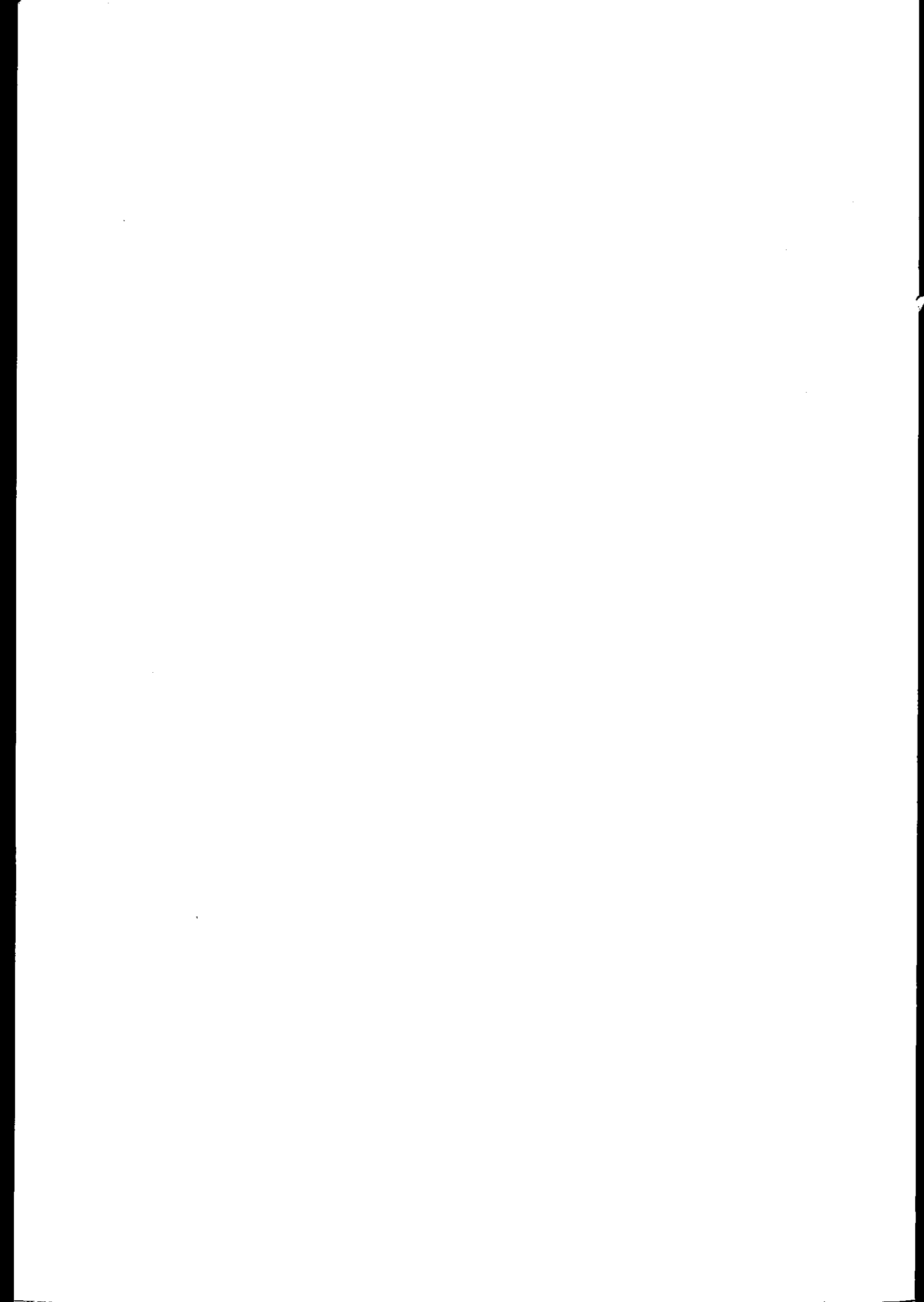




ARMERINGSKORROSION I CHLORIDPÅVIRKET BETON



© 1995 Dansk Betonforening

Dansk Betonforening
c/o Ingeniørforeningen i Danmark
Vester Farimagsgade 29
DK-1780 København V

Tlf 33 15 65 65
Fax 33 15 37 07

Tryk: Paritas Grafik A/S

Forord

Dansk Betonforening nedsatte i 1993:

Arbejdsgruppe vedrørende armeringskorrosion i chloridpåvirket beton.

Arbejdsgruppen fik følgende sammensætning:

Birgit Sørensen (formand)
Knud E. Brodersen
Knud V. Christensen
Jens M. Frederiksen
Svend Åge Hansen
Ghitha N. van Hauen (indtil 1993-10-01)
Carsten F. Henriksen/Niels Thaulow
Oskar Klinghoffer
Erik Stoltzner (fra 1993-10-01)
Torsten S. Thorsen
Morten Hjørsløv Hansen (sekretær)

Arbejdsgruppen fik som kommissorium at udarbejde en redegørelse, der skal danne grundlag for identifikation af fremtidige behov for forskning og udvikling indenfor området. Redegørelsen skal endvidere fungere som baggrundsmateriale ved udarbejdelse af normer og anvisninger.

Som basis for udarbejdelsen af redegørelsen skulle gruppen indsamle og analysere erfaringer vedrørende chloridindtrængning og armeringskorrosion i chloridpåvirket beton. Følgende forhold skulle behandles i redegørelsen:

- Hvorledes tages der højde for chloridindtrængning ved projektering og udførelse?
- Hvorledes undersøges chloridpåvirkede konstruktioner, hvilke foranstaltninger resulterer undersøgelseerne i, og hvad er konsekvenserne af disse foranstaltninger?
- Er de værktøjer og modeller, der anvendes i dag, tilstrækkelige?

Arbejdsgruppen har besluttet at redegørelsen præsenteres gennem 2 publikationer:

- denne publikation, der som målgruppe har ingeniører med projektering, drift og vedligeholdelse af chloridpåvirkede betonkonstruktioner som arbejdsområde eller interesse. Publikationen indeholder to hovedafsnit, der giver en generel beskrivelse af problemkomplekset og en opsummering af de erfaringer, der har kunnet udtrækkes af analysen af praktiske erfaringer. Publikationen afsluttes med gruppens anbefalinger.
- det er hensigten på et senere tidspunkt at publicere redegørelsen i en form, der indeholder baggrundsmaterialet i form af de gennemførte analyser af eksisterende konstruktioners holdbarhed og mere detaljerede teori-afsnit.

Indholdsfortegnelse

Forord	4
Indholdsfortegnelse	5
1 Indledning	6
2 Baggrund	6
2.1 Levetidsmodeller og deres anvendelse	6
2.1.1 Modelling af initieringsfasen	8
2.1.2 Kritisk chloridkoncentration (korrosionsinitiering)	10
2.1.3 Modelling af propageringsfasen	10
2.2 Forhold der påvirker levetiden	11
2.2.1 Betonsammensætning	11
2.2.2 Konstruktiv udformning	13
2.2.3 Arbejdets udførelse	14
2.2.4 Miljøpåvirkninger	14
2.3 Tilstandsvurdering	15
2.4 Vedligeholdelse	16
3 Erfaringer	18
3.1 Levetidsmodeller	18
3.1.1 Initieringsfasen	18
3.1.2 Kritisk chloridkoncentration	20
3.1.3 Propageringsfasen	20
3.2 Vurdering af eksisterende konstruktioners holdbarhed	21
3.2.1 Generelt	21
3.2.2 Marine konstruktioner	23
3.2.3 Landbroer	25
3.2.4 Bygninger	27
3.2.5 Svømmehaller (bassiner og omgivende konstruktionsdele)	28
4 anbefalinger	30
Litteraturliste	32

1 Indledning

Armeringskorrosion i chloridpåvirkede betonkonstruktioner har i en lang årrække været en kendt nedbrydningsmekanisme. Indtil ca. 1980 har man her i landet været uopmærksom på problemet, eller man har betragtet det som mindre alvorligt. Det har været en almindelig antagelse, at korrosion kan undgås, hvis man iagttager nogle få, grundlæggende regler som fx minimumsværdier for cementindhold og dæklag samt maksimumsværdier for vand/cementforhold, [1], [2].

