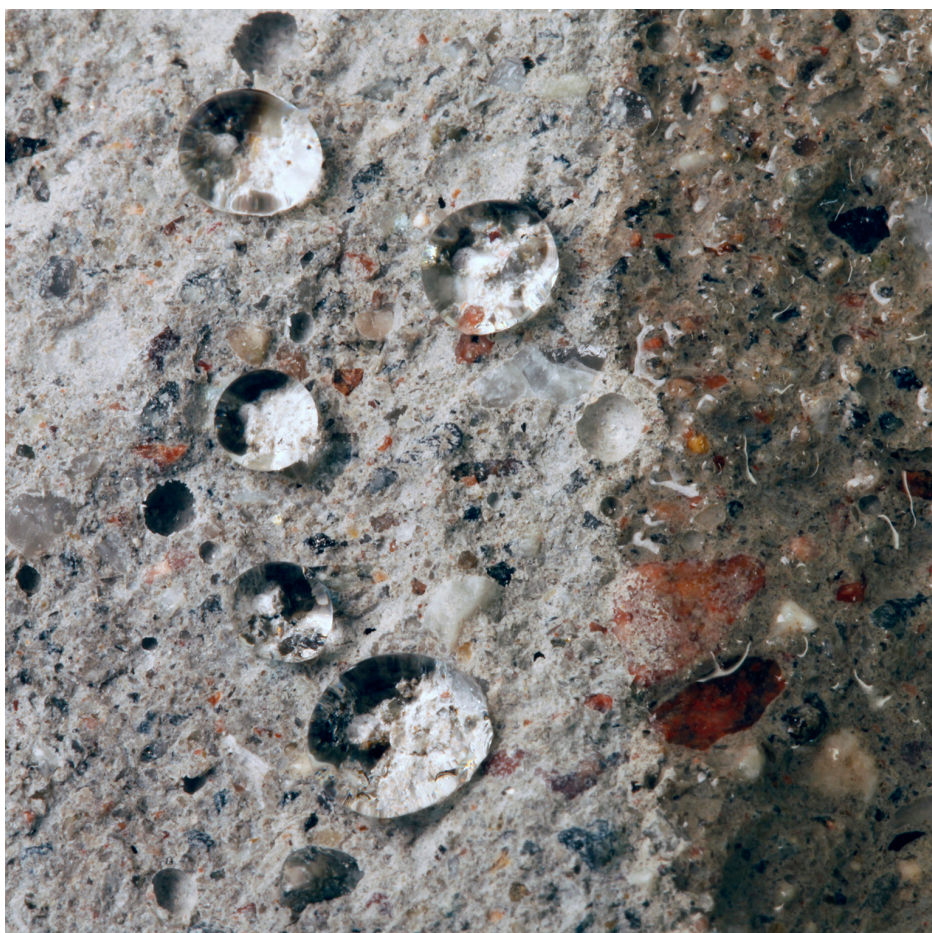


VATTENAVVISANDE IMPREGNERING AV BETONG I KÄRNKRAFTSMILJÖ

RAPPORT 2016:283



BETONGTEKNIK
KÄRNKRAFT



Energiforsk

Vattenavvisande impregnering av betong i kärnkraftsmiljö

En förstudie om skyddsmetodens förutsättningar

ANDERS SELANDER

ISBN 978-91-7673-283-0 | © 2016 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Kärnkraftverkens kylvattenvägar är en tuff miljö, där stora mängder salt och varmt havsvatten passerar. Det finns flera sätt att försöka minska risken för att skador uppstår, exempelvis genom att installera katodiskt skydd.

I detta projekt har en förstudie genomförts för att undersöka om det är möjligt att impregnera betongen med ett vattenavvisande skikt, för att därigenom hindra kloridjonerna från att ta sig in i konstruktionen och orsaka korrosion i armeringen. Denna teknik har använts inom andra områden med gott resultat, men för att metoden ska kunna användas i kärnkraftstillämpningar så krävs att den fungerar rent praktiskt med de fukthalter som råder.

Projektet har letts av Anders Selander, CBI Betonginstitutet och ingår i Energiforsk Betongtekniskt program Kärnkraft, som driver forskning kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverk. Det övergripande målet med programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet och för att kunna driva en effektiv förvaltning.

Intressenterna bakom Betongtekniskt program kärnkraft är Vattenfall, Uniper, Fortum, Teollisuuden Voima Oy (TVO) i Finland, Skellefteå Kraft, Karlstads Energi samt Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM).

Sammanfattning

Vattenavvisande impregneringsmedel som appliceras på betongkonstruktioner används i Sverige i första hand för att skydda armeringen från salt. Genom att göra betongens ytskikt vattenavstötande begränsas bland annat kloridjonernas möjlighet att transporteras in till armeringen vilket i många fall kan förlänga konstruktionens livslängd. I våra kärnkraftverk befinner sig armerad betong i många fall i en mycket utsatt miljö där olika nedbrytningsprocesser i varierande utsträckning förekommer. Detta gäller speciellt vattenvägarna. Att impregnera en undervattenskonstruktion är dock av förklarliga skäl normalt sätt inte möjligt. Det som gör vattenvägarna i kärnkraftverken speciella i detta fall är att de i bruk befinner sig under vatten men under revision är torrlagda.

Rapporten presenterar en förstudie som syftar till att svara på om och i så fall var det finns fördelar med att använda vattenavvisande impregneringar i förebyggande underhåll samt i vilka miljöer det är möjligt rent praktiskt att använda metoden. I rapporten redogörs för viktiga faktorer vid impregneringstillfället och betydelsen av att känna till konstruktionens tillstånd med avseende på pågående och begynnande skademekanismer.

Ett accelererat fältförsök av skyddsmetodens funktion under tryck visar att vattenavvisande impregneringar är effektiva som kloridbarriär och klarar minst 10 mvp. Kloridkoncentrationerna är markant lägre i de behandlade proverna och i paritet med vad som brukar ses i t.ex. vägmiljö dvs. 70-80 % reduktion i kloridinträngning eller mer. Fuktmätningar i fält och materialanalyser visar att det bör gå att torka ut vissa vattenvägar i kärnkraftverken när dessa är torrlagda och att en stor andel av dessa även bör gå att impregnera med gott resultat.

De flesta skademekanismer i betong är relaterade till fuktnivån i konstruktionen. En vattenavvisande impregnering ändrar förutsättningarna för transport av fukt och ämnen lösta i vätska. Det kan i vissa situationer påverka konstruktionens fuktnivå och därmed även hur fort skadeförloppet går. Vid undersökningarna av vattenvägarna framgår att det knappast kommer vara möjligt att sänka fuktnivån i betongen med hjälp av den vattenavvisande impregneringen. Den vattenavvisande impregneringen kan därför inte förväntas ge någon effekt mot redan pågående korrosion.

De genomförda pilotförsöken pågick i en månad och vid 10 meters djup. Innan skyddsmetoden används i stor skala rekommenderas att ett eller flera försök i fält genomförs där långtidseffekten studeras. Samtidigt bör det undersökas vad som händer vid ett större djup än 10 meter.

Ett alternativ där miljön är för fuktig för att impregneringsmedlet skall kunna tränga in kan vara hydrofoba tillsatser i t.ex. sprutbetong.

Summary

Water repellent agents applied on concrete structures in Sweden are primarily used to protect the reinforcement from chloride ions. By making the concrete surface layer hydrophobic the transport of chlorides is reduced, which in many cases can extend the service life of the structure. In nuclear power plants, reinforced concrete is often exposed to a harsh environment, especially in the waterways, where different degradation processes to varying degrees occur. However, treating an underwater structure is for obvious reason usually not possible. What makes the waterways of nuclear power plants special in this case is that in use it is submerged but during inspection drained enabling it to be treated.

This report presents a preliminary study designed to answer if there are areas within the waterways of nuclear power plants that can benefit from the use of water repellent agents and identify if it is possible to use the method. The report lists the key factors for a successful treatment and also illustrates the importance of knowing the condition of the structure with respect to ongoing degradation mechanisms.

An accelerated experiment of the function of a water repellent treatment under pressure showed that the method is effective as a chloride barrier at a depth of 10 meters. Concentrations of chloride ions are found to be significantly lower in the treated samples and equivalent to what is usually seen in for example road environment, 70-80% reduction or more. Measurements of humidity in the concrete of a waterway and material analysis from several showed that it should be possible to dry out some waterways in nuclear power plants when they are drained and that a large proportion of these also are possible to treat.

Most of the damage mechanisms in concrete are related to the level of moisture in the structure. A water repellent treatment changes the conditions for the transport of moisture and substances dissolved in the water. It may in some situations affect the level of moisture inside the structure and thus how quickly the degradation process goes. The inspection of the waterways showed that it is not likely to lower the level of moisture in the concrete by means of the water repellent treatment. The water repellent treatment cannot be expected to have any effect against ongoing corrosion for example.

The exposure in chlorides lasted for a month and at a depth of 10 meters. Before the method is used on a large scale it is recommended that one or more experiments in situ is carried out where the long-term effects are studied. Also, what happens when exposed at a depth greater than 10 meters?

Alternatively, where the environment is too moist for the water repellent agent to penetrate, hydrophobic additives can be used in for example shotcrete.

Innehåll

1	Bakgrund	9
1.1	Syfte	9
1.2	Genomförande	9
1.3	Mål	10
2	Metod	11
2.1	Översiktlig bedömning av betongen i vattenvägar	11
2.1.1	Besök vid kärnkraftverk	11
2.1.2	Sammanställning av materialanalyser från kärnkraftverken	11
2.2	Laboratorieprovningar	12
2.3	Fältförsök kloridinträngning	12
3	Litteraturgenomgång	14
3.1	Kemi hos vattenavvisande impregneringsmedel	14
3.2	Funktion hos vattenavvisande impregneringsmedel	15
3.3	Faktorer som påverkar impregneringen	17
3.4	livslängden hos vattenavvisande impregneringar	18
3.5	Erfarenheter av vattenavvisande impregneringar och ytskydd	19
3.5.1	Fukttransport och RF i betongen	20
3.5.2	Kloridinträngning	22
3.5.3	Inträngningsdjupets betydelse	23
4	Resultat	24
4.1	Översiktlig bedömning av betongen i vattenvägar	24
4.2	Fuktmätningar vid Kärnkraftverken	25
4.3	Laboratorieprovningar-Vattenabsorption	26
4.4	Fältförsök kloridinträngning	27
4.4.1	Betong med vct=0,45	28
4.4.2	Betong med vct=0,8	30
5	Slutsatser	32
5.1	Förutsättningar vid impregneringstillfället	32
5.2	Konstruktionens tillstånd	32
5.3	Funktion under tryck	33
5.4	Funktion i olika miljöer	33
6	Fortsatt forskning	35
7	Referenser	36

1 Bakgrund

Vattenavvisande impregneringsmedel som appliceras på betongkonstruktioner används i Sverige i första hand för att skydda armeringen från salt. Genom att göra betongens ytskikt vattenavstötande begränsas bland annat kloridjonernas möjlighet att transporteras in till armeringen vilket i många fall kan förlänga konstruktionens livslängd. De flesta skademekanismer i betong är relaterade till fuktnivån i konstruktionen. En vattenavvisande impregnering ändrar förutsättningarna för transport av fukt och ämnen lösta i vätska. Det kan i vissa situationer påverka konstruktionens fuktnivå och därmed även hur fort skadeförloppet går.

I våra kärnkraftverk befinner sig armerad betong i många fall i en mycket utsatt miljö där olika nedbrytningsprocesser i varierande utsträckning förekommer. Vattenavvisande impregnering har använts i några fall dock utan ordentlig uppföljning. Det är därför angeläget att dels titta på de konstruktioner där metoden använts men också kartlägga i vilka nya miljöer det kan finnas förutsättningar att använda densamma.

1.1 SYFTE

Förstudien som presenteras i denna rapport syftar till att svara på om och i så fall var det finns fördelar med att använda vattenavvisande impregneringar i förebyggande underhåll samt i vilka miljöer det är möjligt rent praktiskt att använda metoden.

1.2 GENOMFÖRANDE

Följande fyra delar ingår i genomförandet av projektet:

- Den första delen innefattar en litteraturgenomgång, som redogör för hur skyddsmetoden fungerar, vad som krävs för att lyckas med behandlingen samt vilka resultat som kan uppnås.
- Den andra delen innefattar besök vid OKG, Forsmark och Ringhals tillsammans med representanter från kärnkraftverken. Lämpliga miljöer/konstruktionsdelar som vattenvägar, turbinhallar, intag och utlopp inspekteras och om möjligt identifieras områden där metoden skulle kunna vara tillämpbar baserat på känd kunskap.
- I den tredje delen genomförs en översiktlig inventering och sammanställning av de betonganalyser/tillståndsbedömningar som är utförda på de aktuella betongkonstruktionerna. Denna del innefattar även några kompletterande provningar från OKG och Forsmark för att få en bra bild av relevanta betongegenskaper för den vattenavvisande impregneringens funktion.
- Den fjärde och sista delen handlar om laboratorieförsök för att undersöka effekten av en impregnering under vattentryck. Då stora delar av de aktuella områdena i kärnkraftverken står under vatten i normala fall är det av yttersta vikt att se vid vilket tryck(mvp) det impregnerade ytskiktet i betongen fuktmättas och därmed släpper igenom kloridjoner.

