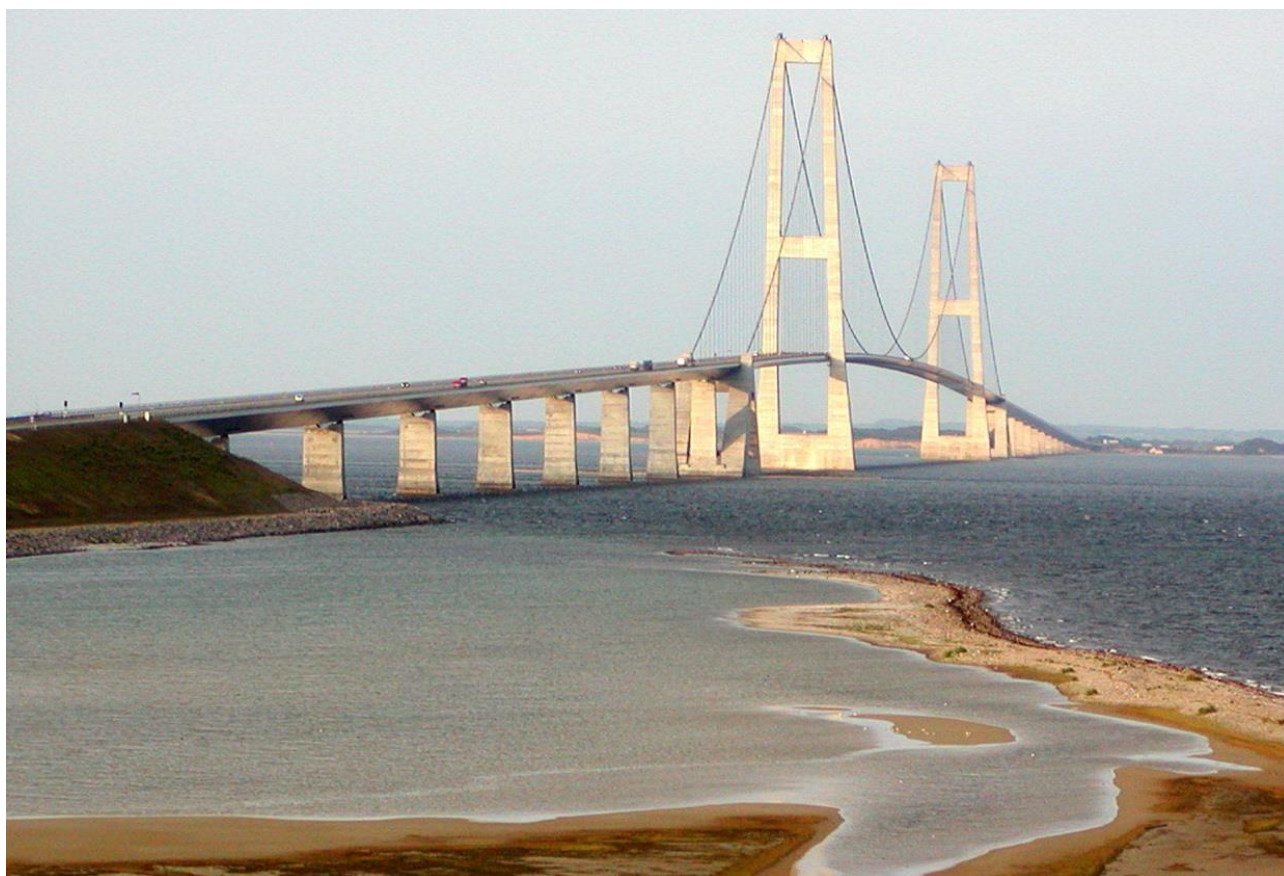


19.3 Chloridindtrængning

Af Jens Mejer Frederiksen



Figur 1. Storebæltsforbindelsen – her højbroen set fra Sprogø – var en af de første konstruktioner i Danmark, hvor beregning og måling af chloridindtrængning indgik direkte i kravstillelsen (omkring 1988).

Chlorid fra almindeligt salt kan trænge ind i beton og få armeringen til at ruste, så denne svækkes alvorligt – og det kan ske helt uden synlige tegn på betonens overflade.

Sikring mod indtrængning af chlorid fra salt fra havvand er meget afgørende for at sikre broer, tunneler og andre marine konstruktioners holdbarhed. Også chlorid fra tøsalt kan angribe fx altanplader, parkeringshuse og motorvejsbroer. Endvidere er svømmebadsvand chloridholdigt, hvorfor også holdbarheden af selve bassinet og de nærliggende konstruktioner kan påvirkes af chlorid.

19.3.1 Mekanismen

Chlorid - i form af natriumchlorid - udgør en stor del af de i havvand naturligt forekommende salte. Almindeligt køkkensalt og tøsalt til optøning af frosne vejoverflader består også i høj grad af natriumchlorid. Natriumchlorid består af ionerne Na^+ (natrium-ionen) og Cl^- (chlor-ionen, der ofte kaldes chlorid-ionen selv om det egentligt er forkert - en pleonasme).

Når natriumchlorid trænger ind i en betonkonstruktion kan ionerne Na^+ og Cl^- føre til skadevirkning på hhv. tilslagsmaterialer og armeringsstål. Skadevirkningerne af Na^+ (alkalimetalion) er beskrevet i kapitel 19.1, mens nærværende kapitel handler om indtrængning af Cl^- (chlorid) i beton, hvad det betyder, hvordan det foregår, hvor hurtigt det sker, og hvilke forholdsregler man kan tage.

Beton – der ikke er carbonatiseret, se kapitel 19.2 – beskytter pga. porevæskens pH på 12-14, armeringsstålet mod at ruste, når der ikke er chlorid til stede i betonen. Skadevirkningen af chlorid vedrører ikke selve betonmaterialet, men kun armeringsstålet i betonkonstruktionen. Når der er opbygget et tilstrækkeligt højt indhold af chlorid ved armeringsstålet, begynder armeringsstålet at ruste.

Der skal i princippet kun få og relativt enkle forholdsregler til for at modvirke skadevirkningen fra chlorid. Det er følgende:

- Der må kun indblandes en lille chloridmængde i betonen ved betonproduktionen
- Betonmaterialet skal have en tilstrækkelig stor tæthed
- Dæklaget uden på armeringen skal være tilstrækkeligt tykt og uden revner.

I praksis er det dog ikke så let at etablere disse forholdsregler.

Der kræves særlig omhu for at begrænse delmaterialernes indhold af chlorid, således at den friskblandede betons chloridindhold er lavt.

Tæthed overfor chloridindtrængning kræver, at betonen støbes med et lavt v/c -forhold. Dette kan give problemer med at udstøbe og efterbehandle betonen.

Af hensyn til økonomi, bæreevne og revnevidder kan dæklaget ikke bare vælges vilkårligt tykt. Et tykt dæklag fordrer en kraftig armering for at undgå for store revner, der ødelægger dæklagets tæthed.

En yderligere komplikation er, at hvis man ved evaluering af det nødvendige dæklag anvender oversimplificerede modeller for chloridindtrængning, vil det føre til meget tykke betondæklag (over 100 mm) i de mest udsatte områder på chloridpåvirkede konstruktioner som fx brosjølers vandgangssnit.

Nærværende kapitel beskriver de grundlæggende forhold knyttet til chloridindtrængning i beton, men det kræver yderligere studier (ud over Betonhåndbogen), at kunne udføre egentlige forudsigelser af betons chloridindtrængningsmodstand mv.



Figur 2. Undersiden af en betonplatform beliggende ca. 10 m over havet (på billedet er havet holdt tilbage af en midlertidig dæmning). Salt fra havvandet er trængt ind i betonen og chlorid har fået armeringsstålet til at ruste i udbredt grad. Rust kan fylde op til syv gange så meget som stål, hvorfor betondæklaget uden på armeringen kan sprænges af, når rustprocessen er udbredt og har forløbet i passende lang tid.

19.3.2 Chlorid i beton

Chlorid findes naturligt i små mængder i betonens delmaterialer (især i cement, flyveaske, sand, vand). Der er nu i Europa og i de fleste andre lande normkrav til, hvor stort indholdet af chlorid i delmaterialerne og i den friske beton må være. I Mellemøsten har man oplevet, at den primære kilde til betons chloridindhold var ørkensandet, hvilket har ført til omfattende skader på selv helt nye bygværker.

I Danmark kan chlorid komme fra cementen (normalt mindre end 0,03 %, men op til 0,10% er tilladt i cementstandarden DS/EN 197-1) og fra rester af saltvand i søsand (sand indvundet på havet).

Den mest betydelige kilde til chlorid under danske forhold har dog altid været fra omgivelserne, dvs. at salt er trængt ind i betonen, efter at denne er hærdnet.

Andre mulige kilder til chlorid kan være anvendelse af saltvand som blandevand eller calciumchlorid som accelerator – begge fremgangsmåder er i dag ikke tilladt i henhold til gældende standarder, men har været anvendt tidligere.

19.3.2.1 Forekomst

Konstruktioner placeret i eller tæt ved havvand, eller i eller nær ved arealer, der saltes for at fjerne is om vinteren, bassiner med saltholdigt vand (fx svømmebassiner) eller konstruktioner, der på anden vis kommer i kontakt med chloridholdigt vand eller blot store koncentrationer af salt (fx saltlagre), skal anses for at være chloridpåvirkede.

Eksempler på konstruktioner eksponeret for chlorid i...			
• havvand:	• tøsalt:	• badevand:	• procesvand:
○ Brosøjler i vand ○ Broers overbygninger (undersiden op til en vis højde) ○ Tunneler (især ydersiden) ○ Bølgebrydere ○ Kajmure	○ Brosøjler ved veje ○ Vejbroers overbygninger (især oversiden) ○ Tunneler (især indersiden) ○ Parkeringsanlæg (dæk, vægge, søjler) ○ Altaner (dæk, konsoller, søjler) ○ Saltlagre	○ Svømmebassiner ○ Promenadedæk (barfodsarealet omkring bassiner) ○ Springtårne	○ Visse rensningsanlæg ○ Saltkar (fødevareindustrien)

Tabel 1. Typiske eksempler på chlorideksponerede konstruktioner.