Igennem de seneste ca. 15 år er der gjort en stor indsats for at beskrive de styrende faktorer, der er afgørende for omfang og hastighed af chloridindtrængning og for den efterfølgende armeringskorrosion. Hovedårsagerne til denne indsats er, at et voksende antal korrosionsskader har ført til et behov for viden om, hvorledes skader på konstruktioner kan forebygges eller udbedres. Endvidere er de funktionskrav, der i projekteringsfasen stilles til større betonkonstruktioner, i de senere år ofte suppleret med et krav om en specificeret minimumslevetid. Et sådant krav forudsætter grundlæggende overvejelser om sammenhængen mellem holdbarhed og henholdsvis materialer, konstruktiv udformning og miljøpåvirkninger.

Disse sammenhænge kan i princippet beskrives ved en levetidsmodel, der forudsiger den tidsmæssige udvikling af konstruktionens tilstand. Levetidsmodeller må betragtes som en væsentlig metode til at vurdere restlevetiden af eksisterende konstruktioner. Levetidsmodeller muliggør principielt en totaløkonomisk optimering af en betonkonstruktion, idet såvel bygge- som drift- og vedligeholdelsesomkostninger kan tages i betragtning. Endvidere giver pålidelige levetidsmodeller mulighed for projektering af konstruktioner med en specificeret minimumslevetid. I denne redegørelse har levetidsmodeller derfor fået en central placering.

Afsnit 2 indeholder en kort gennemgang af levetidsmodellers principielle opbygning, af de forhold der har indflydelse på levetiden, samt en oversigt over de muligheder der findes for at tilstandsvurdere og vedligeholde chloridpåvirkede konstruktioner. Afsnit 3 opsummerer erfaringer vedrørende levetidsmodellering og eksisterende konstruktioners holdbarhed. Afsnit 4 indeholder gruppens anbefalinger.

2 Baggrund

2.1 Levetidsmodeller og deres anvendelse

Levetiden af en konstruktion kan defineres som det tidsrum, hvori konstruktionen opfylder alle sine funktionskrav, [3], [4], [5]. Funktionskravene er krav til konstruktionens holdbarhed og egenskaber på en række veldefinerede områder. Funktionskravene til en betonkonstruktion kan f.eks. være:

- Sikkerhed mod kollaps
- Sikkerhed mod nedfald
- Stivhed
- Tæthed
- Planhed
- Ruhed
- Udseende

En levetidsmodel er en matematisk model, der gør det muligt beregningsmæssigt at forudsige den tidsmæssige udvikling af den eller de egenskaber, der stilles funktionskrav til for den pågældende konstruktion.

Det afgørende for en chloridpåvirket konstruktions levetid er, hvor hurtigt chlorioner trænger ind, hvor meget chlorid der kan tolereres i armeringsniveau (den kritiske chloridkoncentration), og hvor

hurtig den efterfølgende korrosionsproces forløber. Hele dette forløb er bestemt af betonens sammensætning og kvalitet, konstruktionens udformning og de miljøpåvirkninger, som konstruktionen er udsat for. Disse forhold er igen styret af en lang række materialeparametre og miljøfaktorer, hvis effekt og indbyrdes betydning langt fra er fuldt forstået.

En samlet forståelse af denne meget komplekse problemstilling kan opnås ved opstilling og eftervisning af transport- og nedbrydningsmodeller, der skønnes at tage hensyn til alle væsentlige parametre. Hvilke parametre, der er de væsentligste, kan i en vis udstrækning undersøges ved kontrollerede forsøg i laboratoriet. En endelig eftervisning af modellernes gyldighed kan dog kun ske ved at sammenholde observationer og målinger opnået ved tilstandsvurdering af eksisterende konstruktioner med de opstillede modellers forudsigelser.

Modellerne, der præsenteres i det følgende, befinder sig på et indledende stadium af modelopstilling og -tilpasning. Man må derfor forvente, at de opstillede modeller skal modificeres på grundlag af målinger og observationer fra eksisterende konstruktioner. Disse modifikationer kan være generelle, eller knyttet til bestemte konstruktioner.

Princippet for alle levetidsmodeller for betonkonstruktioner, hvis levetid er bestemt af chloridinitieret armeringskorrosion, kan eksemplificeres ved Tuutti's levetidsmodel, [6], [7]. I denne model opdeles konstruktionens levetid i initieringsfasen, hvor der ikke forekommer korrosion, samt propageringsfasen, hvor der er aktiv korrosion.

I *initieringsfasen* sker der indtrængning af chlorioner i og gennem dæklaget, men det kritiske chloridindhold for initiering (start) af korrosion er endnu ikke overskredet ved armeringen. For konstruktioner, der udsættes for forskellige miljøpåvirkninger i forskellige områder vil længden af initieringsfasen være forskellig for de forskellige områder. Endvidere vil initieringstiden variere helt lokalt bl.a. som følge af lokale variationer i tykkelse og kvalitet af dæklaget.

Propageringsfasen er perioden efter korrosionsinitiering, hvori korrosionsprocessen forløber. Afhængig af hvilken vedligeholdelsesstrategi, der er teknisk og økonomisk optimal for konstruktionen, gennemføres forebyggende eller udbedrende vedligeholdelse, eller konstruktionen udskiftes inden brudsikkerheden er utilladeligt reduceret.

Figur 1 illustrerer disse forhold. Når der er foretaget vedligeholdelse påvirkes nedbrydningsforløbet. Det stiplede kurveforløb viser et eksempel på udbedrende vedligeholdelse.

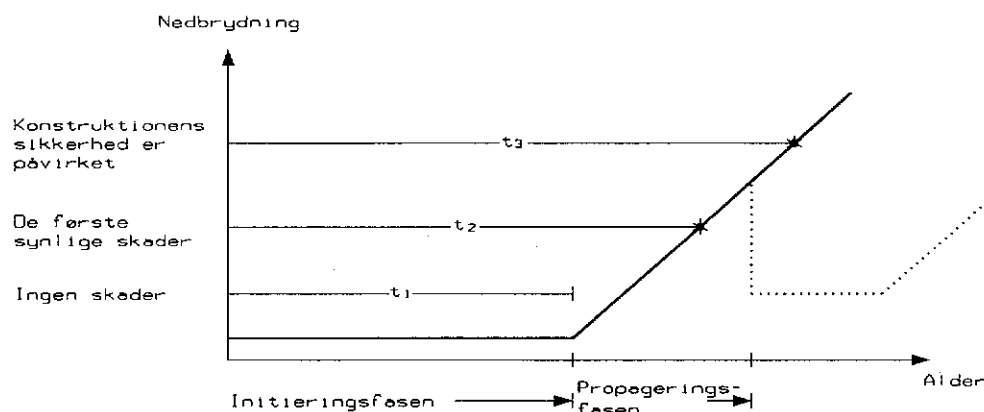


Fig. 1: Principielt forløb af betonkonstruktioners nedbrydning. Det stiplede kurveforløb viser effekten af udbedrende vedligeholdelse.

- t_1 = initieringstiden. Forebyggende vedligeholdelse udføres indenfor denne periode.
- t_2 = tidspunkt hvor mindre reparationer kan overvejes.
- t_3 = tidspunkt hvor omfattende reparationer er nødvendige.

Den principielle fremgangsmåde ved vurdering af en chloridpåvirket konstruktions levetid er vist i fig. 2.