1.3 MÅL

Målet är att, utifrån de fyra ovan nämnda stegen, redogöra för förutsättningarna att använda skyddsmetoden på betong som befinner sig:

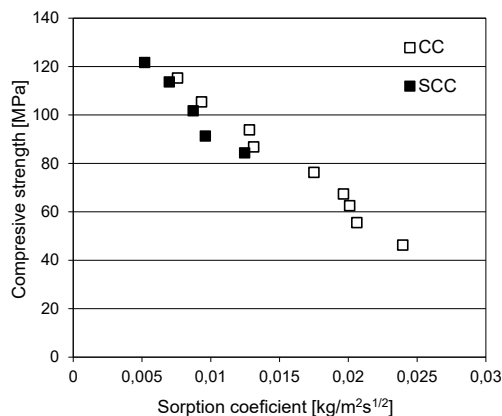
- a) under vattenytan
- b) inom område som påverkas av hög/låg vattennivå
- c) i skvalpzon
- d) permanent ovanför vatten med hög fuktighet

För miljö (a-d) görs en bedömning av vad som krävs för att uppnå avsedd effekt samt vilka förutsättningar som ställs på betongens fuktnivå och täthet.

2 Metod

2.1 ÖVERSIKTLIG BEDÖMNING AV BETONGEN I VATTENVÄGAR

Den enskilt viktigaste parametern för om det skall finnas förutsättningar att lyckas med en impregnering är betongens förmåga att kapillärt suga in impregneringsmedlet. Ett sätt att analysera denna egenskap är att genomföra vattenabsorptionsförsök där en sorptionskoefficient bestäms. Detta är en materialprovning som sällan används i vanliga tillståndsbedömningar. I analysen kommer därför uppskattningar att användas där olika ställföreträdande parametrar så som vattencementtal och tryckhållfasthet används. Det är viktigt att påpeka detta endast ger en uppskattning av sorptionskoefficienten. I Figur 1 visas en sådan korrelation mellan sorptionskoefficienten och tryckhållfasthet. Samma figur kommer att användas senare i rapporten för att illustrera i vilka miljöer som betongen är möjlig att impregnera.



Figur 1: Korrelation från en försöksserie med anläggningsbetong där tryckhållfasthet och vattenabsorption provats. CC står för konventionell betong och SCC för självkompakterande. Vattencementtalet i serien varierar mellan 0,35 och 0,75. Selander m.fl (2014)

2.1.1 Besök vid kärnkraftverk

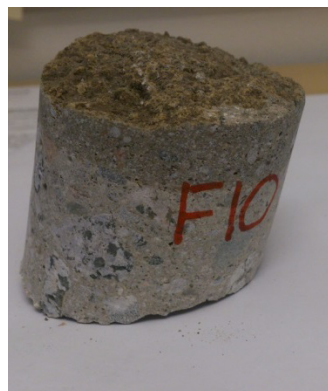
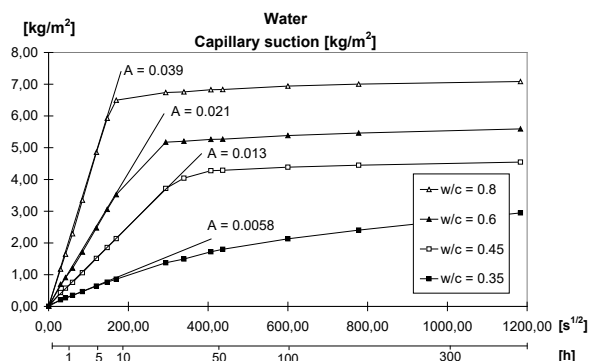
Vid besöken genomfördes en rundvandring där framförallt olika vattenvägar studerades men även fundament, skorstenar och bergspalter. Fokus ligger dock vid vattenvägarna i denna förstudie då detta är speciella miljöer för kärnkraftverken. Vid Ringhals och OKG genomfördes fuktmätningar i både betong och luft medan det vid Forsmark endast gavs möjlighet att mäta i luften. Samtliga besök genomfördes under sommarhalvåret.

2.1.2 Sammanställning av materialanalyser från kärnkraftverken

Information från ett stort antal materialanalyserapporter från OKG, Ringhals och Forsmark har sammanställts för att få en bild av vilken betong som finns i vattenvägarna och under vilka förutsättningar den är möjlig att impregnera. Alla värden på tryckhållfasthet och vct-ekvivalent har noterats men det har inte bedömts vara relevant att behandla materialet statistiskt då det utifrån rapporterna är svårt att bedöma hur representativa analyserna är. Istället noteras endast inom vilket spann värdena ligger. Inför ett eventuellt fältförsök kommer ändå den aktuella betongen och miljön att behöva analyseras.

2.2 LABORATORIEPROVNINGAR

Vattenabsorptionen (sorptionskoefficienten) bestäms genom att utborrade kärnor sågas i 30 mm tjocka plattor, torkas i ugn i 40 °C tills dess jämvikt infinner sig. Mantelytan förseglas med en tejp och proverna placeras på en speciell duk för att hela den exponerade ytan skall ha obegränsad kontakt vattenytan. Viktökningen registreras enligt ett givet schema och sorptionskoefficienten bestäms som lutningen, innan fuktgenomslag fås, där viktökningen ritas i ett diagram mot roten ur tiden, se Figur 2.



Figur 2: Kapillarsugningsförsök där sorptionskoefficienten A [kg/m²s^{1/2}] bestäms. Diagrammet är från ett tidigare försök och de provkroppar som används för kloridinträngningsförsöken är från samma gjutning. Fotot visar F10 som är från Forsmark.

Borrkärnor från OKG och Forsmark har analyserats i projektet. Vid Ringhals togs inga materialprover.

2.3 FÄLTFÖRSÖK KLORIDINTRÄNGNING

I Figur 3 visas provkropparna som användes i kloridinträngningsförsöken och fältstationen där de sänktes ned på olika djup. Betongen är 10 år gammal och har använts vid flera tidigare försök där bland annat inträngningsförmåga hos impregneringsmedel och vatten har undersökts. Diagrammet i Figur 2 visar vattenabsorptionsförsök som utförts på provkroppar från samma gjutning ($w/c=0,45$ resp $w/c=0,8$). Provkropparna har under flera år konditionerats i 85 % RF. Mantelyta och undersida förseglades med kapillärbrytande tejp.



Figur 3: Foto av provkropparna (d=75mm, h=30mm) och foto av påsarna med 15 % NaCl som sänktes ned till olika djup.

Fyra provkroppar av betong med $v_{ct}=0,45$ resp fyra med $v_{ct}=0,8$ impregnerades med triethoxy(isooktyl)silan med en bärare av bentonitgel i laboratoriemiljö, referenserna behandlades inte. Provkropparna fick därefter ligga en vecka innan försöken initierades. För att accelerera försöken blandades en lösning med 15 % NaCl. Provkropparna placerades i fyra olika påsar med saltlösning, en impregnerad och en obehandlad samt två olika v_{ct} ger fyra provkroppar i varje. Påsarna som bestod av tre olika skikt surrades fast i en kätting med 2,5 meters mellanrum och sänktes ned vid en kaj i 28 dygn. Provkropparna hamnade på 2,5 5,0 7,5 och 10 meters djup. Efter 28 dygn togs provkropparna upp och kloridprofiler frästes fram.

Försöket är upplagt för att likna situationen i en torrlagd vattenväg. Själva impregneringen sker på en relativt torr yta (85 % RF) och impregneringen får ligga på en vecka innan vatten innehållande kloridjoner släpps på igen.

3 Litteraturgenomgång

3.1 KEMI HOS VATTENAVVISANDE IMPREGNERINGSMEDEL

Vattenavvisande impregneringsmedlen som appliceras på betongkonstruktioner i Sverige är i dagsläget till största del silan/siloxan-baserade. Silaner/siloxaner i impregneringsmedel på betong har använts i Sverige sedan sent 80-tal även om det även tidigare förekom enstaka försök. Silanen som molekyl betraktad började dock användas redan på 1940-talet men då i forskningssyfte av militären i USA. I takt med att kompositmaterial började bli allt mer intressant i militära tillämpningar växte behovet av god vidhäftning mellan glasfiber och matris. Under benämningen "Silane Coupling Agents" (Plueddemann, 1991) undersöktes då silanen för dess förmåga att skapa starka bindningar (kovalenta) mellan oorganiska och organiska ämnen. Till betongens oorganiska yta binds en kolkedja (alkylgrupp) som gör betongens yta vattenavstötande. På den svenska marknaden används i huvudsak tre stycken olika silaner till vattenavvisande impregneringsmedel där endast storleken på alkylgruppen varierar.

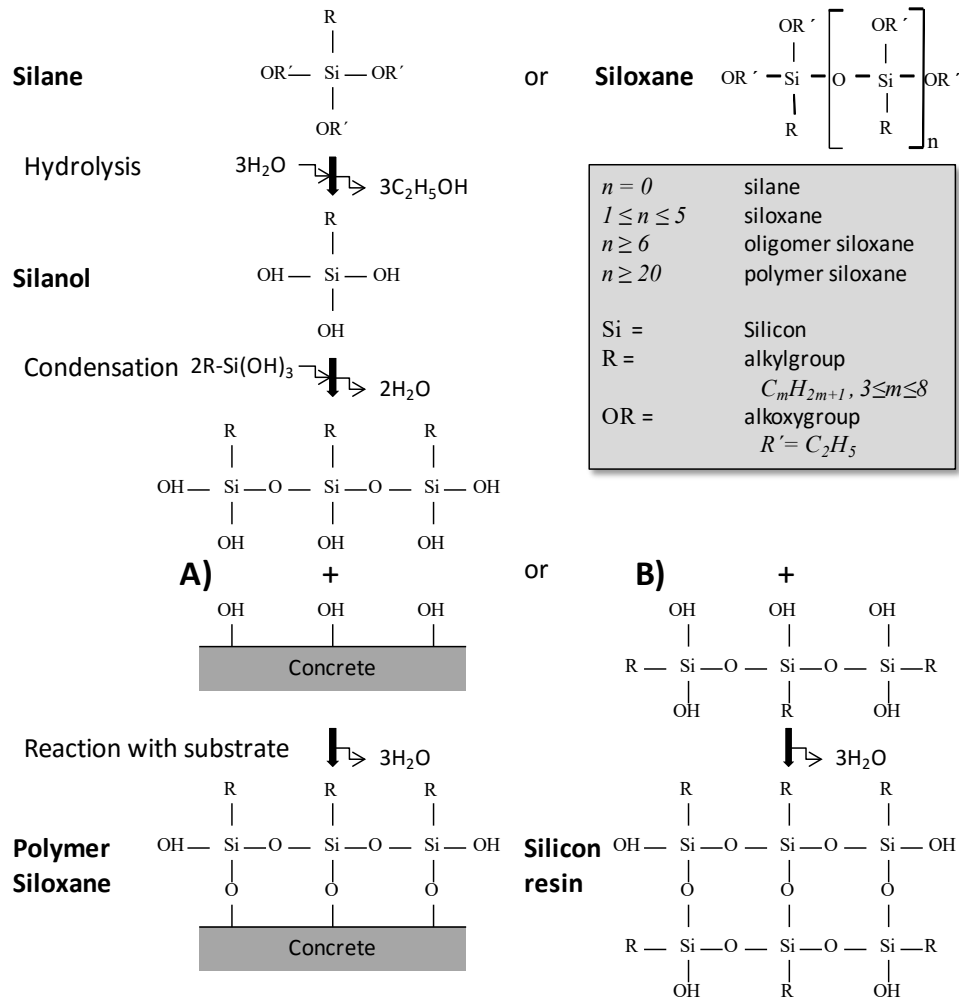
Det korrekta kemiska namnet på den aktiva molekylen i vattenavvisande impregneringsmedel är alkylalkoxysilan men i den löpande texten benämns den som silan. Silaner är små molekyler som transporteras in i betongen genom kapillärkrafter och reagerar på plats. Kiselatomen i silanen har fyra bindningsmöjligheter där tre stycken i de flesta fall utgörs av alkoxygrupper, se Figur 4, vilka reagerar i kontakt med vatten och binder till CSH (Calcium-Silikat-Hydrat) -gel och andra silaner i dess närhet. Reaktionen resulterar i ett fint nätverk (silikonharts/polymer siloxan) på betongens porväggar. Den fjärde gruppen i molekylen utgörs av en alkylgrupp. Denna reagerar inte utan det är denna som ger impregneringen dess avsedda vattenavvisande effekt. Figur 1 visar en förenklad skiss av reaktionen. I Arkles m.fl. (1977) finns en utförlig beskrivning av polymerisationen från silan, via siloxan till silikonharts.