19.3.2.2 Målemetoder

En korrekt bestemmelse af chloridindhold kræver, at en repræsentativ prøve af beton/mørtel/cementpasta udtages, at prøven forberedes og tilpasses til korrekt størrelse, at alt prøvens chlorid ekstraheres over i en vandig fase og, at indhold af chlorid bestemmes i forhold til prøvens masse. Der er tale om en delikat kvantitativ analyse, hvor der er en del fejlkilder undervejs. Bestemmelse af betons chloridindhold bør derfor udføres af veludstyrede laboratorier med den fornødne og vedligeholdte prøvningserfaring.

Der findes i princippet to forskellige teknikker til at udtage prøver til bestemmelse af chloridindhold i beton fra eksisterende konstruktioner. Det er enten udtagning af borekerner til neddeling på laboratorium eller udtagning af boremelsprøver. Udtagning af borekerner er at foretrække til målinger med præcisionskrav, hvorimod udtagning af boremelsprøver (pulver fra boring i betonen) pga. den lavere pris og kortere prøvningstid er at foretrække til orienterende målinger, såfremt man har kendskab til carboniseringsfrontens aktuelle beliggenhed i betonen.

Den udtagne prøve skal nedknuses således, at alle dele af prøven kan passere gennem en sigte med en maskevidde på 0,1 mm – dette er dog ikke nødvendigt for en boremelsprøve, hvor betonen er knust under boringen. Hvis prøvemassen er for stor, fx hvis den indeholder mere end, hvad der svarer til 10 g cement, så skal den neddeles ved kvartering, så dens størrelse er afpasset den efterfølgende kemiske analyse.

Kvartering er en metode til at neddele en pulverprøve. Man opbygger en symmetrisk kegleform af prøven. Herefter skæres midt ned igennem prøven på to leder, så den deles i fire lige store dele. Man isolerer herefter de to modstående "fjerdedele" og blander dem til en ny pulverprøve. Man kan evt. gentage kvarteringen, indtil prøvens masse er passende til det videre prøvningsforløb.

Chloridindholdet i beton/mørtel/cementpasta bestemmes altid i forhold til den tørre prøvemasse. Dvs. at den udtagne prøve skal tørres ved 105 °C til massekonstans, hvorefter massen bestemmes på en præcisionsvægt med en målenøjagtighed, der skal være bedre end 0,1 % af prøvens masse.

Man skal være opmærksom på, at beton og cement kan indeholde stoffer, der kan forstyrre chloridmålingen og give misvisende resultater. Derfor skal man følge de prøvningsprocedurer, der er særligt udviklet til anvendelse på beton/mørtel/cementpasta. De væsentlige trin i chloridanalysen frem til - men eksklusive - selve chloridmålingen - gennemgås nedenfor, da de er essentielle for vurdering af gyldigheden af en rapporteret værdi af et chloridindhold.

Fastlæggelse af, hvordan en prøve bliver repræsentativ afhænger af formålet med målingen og den måde, hvorpå chlorid er tilført betonen. Der er normalt følgende tre situationer:

1. Hvis der er indblandet chlorid i betonen går målingen ud på at bestemme, om der er tilsat mere end tilladeligt, hvorfor man bør bestemme et gennemsnitligt chloridindhold.
2. Hvis chlorid er trængt ind i betonen, kan målingen dreje sig om at bestemme chloridindholdet i flere dybder under den eksponerede overflade for at fastlægge et såkaldt chloridprofil.

Chloridprofiler bør bestemmes med et tilstrækkeligt antal punkter, og således at hele profilet forløb fra koncentrationen ved den eksponerede overflade til den oprindelige koncentration i betonens indre bestemmes. Man skal være opmærksom på, at denne koncentrationsvariation kan forekomme på 20 mm eller på 20 cm afhængig af eksponeringsforhold og betonkvalitet. Uden kendskab til betonens kvalitet og eksponeringstid/-historik kan en orienterende måling være påkrævet, før man kan bestemme chloridprofilet med det antal punkter, der er optimalt i det enkelte tilfælde. Ved regulære chloridprofiler (se herom senere) er 8-10 punkter det optimale antal punkter.

3. Hvis mængden af chlorid skal bestemmes orienterende i forbindelse med en tilstandsundersøgelse, bør målingen udføres nær ved armeringen, således at der kan opnås en sammenhæng mellem målt chlorid og rust på armeringen. Desuden bør chloridindholdet bestemmes lige foran carbonatiseringsfronten, hvis denne ligger 1-2 cm inde i betonen og hvis armeringen ligger dybere end dette.

Herefter skal chlorid ekstraheres fra prøven således, at prøvens indhold af chlorid bogstaveligt talt flyttes over i en vandig opløsning. Hvis formålet med prøvningen er at bestemme prøvens totale, syreopløselige chloridindhold overhældes prøven først med lidt demineraliseret vand og derefter med salpetersyre, hvorefter prøven henstår, imens cementpastaen opløses af syren. Herefter fortyndes prøven yderligere.

Såfremt den videre analyse kræver, at prøven filtreres, skylles filtratet først med vand og derefter med fortyndet salpetersyre, så det er helt rensat for chlorid.

Når chlorid således er ekstraheret fra prøven, kan en række forskellige målemetoder (typisk titrering ved anvendelse af sølvnitrat) til bestemmelse af chloridindhold i en

væske i princippet anvendes. Når indholdet af chlorid i væsken er bestemt, står herefter alene tilbage at sætte dette chloridindhold i forhold til massen af prøven.

Kender man prøvens indhold af bindemiddel (cement og puzzolaner) i det pågældende måleområde, så kan man også udregne chloridindholdet i forhold til prøvens bindemiddelindhold – en værdi, der anses for mere oplysende end chloridindholdet i forhold til blot prøvemassen, hvor bindemiddelandelen er ukendt.

Da chlorid kun befinder sig i pastaen og ikke i tilslaget (der forudsættes at være tæt), kan man søge at korrigere for et forskelligt (højere) pastaindhold i overfladen i forhold til midten af betonen. Det kan fx gøres ved at måle indholdet af calcium i pulverprøven – hvis der ikke er kalksten i tilslaget.

DS/EN 14629 – Bestemmelse af chloridindhold i hærdnet beton, beskriver fremgangsmåden.

19.3.2.3 *Fri og bundet chlorid*

Chlorid forekommer på forskellig vis i beton. Noget er bundet og noget er frit. Der menes at være en form for ligevægt imellem bunden og fri chlorid. Chlorid menes at kunne være bundet til cementpastaen både kemisk og fysisk.

Der er forskellige opfattelser af betydningen af om chlorid er kemisk eller fysisk bundet i betonen for så vidt angår indvirkningen på evt. rustdannelse på armeringen. Fysisk bundet chlorid menes at kunne blive inddraget aktivt, når chlorid forårsager rustdannelse på stål i beton, jf. 0.

Betons totale chloridindhold, C_{total} er bestemt som angivet i formel (19.3-1).

$$(19.3-1) \quad C_{total} = C_{fri} + C_{bunden}$$

Tilsættes chlorid til beton, før cementens hærdning, influerer chlorid på cementens hærdning ved at accelerere hærdningen. Tilsat chlorid reagerer samtidig med en del af cementen under dennes reaktion med vand. Klinkermineralet C_3A kan, under sin (hurtige) reaktion med vand og ved tilstedeværelse af chlorid, danne Friedels salt ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$), der binder indblandet chlorid kemisk, og det således bundne chlorid menes ikke at kunne deltage i en korrosionsproces.

Trænger chlorid ind i beton, er det ikke videnskabeligt afklaret, om der dannes Friedels salt, idet C_3A reagerer meget hurtigt med vand og dermed ikke umiddelbart er til rådighed for den kemiske reaktion.

Den kemiske binding af chlorid i cementpastaen kan brydes, hvis betonen senere carbonatiserer – se mere herom nedenfor.

På hvilken form chlorid forekommer i beton kan kun studeres indirekte, men på principielt forskellig vis, som følger:

- Man kan lade chlorid trænge ind i prøver af beton/mørtel/cementpasta og så efter en passende lang tid under højt tryk presse porevæsken ud af prøverne. Herefter bestemmes chloridkoncentrationen i den udpressede væske og chloridindholdet i den resterende prøve. Antages det, at den udpressede væskes chloridindhold er lig med det frie chloridindhold, så er det målte resterende chlorid indhold i prøven det bundne, iht. formel (19.3-1)
- Man kan lade små stykker af beton/mørtel/cementpasta ligge i en opløsning kaldet en syntetisk porevæske, hvortil der er tilsat chlorid i en vis koncentration. Efter nogen tid vil væsken uden for de små prøvestykker komme i ligevægt med væsken inde i dem, hvorefter man kan bestemme chloridkoncentrationen i væsken. Desuden kan man bestemme prøvestykkernes porøsitet og derved udregne porevolumenets væske- og chloridindhold. Bestemmes samtidig prøvestykkernes totale chloridindhold kan det bundne chloridindhold i prøverne bestemmes ved subtraktion ud fra formel (19.3-1)
- Man kan "ekstrahere" chlorid fra chloridholdig beton i vand (i stedet for i syre) og derefter bestemme betonens vandopløselige chloridindhold. Herefter kan man tilsætte syre til resten, hvorved man bestemmer restens syreopløselige chloridindhold. Det bundne (dvs. det ikke-vandopløselige) chloridindhold bestemmes herefter igen iht. formel (19.3-1)