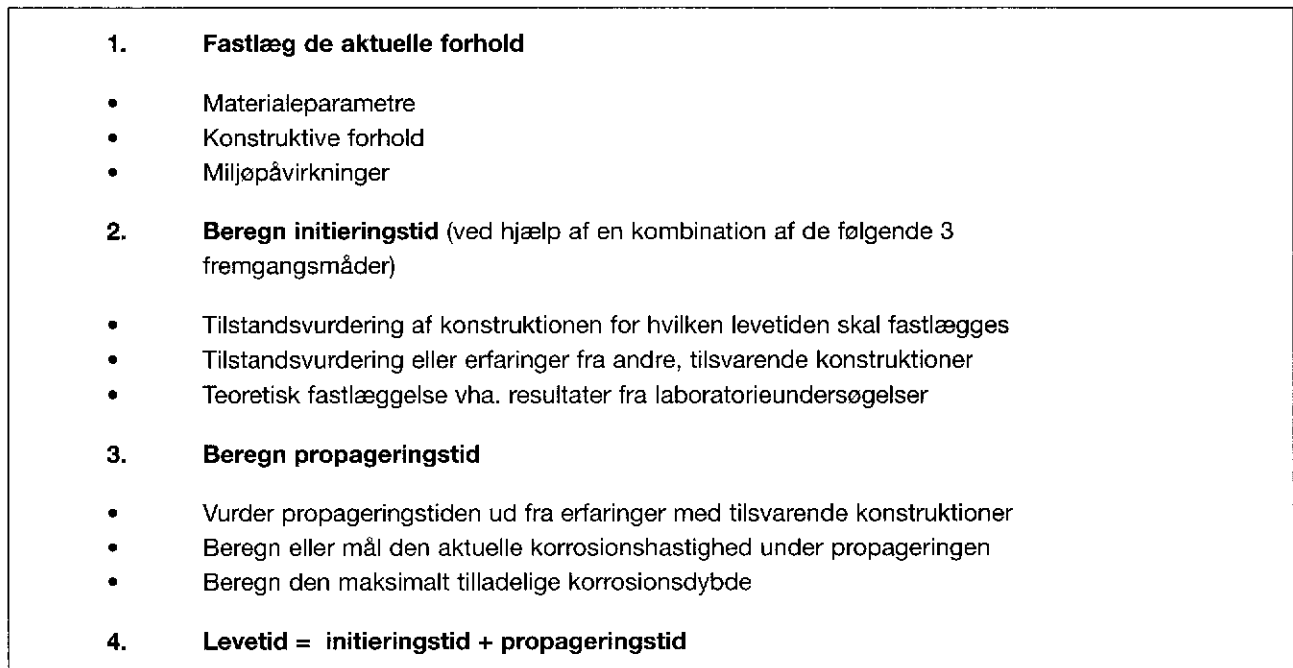


Fig. 2. Tuutti's levetidsmodel for konstruktioner med chloridinitieret armeringskorrosion. (iht. [7], men med små ændringer).

2.1.1 Modellering af initieringsfasen

Fastlæggelsen af initieringstiden er baseret på bestemmelse af indtrængningshastigheden af chlorid, dæklagets tykkelse samt den kritiske chloridkoncentration.

Indtrængningen af chlorid sker ved transport i helt eller delvist vandfyldte porer i betonen. I princippet kan transporten ske ved:

- Diffusion
- Kapillarsugning
- Hydraulisk trykforskel (permeation)
- Elektromigration

samt kombinationer af disse mekanismer.

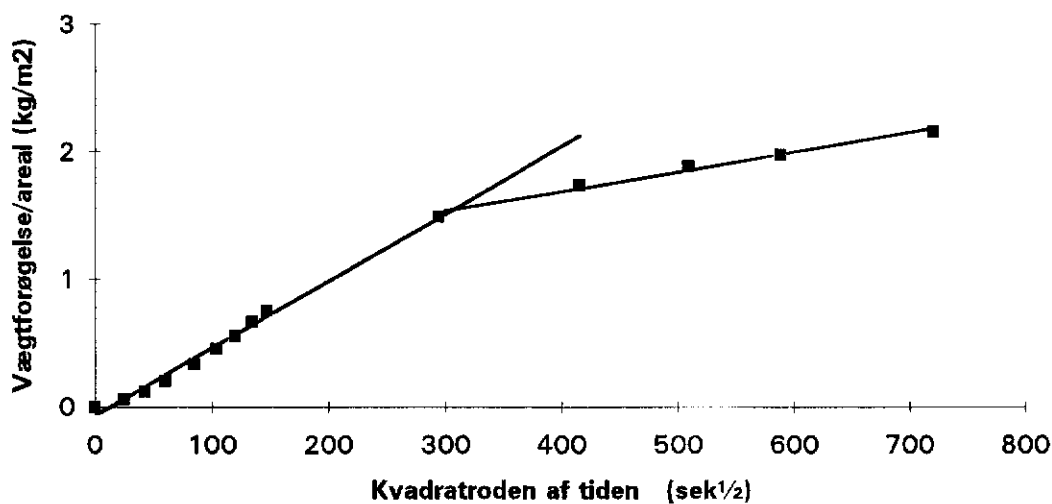
Ved *diffusion* er den drivende kraft for stoftransporten koncentrationsforskelle, og transporten sker fra områder med høj stofkoncentration til områder med lavere stofkoncentration.

For betonkonstruktioner behandles diffusionsprocessen ofte som ikke-stationær, en-dimensional chloriddiffusion i henhold til Fick's anden lov [8]. Det antages normalt, at diffusionskoefficienten (transporthastigheden) er konstant, dvs. konstant igennem hele betondæklaget og uafhængig af betonens alder.

Vand kan suges ind i beton ved *kapillarsugning* som følge af vandets overfladespænding, idet betonens porer optræder som kapillarrør. Transporthastigheden af vand er i den beskrevne situa-

tion stærkt tidsafhængig (ikke-stationær) og aftager hurtigt (normalt indenfor et døgn efter at betonoverfladen blev udsat for vand) til næsten nul. Hvis vandet indeholder opløste chlorider, vil disse transporteres med vandet ind i betonen, hvilket vil ske langt hurtigere end ved ren diffusion.

Når væskefronten standser efter opsugning i betonens porer, bliver væsketransporten stationær (stationær kapillarsugning). Holdes luftfugtigheden på nedstrømssiden konstant, vil der opstå en ligevægt imellem tilførsel af vand *til* væskefronten og fordampning *fra* væskefronten. Fastholdes denne situation, vil vand transporteres i porerne fra det indre af betonen frem til væskefronten ved stationær kapillarsugning og videre bort fra væskefronten ved dampdiffusion i de delvist luftfyldte porer. Da chlorionerne ikke fordamper, opkoncentreres disse i fordampningszonen.



Figur 3: Eksempel på vandoptagelse i en betonskive. Den stejle del af kurven repræsenterer ikke-stationær kapillarsugning mens den flade del repræsenterer stationær kapillarsugning.

Udsættes et urevnet betontværsnit for et stort væsketryk (for eksempel et tunnelrør på stor dybde i vandførende jord) vil væsketrykket (*den hydrauliske trykforskel*) bidrage til transporten af vand ind i og igennem betonen. Bidraget vil normalt være beskedent, og afhænger af vandtrykket, betonens tykkelse og kvalitet samt af forholdene på den nedstrøms side. Er der tør luft, vil stationær kapillarsugning som følge af betonens porestruktur være den transportform, der dominerer vandtransporten.

I beton med gennemgående revner får disse lokalt en dominerende indflydelse på den transporterede væskemængde, idet dimensionen af en revne kan være flere størrelsesordere større end betonens egne porer. Dette er konstateret i praksis, [9], og eksemplificeret i [16].

Elektro-migration er en proces, hvor chlorionerne bevæger sig i det elektriske felt, der fremkommer p.g.a. af forskelle i armeringens potential i forskellige områder eller p.g.a. forskellig bevægelighed af de diffunderende ioner (diffusionspotential). Forholdene er væsentligt mere komplekse end for de øvrige transportmekanismer, og den praktiske betydning af elektromigration som transportmekanisme for chlorid i beton er ikke kendt.

De ovennævnte transportformer kan forekomme såvel alene som i kombination. Eksempler herpå er:

Marine konstruktioner: Over vandlinien vil chloridtransporten i den yderste del af dæklaget foregå ved en kombination af diffusion, ikke-stationær kapillarsugning og evt. elektromigration. Længere inde i betonen har kapillarsugning ingen betydning.

Svømmebassiner: I en bassinvæg ud mod en ingeniørgang vil chloridtransporten foregå ved en kombination af stationær kapillarsugning, hydraulisk trykforskel, diffusion og evt. elektromigration.

2.1.2 Kritisk chloridkoncentration (korrosionsinitiering)

Stål indstøbt i beton er beskyttet mod korrosion af et såkaldt passivlag. Passivlaget dannes på ståloverfladen ved indstøbning i basisk beton. Korrosionsangreb kan starte, når den kritiske chloridkoncentration overskrides, hvor armeringen befinder sig. Derved sker en lokal nedbrydning af passivlaget.

Den kritiske chloridkoncentration angives i vægt-% chlorid af betonvægten, iht. normal dansk praksis. Da det kun er den del af chlorionerne, der er opløst i betonens porevæske, der medvirker til korrosionsinitieringen, havde det været mere logisk i stedet at referere til den kritiske koncentration af opløste chlorioner i porevæsken. Det kræver imidlertid måling af porevæskens sammensætning, hvilket er kompliceret og under en række forhold umuligt.