Reaktionen är starkt beroende av pH, temperatur och vilken molekyl som används. I de flesta fall har de mesta materialet reagerat inom två veckor. Oavsett om produkten baseras på siloxaner eller silaner är slutprodukten den samma. Siloxanen som är en större molekyl enligt Figur 4 är därför bättre lämpade på underlag med större porer alternativt när en större yteffekt önskas. Omvänt gäller därför att silanbaserade produkter är bättre på underlag med finare porer där ett större inträngningsdjup önskas.

När vattenavvisande ytbehandlingar började användas på betongkonstruktioner fanns ett stort antal olika silaner och siloxaner på marknaden men via praktiska erfarenheter och försök har antalet begränsats. I t.ex. De Clercq m.fl. (2001) och Gerdes m.fl. (2005), där storleken på alkyl- och alkoxygruppernas inverkan på reaktionsbenägenheten i betong studerats, ses bland annat att metoxygrupper reagerar avsevärt mycket snabbare än etoxygrupper samt att större alkylgrupper fördröjer alkoxygruppens reaktion markant. Nästan alla silanbaserade impregneringsmedel som finns på marknaden idag använder alkyltriethoxysilaner med tre till åtta kolatomer i alkylgruppen.

Gammal betong är ofta karbonatiserad vilket medför att pH-miljön drastiskt sänks i ytskiktet. I Osterholtz m.fl. (1991) presenteras en sammanställning av polymerisationshastighetens pH-beroende och även om det finns variationer så antar kurvan en V-form på en log-skala med minimum kring pH-värdet 6-7. I fallet betong och karbonatisering handlar det om en pH-sänkning från ca 13 till 9. Det skulle enligt

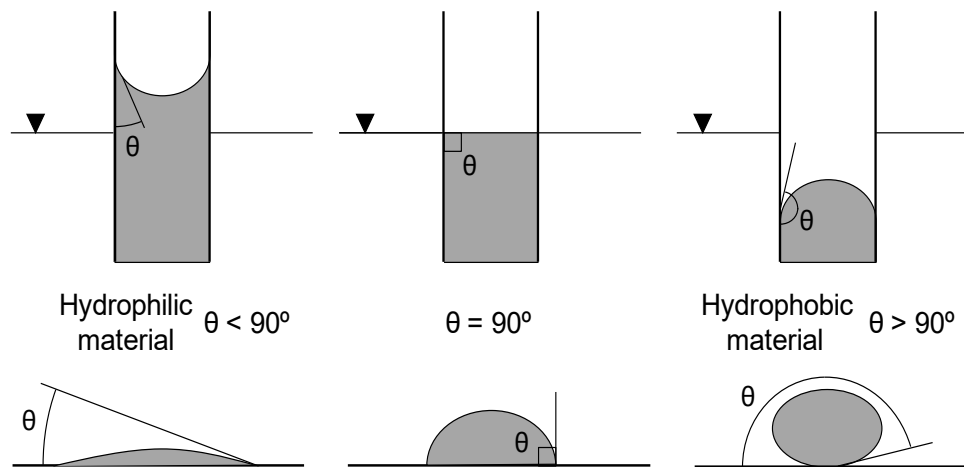
Osterholtz i sådana fall innebära att polymerisationshastigheten sänks med en till två tiopotenser. Exakt vilken silan eller siloxan som är optimal bör därför variera med vilka förutsättningar (betong, fuktnivå, pH-värde m.fl.) som gäller vid impregneringen.



Figur 4: Förenklad skiss på reaktionen hos ett silanbaserat impregneringsmedel. Vid kontakt med betongens porvatten (högt pH-värde + vatten) polymeriseras silanerna till längre molekyllängder (siloxaner) vilka sedan binder till betongens porväggar och formar ett fint nätverk (silikonharts/polymer siloxan). (Selander, 2010)

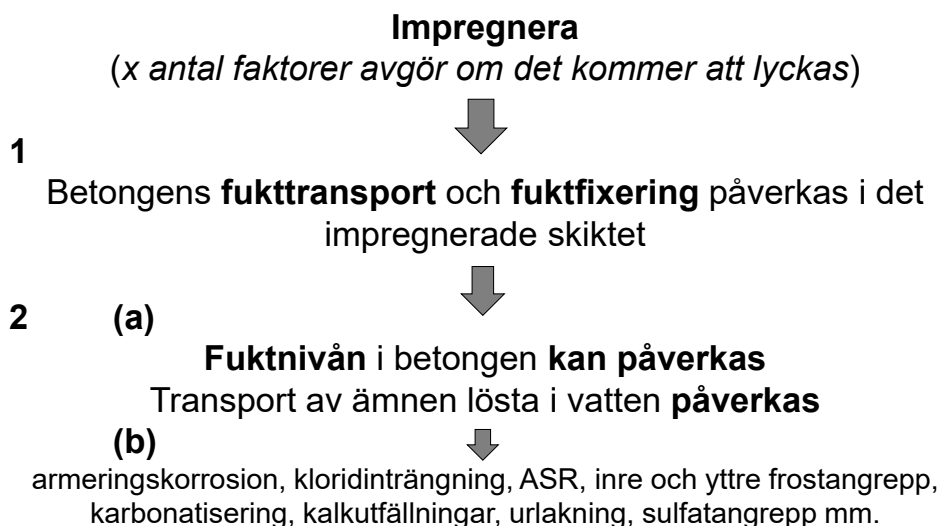
3.2 FUNKTION HOS VATTENAVVISANDE IMPREGNERINGSMEDEL

Det som händer med betong vid en behandling med ett vattenavvisande impregneringsmedel är att de fuktmekaniska egenskaperna förändras. Betong är ett hydrofilt material, dvs. ett sugande material. Detta beror på att de fina kapilläerna i kombination med vattnets ytegenskaper ger en drivande kraft för fuktransporten i form av vätska. När en betong impregneras förändras betongens ytegenskaper från hydrofila (vattenattraherande) till hydrofoba (vattenavstötande) vilket medför vissa förändringar ur fuktmekanisk synvinkel. Detta brukar illustreras genom att definiera en kontaktvinkel α mellan vatten och betong, se Figur 5.



Figur 5: Den övre figuren visar kapillärer där den impregnerade (hydrofoba) stöter bort vattnet medan den oimpregnerade suger in. Den nedre visar samma kontaktvinkel för en vattendroppe på plan yta. (Selander, 2010)

Förenklat kan impregneringen ses som ett membran där vattendroppar stoppas medan vattenånga tillåts passera. Detta är den primära funktionen hos vattenavvisande impregneringsmedel. I vissa situationer kan detta ha en permanent fukthaltsänkande funktion när till exempel regn hindras från att tränga in, medan vattenånga kan diffundera ut under varma dagar. I andra situationer förhindras lösta ämnen i vatten, t.ex. salter, från att transporteras genom det impregnerade skiktet. Hur olika skademekanismer i betongkonstruktioner påverkas av dessa förändrade egenskaper i ytskiktet måste bedömas och förutses från fall till fall, så kallade sekundära effekter. Figur 6 visar ett flödesschema över vad som händer vid en behandling med ett vattenavvisande impregneringsmedel.

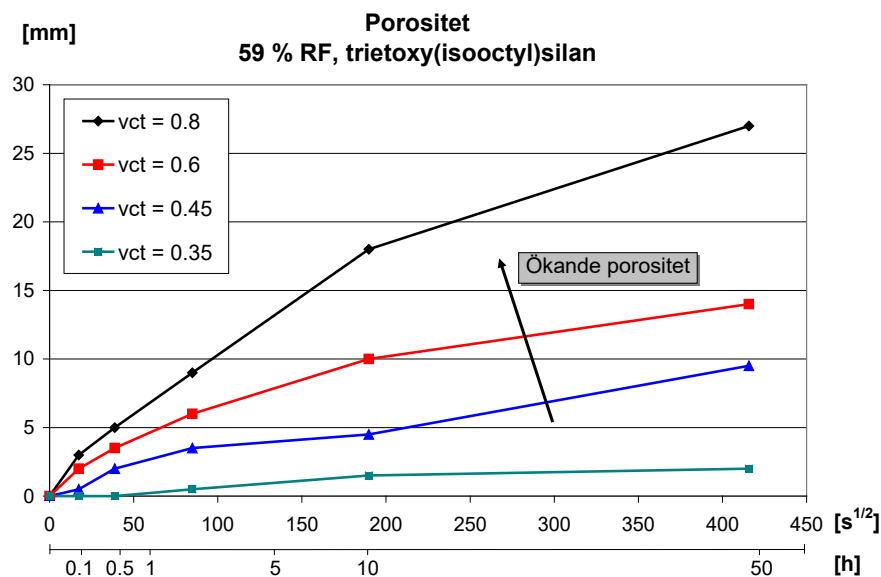


Figur 6: Flödesschema över en behandling med ett vattenavvisande impregneringsmedel och dess primära (1) och sekundära (2) effekter. Med fuktfixering menas hur mycket fukt som finns i det impregnerade skiktet.

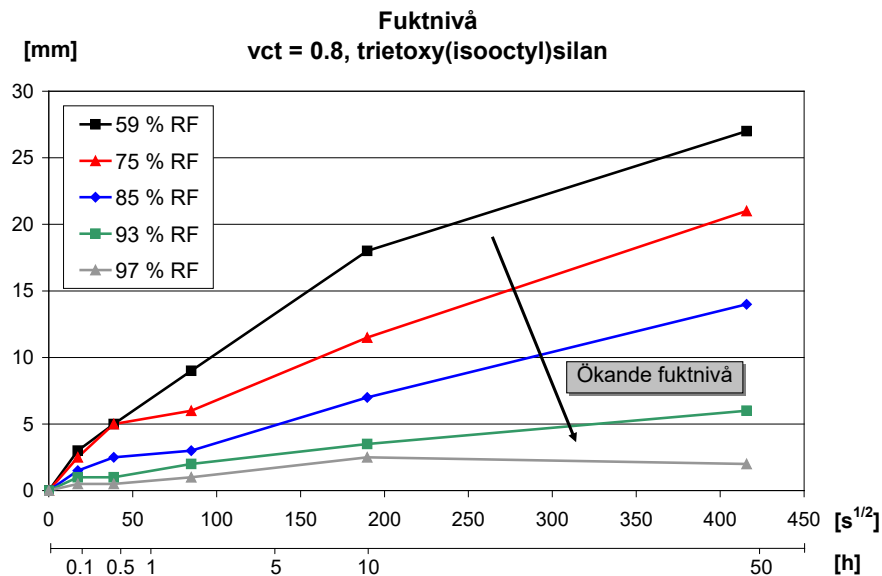
Vid en impregnering är det X antal faktorer som kommer att avgöra om själva impregneringen lyckas, dvs. om impregneringsmedlet tränger in, reagerar och ger en vattenavstötande effekt. Dessa faktorer kommer att behandlas senare. Förutsatt att detta sker fås två primära effekter. Betongens fukttransport och fuktfixering påverkas i det impregnerade skiktet (oftast någonstans mellan 1 och 5 mm räknat från den behandlade ytan). De sekundära effekterna kan därefter delas in i två steg: a) och b) enligt Figur 6. Alla faktorer som påverkar fuktnivån i konstruktionen är svåra att förutse i många fall och därmed ofta effekten av impregneringen på den aktuella skademekanismen. Transporten av ämnen lösta i vatten är däremot lättare att förutse och effekten beror på hur bra impregneringen lyckades.

3.3 FAKTORER SOM PÅVERKAR IMPREGNERINGEN

En förutsättning för att kunna utnyttja impregneringens positiva egenskaper är att medlet tränger in i konstruktionen enligt Bofeldt (2001) och Bofeldt & Nyman (2001). Stannar impregneringen på ytan kan effekten avta relativt snabbt. Inträngningsdjupet definieras som det vinkelräta avståndet från en impregnerad yta till den skarpa linjen mellan ljus och mörk betong på en spräckt och fuktad provkropp. Exakt hur stort inträngningsdjup som behövs varierar självklart med vilken betongkvalitet som används och vad den är utsatt för. De tre viktigaste faktorerna för alla impregneringsmedels inträngning i betong (givet att substans och koncentration är densamma), är kontakttiden mellan betong och impregneringsmedel, betongens porositet och betongens fuktnivå vid impregneringstillfället enligt Johansson m.fl (2007). Med kontakttid avses här den tid betongkonstruktionens yta kan kapillärsuga impregneringsmedlet. Likhade slutsatser dras även i Hankvist & Karlsson (2001), Gerdes & Wittmann (2001), Meier & Wittmann (2001). Att dessa tre faktorer har en avgörande betydelse för resultatet är väl dokumenterat och illustreras tydligt i Figur 7 och 8.



Figur 7: Porositetens inverkan på inträngningsdjupet. Provkropparna konditionerades i ett halvår i 59 % RF och behandlades med trietoxyl(isooctyl)silan. Man ser tydligt att en ökad porositet ger större inträngning, Johansson m.fl.(2007).



