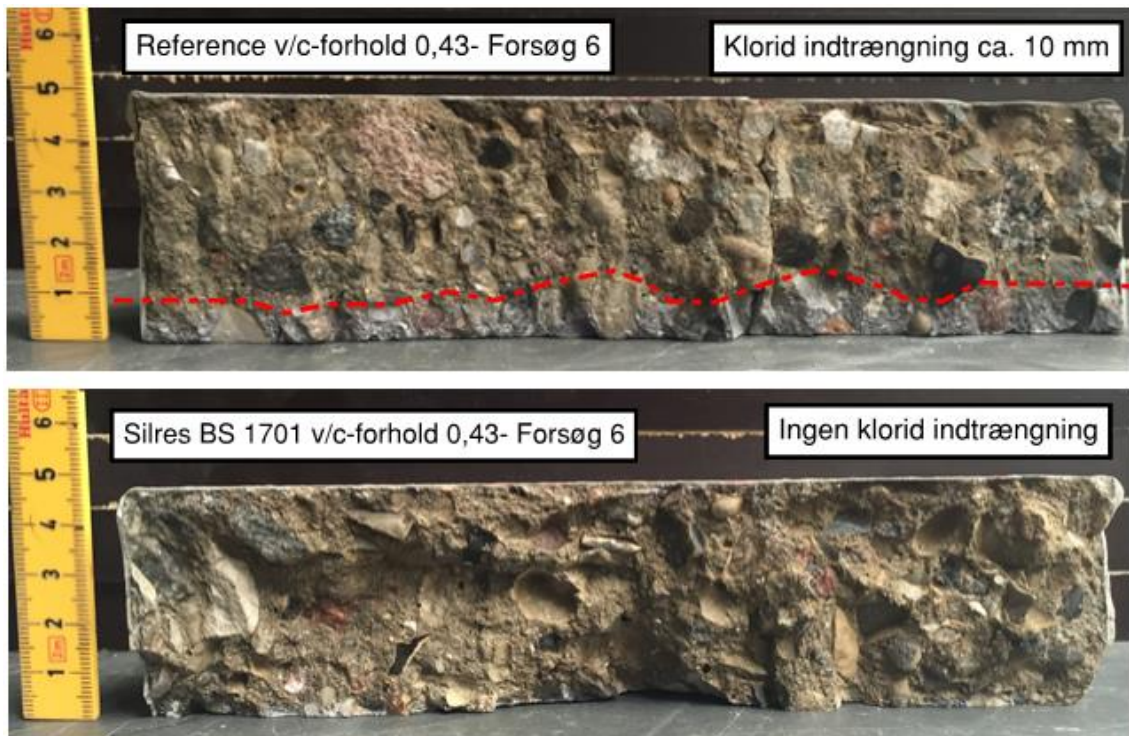


Figur 1. Klorid indtrængning i beton med v/c-forhold 0,40. Indtrængningsdybden for klorid for det imprægnerede prøveemne ligger lige ved overfladen af eksponeringsfladen. Referencen har klorid indtrængningen på ca. 10 mm.

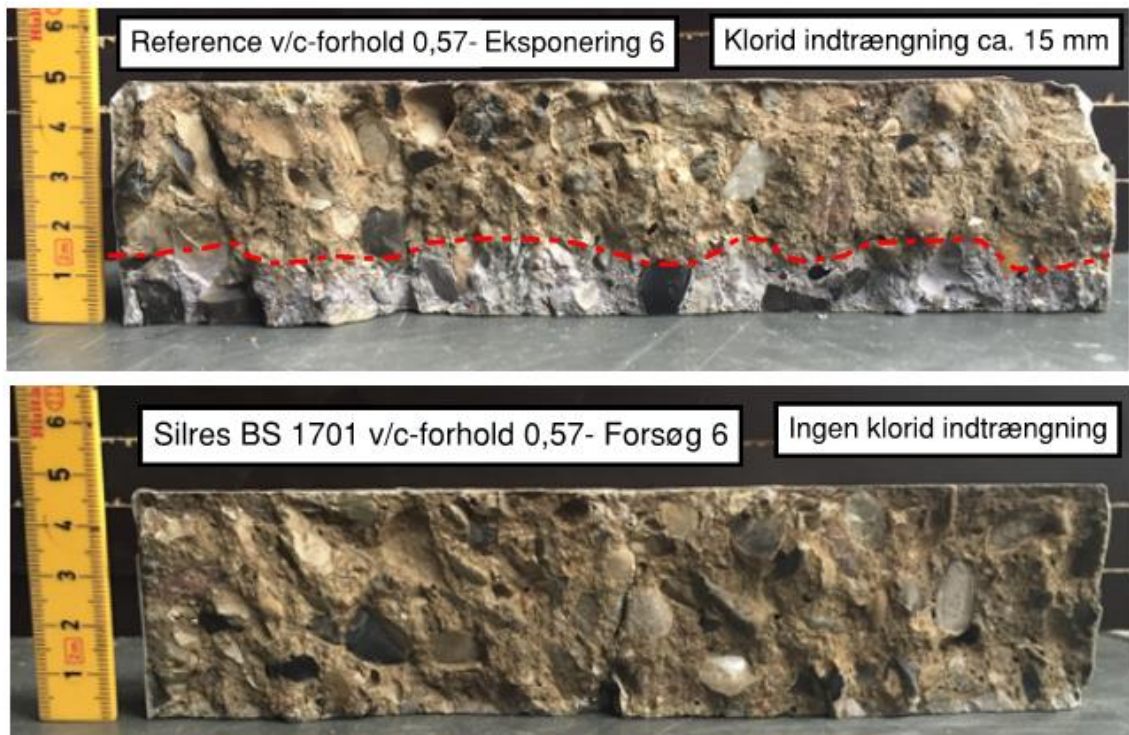


Figur 2. Klorid indtrængning i beton med v/c-forhold 0,55. Indtrængningsdybden for klorid for det imprægnerede prøveemne ligger lige ved overfladen af eksponeringsfladen. Referencen har klorid indtrængningen på ca. 20 mm.





Figur 3. Klorid indtrængning i beton med v/c-forhold 0,40. Indtrængningsdybden for klorid for det imprægnerede prøveemne ligger lige ved overfladen af eksponeringsfladen. Referencen har klorid indtrængningen på ca. 10 mm.



Figur 4. Klorid indtrængning i beton med v/c-forhold 0,57. Indtrængningsdybden for klorid for det imprægnerede prøveemne ligger lige ved overfladen af eksponeringsfladen. Referencen har klorid indtrængningen på ca. 15 mm.





BYG R-436, 2018

ISBN: 8778775353

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

[www.byg.dtu.dk](http://www.byg.dtu.dk)  
Tlf. 4525 1700