Størrelsen af den kritiske chloridkoncentration afhænger bl.a. af betonsammensætning og stålets elektrokemiske potentiale, der igen er påvirket af bl.a. fugtindhold og iltadgang. Den kritiske chloridkoncentration kan derfor variere fra konstruktion til konstruktion og fra område til område i samme konstruktion.

Tidligere har man specielt fokuseret på, at det kun er de frie chlorioner opløst i porevæsken, der kan medvirke til initiering af korrosion, samt at tilstedeværelsen af hydroxylioner vil virke i modsat retning, dvs. hæmmende på korrosion. Dette er udtrykt i Hausmanns kriterium for initiering af korrosion, $[Cl^-]/[OH^-] \geq 0,6$, hvor koncentrationerne refererer til opløste stoffer i porevæsken, [10]. Undersøgelser har vist, at dette kriterium er for simpelt og ikke generelt anvendeligt [11].

Tabel 1 opsummerer hyppigt anvendte grænseværdier for chloridindhold. Overstiger chloridindholdet i betonen disse værdier, er der risiko for korrosionsinitiering. Værdien 0,05 % anvendes ofte i forbindelse med relativt tørre konstruktioner, der periodisk opfugtes med saltholdigt vand, som fx landbroer og bygninger. Værdien 0,1 % anvendes for konstruktioner med et mere ensartet og højt fugtindhold, fx marine konstruktioner.

Reference	% Cl af cementvægt	% Cl af betonvægt
Almindelig dansk praksis		0,05 - 0,1
[12]	0,4 - 1	ca. 0,05 - 0,13
[13], slap armering		0,05
[13], forspændt armering		0,025

Tabel 1: Almindeligt anvendte grænseværdier for chloridindhold i ukarbonatiseret beton.

Den lavere grænseværdi for forspændt stål, [13], er udtryk for, at der kræves en større sikkerhed mod korrosion af forspændingsstål end af slap armering.

2.1.3 Modellering af propageringsfasen

Efter initiering af korrosion er nedbrydningshastigheden afgørende for konstruktionens restlevetid. At konstruktionen har en levetid, der strækker sig udover initieringstidspunktet, skyldes, at der ved den statiske dimensionering er indbygget en sikkerhed i form af en ekstra bæreevne. Det er altså denne sikkerhed, der bliver forringet, når korrosionen og den tilknyttede betonedbrydning begynder. Den krævede minimumssikkerhed må naturligvis aldrig underskrides.

Der findes ingen generelle modeller for propageringsfasen. Forløbet vil i meget høj grad være afhængig af beton, konstruktiv udformning og miljøpåvirkning. Hvilken skadeudvikling, der kan tillades inden reparation, vil være afhængig af den enkelte konstruktions bæreevne samt andre hensyn (æstetiske hensyn, risiko for skader pga. nedfaldende betonstykker o.l.).

I chloridholdig beton kan korrosionshastigheden typisk ligge på 0,05 - 0,1 mm/år. I værste fald kan korrosionshastigheden lokalt være 10 gange højere [7]. Under sådanne forhold vil lokale reparationer være nødvendige efter få år.

2.2 Forhold der påvirker levetiden

Nedbrydningen af en betonkonstruktion p.g.a. indtrængning af chlorid og efterfølgende armeringskorrosion, er bestemt af følgende forhold:

- Betonsammensætning
- Konstruktiv udformning
- Udførelsen af betonarbejdet
- De miljøpåvirkninger, konstruktionen udsættes for gennem sin levetid.

Overvejning med andre nedbrydningsmekanismer, fx alkalikiselreaktioner (AKR) eller frost/tø vil typisk accelerere nedbrydningsforløbet.

2.2.1 Betonsammensætning

Betonens sammensætning har teoretisk set stor indflydelse på konstruktionens levetid. Tabel 2 opsummerer enkeltfaktorer, der har eller formodes at have betydning for chloridindtrængning og korrosion. I praksis er det væsentligt ikke kun at se på enkeltfaktorer, men også at vurdere samspillet mellem disse, samt at tage hensyn til de enkelte faktoreres indflydelse på produktionsforhold og på andre nedbrydningsmekanismer.

Faktor	Indflydelse på:			
	Chloridindtrængningshastigheden	Kritisk chlorid konc., % af betonvægt	Tid til korrosionsinitiering ¹⁾	Korrosionshastigheden
CEMENTTYPE:				
C3A og andre faser, der binder Cl kemisk	+	+	+	0
Alkali	+? ²⁾	? ³⁾	+?	+? ²⁾
Stor finhed	+? ⁴⁾	?	+?	?
POZZOLANER/TILSÆTNINGSSTOFFER:				
Flyveaske	+	0 eller -	+	+
Mikrosilika	+	-	+	+
Slagge	+	-	+	+
Plastificeringsmiddel ⁵⁾	?	?	?	?
Luftindblanding	?	?	?	?
TILSLAGSMATERIALE:				
Stor tæthed	+?	0?	+?	0?
God ved hæftning til pasta ⁶⁾	+?	0?	+?	0?
BLANDINGSFORHOLD:				
Lavt v/c	+	+?	+	+
Højt cementindhold ⁷⁾	?	+	?	-?
Optimal kornkurve ⁸⁾	+?	0	+?	+?

Tabel 2: Betonsammensætningens indflydelse på korrosionsinitiering og -propagering.

+ = gunstig effekt ud fra et korrosionssynspunkt.

- = ugunstig effekt ud fra et korrosionssynspunkt.

0 = ingen effekt ud fra et korrosionssynspunkt.

? = ukendt effekt.

+?, -?, 0? = formodet, men udokumenteret effekt.

1) Tiden til korrosionsinitiering afhænger af såvel chloridindtrængningshastigheden som den kritiske værdi.

2) Effekten vil afhænge af bindemiddelsammensætningen. Eksempelvis vil højt alkaliindhold føre til højere reaktionsgrad og dermed større tæthed af pozzolanholdig beton. Lavt alkaliindhold foretrækkes ofte p.g.a. andre hensyn.

3) Effekten er delvist modsatrettet. Et højt alkaliindhold medfører mindre chloridbinding og dermed mere frit chlorid. Til gengæld fører en højere hydroxylionkoncentration i porevæsken til en højere kritisk værdi.

4) Iht. laboratorieforsøg kan større finhed føre til lavere chloridindtrængningshastighed. Til gengæld forventes selvhelings-effekt ved revnedannelse at være størst for grov cement. Stor finhed kan medføre uønsket stor varmeudvikling.

5) Tilsættes af hensyn til bearbejdigheden. Den direkte effekt på chloridindtrængning og korrosion er ikke kendt.

6) Vedhæftningszonen forventes at påvirke chloridindtrængningshastigheden omkring tilslagsmaterialet.

7) Visse undersøgelser tyder på en gunstig effekt af højt cementindhold. Teoretisk set er det dog uden indflydelse, forudsat at betonen kan komprimeres tilfredsstillende. Højt cementindhold kan lettere føre til termorevner.

8) Afpasses til at give den bedst mulige komprimering og pakning (under hensyntagen til bearbejdigheden).

2.2.2 Konstruktiv udformning

Konstruktiv udformning omfatter den overordnede konstruktive udformning, diverse konstruktive detaljer samt anbringelse af armeringen. Tabel 3 giver typiske eksempler på forhold, der skal overvejes i projekteringsfasen.