Figur 8: Fuktnivåns inverkan på inträngningsdjupet. Provkropparna konditionerades ett halvår i respektive RF-miljö innan de impregnerades med trietoxylsilan. Man ser tydligt att en ökande fuktnivå minskar inträngningen av silanen. Johansson m fl.(2007).

I graferna presenteras inträngningsdjupet på y-axeln och roten ur tiden på x-axeln. I Figur 7 används betong med olika vct för att visa på porositetens betydelse för hur lätt respektive svårt det är att uppnå ett stort inträngningsdjup. I Figur 8 illustreras betydelsen av att betongen tillåts torka ut innan produkten appliceras. I båda figurerna ses tydligt hur viktigt tidsfaktorn är. En lång behandlingstid, något som kan uppnås med olika bärare eller upprepade behandlingar, är den tredje viktiga faktorn. Ytan på ovansidan och undersidan av en konstruktion kan ha helt olika förutsättningar när det gäller betongens fuktnivå och porositet även om samma recept använts. Nord eller sydsida kan påverka fuktnivån medan solljus och vind påverkar behandlingstiden. Sprickor och gjuthud är kopplade till porositet precis som rengöring då fina partiklar kan sätta igen porer. Listan kan göras lång.

Sammanfattningsvis kan de tre faktorerna (porositet, fuktnivå och tid) ses som tillgängligt utrymme och möjligheten att fylla det. Porositeten ger information om det totala utrymmet, fuktnivån hur mycket av detta utrymme som är tillgängligt och tiden förutsättningen att behandla detsamma.

3.4 LIVSLÄNGDEN HOS VATTENAVVISANDE IMPREGNERINGAR

Ur ett beständighetsperspektiv är en lyckad impregnering ett sätt att förlänga livslängden hos en betongkonstruktion. Hur bra effekt som sedan fås av impregneringen beror förutom tidigare beskrivna faktorer även på exponeringen. En viktig aspekt när det gäller beständigheten är förstas livslängden hos den vattenavvisande impregneringen. Flera försök till accelererade metoder har gjorts men hur väl de speglar verkligheten är svårt att säga. I Buttner & Raupach (2008) analyseras olika möjliga nedbrytningsmekanismer (karbonatisering, UV-ljus och hög alkalitet) i ett försök att skapa tillförlitliga accelererade försök. Några faktorer som påverkar impregneringen över tid är däremot kända genom empiriska försök Alberto León & Bertil Nyman (2001). Damm och smuts som hamnar på ytan tar relativt snabbt bort den

pärlande effekten på ytan. UV-ljus har en nedbrytande effekt och nötning påverkar impregneringen lika mycket som betongen. Dessa faktorer påverkar dock endast det allra yttersta lagret vilket innebär att funktionen kan finnas kvar även om den pärlande effekten avtagit. Detta visar hur viktigt det är att impregneringen når ett visst djup innanför ytan. I Shuere m.fl. (2008) presenteras en uppföljning av en impregnering utförd på en större kajkonstruktion av armerad betong byggd 1993. Impregneringen med silan ger en tydlig positiv inverkan efter 3, 5 och 12 års exponering. Laboratorieprovningar visar att inträngning i genomsnitt var 3,5 mm med 8 mm som största värde.

I Johansson m.fl. (2008) redogörs för exempel på behandlingar som efter 15 år fortfarande fungerar mycket bra och det finns exempel där behandlingar misslyckats och effekten upphört efter bara ett år. Förklaringen till denna spridning ligger i de allra flesta fall i förhållandena vid impregneringstillfället. En hög fuktnivå eller en för kort behandlingstid är de vanligaste orsakerna till att behandlingen gett ett mindre bra resultat.

Experimentella studier och fältförsök visar att impregneringen ger ett förbättrat skydd mot fukt och aggressiva ämnen i minst tio år. På konstruktionsdelar som är särskilt utsatta kräver Trafikverket impregnering med vattenavvisande medel sedan en tid tillbaka (Bro 94, 2004) vilket också fortsatt gäller. Vattenavvisande impregneringar har nu varit i bruk i mer än 30 år i Sverige. Många studier visar att skyddet fungerar och livskostnadsanalyser Silfwerbrand (2008) och During (2014) visar att skyddsmetoden är kostnadseffektiv.

3.5 ERFARENHETER AV VATTENAVVISANDE IMPREGNERINGAR OCH YTSKYDD

I USA har man studerat ytskydd sedan 1970-talet. I Powell m.fl. (1993) behandlas djupimpregnering med polymerer för att skydda brobaneplattan från armeringskorrosion. De berättar om två försök som utfördes i Bethlehem 1975 resp. Boalsburg 1985 på två broar i Pennsylvania. Ett begränsat område av vardera brobaneplattan impregnerades med metylmetakrylat. Utifrån mätningar av kloridinnehåll, korrosionspotential, korrosionsfart och resistivitet från Boalsburg dras slutsatsen att kloridinträngningen sker långsammare i den impregnerade betongen, men att skillnaden varierar kraftigt med såväl tid som djup. Efter nio år är skillnaden störst på djupet 25-38 mm; inträngningen går c:a 40 % långsammare i den impregnerade betongen. Mätningar av korrosionsfarten gav tydligare besked; i den icke impregnerade referensbetongen var farten 2,5 gånger högre än i den impregnerade betongen. I Bethlehem var skillnaderna ännu större; här rostade armeringen i den icke-impregnerade betongen 10 gånger snabbare.

F. Andrews-Phaedonos (1994) rapporterar om användningen av ytskydd på en slakarmerad australiensisk bro utanför Melbourne. Tre typer av skyddsbeläggning (innehållande silan, polymermodifierat cement respektive epoxi) undersöktes. Då artikeln skrevs hade ytskydden bara varit i bruk två år. De befanns samtliga vara i god kondition, men som författaren påpekar i sin artikel krävs uppföljande mätningar innan slutgiltiga slutsatser kan ges.

Lars Johansson, CBI, (1993) har gjort en mycket gedigen genomgång av ytbehandling av betongkonstruktioner. Han behandlar en lång rad olika färger, plaster, oljor, epoxi m.fl. där även silaner och siloxaner ingår. Bland fördelarna som identifieras är att behandlingarna är diffusionsöppna och reagerar med underlaget och bland

nackdelarna påpekas svårigheterna med att uppnå tillräckligt stora inträngningsdjup. När litteraturstudien genomfördes hade dock inte bärare nått marknaden vilket numera gett helt andra förutsättningar för vad som är möjligt att behandla.

Storbritannien besitter en stor kompetens inom reparation och underhåll av betongkonstruktioner. Enligt Hurley (2001) har silaner, siloxaner och silikon framgångsrikt använts som "breathable" ytskydd för betong- och murverkskonstruktioner under minst tio-femton år. Brittiska TRL (Transport Research Laboratory) har bidragit starkt till utvecklingen av nya provningsmetoder för godkännande av impregneringsmedel (EN 13579 – 13581, 2002).

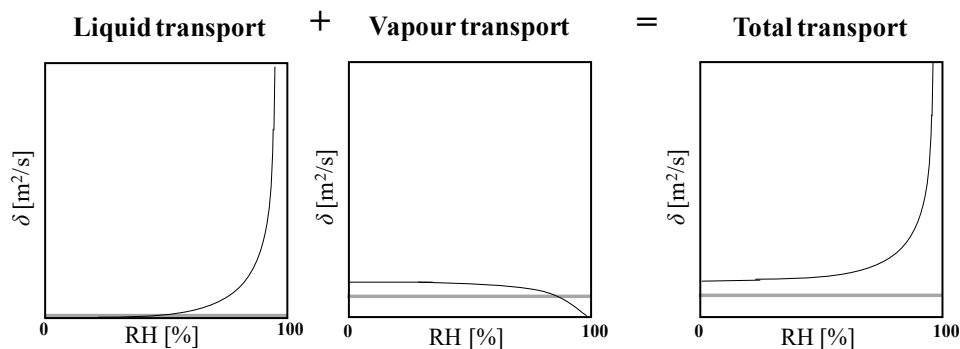
I Stockholms stad har man goda erfarenheter av att impregnera betongen som skydd mot salt och vatten. Folke Karlsson (1997) hävdar att salt och vatten antingen är orsaken till eller en påskyndande faktor för de flesta skademekanismer i betong. Kan betongen hållas fri från salt och vatten kommer risken för skador därmed att minska högst väsentligt. En perfekt betong behöver inte något ytterligare skydd, men sådan är svår att åstadkomma. Särskilt utsatta brodelar bör därför behandlas med ytskydd. För utomhuskonstruktioner måste betongen kunna andas, vilket betyder diffusionsöppna system. Preparatet kan antingen appliceras i vätskefas eller som beståndsdel tillsammans med en förtjockare/bärare. Inträngningsdjupet ökar med ökande kapillärsugningstid, minskande fukttinnehåll i betongen och minskande täthet. Med olika bärare som förlänger denna nås väsentligt längre kapillärsugningstid och Folke Karlsson (1997) rekommenderar därför denna teknik för konstruktioner i högvärdig betong med högt fukttinnehåll, svåråtkomliga konstruktionsdelar, prefabricerade betongpelare som flottas ut i saltvatten, betongkonstruktioner som utsätts för både tösaltning och nötning. Frågor kring olika kombinationer av ytskydd däribland impregnering har också studerats av dåvarande Stockholm Konsult i en artikel av Bertil Nyman (1998). Försök visar t.ex. att klotterskydd som appliceras på en redan utförd impregnering fungerar effektivt utan att impregneringens skyddseffekt mot salt och vatten försämras. Måste man däremot först sanera en yta med kemiska rengöringsmedel får silaner svårt att tränga in i betongen och impregneringens skyddande effekt försämras avsevärt.

Nedan presenteras några exempel på vad som kan uppnås med vattenavvisande impregneringar.

3.5.1 Fukttransport och RF i betongen

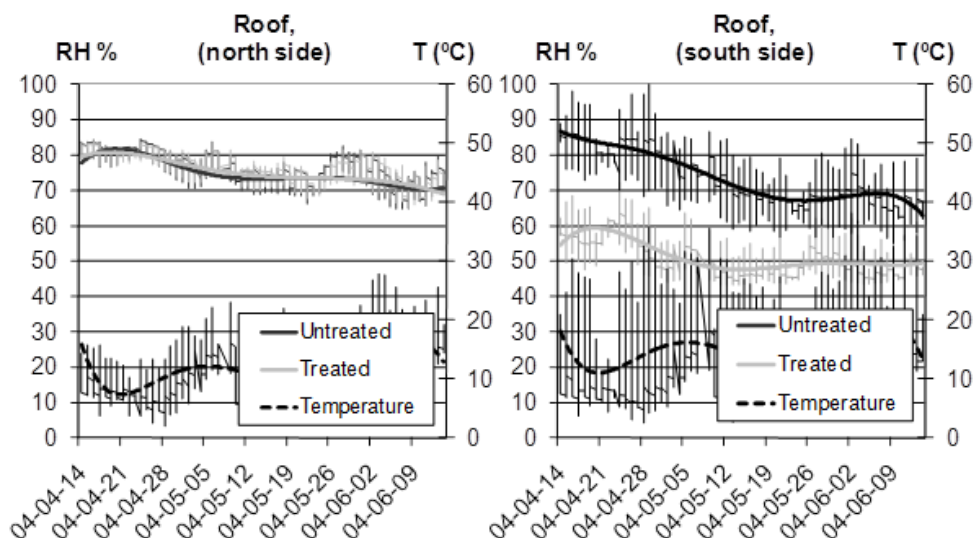
Vid en impregnering förändras betongens fuktmekaniska egenskaper från hydrofila till hydrofoba som tidigare redogjorts för. Denna förändring påverkar transporten av ånga och vätska samt i förlängningen ämnen lösta i vätskan t.ex. salter. En förutsättning för att förstå vad detta innebär för betongkonstruktionen är att känna till hur ångdiffusionskoefficienten påverkas. I Johansson m.fl (2006) undersöks två betonger med vattencementtalet 0,8 respektive 0,45 med koppmetoden för att bestämma ångdiffusionskoefficienten. Hälften av provkropparna impregnerades med isooctyltriethoxysilan med kapillär uppsugning och den andra halvan lämnades obehandlad. Silanen är en av de mest använda på svenska marknaden. Fyra olika saltlösningar användes i kopparna med mellan 85 och 97 % relativ fuktighet och omgivande klimat hölls vid 50 % RF. Viktminskningen mättes varje vecka tills ett konstant flöde uppnåts. Bland slutsatserna märks: Ångdiffusionskoefficienten för aktuell silan är nära konstant och inte alls så beroende av relativa fuktigheten som obehandlad betong. Skillnaden är mest markant vid höga RF vilket förklaras med att

transporten i vätskefas är nära noll för de impregnerade proverna till skillnad från de obehandlade där denna transport är dominant. I Figur 9 visas en schematisk bild av hur ångdiffusionskoefficienten påverkas av en vattenavvisande impregnering, Selander (2010).