19.3.3 Transportprocesser for chlorid

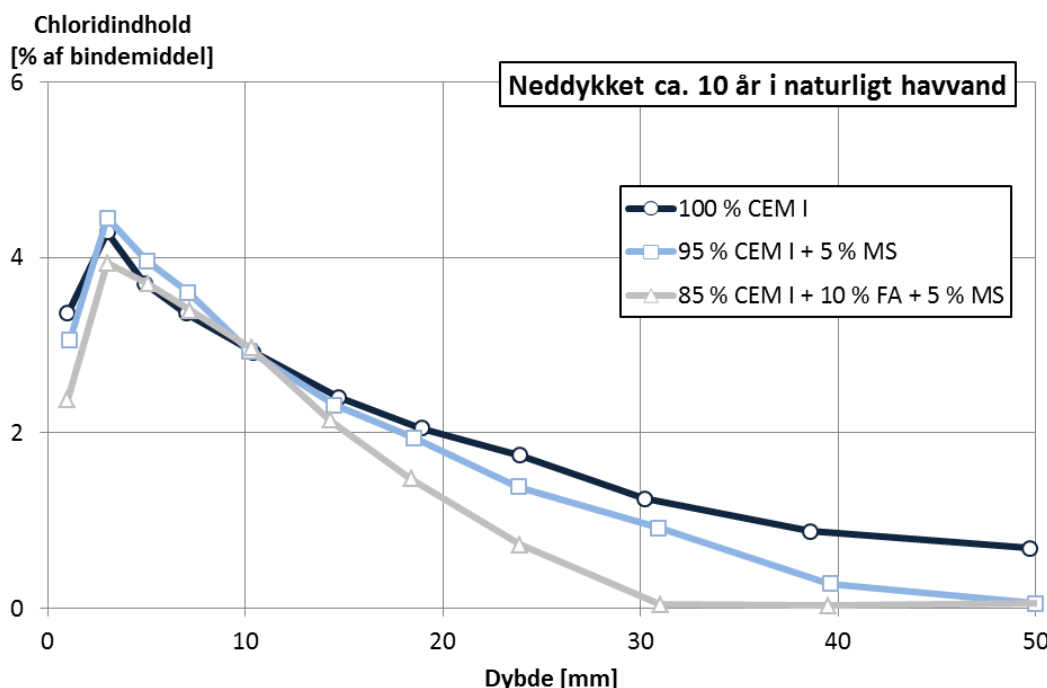
Ionen chlorid (Cl^-) måler ca. 19 Å (1,9 nm). En kapillarpore måler fra ca. 100 Å og op til makroskopisk størrelse, mens gelporerne typisk måler fra ca. 5 Å til 25 Å. Chlorid i beton kan kun transporteres i en vandig fase i beton og i praksis kun i kapillarporerne. Da beton indeholder vandige faser, selv når der er opnået ligevægt ved 50-60 % RF, kan chlorid således teoretisk set transporteres under næsten alle forhold.

Chlorid vil altid søge mod områder med en lavere koncentration (aktivitet), og derfor må man forvente, at hvis chlorid er til stede i forskellige koncentrationer i beton, så vil det også kunne transporteres. Transporthastigheden for chlorid i beton er naturligvis interessant, idet en passende lav transporthastighed vil sikre, at der går (passende) lang tid, før chlorid trænger igennem dæklaget og forårsager, at armeringen begynder at ruste.

19.3.3.1 Diffusion

Diffusion er transport af ioner, atomer og molekyler fra områder med høj koncentration til områder med lav koncentration. Transporten sker ved partiklernes tilfældige bevægelser og disse er større jo højere temperatur. Diffusion er hurtigst i gasser, langsomme i væsker og langsomst i faste stoffer.

I figur 3 er vist tre eksempler på chloridprofiler i beton, der har været neddykket i havvand i ca. 10 år. Der har ikke været nogen anden drivende kraft end koncentrationsforskellen imellem havvandets chloridindhold og chloridindholdet i betonens porevæske. Alligevel er chloridindholdet forhøjet i forhold til det indre af prøverne, hvilket således påviser, at der er trængt chlorid ind i betonen.



Figur 3. Chloridkoncentrationen som funktion af dybden i 100 mm tykke, laboratoriefremstillede betonemner eksponeret i havvand i ca. 10 år. Alle emner er støbt med et forhold mellem vand og bindemiddel på 0,35. CEM I udtrykker, at der er tale om en ren Portlandcement, MS er en forkortelse for mikrosilica, FA er en forkortelse for flyveaske. De enkelte delprøvers indhold af såvel chlorid som af bindemiddel er bestemt, hvorfor chloridindholdet er angivet som forholdet mellem disse. En monotont aftagende kurve med dybden var at forvente, og det her (og ofte) observerede "dyk" af profilerne når man kommer tæt på overfladen skyldes formentlig udludning eller anden omdannelse af det yderste af betonen. Der ses derfor som regel bort fra denne yderste afvigelse fra "den forventede profilform".

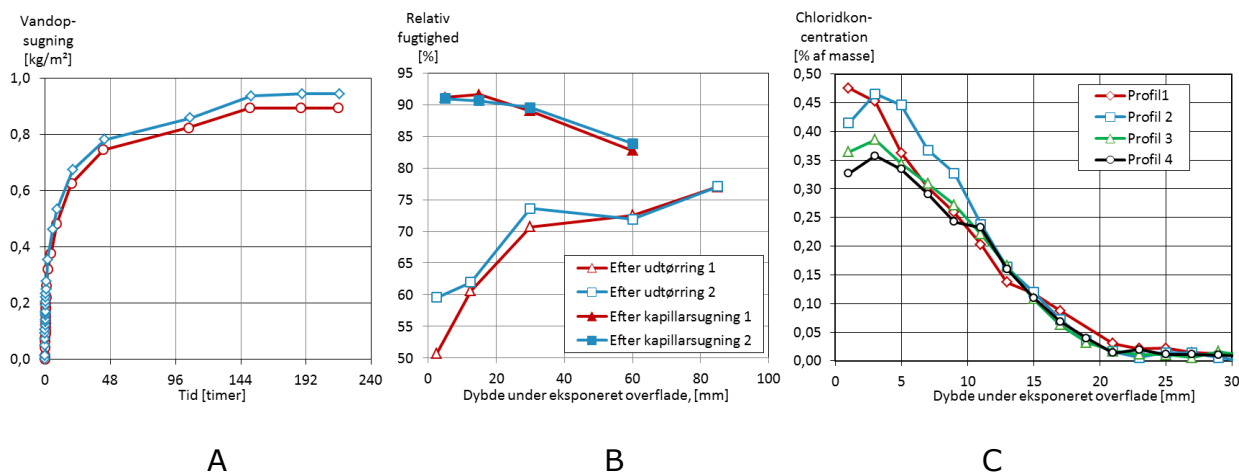
Det falder uden for denne publikations sigte at gå nærmere ind på, hvorvidt der er tale om diffusion i ren forstand, når chlorid under disse forhold trænger ind i beton, og når der samtidig foregår transport af en række ioner ud af og ind i betonen samt en form for samtidig, delvis binding af chlorid.

Ved påpasselighed med valg og tolkning af transportkoefficienten, begår man ikke fejl ved at betragte chloridindtrængning i vandmættet beton som ren diffusion.

19.3.3.2 Kapillarsugning

Når beton er udtørret, er en del af kapillarporerne tømte for vand. Hvis beton i denne tilstand kommer i kontakt med vand, vil det hurtigt suges ind i betonen. Man kan forestille sig, at dette vil føre til en betydelig chloridindtrængning, hvis det er saltvand, der opsuges i betonen.

Under praktiske forhold i naturligt miljø viser det sig imidlertid, at kapillarsugning er kritisk for beton af forholdsvis lav kvalitet samt i forbindelse med revner, mens beton af en kvalitet, der er egnet til eksponering i chloridholdige miljøer pga. sin langsomme og begrænsede fugtafgivelse, kun når at udtørre overfladisk imellem de periodiske opfugtninger (der også kan være med ferskvand).



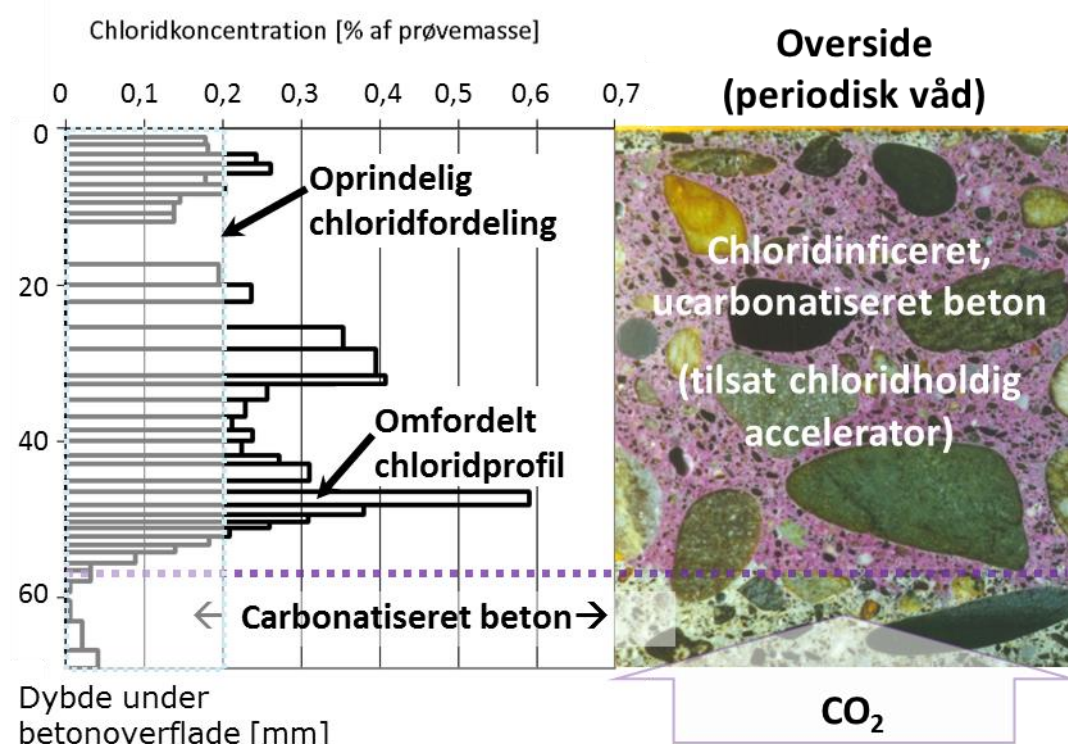
Figur 4. Laboratorieundersøgelse af udtørring og kapillarsugning af chloridholdigt vand i beton med v/c-forhold på 0,45 og CEM I. A: Vandoptagelsesforløbet (masseændring som funktion af tiden) under kapillarsugningen – den ikke-stationære karakter af opsugningen er markant, målt i de ens prøver (1 og 2). B: Fugtprofiler efter 60 dages udtørring (nederste kurver) og efter, at kapillarsugningen var standset (iht. A), målt i de ens prøver (1 og 2). C: Chloridprofiler målt i fire ens prøver (1, 2, 3 og 4) efter, at kapillarsugningen var standset (iht. A). Data fra [2].