Konstruktivt forhold, der bør overvejes	Eksempler	Problemstilling
Nærhed til chloridkilde	Brosøjler på landbroer	Placering tæt på kørebanen giver kraftig chloridpåvirkning
	Overbygning på kystbroer	Lavbroer er mere udsatte end højbroer
Udformning af tværsnit	Overbygning og piller på kystbroer	Chloridophobningen er størst i områder i læ
Placering af og dræningsforhold omkring fundamenter	Pillefundamenter for landbroer	Placering i grøfter giver risiko for konstant påvirkning af chloridholdigt vand
Fald på vandrette, opadvendte overflader	Altanplader, brodæk, dæk i parkeringshuse, overside af piller og søjler	Utilstrækkeligt fald eller lunger øger kontakttiden mellem beton og chloridholdigt vand
Dæklag	Generelt	Dæklagets beskyttende effekt på armeringen stiger med kvadratet på tykkelsen
	Ved hjørner	Indtrængning af chlorid fra to retninger øger korrosionsrisikoen for hjørnearmering
Fuger	Generelt	Indtrængning af chlorid pga. utilstrækkelig tætning Geometriske forhold umuliggør rensning
Støbeskel	Generelt	Støbeskel i områder med kraftig chloridpåvirkning kan fungere som revner
Afstandsklodser	Generelt	Eventuel dårlig vedhæftning mellem afstandsklodser og beton Afstandsklodserne kan være mere gennemtrængelige for chlorid end den omgivende beton
Armeringsmængder og -fordeling	Generelt	For lidt armering giver stor revnevidde For tæt armering giver risiko for dårlig komprimering
Type af armeringsstænger	Generelt	Ribbet stål giver bedre revnefordeling end glat stål
Forspændt armering	Konstruktioner, hvor tæthed er væsentlig, fx beholdere	Revnedannelse kan undgås

Tabel 3: Eksempler på holdbarhedsaspekter der skal overvejes i konstruktionsfasen for chloridpåvirkede konstruktioner.

2.2.3 Arbejdets udførelse

Selv med en god betonsammensætning vil produktionsforholdene være af betydning for, hvor godt armeringen er beskyttet mod chloridindtrængning og efterfølgende chloridinitieret armeringskorrosion. En uhensigtsmæssig produktionsteknik kan føre til inhomogeniteter, revner og mikrodefekter. Disse defekttyper kan enten være generelle eller knyttet til overfladelaget.

Ref. [14] giver en oversigt over forskellige typer af revner, herunder revner som opstår under hærdningen (svind- og termorevner). Disse typer af revner kan helt eller delvist undgås ved passende forholdsregler i produktionsprocessen. Ref. [13] behandler mere generelt indflydelsen af defekter, opstået i udførelsesfasen.

De væsentligste produktionstekniske forhold er:

- Blanding
- Transport
- Formmateriale
- Udstøbning
- Komprimering
- Temperaturstyring
- Efterbehandling

Kravene til disse faktorer er beskrevet i bl.a. [15] - [18].

2.2.4 Miljøpåvirkninger

Opdelingen i miljøklasser som beskrevet i ref. [19] afspejler, at de miljøpåvirkninger, som betonkonstruktionen udsættes for, har stor indflydelse på holdbarheden. Derfor stilles forskellige krav til betonrecept, dæklag og udformning afhængigt af det omgivende miljø.

I denne redegørelse, er der skelnet mellem 4 hovedgrupper af konstruktioner:

- Marine konstruktioner
- Landbroer
- Bygninger
- Svømmehaller

Miljøpåvirkningerne for disse konstruktionstyper er beskrevet tabel 4.

Konstruktionstype	Korrosionsmiljø	Kommentarer
Marine konstruktioner, under vand	Konstant påvirkning af havvand. Konstant vandmætning. Lav iltadgang. Relativ konstant temperatur. Magnesiumsalte i havvandet har muligvis en vis beskyttende effekt.	Lavt iltindhold fører til et lavt stål potentiale og dermed en høj kritisk chloridkoncentration. Lav generel korrosionshastighed p.g.a. lavt iltindhold. Høj lokal korrosionshastighed kan forekomme.
Marine konstruktioner, splash- og tidevandszone	Vekselvis udtørring og opfugtning med havvand. Relativt højt fugtindhold. Relativ god iltadgang. Mulighed for relativ høj temperatur. Magnesiumsalte i havvandet har muligvis en vis beskyttende effekt.	Det mest udsatte område på en marin konstruktion. Mulighed for hurtig chloridindtrængning og høj korrosionshastighed.
Marine konstruktioner, atmosfærisk zone	Mindre mængder af chlorid tilføres i vanddråber, der bæres med vinden. Lavere fugtindhold. God iltadgang. Lejlighedsvis høj temperatur.	Mindre risiko for chloridindtrængning og korrosion. Udbredte skader kan dog forekomme, hvis der er overlejlrede problemer som fx AKR.
Landbroer	Periodisk kraftig påvirkning med tøsalt. Stærkt varierende fugtforhold. God iltadgang. Lejlighedsvis høj temperatur.	Stor risiko for lokal chloridophobning og høj korrosionshastighed.
Bygninger	Periodisk kraftig påvirkning med tøsalt. Stærkt varierende fugtforhold. God iltadgang. Lejlighedsvis høj temperatur.	Lokalt konstant høj temperatur. Stor risiko for lokal chloridophobning og høj korrosionshastighed. Undertiden forstærkes problemerne af samtidig karbonatisering.
Svømmehaller	Konstant eller hyppig påvirkning med bassin vand med 0.3 - 0.9% NaCl. Højt fugtindhold. Store fugtgradienter. Områder med god iltadgang. Konstant meget høj temperatur.	Stor risiko for chloridophobning og høj korrosionshastighed. Undertiden forstærkes problemerne af udludning er omkring revner og støbeskel. AKR er ofte en overlejlrende mekanisme.

Tabel 4: Miljøpåvirkninger for hovedgrupper af konstruktioner.

2.3 Tilstandsvurdering

Behovet for at foretage vedligeholdelse af en konstruktion fastlægges ved en tilstandsvurdering. Tabel 5 viser hvilke metoder, der generelt anvendes til undersøgelser af chloridindtrængning og korrosion. Ved en tilstandsvurdering bør der desuden undersøges for andre typer nedbrydning. Tyndslibsundersøgelser er væsentlige i den forbindelse. Hvor karbonatisering kan være et problem, måles karbonatiseringsdybden ligeledes.

Metode	Formål
Grove chloridprofilmålinger (typisk 2-4 dybder)	Orienterende måling af omfanget af chloridindtrængning
Detaljerede chloridprofilmålinger (typisk 5 - 10 dybder)	Måling af i hvilket omfang, der er trængt chlorider ind Beregning af diffusionsparametre til levetidsmodellering
Dæklagsmåling	Måling af dæklaget over den korrosionstruede armering
EKP-målinger	Lokalisering af områder med risiko for korrosion
Elektriske modstandsmålinger	Vurdering af risikoen for høj/lav korrosionshastighed Hjælpe-måling ved EKP-målinger. Høj elektrisk modstand kan påvirke potentialmålingerne
Pulsmålinger/korrosions-hastighedsmålinger [20]	Nyere metoder, til verifikation af korrosion/ikke-korrosion samt til vurdering af korrosions-hastigheden
Visuel kontrol	Detektion af fremskreden korrosion (inspektion af betonoverfladerne) Detektion af begyndende eller fremskredet korrosion (ophugning og inspektion af armering)
Hamring	Detektion af laminerede områder

Tabel 5: Metoder til tilstandsvurdering i forbindelse med chloridindtrængning og korrosion.

Andre metoder er under udvikling, men anvendes pt. ikke systematisk til tilstandsvurdering, se i øvrigt afsnit 3.

Systematisk tilstandsvurdering udføres bl.a. på Vejdirektoratets broer, der indgår i et eftersynsprogram, efter hvilket de med regelmæssige mellemrum gennemgås visuelt for skader. I tilfælde af skader foretages mere detaljerede eftersyn for at fastslå skadeårsag og -omfang, reparationsbehov osv. Tilstandsvurdering, der tager sigte på at undersøge, hvor i initieringsfasen konstruktionen befinder sig, anvendes pt. ikke systematisk. Sådanne systemer er en forudsætning for forebyggende vedligeholdelse.

Som et supplement til periodisk eftersyn og tilstandsvurdering kan korrosionsrisikoen vurderes ved hjælp af data fra indbyggede målelektroder (referenceelektroder og korrosionceller).

2.4 Vedligeholdelse

Efterfølgende beskrives forholdsregler, der kan anvendes til vedligeholdelse af eksisterende konstruktioner. Visse af disse metoder kan bringes i anvendelse allerede på projekteringstidspunktet. Der omtales udelukkende metoder til generel vedligeholdelse af armeret beton, hvorimod vedligeholdelse af detaljer, som fx fuger, ikke er medtaget. Ved valg af forholdsregler skal der tages hensyn til eventuelle overlejlrede nedbrydningsmekanismer.

Valget af vedligeholdelsesmetoder fastlægges ofte ved en nuværdibetragtning, der omfatter alle teknisk relevante metoder. Det er væsentligt ved en sådan beregning, at de samlede levetidsomkostninger tages i betragtning, herunder omkostningerne til tilstandsvurdering og overvågning. Disse omkostninger vil være stærkt afhængige af den valgte reparationsstrategi.