Figur 9: Förenklad bild av hur ång- och vätsketransporten ser ut för ett hydrofilt respektive hydrofobt material. Grå linje visar hydrofobt och svart hydrofilt, Selander (2010).

I Sadouki & Wittman (1998) presenteras ett liknande utseende på transportkoefficienten baserat på uttorkningsförsök och en numerisk analys. Detta principiella utseende på transportkoefficienten förklarar den sänkning av RF som under gynnsamma förhållanden kan uppkomma genom en impregnering Johansson m.fl (2008). Skatteskrapan i Stockholm, byggd 1959, är ett bra exempel på detta. Byggnaden 81 m hög, fristående och klädd med förtillverkade betongelement. Dessa hade flera fuktproblem. Ett byte av alla fasadelementen skulle bli mycket dyrt. Istället valdes att försöka sänka fuktigheten. Tre ställen på byggnaden användes för jämförande provning: på markplanet mot väster, nära taket mot norr och mot söder. De tre fasadelementen behandlades med isooctyltriethoxysilane två gånger samma dag. Två element vid varje provställe användes som referens. Resultaten visar att fuktnivån kunde sänkas med upp till 20 % när omständigheterna var de rätta. Figur 10 visar samtidigt att förutsättningarna var olika för nord och sydsidan och att fuktsänkningen endast uppnåddes på sydsidan. Det är viktigt att säkerställa vad som är orsaken till de problem som skall åtgärdas innan en impregnering utförs.

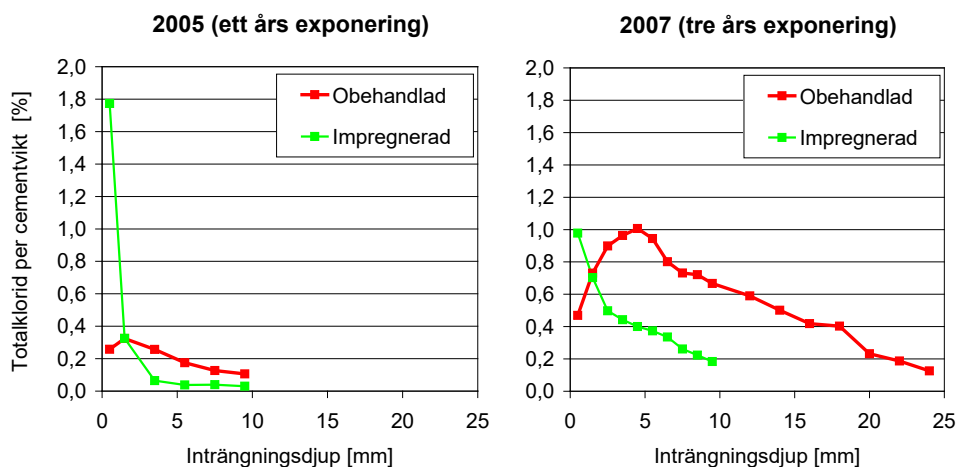


Figur 10: Mätningar av RF och temperatur på Skrapan i Stockholm. Fasadelement behandlade med vattenavvisande impregneringsmedel (treated) jämfördes med obehandlade (untreated).

Vattenånga kan visserligen passera genom det impregnerade skiktet men inte lika lätt som om det vore obehandlat. Det är därför viktigt att veta var fukten kommer ifrån så att källan inte finns innanför och fuktvandringen ut bromsas istället.

3.5.2 Kloridinträngning

I Figur 11 visas ett exempel från Eugeniattunneln där väggarna utsätts för stora mängder vägsalter under vintermånaderna. Behandlingen som utförts på betongprover med $v_{ct}=0,45$ har 2 mm i inträngningsdjup. Trots ett relativt litet djup av den vattenavvisande impregneringen fås ändå ett mycket gott skydd. Till exempel går det att konstatera att den i många fall kritiska kloridkoncentrationen 0,4 viktsprocent fås nära 20 mm in i betongen efter tre års exponering för de obehandlade proverna. Motsvarande djup för de impregnerade ligger på endast ca 5 mm. Den totala kloridinträngningen reduceras med 70-80 % genom impregneringen i detta exempel.

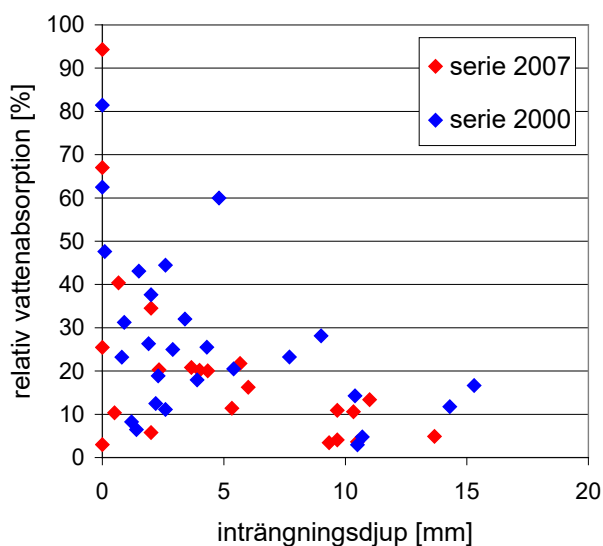


Figur 11: Kloridprofiler från provkroppar i Eugeniattunneln (Stockholm) efter ett respektive tre års exponering, Johansson-Selander m.fl (2010).

3.5.3 Inträngningsdjupets betydelse

Ett större inträngningsdjup ger inte alltid en bättre effekt men i de flesta situationer är det så. Figur 12 visar mätningar på vattenabsorption som funktion av impregneringens inträngningsdjup. Provningsarna är utförda på borrhärdor vilka tagits ut ur impregnerade betongkonstruktioner i Stockholm. Olika preparat och kombinationer av preparat förekommer men samtliga är baserade på silaner, siloxaner eller kombinationer av dessa.

Det är en stor spridning i resultaten och ett litet inträngningsdjup innebär inte automatiskt att impregneringen fungerar mindre bra men trenden är tydlig. Ett stort inträngningsdjup innebär med största sannolikhet att funktionen är god medan ett litet riskerar att tappa effekt tidigt.



Figur 12: På y-axeln presenteras vattenabsorptionen hos impregnerade prover jämfört med dess referens. Varje punkt representerar ett medelvärde av tre impregnerade prover dividerat på dess tre obehandlade referenser. (40 % innebär att impregneringen har gett 60 % reduktion i vattenabsorption). Johansson-Selander m.fl (2010).

4 Resultat

Resultaten presenteras nedan i fyra avsnitt.

4.1 ÖVERSIKTLIG BEDÖMNING AV BETONGEN I VATTENVÄGAR

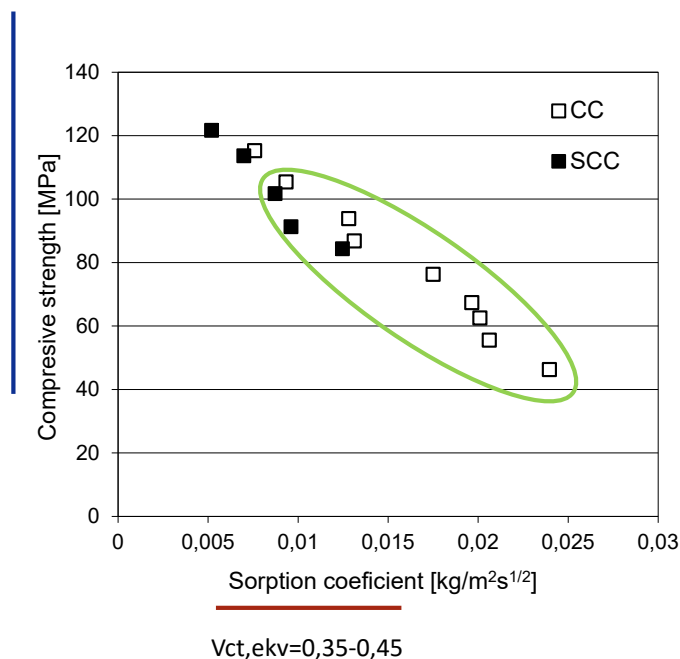
Vid sammanställningen av de materialanalyser CBI kunnat ta del av framkommer följande:

Tryckhållfasthet	Det finns ett stort spann i tryckhållfasthet (40-160 MPa). Merparten ligger dock i spannet (50-90 MPa). Över 100 MPa är relativt få i antal.
V _{ct,ekv}	Tunnslipsanalys där v _{ct,ekv} bestämts är relativt få till antalet. Analyserna har gett mellan 0,35 och 0,45.
Tunnslip	Urlakningszoner förekommer i tunnslipsanalyser men är också få i antal. I några enstaka fall upp till 10 mm djup.
pH	Har mätts i något enstaka fall och då i kombination med tunnslip. pH noterades i ett fall till 11,2 första 10 mm. I övrigt inga markanta sänkningar.
Densitet	~2200-2350 kg/m ³ i de fall denna har redovisats i rapporterna.
Kloridanalyser	Generellt förekommer många kloridanalyser. I många fall redovisas värden över 1,0 vikts-%.

Baserat på ovanstående resultat görs följande översiktliga bedömning av möjligheten att impregnera betongen. Till hjälp i analysen används Figur 13 genom att använda den tidigare presenterade korrelationen mellan tryckhållfasthet och vattenabsorption.

På Y-axeln presenteras spannet i tryckhållfasthet som framkommit i materialanalyserna i blått och på X-axeln v_{ct,ekv} i rött. Den gröna ringen indikerar inom vilket spann det kan anses vara möjligt att lyckas med en impregnering under förutsättningen att RF i ytan kan sänkas till 85 %. Detta baseras framförallt på den studie som ligger till grund för figurena 7 och 8 där 300 prokroppar impregnerades under olika förutsättningar.

I Figur 13 ses att det är fullt möjligt att impregnera merparten av betongen i kärnkraftverkens vattenvägar om RF i ytan kan sänkas till 85 %.



Figur 13: Korrelation från en försöksserie med anläggningsbetong där tryckhållfasthet och vattenabsorption provats, se Figur 1 för förklaring av diagrammet. I diagrammet redovisas materialanalysen (röd och blå linje) samt en bedömning av vad som är möjligt att impregnera (grönt område).

4.2 FUKTMÄTNINGAR VID KÄRNKRAFTVERKEN

I samband med besöken genomfördes flera RF-mätningar i intressanta miljöer för att ge en bild av hur fuktig betongen är när en vattenväg är torrlagd. Mätningarna genomfördes med en Vaisala SHM40 fuktmätare.

Ringhals: Betongvägg med stående vatten på baksidan, dränageschakt i turbinbyggnad. Foderrör till givarna monterades av Ringhals personal enligt instruktion innan besöket. Mätpunkterna placerades på 50 mm djup i en 300 mm tjock vägg med 4 meter vattenpelare på baksidan. Väggen var målad på den sida fukten mättes.

RF i betong 93-95 %, temperatur 18 °C

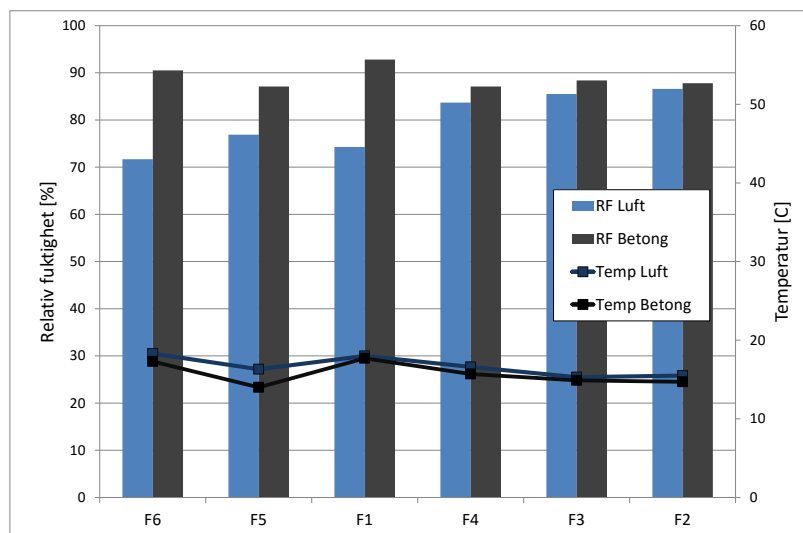
RF i luft 59 %, temperatur 17 °C

Trots en torr inomhusmiljö är fukten hög inuti och med ett vätskestryck inifrån blir fuktnivån hög genom hela tvärsnittet.

Forsmark: Svallschakt samt anslutande torrlagd vattenväg. Endast mätningar i luft. 6 stycken mätningar genomfördes där RF varierade mellan 83-91 % i luften. De reparationer som utfördes under revisionen krävde ingen extra tillförsel av frisk luft vilket i kombination med stående och rinnande vatten i nära anslutning till mätpunkterna gav ett högt RF i luften. Med ett RF som överstiger 85 % i luften tar det lång tid att torka ut betongen.