Den ovenfor beskrevne kapillarsugning er ikke-stationær, dvs. den er stærkt tidsafhængig. Det er bemærkelsesværdigt, at chloridprofilerne vist på figur 4, C. har en kurveform, der svarer til kurveformen på chloridprofilerne vist i figur 3. Det betyder i praksis, at den naturligt begrænsede, ikke-stationære kapillarsugning **ikke** influerer mærkbart på chloridindtrængning ved diffusion, selvom processerne finder sted samtidigt og periodisk.

19.3.4 Kombinerede effekter

Under virkelige eksponeringsforhold kan der forekomme kombinerede effekter, der kan påvirke transport af chlorid, og så som har betydning for vurdering af målte chloridindhold.

Figur 5 viser et eksempel på, hvordan en oprindelig jævn fordeling af indblandet chlorid i et betontværsnit kan omfordeles som følge af betonens carbonatisering.



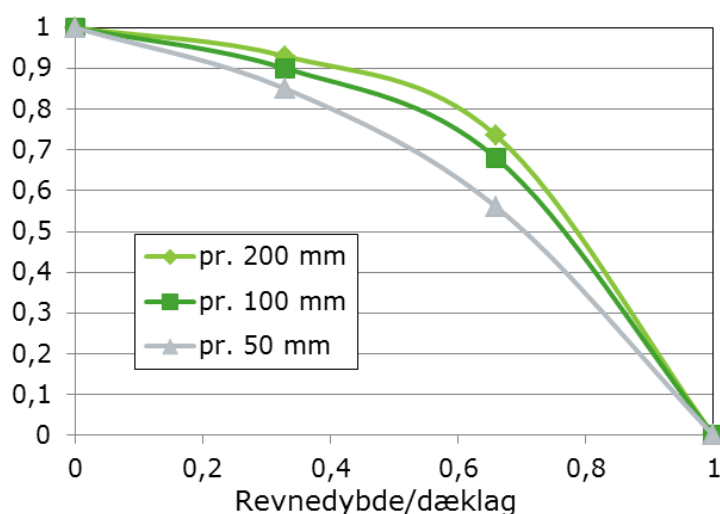
Figur 5. Eksempel på carbonatisering af chloridholdig beton. Betonen blev oprindeligt tilsat en accelerator svarende til 0,2 % af betonmassen for at fremme betonens tidlige styrkeudvikling. Dette var tilladt på daværende tidspunkt i det pågældende land – som ikke er Danmark. Konstruktionen opfugtes periodisk på oversiden. Undersiden opfugtes ikke, hvorfor carbonatiseringen forløber hurtigere nedefra end oppefra. Det oprindeligt jævnt fordelte chloridprofil blev forandret markant, hvilket ses at være sammenfaldende med carbonatiseringen nedefra, formentlig er chlorid bundet i cementen blevet frigivet ved cementpastaens omdannelse pga. carbonatiseringen (se yderligere forklaring af konsekvenserne heraf i tekstafsnittet nedenfor). Det aritmetiske gennemsnit af det målte chloridprofil er udregnet til 0,2 % af betonmassen.

Af det i figur 5 viste eksempel kan lære følgende:

- At man skal kende carbonatiseringsdybden af den beton man måler chloridindhold i, da man sjældent i normal praksis har økonomi til at bestemme chloridindholdet i 35 punkter på en 7 cm lang strækning.
- At man ved en dyb carbonatisering (enten på tidspunktet for prøvetagningen eller på et tidspunkt i fremtiden) i en beton med et ellers lavt chloridindhold, kan risikere, at der ved armeringen opbygges et chloridindhold, der overstiger det kritiske chloridindhold.

En anden type hyppigt forekommende kombineret effekt er et revnet dæklag, hvor betonen kan blive udsat for chlorideksponering. Det kan på grundlag af teoretiske overvejelser beregnes, at fine revner (op til 0,2 mm) der **ikke** gennembryder dæklaget svarer til en reduktion af dæklagstykkelsen.

Ækv. dæklag/dæklag



Figur 6. Den teoretiske betydning af revner, der ikke passerer igennem dæklaget som funktion af revnedybden og revnetætheden på overfladen. Figuren udtrykker hvilken betydning en given revneforekomst har på den ækvivalente dæklagstykkelse. Hvis fx revnerne har en afstand på 100 mm og når halvt ned i dæklaget er den ækvivalente dæklagstykkelse ca. 80% af det geometriske dæklag.

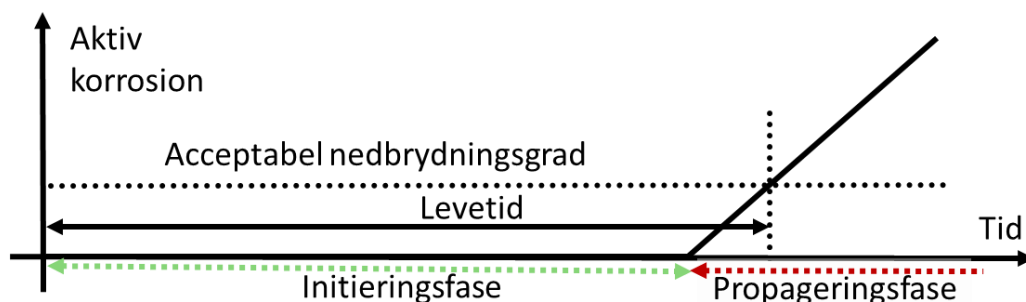
19.3.5 Forudsigelse af chlorids skadevirkning

19.3.5.1 Levetidsmodel

Det er væsentligt at fastlægge, hvad man forstår ved en betonkonstruktions levetid. I figur 7 er vist et principdiagram, der fastlægger den almindeligt anvendte terminologi og tidsfølge af de indgående faser i en konstruktions/konstruktionsdels levetid. Diagrammet i figur 7 viser tilstanden udtrykt ved om korrosion er "initieret" eller "ej initieret" som funktion af tiden.

Ved konstruktionens opførelse har den et lavt chloridindhold. I "initieringsfasen" trænger chlorid ind i konstruktionen, og på et tidspunkt (når initieringsfasen er slut) begynder armeringen at ruste. Når det sker (generelt for konstruktionen/konstruktionsdelen) er propageringsfasen begyndt. Herefter "nedbrydes" konstruktionen, fordi bæreevnen reduceres i takt med at armeringen rustet væk.

Hvis man ikke griber ind, bliver nedbrydningen på et tidspunkt så fremskreden, at konstruktionens/konstruktionsdelens levetid er opbrugt. Herefter forestår enten en nedrivning, en hovedreparation, en udskiftning eller en omdefinering af anvendelsen.



Figur 7. Principdiagram for definition af levetid for betonkonstruktioner i henseende til virkningen af chloridindtrængning (for andre nedbrydningsformer kan forløbet være anderledes).

Det er værd at bemærke forholdet mellem initieringstid og propageringstid i principdiagrammet i figur 7 kan være ganske anderledes end vist.

For at kunne forudsige levetiden af en betonkonstruktion udsat for chloridindtrængning kræves kendskab til eksponeringsmiljøet (der er en funktion af saltpåvirkningen (S), tiden (t), temperaturen (T), mv.) og til betonkonstruktionens evne til at modvirke chloridindtrængning (der er en funktion af konstruktionens udformning (G), betonens kvalitet (Q), dæklaget på armeringen (c), tiden (t), temperaturen (T), mv.).

Der er således tale om en klassisk ingeniørdisciplin, hvor man på den ene side har en påvirkning og på den anden side skal etablere en modstand med en vis sikkerhed, hvorfor sikkerheden udtrykt ved γ skal være større end 1. Problemet kan formuleres som vist formel (19.3-2), hvor:

$$(19.3-2) \quad \gamma \cdot E(S, t, T, \dots) \leq R(Q, c, t, T, \dots)$$

For at kunne løse problemet formuleret i formel (19.3-2) rationelt, kræves både forståelse for påvirkningens intensitet (venstresiden i formel (19.3-2)) og for hvordan en tilstrækkelig modstand opnås (højresiden i formel (19.3-2)). Introduktion til forståelsen for højresiden gives i næste afsnit.

19.3.6 Matematiske modeller for indtrængning

Udseendet af chloridprofiler har inspireret betonforskere til at benytte Ficks anden lov til at beskrive chloridindtrængning i beton. Denne forudsætning er meget vanskelig at tilbagevise. Ficks anden lov opstilles som vist i formel (19.3-3):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_0 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad x > 0, \quad t > t_{ex} \quad (\text{differentialligning})$$

$$(19.3-3) \quad C(x, t) = C_s \quad x = 0, \quad t \geq t_{ex} \quad (\text{randbetingelse})$$

$$C(x, t_{ex}) = C_i \quad x > 0, \quad t = t_{ex} \quad (\text{begyndelsesbetingelse})$$

I formel (19.3-3) er C koncentration, C_s er overfladekoncentrationen (s for "surface"), C_i er begyndelseskoncentrationen (i for "initial"), D_0 er en diffusionskoefficient, x er afstand fra overfladen, t er tiden og t_{ex} er tidspunktet for første eksponering.