Målet med vedligeholdelsen er at bryde den serie af processer, der skal forløbe, for at korrosion kan finde sted. Tabel 6 giver en oversigt over, hvorledes korrosion kan hindres eller hæmmes, og hvilke vedligeholdelsesmetoder der principielt kan anvendes.

Led i processen	Forholdsregel	Vedligeholdelsesmetode
KORROSIONSINITIERING:		
Chlorid trænger gennem betonoverfladen fra det omgivende miljø	Kontakt med miljøet forhindres	Overfladebehandling, isolering eller inddækning
	Det omgivende miljø påvirkes	Fx bortledning af overfladevand, regulering af fald, dræning
Chlorid trænger gennem betondæklaget	Transporthastigheden af chlorid reduceres	(Reduktion af fugtindhold i betonen vha. vandafvisende overfladebehandling, isolering eller inddækning) ³⁾ (Forebyggende katodisk beskyttelse) ³⁾
	Chlorioner fjernes fra dæklaget	Elektrokemisk chloridudtrækning ¹⁾
Den kritiske chloridkoncentration overskrides i niveau af armeringen	Førøg den kritiske chloridkoncentration	Forebyggende katodisk beskyttelse
	Umuliggør korrosion ved at sænke armeringens potentiale	
KORROSIONSPROPAGERING:		
Opløsning (korrosion) af jern	Hindring af jernopløsning	Katodisk beskyttelse
Reduktion (forbrug) af ilt	Hindring af iltindtrængning	(Overfladebehandling) ²⁾
	Fjernelse af ilt ved armeringen	Katodisk beskyttelse
Ionledning gennem betonen	Hindring/reduktion af ionledning	(Reduktion af fugtindholdet i beton ved overfladebehandling, isolering eller inddækning) ³⁾
GENERELT:		
Fjernelse af chloridholdig beton og afrensning/erstatning af armering	Beton med overkritisk chloridindhold fjernes (+ en vis reserve). Passivitet af armering sikres	Pletreparation eller udskiftning af dæklagsbeton
		Hel eller delvis udskiftning af konstruktions-elementer

Tabel 6: Vedligeholdelsesmetoder og deres effekt på chloridindtrængning og korrosion.

¹⁾ Ny metode, med spinkelt erfaringsgrundlag.

²⁾ Effekten er ikke påvist i praksis. Metoden kan ikke umiddelbart anbefales.

³⁾ Størrelse af effekt ukendt.

Ved at planlægge katodisk beskyttelse i projekteringsfasen og gennemføre de nødvendige forberedelser i byggeperioden kan der opnås bedre tekniske løsninger og besparelser, såfremt beskyttelsen senere etableres. Forberedelse til katodisk beskyttelse sker ved under udførelsen at sikre, at al armering er elektrisk sammenhængende. Dette princip er anvendt som supplement til de konstruktive og betonteknologiske forholdsregler bl.a. på Storebæltsforbindelsen.

For at opnå holdbare reparationer eller for at kunne efterlade konstruktionen med et acceptabelt udseende anvendes undertiden en kombination af flere vedligeholdelsesmetoder. Dette kan eksempelvis være en kombination af pletreparation og katodisk beskyttelse eller en kombination af pletreparation og overfladebehandling.

3 Erfaringer

3.1 Levetidsmodeller

3.1.1 Initieringsfasen

Initieringsfasen er jf. afsnit 2.1 den periode, hvor chlorioner trænger ind i betonens dæklag, frem til det tidspunkt, hvor den kritiske chloridkoncentration overskrides i armeringsniveau.

I praksis behandles chloridindtrængningen i marine og tørsaltpåvirkede konstruktioner som rene diffusionstilfælde. Hvis bidraget fra fx ikke-stationær kapillarsugning er betydeligt, kan denne praksis føre til, at den forventede, fremtidige chloridindtrængning fejlvurderes. Sådanne forhold kan eksempelvis forekomme, hvor porøs beton udsættes for skiftevis udtørring og genopfugtning med saltvand.

For svømmehaller og tunneler anvendes undertiden modellering af initieringstiden under hensyntagen til chloridtransport ved permeation iht. Darcy's lov samt overslagsmæssig hensyntagen til kapillarsugning, [21]. Et eventuelt migrationsbidrag tages ikke i betragtning.

Der har været gjort forsøg på direkte at anvende transportparametre bestemt ved korttidslaboratorieforsøg til levetidsmodellering [22]. Nyere undersøgelser viser, at der er en betydelig afvigelse mellem transportparametre, fastlagt ved laboratorieforsøg, og målt i praksis, [23], [24]. Laboratorieforsøg kan derfor primært bruges til at karakterisere betonen med hensyn til dens potentielle modstand mod chloridindtrængning og til mere generelle procesorienterede undersøgelser. Der findes ikke på nuværende tidspunkt nogle dokumenterede sikre metoder til at estimere levetiden ud fra laboratorieforsøg.

Almindeligvist baseres levetidsmodellering på chloridprofilmålinger på den aktuelle konstruktion, se for eksempel [25]. Ved kurvetilpasning af det målte chloridprofil til Fejlfunktionsløsningen til Fick's anden lov, bestemmes den effektive diffusionskoefficient, D (m^2/sek), samt den effektive overfladekoncentration, C_s (% Cl af betonvægten). Figur 3 viser et indtrængningsprofil for chlorid i beton, samt en kurvetilpasning af indtrængningsprofillet til Fejlfunktionsløsningen til Fick's anden lov.

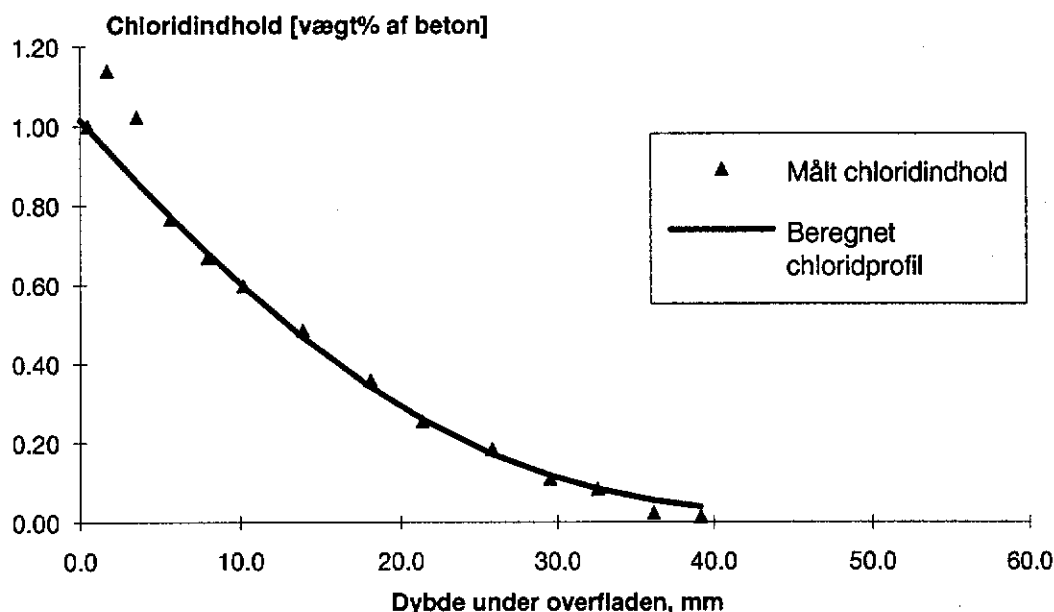


Fig. 3 : Eksempel på chloridprofil og kurvetilpasning til Fick's anden lov.

For konstruktioner, hvor diffusion må antages at være den dominerende transportmekanisme, er der generelt rimelig overensstemmelse mellem de målte data og den anvendte løsning til Fick's anden lov. At de beregnede diffusionsparametre, D og C_s , med god tilnærmelse beskriver chloridprofilen på prøveudtagningstidspunktet er dog ikke ensbetydende med, at de kan anvendes til længere tids fremskrivning af chloridindtrængningen.