OKG:

Kylvattenväg för utlopp. Foderrör till givarna monterades av CBI enligt instruktion innan besöket. Mätpunkterna placerades på 50 mm djup utspridda längsmed kanalen. Vid varje mätpunkt mättes RF och temperatur i både betong och luft. Kanalen hade genomströmning av frisk/torr luft under revisionen vilket möjliggjorde en uttorkning av betongen i kylvattenkanalen. Figur 14 visar ett stapel diagram där mätpunkterna presenteras i ordningsföljd från inblåset av frisk luft till utblåset.



Figur 14: RF och temperatur i betong respektive luft från mätpunkt F6 närmast inblåset av friskluft till F2 närmast utblåset.

Det som går att se i Figur 14 är att RF i luften ligger så lågt som 70 % närmast inloppet av luft vilket möjliggör en uttorkning av betongen. Därefter fuktas luften upp gradvis när den närmar sig utloppet.

I betongen ligger RF på 50 mm djup mellan 87 och 92 %. Det är lite för högt för att kunna impregnera med framgång men det finns goda skäl att tro att RF i de yttersta 5-10 mm ligger betydligt lägre, åtminstone närmast inblåset av luft.

Detta bör vara en miljö där en vattenavvisande impregnering har goda förutsättningar att lyckas.

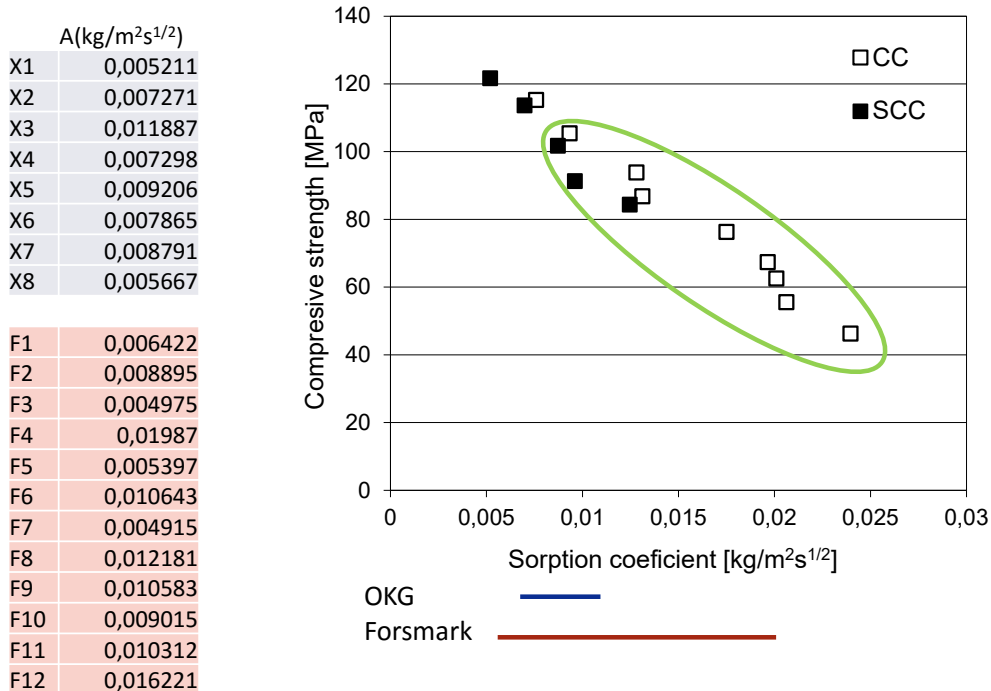
4.3 LABORATORIEPROVNINGAR-VATTENABSORPTION

Från Forsmark och OKG togs prover för kompletterande provningar där sorptionskoefficienten bestämdes. Provkropparna togs från samma vattenvägar som beskrivits i 4.2.

Provkropparna från Forsmark var av tre olika typer. Borrkärnor med enbart gammal konstruktionsbetong, gammal konstruktionsbetong som reparerats med någon/några centimeter sprutbetong samt borrkärnor med enbart ny sprutbetong. Detta är förklaringen till spridningen i resultaten.

Provkropparna från OKG hade markeringsfärg på ovanytan. Denna var svår att ta bort utan att påverka ytan varför provningen istället genomfördes på en sågad yta.

I Figur 15 redovisas resultaten där den gröna ringen indikerar inom vilket spann det kan anses vara möjligt att lyckas med en impregnering under förutsättningen att RF i ytan kan sänkas till 85 %.



Figur 15: Korrelation från en försöksserie med anläggningsbetong där tryckhållfasthet och vattenabsorption provats, se Figur 1 för förklaring av diagrammet. I diagrammet redovisas materialanalysen (röd Forsmark och blå OKG) samt en bedömning av vad som är möjligt att impregnera (grönt område).

I Figur 15 går det att se att den absoluta majoriteten av borrhämnarna skulle gå att impregnera om RF går att sänka till 85 % i ytan på betongen.

4.4 FÄLTFÖRSÖK KLORIDINTRÄNGNING

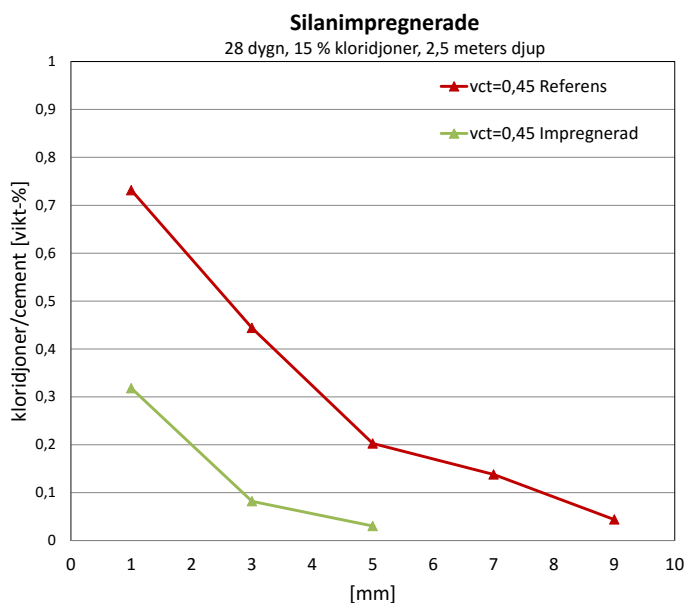
Med syftet att utröna om vattenavvisande impregneringar kan bromsa kloridinträngning under tryck genomfördes ett enkelt pilotförsök där fyra olika djup jämfördes. Försöken accelererades genom att låta provytorna stå i kontakt med en 15 % saltlösning och exponeras i 28 dygn. Erfarenhetsmässigt är det känt att vattenavvisande impregneringar är effektivare på porös betong. Experimentet genomfördes därför på två betonger. Den första med $v_{ct}=0,45$ vilken kan anses vara representativ för kärnkraftverkens vattenvägar och en med $v_{ct}=0,8$ för att vara säker på att få något resultat. Nedan redovisas var för sig. Observera att skalorna på X-axeln och Y-axeln är olika.

Noteras bör också att bestämningen av kloridkoncentrationen blir något osäker vid så höga koncentrationer som 3-5 % av cementvikten vilket förekommer i vissa fall.

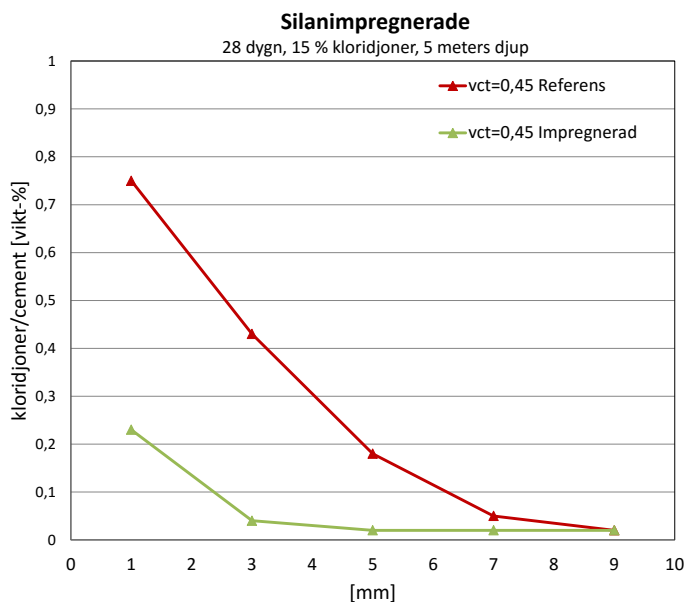
I båda fallen är effekten markant och det framstår som om skyddsmetoden är lika effektiv under vatten som ovan utifrån dessa försök.

4.4.1 Betong med $v_{ct}=0,45$

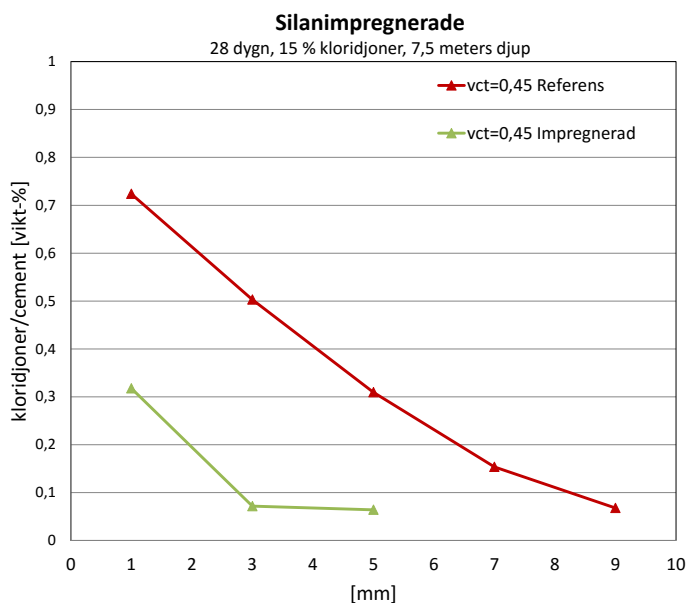
I Figur 16-19 redovisas resultaten för proverna med $v_{ct}=0,45$.



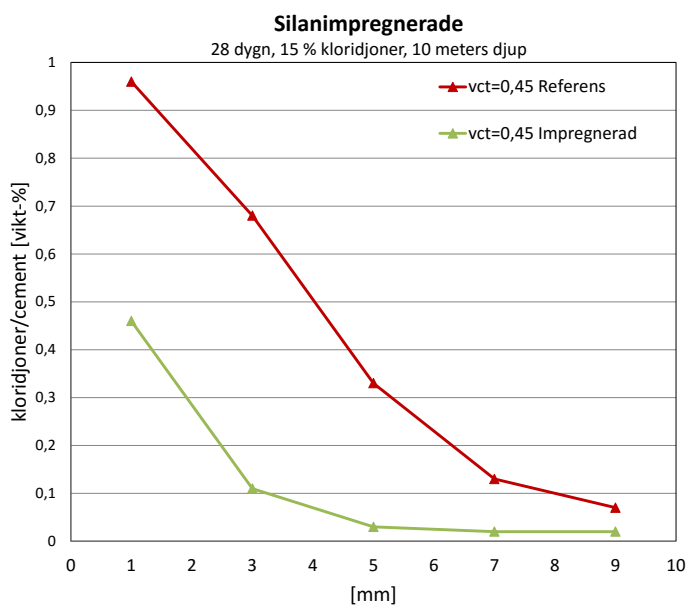
Figur 16: Betong med $v_{ct}=0,45$ efter 28 dygns exponering i 15 % saltlösning och 2,5 meters djup. Röd linje är obehandlad och grön är silanimpregnerad.



Figur 17: Betong med $v_{ct}=0,45$ efter 28 dygns exponering i 15 % saltlösning och 5 meters djup. Röd linje är obehandlad och grön är silanimpregnerad.