Det er svært at opstille en generel løsning til Ficks anden lov. Formentlig derfor blev det oprindeligt valgt at anvende en af de simpleste løsninger. Løsningen benævnes ofte "fejlfunktionsløsningen", fordi Gauss' fejlfunktion, "erf" indgår i løsningsformlen. Det gælder, at $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$, hvor "erfc" benævnes "den komplementære fejlfunktion". Fejlfunktionsløsningen (med den komplementære fejlfunktion indsat) er givet i formel (19.3-4):

$$(19.3-4) \quad C(x,t) = C_i + (C_{sa} - C_i) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a \cdot (t - t_{ex})}} \right)$$

I formel (19.3-4) er C_{sa} den opnåede overfladekoncentration (a for "achieved") og D_a er den opnåede diffusionskoefficient, men de øvrige symboler er som anført under formel (19.3-3). Ved "opnået" skal altså her forstås betonens "svar" på den ydre påvirkning – en anden påvirkning, ville derfor give et andet "svar".

Løsningen gælder for diffusion af ioner ind i et halvuendeligt medium, når der er en **konstant** randbetingelse som funktion af tiden. Det er sidenhen vist, at løsningen kan modificeres til også gælde, hvis D_a er tidsafhængig, men den gælder altså ikke, hvis C_{sa} samtidig er tidsafhængig.

Formel (19.3-4) kan omskrives som følger:

$$(19.3-5) \quad x = 2 \cdot D_a \cdot \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C(x,t) - C_i}{C_{sa} - C_i} \right) \sqrt{(t - t_{ex})}$$

Og idet

$$(19.3-6) \quad K = 2 \cdot D_a \cdot \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C(x,t) - C_i}{C_{sa} - C_i} \right)$$

fås den endnu simplere form givet i formel (19.3-7), idet man samtidig ser, at $t \gg t_{ex}$, hvorfor $(t - t_{ex}) \cong t$

$$(19.3-7) \quad x = K \cdot \sqrt{t}$$

Formel (19.3-7) siger altså, at dybden af en given koncentration er ligefrem proportional med kvadratroden af tiden. Proportionalitetsfaktoren, K kan også benævnes "førsteårsindtrængningen", idet man for $t = 1$ år netop får, at $x = K$.

Formel (19.3-7) har den store fordel, at den er simpel. Formlen har vist sig at være lidt konservativ (fordi de indgående parametre i K (C_{sa} og D_a) viser sig både at være indbyrdes afhængige og tidsafhængige – se senere herom). Man kan derfor med den-

ne simple formel hurtigt danne sig et brugbart erfarings- og beslutningsgrundlag, hvilket er vist i eksempel 1, 2 og 3.

Eksempel 1. Chloridprofilen i en betonkonstruktion er fastlagt, hvor det omgivende miljø er formodet at være mest aggressivt. Det kan aflæses, at den koncentration som bygherren anser for at være kritisk for initiering af korrosion på armeringen, 0,15 % af betonmassen, har nået en dybde på 30 mm efter 20 års eksponering. Dæklaget på armeringen er specificeret til 50 mm. Bygherren ønsker et skøn for, hvornår han kan forvente, at den kritiske koncentration har nået armeringen i de mest udsatte områder af konstruktionen. Ved hjælp af kvadratrodsformlen kan den forventede tid, t til, at den kritiske koncentration har nået armeringen i konstruktionens mest udsatte områder beregnes:

$$30 = K\sqrt{20} \Leftrightarrow K = \frac{30}{\sqrt{20}} = 6,71 \frac{\text{mm}}{\sqrt{\text{år}}} \Rightarrow \left(\frac{50}{6,71}\right)^2 = t = 56 \text{ år}$$

Bygherren kan således forvente, at der går endnu $(56-20) = 36$ år, før armeringen i de mest udsatte områder begynder at korrodere.

Eksempel 2. Dæklaget på armeringen er specificeret til 40 mm, svarende til ekstra aggressiv miljøklasse og bygherren regner derfor med at opnå en levetid på 60 år. Pga. en udførelsesfejl viser målinger på den udførte konstruktion, at dæklaget kun er 30 mm. Ved hjælp af kvadratrodsformlen kan man nu anslå, at den forventede levetid (t) er reduceret til

$$40 = K\sqrt{60} \Leftrightarrow K = \frac{40}{\sqrt{60}} = 5,16 \frac{\text{mm}}{\sqrt{\text{år}}} \Rightarrow \left(\frac{30}{5,16}\right)^2 = t = 34 \text{ år}$$

Bygherren bør derfor kræve kompensation for eller afhjælpning af den opståede mangel.

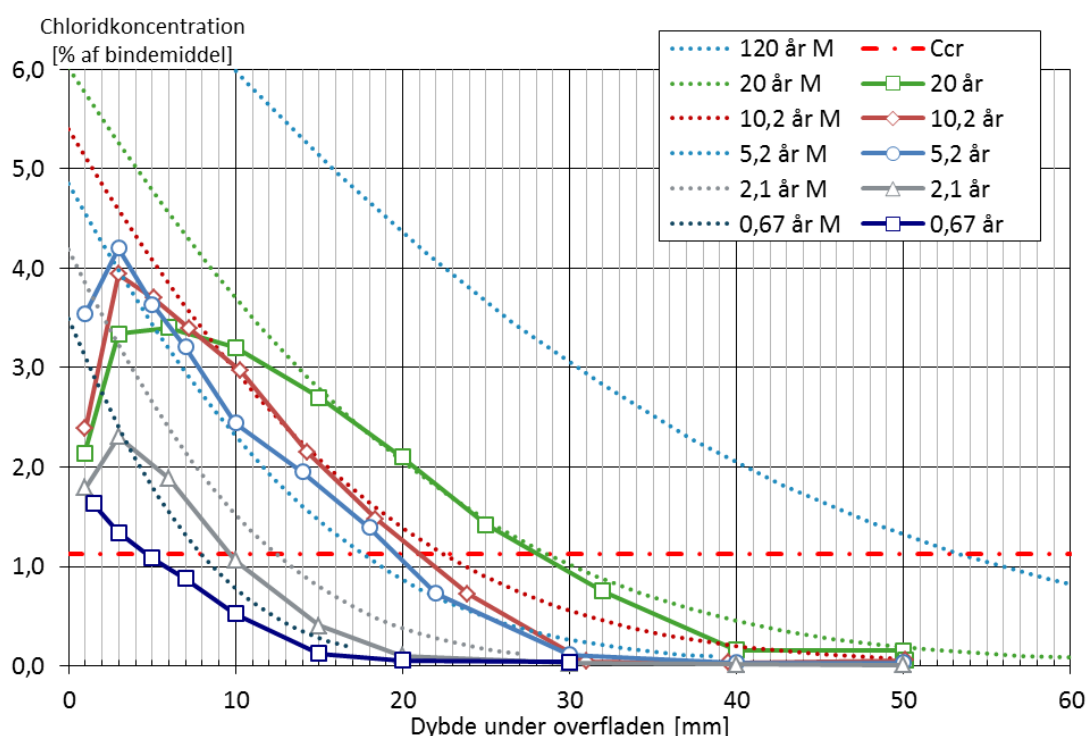
Eksempel 3. Dæklaget på armeringen er specificeret til 40 mm, svarende til ekstra aggressiv miljøklasse og bygherren regner derfor med at opnå en levetid på 60 år, men pga. politiske ønsker om mere bæredygtighed for nye konstruktioner, ønsker bygherren nu i stedet en forventet levetid på 120 år. Ved hjælp af kvadratrodsformlen kan man nu anslå, at det foreskrevne dæklag (c) skal forøges til

$$40 = K\sqrt{60} \Leftrightarrow K = \frac{40}{\sqrt{60}} = 5,16 \frac{\text{mm}}{\sqrt{\text{år}}} \Rightarrow c = 5,16 \cdot \sqrt{120} = 56,5 \cong 60 \text{ mm}$$

Bygherren kan således forvente mere end en dobbelt så lang levetid ved at forøge armeringens dæklag fra 40 mm til 60 mm.

Mere sofistikerede modeller for chloridindtrængning i beton udvikles på grundlag af indsamlede data fra eksponering under kendte betingelser og fra naturlig eksponering. I figur 8 er vist et eksempel med én betontype, der har været eksponeret i 20 år neddykket i havvand. Man kan ud fra de målte chloridprofiler foretage en kurvetilpasning og derved bestemme parametrene C_{sa} og D_a i formel (19.3-4).

Man gør dette for at kunne beregne chloridprofilen til et andet givent tidspunkt i forsøget på at modellere, hvordan chloridindtrængningen vil forløbe i en betonkonstruktions levetid.