Nyere forskning stiller spørgsmålstegn ved om forudsætningerne for anvendelsen af Fejlfunktionsløsningen til Fick's anden lov med konstante transportparametre er overholdt for chloridtransport i beton, [26]. Det skyldes bl.a., at antagelsen om at betonen kan behandles som et homogent materiale ikke er korrekt. Diffusionskoefficienten, D , må forventes at afhænge af indtrængningsdybde (fx hvis betonkvaliteten varierer som funktion af dybden), betonens alder og af sammensætningen af den væske, betonen er i kontakt med (chloridkoncentration og andre ioner). Derudover vil kemisk binding af chlorid i cementpastaen påvirke indtrængningsforløbet. Disse forhold kan indarbejdes i Fick's anden lov i form af variable (tids- og stedafhængige) parametre i stedet for konstanter. En opstilling og praktisk eftervisning af sådanne modeller er ikke afsluttet.

Enkelte undersøgelsesresultater på marine konstruktioner viser, at den beregnede effektive diffusionskoefficient er aftagende med tiden, i hvert fald gennem konstruktionens første leveår [23], [27]. Det peger på, at en fremskrivning af chloridindtrængningen med diffusionsparametre, der beregnes på grundlag af chloridindtrængningen til en given tid, vil føre til en undervurdering af restlevetiden.

Målinger på landbroer udført med få års mellemrum tyder på, at D -værdien er uændret eller faldende med tiden. Beregninger af den forventede tid til korrosionsinitiering udført ved hjælp af Fick's anden lov på grundlag af målinger på brosjøler på landbroer udført i henholdsvis 1991 og 1994 har i 13 ud af 17 tilfælde ført til samme resultat indenfor ± 5 år, se fig. 4. Dette resultat indikerer, at den simple transportmodel kan være anvendelig i praksis, selvom den ikke fuldt ud tager højde for de fysiske forhold.

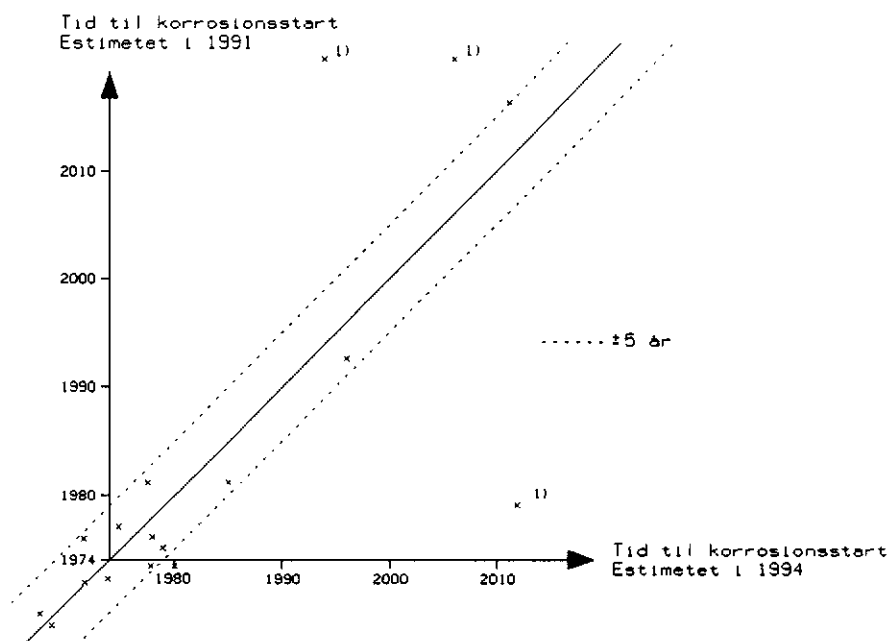


Fig. 4: Sammenhængen mellem det forventede tidspunkt for korrosionsinitiering beregnet på grundlag af målinger udført i henholdsvis 1991 og 1994.

1) Samtidige alkaliselreaktioner.

I inhomogeniteter (fx revner) vil transportforholdene afvige betydeligt fra resten af betonen. Denne problemstilling er kun yderst sparsomt behandlet på modelplan. I [28] er opstillet en kompositmodel, der tager effekten af revner i betragtning. Modellen forudsiger, at isolerede mikrorevner kun vil have marginal indflydelse på diffusiviteten, med mindre de findes i meget stort antal. Omvendt vil sammenhængende revner have en stor relativ effekt, specielt for tætte betoner. Modellen er ikke verificeret i praksis.

Nyere overvejelser peger på, at tætte betoner har et »globalt« poresystem, der består af flere indbyrdes usammenhængende (eller meget lidt sammenhængende) »lokale« poresystemer, ref. [29], [30]. Såfremt dette er tilfældet, vil chlorioner kun kunne trænge ind i betonen til en dybde, der er bestemt af, hvor langt ind i betonen det overfladeforbundne poresystem er sammenhængende. Forholdene kan illustreres ved relativt simple computermodeller bygget op omkring den såkaldte percolationsteori.

3.1.2 Kritisk chloridkoncentration

Den kritiske chloridkoncentration fastsættes normalt skønsmæssigt. Det skyldes de praktiske vanskeligheder ved at fastlægge den sande, kritiske værdi. Oftest anvendes de grænseværdier, der jf. afsnit 2.1.2, angiver risiko for korrosion. Denne fremgangsmåde giver en tendens til at undervurdere den kritiske værdi. Hvis den kritiske værdi anvendes til en restlevetidsvurdering undervurderes restlevetiden også.

Anvendelsen af erfaringsbaserede kritiske chloridkoncentrationer indebærer derudover en usikkerhed som skyldes, at disse værdier er fastlagt ud fra målinger på ældre konstruktioner. Laboratorieundersøgelser viser, at den kritiske chloridkoncentration for nyere betontyper, fx hvor der er tilsat mikrosilika, kan være væsentligt lavere end for ren cementbeton, [31]. Der er ingen dokumentation for denne effekt målt under praktiske forhold.

Der arbejdes på at etablere fremgangsmåder og vurderingsgrundlag til bestemmelse af den kritiske chloridkoncentration, se bl.a. [11]. I denne metode indgår bestemmelse af frit og bundet chlorid i betonen. Indtil videre er man dog henvist til at anvende erfaringsværdier baseret på det totale chloridindhold i % af betonvægten eller i % af cementvægten.

Den kritiske chloridkoncentration har meget stor indflydelse på den beregnede tid til korrosionsinitiering og dermed for levetidsvurderinger. Eksempelvis er der i ref. [25] fundet typiske forskelle i den forventede tid til korrosionsinitiering på 2 - 20 år, afhængig af om der regnes med en kritisk chloridkoncentration på 0,04 % eller 0,06 %.

3.1.3 Propageringsfasen

Længden af propageringsfasen fastsættes normalt skønsmæssigt. Ved restlevetidsvurderinger antages, at der erfaringsmæssigt går 5 - 25 år fra start af korrosion til reparation bliver nødvendig. Dette skøn er baseret på erfaringer vedrørende gamle betonkonstruktioners nedbrydningsforløb, og kan vise sig at være meget på den sikre side, hvis de anvendes på konstruktioner med nyere og tættere betontyper, hvor korrosionshastigheden vil være begrænset af den højere elektriske modstand og mindre iltindtrængning.

Måling af korrosionshastigheden in-situ er en teknik, der først er taget i anvendelse indenfor de seneste år, og anvendeligheden af denne teknik i forbindelse med beregning af propageringshastigheden er endnu ikke klarlagt.

3.2 Vurdering af eksisterende konstruktioners holdbarhed

Dette afsnit indeholder bl.a. et sammendrag af de iagttagelser fra analyser af eksisterende konstruktioners holdbarhed, der specielt kan fremhæves.

Analyserne er gennemført for fire konstruktionsgrupper:

- Marine konstruktioner (12 broer og havneanlæg)
- Landbroer (ca. 150 broer)
- Bygninger (generelt)
- Svømmehaller (ca. 25 svømmehaller)

Analyserne er gennemført på forskellig vis for de fire konstruktionsgrupper. Dette skyldes den store variation grupperne imellem hvad angår antallet af konstruktioner, antal af konstruktionsdele og -detaljer for den enkelte konstruktion samt mængde og tilgængelighed af informationer.