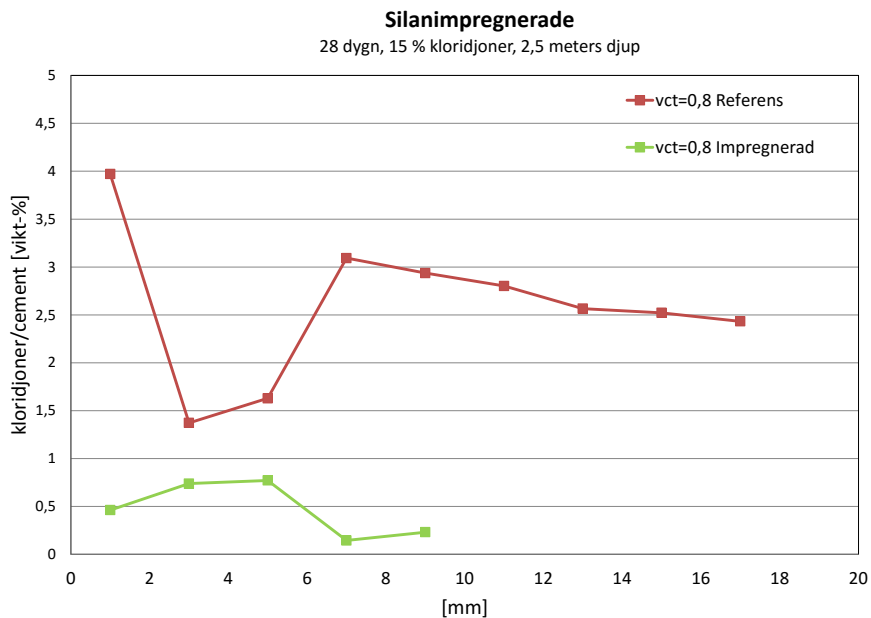
Figur 18: Betong med vct=0,45 efter 28 dygns exponering i 15 % saltlösning och 7,5 meters djup. Röd linje är obehandlad och grön är silanimpregnerad.



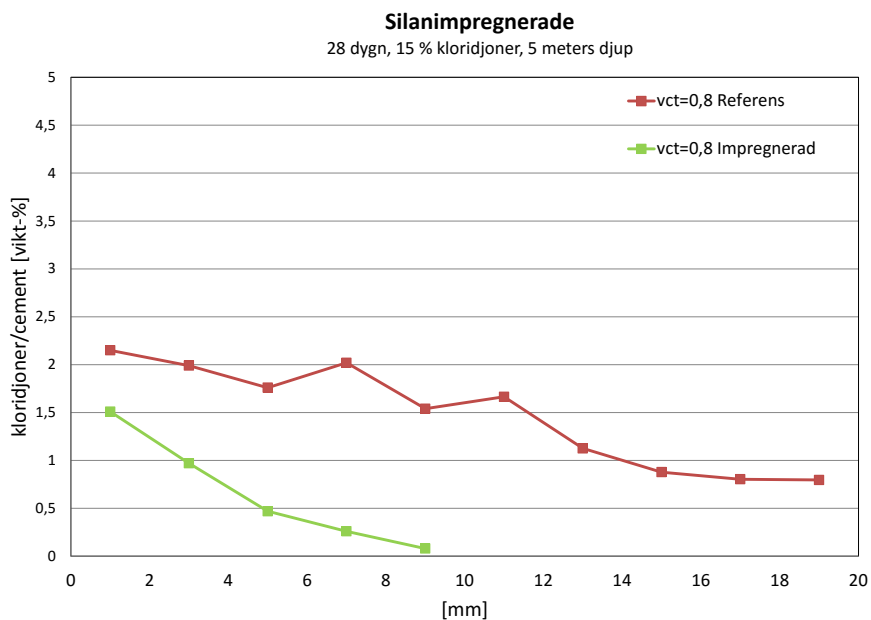
Figur 19: Betong med vct=0,45 efter 28 dygns exponering i 15 % saltlösning och 10 meters djup. Röd linje är obehandlad och grön är silanimpregnerad.

4.4.2 Betong med $v_{ct}=0,8$

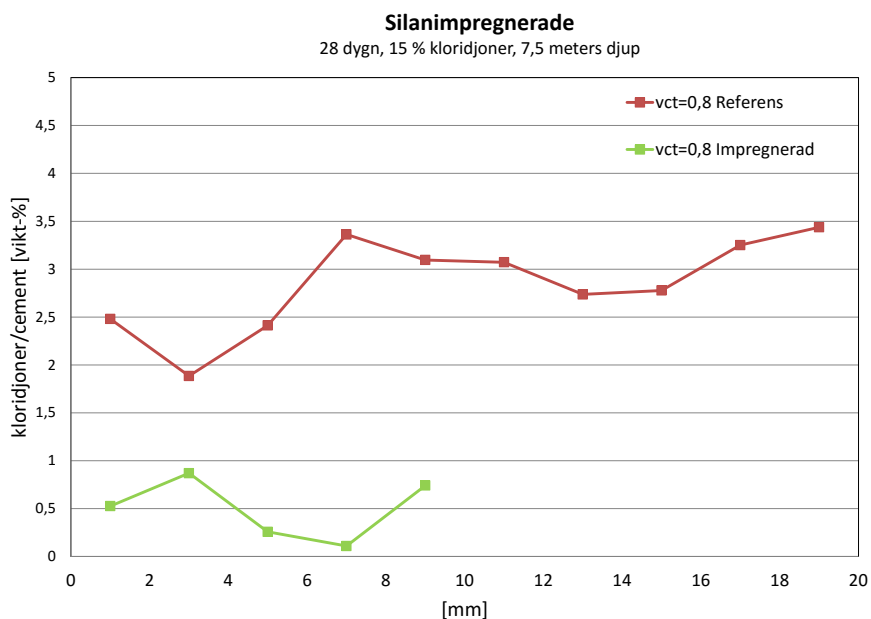
I Figur 20-23 redovisas resultaten för proverna med $v_{ct}=0,8$.



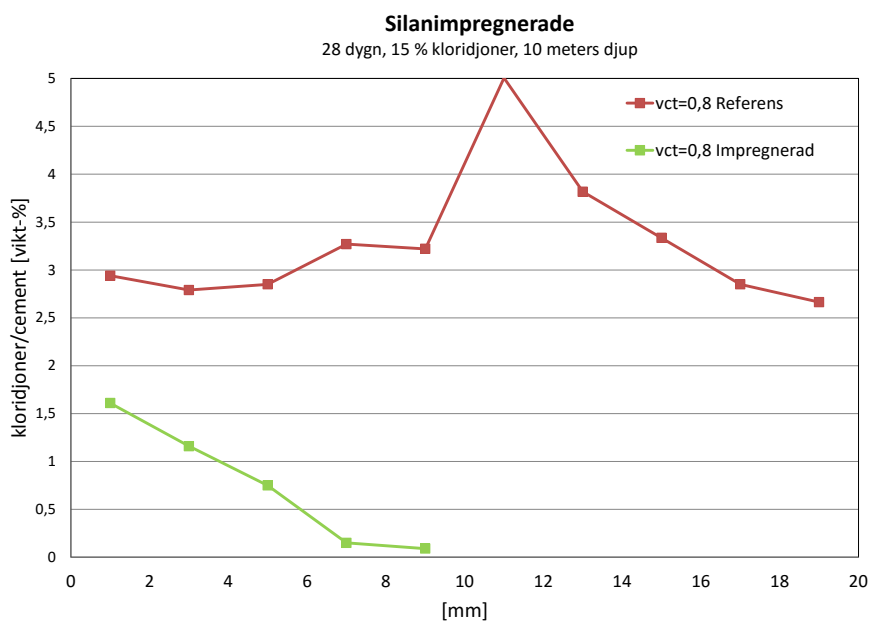
Figur 20: Betong med $v_{ct}=0,8$ efter 28 dygns exponering i 15 % saltlösning och 2,5 meters djup. Röd linje är obehandlad och grön är silanimpregnerad.



Figur 21: Betong med $v_{ct}=0,8$ efter 28 dygns exponering i 15 % saltlösning och 5 meters djup. Röd linje är obehandlad och grön är silanimpregnerad.



Figur 22: Betong med vct=0,8 efter 28 dygns exponering i 15 % saltlösning och 7,5 meters djup. Röd linje är obehandlad och grön är silanimpregnerad.



Figur 23: Betong med vct=0,8 efter 28 dygns exponering i 15 % saltlösning och 10 meters djup. Röd linje är obehandlad och grön är silanimpregnerad.

5 Slutsatser

Förstudien syftar till att svara på om och i så fall var det finns fördelar med att använda vattenavvisande impregneringar i förebyggande underhåll samt i vilka miljöer det är möjligt rent praktiskt att använda metoden. Slutsatserna redovisas under fyra punkter nedan vilket beaktar:

1. förutsättningarna vid impregneringstillfället
2. konstruktionens tillstånd med avseende på pågående och begynnande skademekanismer
3. skyddsmetodens funktion under tryck
4. förutsättningar att använda skyddsmetoden enligt presenterad miljöindelning

5.1 FÖRUTSÄTTNINGAR VID IMPREGNERINGSTILLFÄLLET

Impregneringsmedlet måste tränga in i konstruktionen. I en så utsatt miljö som kärnkraftverkens vattenvägar är detta extra viktigt. Porositet, fuktnivån i betongen samt behandlingstiden avgör om detta är möjligt. I Figur 7 och 8 illustreras detta tydligt.

Porositet: Genom de materialanalyser som genomförts i detta projekt (vattenabsorptionsförsöken, Figur 15) samt de rapporter som tillhandahållits av Forsmark, Ringhals och OKG (Kap 4.1) framgår det att det är fullt möjligt att impregnera merparten av de vattenvägar som finns på kärnkraftverken med gott resultat om endast betongens porositet beaktas.

Fuktnivå: Att impregnera en undervattenskonstruktion är av förklarliga skäl normalt sätt inte möjligt. Det som gör vattenvägarna i kärnkraftverken speciella i detta fall är att de i bruk befinner sig under vatten men under revision är torrlagda. Rapporten visar att det finns exempel där det kan gå att torka ut betongen under revision (se Figur 14) men också att många konstruktionsdelar har en för hög fuktbelastning från "baksidan" för att det skall vara möjligt. Detta måste bedömas från fall till fall och troligtvis krävs ett luftflöde genom vattenvägen för att en uttorkning skall vara möjlig.

Behandlingstid: Tiden som betongen har på sig att suga in medlet går att förlänga med upprepade behandlingar och/eller olika bärare så detta skall inte vara något problem.

5.2 KONSTRUKTIONENS TILLSTÅND

Det är två effekter som kan fås av en vattenavvisande impregnering. i) Lösta ämnen (oftast kloridjoner) i vatten hindras från att tränga in i betongen då i huvudsak ångtransport sker genom det impregnerade skiktet. ii) Under vissa omständigheter kan fuktnivån inuti konstruktionen förändras genom denna egenskap.

När detta är känt är frågan hur de aktuella skademekanismerna som konstruktionen skall skyddas mot påverkas av att ytan blir vattenavstötande. Detta måste bedömas från fall till fall. I Figur 6 ges ett flödesschema som illustrerar detta.

När det gäller **konstruktionens tillstånd** måste en bedömning först genomföras. I samtliga vattenvägar är det osannolikt att en fuktsänkning skall kunna uppnås genom en vattenavvisande impregnering. Detta beror på att miljön bedöms vara relativt konstant med hänseende till fuktnivån i luften och direktkontakten under vattnet. I en

sådan miljö infaller ett jämviktstillstånd i en impregnerad konstruktion. Detta innebär att impregneringens funktion i denna miljö är att bromsa ämnen lösta i vatten. Av detta följer att en vattenavvisande impregnering är ett:

- bra alternativ för att begränsa kloridtransporten in i konstruktionen
- dåligt alternativ mot pågående armeringskorrosion och vid höga kloridkoncentrationer

5.3 FUNKTION UNDER TRYCK

I litteraturgenomgången har det inte framkommit något dokumenterat försök där en vattenavvisande impregnerings funktion under tryck har undersökts. I detta pilotförsök som redovisas i Figur 16-23 framgår att funktionen är mycket god även under tryck. Kloridkoncentrationerna är markant lägre i de behandlade proverna och i paritet med vad som brukar ses i t.ex. vägmiljö dvs. 70-80 % reduktion i kloridinträngning eller mer. Detta är dock ett accelererat försök och det är svårt att dra slutsatser om livslängden hos behandlingen när den står under tryck.

5.4 FUNKTION I OLIKA MILJÖER

En miljöindelning som dyker upp i flera rapporter, t.ex. U 09:136 redovisas i Figur 24.

Utifrån denna förstudie samt de genomförda pilotförsöken kan följande bedömning av förutsättningarna för att använda vattenavvisande impregneringar som skyddsmetod i miljö A-D göras:

- Det bör gå att torka ut vissa vattenvägar i kärnkraftverken när dessa är torrlagda. Figur 14 visar ett exempel på detta från OKG. Miljöindelning A-D har mindre betydelse i detta hänseende.
- En stor del av de vattenvägar som går att torka ut bör även gå att impregnera, vilket framgår av Kap 4.1 och 4.3. Miljöindelning A-D har mindre betydelse även i detta hänseende.
- I miljö A-C kommer den vattenavvisande impregneringen fungera bra mot kloridinträngning. Detta är väl dokumenterat i litteraturen. I miljö D indikerar pilotförsöken under tryck som redovisats i denna rapport att det bör fungera.
- Det går knappast att sänka fuktnivån i betongen med hjälp av den vattenavvisande impregneringen i någon av miljöerna A-D.
- Den vattenavvisande impregneringen kan inte förväntas ge någon effekt mot redan pågående korrosion.