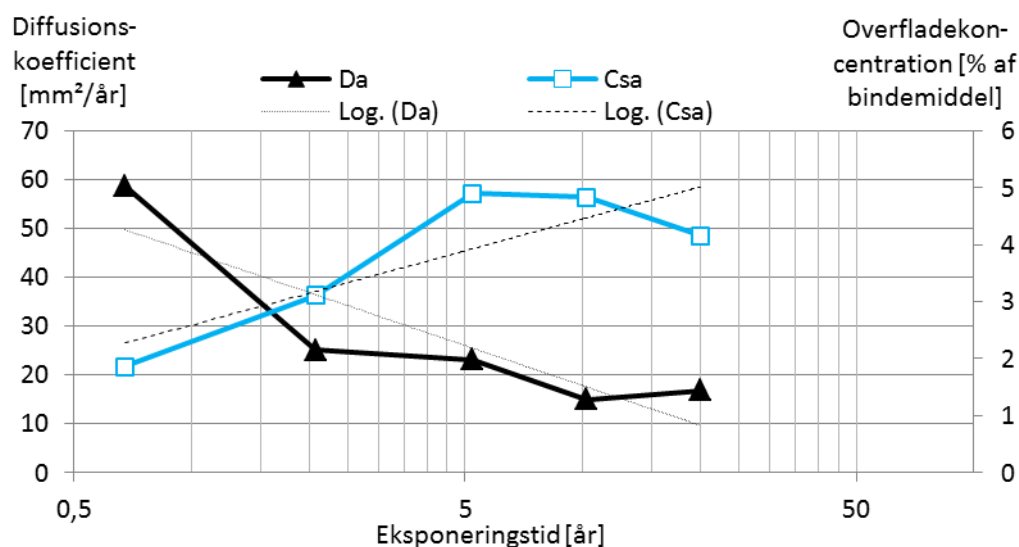


Figur 8. Udviklingen af chloridprofiler (fuldt optrukne kurver med punktmærker) som funktion af tiden op til 20 års eksponering. Betonen er karakteriseret ved en bindemiddelsammensætning på 85 % CEM I, 10 % flyveaske, 5 % mikrosilica og et forhold mellem vand og bindemiddel på 0,35. Hvis man ser bort fra chloridprofilernes yderste punkter (der er i en med tiden stigende grad er påvirket af udludning/omdannelse) og ekstrapolerer chloridprofilerne ud til overfladen, så ses det, at det, der tilnærmelsesvis er parameteren C_{sa} (i formel (19.3-4)), vokser som funktion af tiden, hvilket formel (19.3-4) ikke kan beregne korrekt.

På figuren er foruden de målte chloridprofiler også indtegnet (med punkterede kurver) chloridprofiler, der er beregnet med en mere sofistikeret model (end formel 19.3-4), hvis parametre og koefficienter er fastlagt ud fra de målte profiler op til 10,2 års eksponering. Det målte og det modellerede profil for 20 års eksponering ligger tæt på hinanden, når man ser bort fra den yderste del af profilet. Data fra [3].

Skematisk opstilling af, hvordan chloridindtrængningsparametrene D_a og C_{sa} fastlægges ud fra et målt chloridprofil. **Beregningsen kan udføres i regnearksprogrammer som Excel ved brug af den indbyggede optimeringsrutine (betegnes i Excel "Problemløser" eller "Solver").** Man beregner chloridprofilen vha. formel (19.3-4) og de skønnede værdier for D_a og C_{sa} (de øverste gule felter). Herefter minimerer man (ved hjælp af optimeringsrutinen) summen af afvigelses kvadrat, idet man sikrer sig at D_a og C_{sa} ikke antager værdier under 0,1 (med de her anvendte enheder). I de to kolonner til venstre er vist det målte chloridprofil (sammenhørende værdier af dybde, chloridkoncentration og eksponeringstid). Det er praktisk at kunne vægte måleresultaterne, da man ofte ikke tillægger det/de yderste målepunkter i profilerne nogen vægt ved beregning af chloridindtrængningsparametrene. I dette tilfælde er yderste punkt udeladt af beregningen ved at give det vægten 0. De grønne felter i øverste højre hjørne er beregningsresultatet.

C_i [% af binde- middel] =	0,03		Skønnet ud- gangsværdi for D_a [mm ² /år] =	10,0		Beregnet slutværdi for D_a [mm ² /år] =	23,2
t [år] =	5,23		Skønnet ud- gangsværdi for C_{sa} [% af bindemiddel]=	5,00		Beregnet slutværdi for C_{sa} [% af bindemid- del]=	4,91
Dybde, x [mm]	Målt chloridkon- centration, C_x [% af binde- middel]	Vægt- ning, v	Beregnet chlo- ridkoncentra- tion, C_b iht. formel (19.3.4) med skønnede værdier for D_a og C_{sa} [% af binde- middel]	Kvadratet på afvi- gelsen gange vægtning $v \cdot (C_b - C_x)^2$		Beregnet chloridkon- centration, C_b iht. formel (19.3.4) med slutværdier for D_a og C_{sa} [% af binde- middel]	Kvadratet på afvi- gelsen gange vægtning $v \cdot (C_b - C_x)^2$
1	3,547	0	4,613	0,000		4,647	0,000
3	4,202	1	3,853	0,122		4,155	0,002
5	3,636	1	3,135	0,251		3,675	0,002
7	3,206	1	2,483	0,523		3,215	0,000
10	2,444	1	1,661	0,614		2,573	0,015
14	1,954	1	0,880	1,154		1,832	0,016
18	1,389	1	0,419	0,940		1,239	0,023
22	0,730	1	0,186	0,296		0,796	0,005
30	0,110	1	0,047	0,004		0,278	0,033
40	0,031	1	0,030	0,000		0,054	0,002
50	0,030	1	0,030	0,000		0,007	0,000
				Sum	3,903	Sum	0,099
				Før optimering		Efter optimering	



Figur 9. Optegning af den tidsmæssige udvikling for parametrene D_a og C_{sa} , når de fastlægges som vist ved metodikken gennemgået ovenfor. Datagrundlaget er chloridprofilerne vist i figur 7. Tendensen, der ses, er, at ingen af de to parametre ser ud til at være konstante som funktion af tiden. D_a aftager, mens C_{sa} har et overvejende stigende forløb som funktion af tiden. Det skal bemærkes, at fastlæggelse af C_{sa} godt kan ske for en hver given eksponeringsvarighed ud fra formel (19.3-4), men at hver beregnet værdi af C_{sa} , kun gælder for den aktuelle eksponeringsvarighed.

19.3.7 Binding

Som tidligere gennemgået kan binding af chlorid kun studeres indirekte og der blev omtalt tre måder til at udføre sådanne studier. En fjerde, men betydeligt langsommere og dyrere mulighed er at studere, hvordan chloridprofiler målt i den samme beton og eksponeret for det samme miljø udvikler sig som funktion af tiden. Ved at ekstrapolere chloridprofilet fra det indre af betonen og ud til overfladen kan den tidsmæssige udvikling for parameteren C_{sa} i formel (19.3-4) studeres, se fx figur 8 for dette.

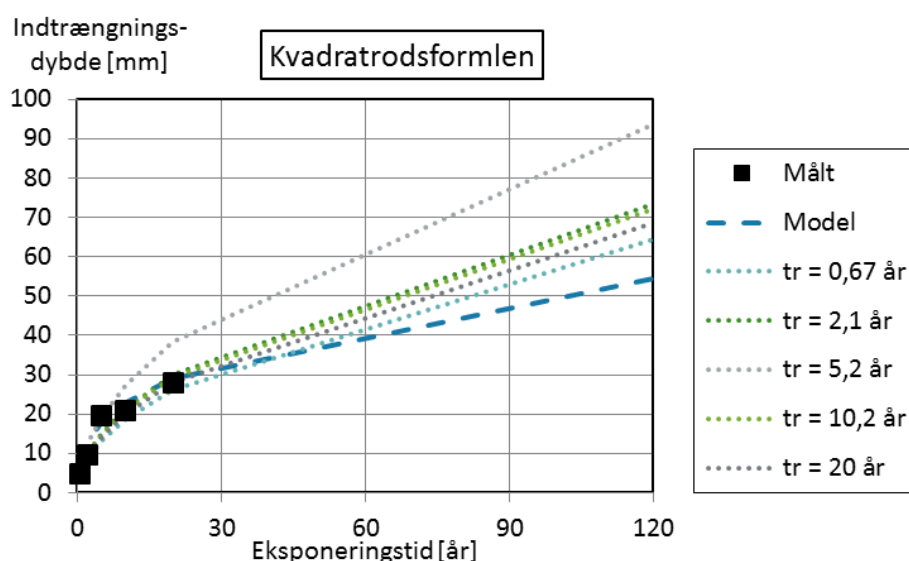
Det kan vises beregningsmæssigt, at binding af chlorid influerer på transporten af chlorid ind i betonen set over længere tid. Den umiddelbare observation er imidlertid, at når der samtidig med chloridindtrængning foregår udludning, så vil de to effekter (binding og udludning) modvirke hinanden, og chloridindtrængningen vil derfor på kort sigt opleves som værende uforstyrret. Imidlertid kan det med en avanceret beregningsmodel, der tager hensyn til samtidig binding og udludning, vises, at denne kombinerede virkning giver anledning til at både randbetingelsen og diffusionskoefficienten varierer med tiden.

Dette svarer til hvad der kan observeres under naturlig eksponering af beton neddykket i havvand, se figur 8 og figur 9 herom.

Det kan derfor nu konkluderes, at man må forvente, at to af de mest betydende parametre i formlen for chloridprofilet i beton (formel (19.3-4)) er tidsafhængige, hvilket betyder, at den almindeligt anvendte løsning (formel (19.3-4)) til Ficks anden lov

(formel (19.3-3)) ikke formelt kan beskrive chloridindtrængning i beton matematisk korrekt.

Ved introduktion af kvadratrodsformlen (19.3-7), blev også parameteren, K ("førsteårsindtrængningen") introduceret. I førsteårsindtrængningen integreres de styrende parametre C_{sa} og D_a , der har modsatrettede tendenser (se fx figur 8) således, at man eliminerer betydningen af disses tidsmæssige variationer. Det kan vise sig at være en fordel, selvom metoden endnu må anses for at være usikker. Som eksempel på, at kvadratrodsformlen (19.3-7) kan give ganske lovende resultater er vist i figur 10.



Figur 10. Figuren viser indtrængningsdybden for en given koncentration (her en skønnet værdi for det kritiske chloridindhold) som funktion af tiden. "tr" i forklaringen til højre angiver tiden for det målte chloridprofil, der ligger til grund for hver af de beregnede kurver. Beregningsprincippet er som vist i Eksempel 1. Ud fra et målt chloridprofil kan man aflæse, hvor dybt en valgt koncentration er trængt ind. Ud fra dette kan man – som det er vist i Eksempel 1 – beregne/skønne indtrængningen af denne koncentration til en vilkårlig anden tid ved hjælp af kvadratrodsformlen (19.3-7). Dette er gjort for det datasæt, der ligger til grund for figur 8. Det ses af graferne, at afvigelserne imellem de med kvadratrodsformlen forudsagte indtrængningsdybder og det forløb, der er forudsagt med "Model" ikke afviger markant, men at kvadratrodsformlen i alle tilfælde er mere konservativ end "Model".

19.3.8 Tærskelværdi

Af figur 7 fremgår det, at der sker et betydningsfuldt skifte, når initieringstiden ophører og progageringstiden begynder. Dette (fiktive) tidspunkt indtræder, når der ved armeringen er opbygget en så stor koncentration af chlorid, at korrosion på armeringen begynder. Denne chloridkoncentration benævnes "tærskelværdien for chloridinitieret korrosion" og findes ofte med forkortelsen C_{cr} .

Tærskelværdien defineres traditionelt på lidt forskellig måde, hvilket i nogen grad kan vanskeliggøre erfaringsudveksling. Tærskelværdien kan således være en af følgende, nævnt efter stigende chloridkoncentration ved armeringen:

- Den koncentration ved armeringen, hvor den første rustplet kan ses med det blotte øje, hvis man fjerner betondæklaget.
- Den koncentration ved armeringen ved hvilken armeringen i korrosionsmæssig henseende overgår fra passivitet til at være aktivt og stabilt korroderende.
- Den koncentration der måles ved armeringen, når den første dæklagsafskalning observeres.

Alene den koncentrationsforskel, der er mellem ovenstående definitioner betyder, at det at fastlægge tærskelværdier på grundlag af indhøstede erfaringer er en næsten umulig opgave.

Siden artiklen, [1] udkom, har der ikke været uenighed om, at en tærskelværdi (dvs. en chloridkoncentration) bør måles som det syreopløselige chloridindhold og anføres i forhold til det målte eller beregnede bindemiddelindhold det pågældende sted i prøven.

Selvom det i princippet er meningsløst, at forudsige chloridindtrængning i betonkonstruktioner uden at kende tærskelværdien, så findes der fortsat hverken konsensus om definition af tærskelværdier eller nogen standardiseret metode til at fastlægge tærskelværdier fx ved laboratorieforsøg.

Der er til trods for disse mangler rapporteret mange forskellige tærskelværdier i faglitteraturen. Den umulige opgave for den almindelige læser af faglitteraturen er således at vælge de rette og mest troværdige værdier. Et sådant arbejde er udført og det gav de i tabel 2 anførte værdier for forskellige eksponeringsforhold og forskellige bindemiddelsammensætninger, iht. [4].

Med tabel 2 som grundlag kan man opstille følgende formel til beregning af et estimat for C_{cr} :

$$(19.3-8) \quad C_{cr} = k_{cr,env} \cdot \exp\left(-1.8 \cdot \frac{a_{kv}}{C_{cr}}\right) \quad [\% \text{ af bindemiddelmassen}]$$

Konstanterne i formel (19.3-8) præsenteres nedenfor i tabel 3 til tabel 5.

Eksempel 4. Det kritiske chloridindhold for betonen i figur 7 i neddykket tilstand i havmiljø ønskes beregnet. Der er tale om et bindemiddel bestående af 85 % CEM I, 10 % flyveaske og 5 % mikrosilica og et forhold mellem vand og bindemiddel på 0,35. Til formålet benyttes formel (19.3-8):

$$C_{cr} = k_{cr,env} \cdot \exp\left(-1.8 \cdot \frac{a_{kv}}{C_{cr}}\right) \Rightarrow C_{cr} = 3,7 \cdot \exp\left(-1.8 \cdot \left(\frac{35}{85 - 1,2 \cdot 10 - 4,2 \cdot 5}\right)\right) = 1,1$$

Denne værdi kan sammenlignes med de tabellagte værdier i tabel 2. Det er vigtigt at erkende, at med det nuværende videnskabelige grundlag er fastlæggelse af tærskelværdier ikke nogen eksakt videnskab.

C _{cr} % Cl af bindemiddelmasse				
Bindemiddel- sammensætning				Atmosfærisk zone (marint miljø/ tøsaltmiljø)
	Neddykket zone	Plaskezone	Tøsaltpåvirket zone	
w/b 0,50				
100 % CEM I	1.5 %	0.6 %	0.4 %	0.6 %
5 % SF	1.0 %	0.4 %	0.3 %	0.4 %
10 % SF	0.6 %	0.2 %	0.2 %	0.2 %
20 % FA	0.7 %	0.3 %	0.2 %	0.3 %
w/b 0,40				
100 % CEM I	2.0 %	0.8 %	0.6 %	0.8 %
5 % SF	1.5 %	0.5 %	0.4 %	0.5 %
10 % SF	1.0 %	0.3 %	0.2 %	0.3 %
20 % FA	1.2 %	0.4 %	0.3 %	0.4 %
w/b 0,30				
100% CEM I	2.2 %	1.0 %	0.8 %	1.0 %
5% SF	1.6 %	0.6 %	0.5 %	0.6 %
10% SF	1.2 %	0.4 %	0.3 %	0.4 %
20 % FA	1.4 %	0.5 %	0.4 %	0.5 %

Tabel 2. Tabellen viser en oversigt foreslåede tærskelværdier som funktion af eksponeringsforhold og bindemiddeltype. Tabellen stammer fra [4].

Miljø: Uoverdækkede arealer	Overdækkede arealer	Med 5-10 m afstand til veje eller stier
k _{cr,env} 1	1,4	1,4

Tabel 3. Konstanten k_{cr,env}, der indgår i formel (19.3.1) til brug på tøsaltpåvirkede betonkonstruktioner.

Miljø: Neddykket zone	Plaskezone	Marin atmosfære
k _{cr,env} 3,7	1,4	1,4

Tabel 4. Konstanten k_{cr,env}, der indgår i formel (19.3.1) til brug på havvandspåvirkede betonkonstruktioner.

Aktivitetsfaktor	Mikrosilica	Flyveaske
K	-4.2	-1.2

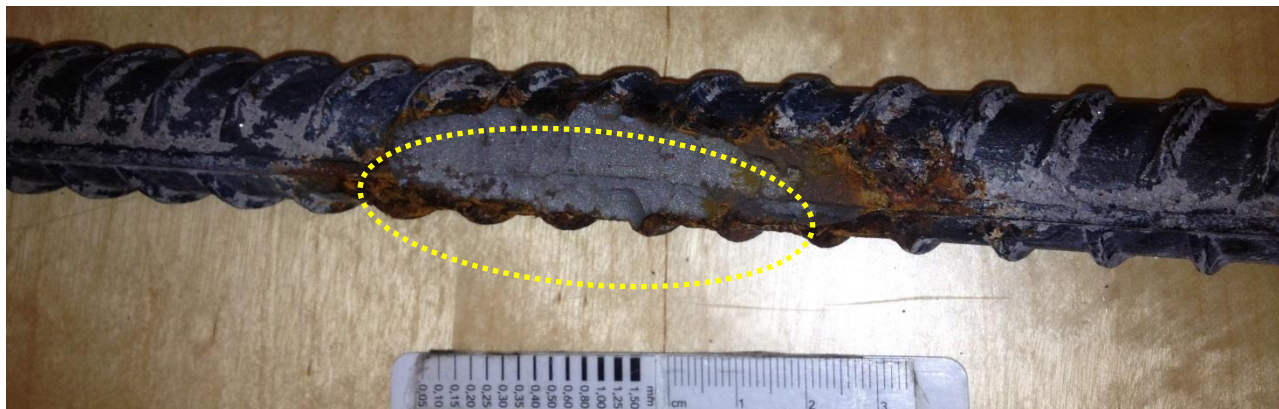
Tabel 5. Aktivitetsfaktorer for mikrosilica og flyveaske til brug ved beregning af det ækvivalente v/c-forhold, der indgår i formel (19.3-8).

19.3.9 Chloridinitieret korrosion

Når stål begynder at ruste som følge af chlorids tilstedeværelse i beton, er processen kendetegnet ved ofte at være meget lokal. Korrosionsangrebet starter et sted, hvor

betonen eller armeringen har en form for defekt eller evt. blot en relativ defekt set forhold til de omgivende arealer.

Chloridinitieret korrosion starter som en grubetæring (ofte benævnt med det engelske ord "pitting"), og vil kunne fortsætte længe som et lokalt angreb. Se figur 11. Men som det også fremgik allerede af figur 2, kan korrosion, der er forårsaget af chlorid-indtrængning, også føre til store dæklagsafskalninger. Dæklagsafskalninger sker, når korrosionsprocessen forløber i et miljø, hvor der er rigelig adgang for luftens ilt.



Figur 11. Billedet viser et korrosionsangreb, der er forløbet på en ribbet armeringsstang, der har været indstøbt i en betonprøve, der i 20 år har været eksponeret i havvand. Korrosionsangrebet ses kun at ske inden for det ca. 60 mm lange markerede område. Uden for dette område er armeringsstangen fuldstændig intakt, selvom chloridindholdet også hér har været over "tærskelværdien".

Korrosionsprodukter, der tilføres ilt, kan fylde op til syv gange så meget som jernet gjorde. Derfor sprænges betondæklaget på armeringen af, hvis armeringskorrosionen forløber i et relativt tørt og dermed iltrigt miljø. Hvis man fjerner betondæklaget på korrosionsangrebet armering, der normalt befinder sig i et vådt miljø, kan man opleve (kortvarigt) at se sorte eller grønne korrosionsprodukter, hvilket skyldes det lave ilt-indhold. Når luftens ilt kommer i kontakt med korrosionsprodukterne skifter de hurtigt farve og blive rødbrune.