För andra konstruktionsdelar än vattenvägarna i kärnkraftverken där vattenavvisande impregneringar kan vara aktuella hänvisas till litteraturgenomgången i rapporten. Där redogörs för de viktigaste faktorerna att ta hänsyn till.

Torr betong God tillgång till syre Låg kloridhalt Ingen risk för urlakning Lufttemperatur	A	
		Kapillär fukttransport
Fuktig betong Lagom tillgång till syre Relativ hög kloridhalt (ackumulering) Liten risk för urlakning Lufttemperatur	B	
		Högvattennivå
Fuktig betong Relativ dålig tillgång till syre Hög kloridhalt (ackumulering) Risk för urlakning Vattentemperatur	C	
		Medelvattennivå
		Lågvattennivå
Vattenmättad betong Dålig tillgång till syre Hög kloridhalt Risk för urlakning Vattentemperatur	D	
		Armering

Figur 24: Miljöindelning utifrån tillståndsbedömningar kopplat till vattennivån.

6 Fortsatt forskning

Baserat på den genomförda förstudien och den aktuella skadebilden i kärnkraftverkens vattenvägar ges tre förslag på lämpliga studier. Det bedöms finnas en stor nytta av att öka kunskapen om och utnyttja fördelarna med hydrofoba egenskaper hos betongen.

- **Fördjupad undersökning kring impregneringens funktion under tryck:**
Hypotesen är: För att en vattenavvisande impregnering skall bromsa kloridinträngningen krävs ett par millimeters skikt där endast ångtransport sker. I de genomförda försöken utsattes impregneringen för 10 mvp och fungerade bra. Finns det en gräns när det impregnerade skiktet vattenfylls och funktionen upphör? Detta är viktigt veta om det är aktuellt att impregnera miljöer som befinner sig under högre tryck. Det är också viktigt att vet hur länge impregneringen kan förväntas stå emot trycket.
- **Fältförsök:** Förstudien har visat att det i teorin är fullt möjligt att använda vattenavvisande impregneringar under vatten om förutsättningarna är de rätta. För att vara säker och börja använda metoden i större skala krävs dock något eller några fältförsök där metoden utvärderas i rätt miljö. Här är det centralt att välja rätt miljö ur ett skadebildsperspektiv där betongen går att torka ut inför en impregnering.
- **Hydrofob betong:** En stor utmaning med impregneringsmedel i vattenvägarna är att torka ut betongen innan applicering. Det finns flera organiska tillsatser som går att använda för att göra betongen vattenavstötande från början. Detta är ett område som är bristfälligt undersökt men har en stor potential. För att begränsa kloridinträngningen i en nyreparerad konstruktion skulle t.ex. hydrofob sprutbetong kunna vara ett intressant alternativ. Den stora fördelen är att den vattenavstötande effekten fås i hela betongmassan medan nackdelen är att den i de flesta fall inte blir lika starkt vattenavvisande. Det senare är dock en fråga om vilken koncentration på den hydrofoba tillsatsen som väljs och hur denna påverkar den färskas betongens egenskaper. Här finns en stor utvecklingspotential.

7 Referenser

- Andrews-Phaedonos, F., (1994) "Rehabilitation and Subsequent Monitoring of Sawtells Inlet Bridge, South Gippsland Highway, Tooradin, Victoria". Proceedings, 17th ARRB Conference, August 14-19, 1994, Gold Coast, Queensland, Australia, Volume 4, pp. 11-27.
- Arkles, B. (1977) "Tailoring surfaces with silanes". Chemtech December, Vol. 7, pp. 766-778.
- Bofeldt, M., (2001) "Inverkan av RH, vct och absorptionstid på inträngningsdjup för impregnerad betong". Examensarbete nr 165, brobyggnad, institutionen för byggkonstruktion, KTH, Stockholm.
- Bofeldt, M., & Nyman, B., (2001) "Inträngningsdjup för impregneringsmedel på betong". Tidskriften Bygg & teknik, nr 7/01, s. 29-31.
- BRO 94. "Allmän teknisk beskrivning för broar. Del 7, Brounderhåll". Publikation nr 1994:7, Vägverket, Borlänge, 1994, 47 s.
- Buttner T. and Raupach M. (2008), Durability of Hydrophobic Treatments on Concrete – Results from Laboratory Tests, Proceedings, 5th International Conference on Water Repellent materials, Aedificatio Publishers, Freiburg, sid 329-340.
- De Clercq, H., De Witte, E., (2001) "Reactivity of silicon based water repellent agents at different application conditions" Internationale Zeitschrift für Baueninstandsetzen und Baudenkmalpflege, 7. Jahrgang, Heft 1, pp. 63-78
- During O & Malaga K., (2014) "Life cycle cost analysis on impregnated bridge edge beams" Hydrophobe VII, Lisabon pp 235-240
- EN 13579 "Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures – Test Methods – Drying Test for Hydrophobic Impregnation". (2002).
- EN 13580 "Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures – Test Methods – Water Absorption and Resistance to Alkali for Hydrophobic Impregnations". (2002).
- EN 13581 "Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures – Test Methods – Determination of Loss of Mass of Hydrophobic Impregnated Concrete after Freeze-Thaw Salt Stress". (2002).
- Gerdes, A., (2005) "Preventive Surface Protection of Concrete Structures". Proceedings of the International Workshop on Service Life of Concrete Structures. Sapporo, Japan, Feb. pp. 31-40.
- Gerdes, A. H., (2001) "Transport und chemische Reaktion siliciumorganischer Verbindungen in der Betonrandzone". PhD-Thesis, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz, 220 p.
- Gerdes A. and Wittmann F. H. (2001), Decisive Factors for the Penetration of Silicon-organic Compounds into Surface near Zones of Concrete, , Proceedings, 3rd international Conference on Surface Technology with Water Repellent Agents, Aedificatio Publishers, Freiburg, sid. 111-122.

- Hankvist K. and Karlsson F. (2001), Gel Impregnation of Concrete – Theoretical Results and practical Experiences, , Proceedings, 3rd international Conference on Surface Technology with Water Repellent Agents, Aedificatio Publishers, Freiburg, sid. 93-110.
- Hurley, S.A., (2001) "The British Experience of Impregnation and Surface Treatment of Concrete". Sammanfattningar, Betongreparationsdagen 2001, Rebet, CBI, Stockholm, 30 s.
- Johansson, A., Janz, M., Silfwerbrand, J., & Trägårdh, J., (2005), "Impregnation of Concrete Structures – Introduction to a Ph.D. Project". Proceedings, Hydrophobe IV - the 4th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials. Stockholm, Sweden, April 12-13, pp. 59-68.
- Johansson, A., Janz, M., Silfwerbrand, J., & Trägårdh, J., (2006) "Moisture Transport in Impregnated Concrete – Moisture Diffusion Coefficient, Modelling, Measurements and Verification", International Journal on Restoration of Buildings and Monuments, Vol. 12, No. 1, pp. 13-24.
- Johansson, A., Janz, M., Silfwerbrand, J., & Trägårdh, J., (2007) "Penetration Depth for Water repellent Agents in Concrete as a Function of Humidity, Porosity and Time", Int. J. Restoration of Buildings and Monuments, Vol. 13, No. 1, pp. 3-16.
- Johansson, A., Janz, M., Silfwerbrand, J., & Trägårdh, J., (2008) "Long Term Performance of Water Repellent Treatment-Water Absorption Tests of Field Objects in Stockholm", Int. J. Restoration of Buildings and Monuments, Vol. 14, No. 1, pp. 39-47.
- Johansson A., Nyman B. and Silfwerbrand J. (2008), Decreasing Humidity in Concrete Facades after Water Repellent Treatments, Proceedings, 5th International Conference on Water Repellent materials, Aedificatio Publishers, Freiburg, sid 379-386.
- Johansson, L., (1993) "Ytbehandling av betongkonstruktioner utomhus". CBI rapport nr 4:93, Cement och Betong Institutet, Stockholm, 197 s.
- Johansson-Selander, A., Janz, M., Silfwerbrand, J., & Trägårdh, J., "Water Repellent Treatments–The importance of reaching a sufficient penetration depth", Proceedings - CONSEC'10, Merida, Mexico, Taylor & Francis Group, 2010, pp 1173-1180.
- Johansson-Selander, A., Janz, M., Silfwerbrand, J., & Trägårdh, J., "Preventing Chloride Ingress in Concrete with Water Repellent Treatments", Proceedings-CONSEC'10, Merida, Mexico, Taylor & Francis Group, 2010, pp 1189-1194.
- Karlsson, F., (1997) "Skyddsbehandling av betong mot salt och vatten". Tidskriften Betong, nr 3/97, s. 10-13.
- León, A., & Nyman, B., (2001) "Effektiviteten hos utförda impregneringar". Tidskriften Bygg & teknik, nr 7/01, s. 34-36.
- Meier S.J. and Wittmann F.H. (2001), Influence of Concrete Quality, its Age and Moisture Content, on the penetration Depth of Water Repellent Agents, Proceedings, 3rd international Conference on Surface Technology with Water Repellent Agents, Aedificatio Publishers, Freiburg, sid. 123-132.

- Nyman, B., (1998) "Klotter på betongytor". Tidskriften Betong, nr 1/98, s. 8-11.
- Osterholtz, F. D., Pohl, E. R., (1992): "Kinetics of the hydrolysis and condensation of organofunctional alkoxysilanes: a review" Journal of Adhesion Science. Vol. 6, No. 1, pp. 127-149.
- Plueddemann, E. P., (1991) "Silane Coupling Agents-Second Edition" Plenum Press, New York, ISBN 0-306-43473-3
- Powell, B.D., Weyers, R.E., Cady, P.D., & Al-Qadi, I.L., (1993) "Field Service Life Performance of Deep Polymer Impregnation as a Method for Protecting Bridge Decks from Corrosion". Transportation Research Record, No. 1392, pp. 117-125.
- Sadouki H. and Wittman F. H. (1998) Influence of Water Repellent Treatment on Drying of Concrete, Proceedings, Hydrophobe II- Second International Conference on Water Repellent Treatment of Building, F. H. Wittman pp.177-188, Aedificatio Publishers, Freiburg
- Selander, A., 2010, "Hydrophobic Impregnation of Concrete Structures – Effects on Concrete Properties", Doctoral-thesis, TRITA-BKN Bulletin No. 104, Chair of Structural Design and Bridges, Department of Structural Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.
- Selander, A, Westerholm, M & Trägårdh, J., Performance-based correlations between different concrete properties, RILEM International workshop on performance-based specification and control of concrete durability, Zagreb, Croatia, pp. 183-190, ISBN: 978-2-35158-135-3.
- Shuere L., Van Gemert D., Friedel M. and Giessler-Blank S. (2008), Durability of Water Repellents in a Marine Environment, Proceedings, 5th International Conference on Water Repellent materials, Aedificatio Publishers, Freiburg, sid 357-366.
- Silfwerbrand, J., (2002) "Aktivt brounderhåll – en förstudie". Rapport nr 65, brobyggnad, byggkonstruktion, institutionen för byggvetenskap, KTH, 65 s.
- Silfwerbrand, J., (2006) "Impregnation – An Efficient Method of Active Bridge Maintenance", International Journal on Restoration of Buildings and Monuments, Vol. 12, No. 1, pp. 3-12.
- Silfwerbrand, J., (2008), Impregnation of Concrete Bridge Elements Exposed to Severe Environment-Is it cost effective? Proceedings, 5th International Conference on Water Repellent materials, Aedificatio Publishers, Freiburg, sid 341-353.

VATTENAVVISANDE IMPREGNERING AV BETONG I KÄRNKRAFTSMILJÖ

Vattenavvisande impregneringsmedel som appliceras på betongkonstruktioner används i Sverige i första hand för att skydda armeringen från salt. Genom att göra betongens ytskikt vattenavstötande begränsas bland annat kloridjonernas möjlighet att transporteras in till armeringen vilket i många fall kan förlänga konstruktionens livslängd.

I våra kärnkraftverk befinner sig armerad betong i många fall i en mycket utsatt miljö där olika nedbrytningsprocesser förekommer. Detta gäller speciellt vattenvägarna. Att impregnera en undervattenskonstruktion är dock av förklarliga skäl normalt sätt inte möjligt. Det som gör vattenvägarna i kärnkraftverken speciella i detta fall är att de befinner sig under vatten när de är i bruk, men är torrlagda under revision.

Ett accelererat fältförsök av skyddsmetodens funktion under tryck visar att vattenavvisande impregneringar är effektiva som kloridbarriär och klarar minst 10 mvp. Kloridkoncentrationerna är markant lägre i de behandlade proverna och i paritet med vad som brukar ses i exempelvis vägmiljö det vill säga mellan 70 och 80 procents reduktion i kloridinträngning eller mer.

Fuktmätningar i fält och materialanalyser visar att det bör gå att torka ut vissa vattenvägar i kärnkraftverken när dessa är torrlagda och att en stor andel även bör gå att impregnera med gott resultat.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se