De sorte korrosionsprodukter er nærmest flydende (som skosvætte) og kan trænge ud i grove porer i betonen, hvorfor et chloridinitieret korrosionsangreb kan være helt usynligt på betonoverfladen. Det skal man især være opmærksom på ved tilstandsun- dersøgelse af chloridpåvirkede konstruktioner i vandgangssnittet eller derunder, da chlorid – som nævnt i indledningen til kapitlet – ej heller giver synlige skader på betonen. Man kan således ikke være sikker på, at chloridinitieret korrosion **ikke** finder sted, før end man har udført en repræsentativ bestemmelse af betonens chloridindhold.

19.3.10 Forebyggelse af chlorids skadevirkning

Chlorids skadevirkning i beton modvirkes som allerede nævnt i indledningen til kapitlet ved at undgå for høj en koncentration af chlorid i den friske beton, ved at foreskri-

ve og anvende en passende tæt beton og et passende tykt – og urevnet – dæklag uden på armeringen.

19.3.10.1 Miljøklasse

Betonkonstruktioner, der kan udsættes for påvirkning af chlorid fra omgivelserne, skal henregnes til aggressiv eller ekstra aggressiv miljøklasse iht. DS/EN 206 og DS 2426.

19.3.10.2 Krav til delmaterialer

Krav til tilslag i miljøklasserne "aggressiv" eller "ekstra aggressiv" sikrer, at sand og sten til beton i Danmark er af høj kvalitet. Man skal dog være opmærksom på, at chlorid kan transporteres igennem porøse eller revnede sten. Derfor kan man risikere at miste noget af den tæthed som man har opnået (og betalt for) ved valg af bindemiddelkvalitet i betonen, hvis stenfraktionen indeholder porøse og/eller revnede korn.

Visse cementtyper (blandingstyper) tillades i DK **ikke** anvendt i aggressiv eller ekstra aggressiv miljøklasse. Det skyldes usikkerhed om langtidsvirkningen af disse blandingscementer.

19.3.10.3 Forholdsregler ved projektering

Ved projektering af konstruktioner, der skal eksponeres i chloridholdige miljøer, skal man være særligt opmærksom på, at den gængse projekteringsregel "vis vand væk, for vand volder vanskeligheder" også gælder for saltvand.

Desuden skal man foreskrive afstandsholdere se (13.1), der er egnet til at give et så godt som ubrudt dæklag ind til armeringen. Ellers kan chlorid trænge ind gennem selve afstandsklodsens, eller i støbeskellet mellem afstandsklods og betonen.

Støbeskel skal planlægges og skal udføres ru og eventuelt med supplerende forholdsregler – fx fugebånd eller efterinjicerbare fugeslanger – for at opnå tæthed.

19.3.11 Dæklag

Beskyttelse mod skadevirkningerne fra chlorid fordrer ofte forholdsvis store dæklag (og en beton med stor chloridindtrængningsmodstand). I aggressiv og ekstra aggressiv miljøklasse foreskrives normalt ved et levetidskrav på 50 år hhv. minimum 30 mm og minimum 40 mm dæklag plus tolerancetillæg.

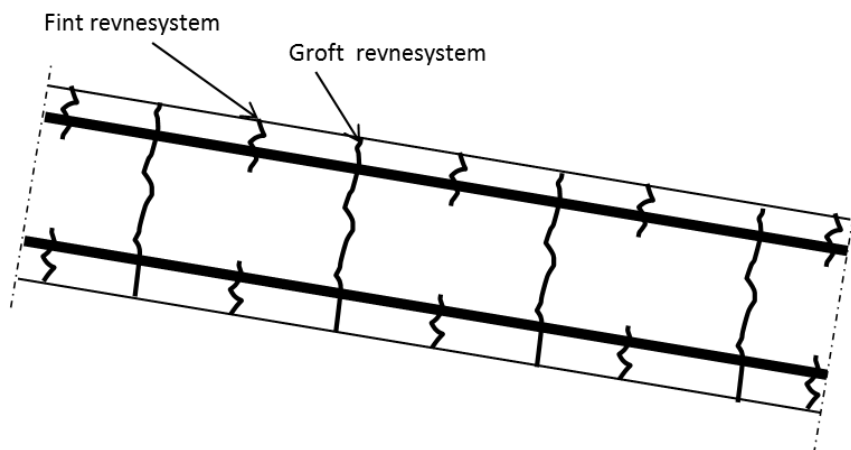
I særligt hårdt påvirkede områder (fx lige omkring vandgangssnittet på brosjøler i havvand) skal dæklagets tykkelse øges, såfremt levetiden skal øges til de 100-120 år, der kræves fx til broer.

Alternativt kan det overvejes at anvende endnu lavere vand/cement forhold end 0,40 eller anvende rustfast armering (af egnet rustfrit stål).

19.3.12 Revnestyring

Revnedannelse skal begrænses, så revnerne ikke forringer konstruktionens virkemåde og holdbarhed eller fører til et uacceptabelt udseende. En armeringsstang kan styre vidden af revner på snitflader, der ligger op til syv gange armeringsdiameteren væk.

Styring af det (fine) revnesystem, der ikke er gennemgående i konstruktionen, fordrer derfor en vis minimumsdiameter for armeringen til konstruktioner i disse miljøer. Ydermere skal den maksimale revnevidde begrænses til fx hhv. 0,2 mm og 0,3 mm for ekstra aggressiv og aggressiv miljøklasse og mindre revnevidder for forspændt armering.



Figur 12. I forbindelse med beregning af armering til revnestyring opdeles revnerne i to revnesystemer: De fine og de grove som illustreret på figuren. "Fint" og "groft" har ikke noget med revnevidden at gøre, men refererer til om revnerne går igennem konstruktionsdelen eller ej. Desuden er det kendetegnende for forskellen på de to revnesystemer, at det fine revnesystem ofte opstår tidligt, indenfor 2 måneder efter støbningen, mens det grove revnesystem kan dannes op til flere år efter støbningen.

Det kræver således armering af en vis størrelse, når man skal armere for at begrænse revnevidden af de fine revner i aggressiv og ekstra aggressiv miljøklasse.

Den nødvendige armeringsgrad, ρ for at styre revnevidden i konstruktioner udsat for rent træk beregnes af formel 19.3-9 i 1992-1-1 DK NA:2013, pkt. 7.3.2.(1)P.

$$(19.3-9) \quad \rho = \sqrt{\frac{\phi f_{ct,eff}}{4E_{sk}kw_k}}$$

hvor

ϕ er armeringsdiametere[n] [mm].

$f_{ct,ef}$ er den effektive trækstyrke af betonen ($0,5 f_{ctk}$, eller hvor f_{ck} er betonens karakteristiske trykstyrke) [MPa]

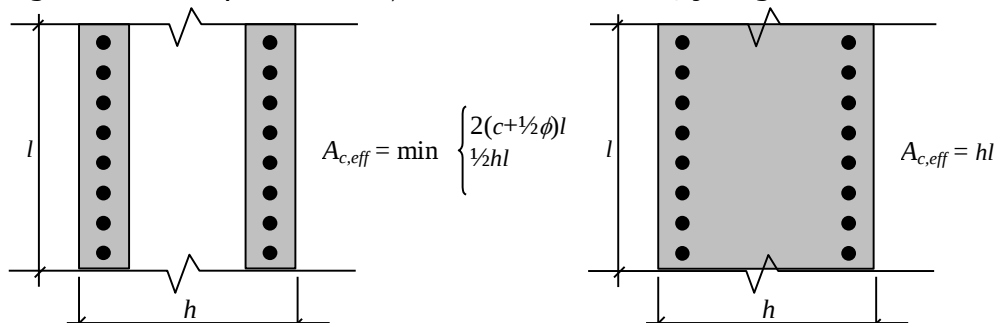
E_{sk} er ståls elasticitetsmodul [MPa].

k gælder ved $k = 1$ for det fine revnesystem og ved $k = 2$ for det grove.

w_k er den højest tilladte revnevidde [mm].

Formel (19.3-9) gælder for ribbestål med en forankringsfaktor på $\zeta > 0,6$. Formel (19.3-9) bruges, hvor konstruktionsdelens svind er hindret, hvor én af dimensionerne er over ca. 6 m (for en fri konstruktion), hvor der ikke er dilatationsfuger eller hvor efterfølgende reparation af store spredte revner er uacceptabelt. Formlen egner sig ikke til anvendelse på konstruktioner udsat for en plan spændingstilstand.

Størrelsen af det effektive trækareal $A_{c,eff}$ i betonen afhænger af hvilket revnesystem, der betragtes. For det fine revnesystem i tværsnit udsat for rent træk er $A_{c,eff}$ lig med summen af det største betonareal, hvis tyngdepunkt falder sammen med armeringens. For det grove revnesystem er $A_{c,eff}$ hele trækarealet, jf. figur 13.



Figur 13. Tv.: Trækareal ved fine revnesystemer, c er betondæklaget. Th.: Trækareal ved grove revnesystemer.

19.3.13 Referencer

- [1] **Glass, G. K., Buenfeld, N. R.:** "The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete", Corrosion Science, Vol. 39, No. 5, 1001-1013, 1997.
- [2] **Nygaard, P. V., Geiker, M. R.:** "A method for measuring the chloride threshold level required to initiate reinforcement corrosion in concrete", Materials and Structures 38, pp. 489-494 Available online at www.rilem.net, 2005.
- [3] **L. Tang:** "Chloride Ingress in Concrete Exposed to Marine Environment Field Data Up to 10 Years' Exposure", SP Report 2003:16, SP Swedish National Testing and Research Institute, Borås, Sweden, 2003.
- [4] **Frederiksen, J. M., Nilsson, L.-O., Poulsen, E.; Sandberg, P.; Tang L. & Andersen, A.:** "HETEK, A system for estimation of chloride ingress into concrete, Theoretical background." The Danish Road Directorate, Report No. 83, 1997.