Det skal bemærkes, at det materiale, der er indgået i undersøgelsen, muligvis giver et skævt billede af forholdene. Årsagen hertil er eksempelvis for marine konstruktioner, at der ikke er gennemført nogen større undersøgelser på uskadede konstruktioner bortset fra på Farøbroerne. Derudover er en række forhold koblet (typisk materialeegenskaber og alder), så det er vanskeligt at drage entydige konklusioner. Det gælder eksempelvis anvendelsen af to- og trepulverblandinger, der kun er anvendt på nyere konstruktioner.

3.2.1 Generelt

De gennemførte analyser vedrørende chloridindtrængning og efterfølgende korrosion hviler på et spinkelt grundlag. Der er derfor ikke baggrund for sikre konklusioner vedrørende hvilke tiltag, der kan sikre god holdbarhed af betonkonstruktioner, eller hvorledes levetidsmodeller bør opbygges for at sikre præcise forudsigelser af chloridindtrængning, korrosion og betonedbrydning.

Analyserne viser, at chloridfremkaldt korrosion kun delvist kan betragtes ud fra en generel synsvinkel, og at forekomsten af korrosionsskader samt forebyggelse og afhjælpning af skader principielt set er forskellige for forskellige konstruktionstyper.

Konstruktiv udformning, materialevalg og udførelse:

Korrosionsproblemer er hovedsageligt knyttet til, hvad der i dag erkendes som fejl og mangler i konstruktiv udformning og udførelse. Generelt er der derfor ikke tale om egentlige materialeproblemer. En mulig undtagelse fra denne regel er splash- og tidevandszonen på marine konstruktioner.

Typiske fejl og mangler i konstruktiv udformning og udførelse er: Små dækklag, dårlige afvandingsforhold, uhensigtsmæssige detaljer (støbeskel, fuger, fastgørelser, gennemføringer etc.), stenreder, komprimeringsfejl (fx i områder med tætliggende armering) og termo- eller svindrevner.

Generelt vil grove revner og andre makrodefekter i beton i chloridholdigt miljø med stor sandsynlighed føre til skader. I konstruktioner med ensidigt vandtryk vil fine revner med gennemsvivende vand have en tendens til at lukke sig til p.g.a. udfældninger i revnerne, således at vandgennemsvivningerne stopper. I chloridholdigt miljø vil et sådant stop af gennemsvivninger ikke fjerne risikoen for korrosion, hvor revnen passerer armeringen.

Foruden makrodefekter findes der også mikrodefekter i betonen. Ved mikrodefekter forstås defekter med en revnevidde mindre end 0,01 mm. Effekten af mikrodefekter på chloridindtrængning,

korrosionsinitiering og -propagering er ikke dokumenteret ved praktiske erfaringer. Enkelte undersøgelser tyder på, at mikrodefekter kan føre til en hurtigere chloridindtrængning, [32].

Adskillige laboratorieundersøgelser har vist, at betonsammensætningen og herunder ikke mindst bindemiddelttype og vand/cementforhold har meget stor indflydelse på chloridindtrængningen og den kritiske chloridkoncentration. I denne undersøgelse har det ikke været muligt at påvise en klar sammenhæng mellem bindemiddelttype og chloridindtrængning og holdbarhed. Det kan skyldes det statistisk set spinkle undersøgelsesmateriale, men kan også være en effekt af, at bindemiddelttype indenfor de undersøgte variationer er en sekundær faktor. Kontrollerede feltforsøg på kantbjælker har vist en hæmmende effekt på chloridindtrængningen ved mikrosilikatilsætning, [33]. I undersøgelsen af marine konstruktioner er konstateret en tendens til lavere chloridindtrængningshastighed ved lavere vand/cementforhold i området fra 0,4 - 0,5.

Metoder til tilstandsvurdering:

Sikre metoder til tilstandsvurdering er en forudsætning for at kunne foretage en rettidig vedligeholdelse. De eksisterende metoder til tilstandsvurdering i forbindelse med chloridindtrængning og armeringskorrosion er generelt velegnede til, enkeltvis eller i kombination, at give et billede af en konstruktions tilstand. Den største fejlkilde er ofte forbundet med valg af positioner for prøveudtagning og måling.

I meget fugtige konstruktioner eller konstruktioner med store fugtgradienter er EKP-målinger dog mindre velegnede til at identificere områder med korrosion. Udviklingen af nye ikke-destruktive elektrokemiske metoder er imidlertid på et fremskredent stade og anvendes allerede i et vist omfang. Pålideligt og veldokumenteret standardapparaturløst forventes at være tilgængeligt i løbet af få år.

En alvorlig mangel er, at der ikke findes sikre, ikke-destruktive metoder til vurdering af korrosionsskader eller brud på spændkabler i kabelrør. Nyere forskning på området giver forhåbninger om at egnede metoder kan udvikles, [34].

Nyere ikke-destruktive metoder (bl.a. impact echo) til vurdering af laminering og revnedannelse anvendes i et vist omfang til specialundersøgelser.

Metoder til bestemmelse af betonens indhold af frie chlorider anvendes i et vist omfang i forskningsøjemed. En udvikling af disse metoder til mere generel anvendelse er en forudsætning for en mere individuel fastlæggelse af den kritiske chloridkoncentration.

Vedligeholdelsesmetoder:

For nye konstruktioner bør det fremtidige behov for vedligeholdelse minimeres ved et optimalt valg af materialer og design.

For ældre konstruktioner kan hel eller delvis udskiftning af konstruktionsdele være et sundt vedligeholdelsesprincip. Ved udskiftning kan det sikres, at de nedbrudte konstruktionsdele bibringes en holdbarhed, der er lige så god som holdbarheden af den resterende del af konstruktionen, som fx ved delvis søjleudskiftning. Princippet kan endvidere anvendes som en tilbagevendende, planlagt udskiftning af stærkt udsatte konstruktionsdele, som fx kant- og autoværnselementer.

Pletreparationer er det hyppigst anvendte reparationsprincip. For at opnå et holdbart resultat kræves imidlertid særdeles stor omhu ved såvel forundersøgelser som gennemførelse. I praksis må man regne med, at en vis procentdel af reparationerne skal genrepareres i kantområderne efter en kortere årrække.

Maling og imprægnering som forholdsregel mod chloridindtrængning har været anvendt gennem en årrække, men opfølgningen på effekten af disse forholdsregler har været minimal, og der er på nuværende tidspunkt ingen eller meget begrænset dokumentation for den chloridbremsende effekt af forskellige malingssystemer og imprægneringsprodukter. Indenfor de seneste år har Vejdirektoratet igangsat udvikling af prøvningsmetoder og systemer til valg af overfladebehandlingsystemer til bremsning af chloridindtrængning, [35], [36], men der eksisterer endnu ikke nogen dokumenteret sammenhæng mellem resultater af laboratorieprøvning og effekten under praktiske forhold.

Katodisk beskyttelse har været anvendt gennem en årrække med gode resultater. En ulempe ved metoden er, at den kræver regelmæssigt tilsyn.

3.2.2 Marine konstruktioner

I dette afsnit behandles forholdene på de havvandspåvirkede dele af marine konstruktioner. Forholdene for de fuldt neddykkede områder er kun sporadisk berørt. Vurderingerne er baseret på en gennemgang af tidligere undersøgelser og på generel viden på området.

Holdbarheden af havvandspåvirkede konstruktionsdele på danske kystbroer er generelt god for de konstruktioner, hvor alkali-kiselreaktioner ikke er en overvejende nedbrydningsmekanisme. Det skyldes, at der ved opførelsen af større broer traditionelt er anvendt materialer og principper, der ud fra samtidens viden er anset for at være bedst mulige, samt at miljøpåvirkningerne i marine omgivelser er relativt konstante.

Øvrige marine konstruktioner, (havneanlæg), er generelt i en dårligere forfatning end kystbroernes pillerkafter. Dette skyldes antageligt, at der ikke har været samme opmærksomhed om at sikre holdbarheden ved konstruktionen af disse anlæg, samt at hovedparten af den synlige del af havneanlæg befinder sig i splash- og tidevandszonen. Derudover er havneanlæg udsat for mekaniske påvirkninger i forbindelse med anløb af skibe.

Fra analysen af informationer vedrørende chloridindtrængning og holdbarhed af 12 marine konstruktioner kan følgende tendenser fremhæves:

Konstruktioner med skader og/eller reparationer: Storstrømsbroen, Langelandsbroen, Stignæs havn (visse byggeafsnit) og Limfjordstunnelen:

- For disse konstruktioner er der i udbredte områder målt en stor chloridindtrængning.
- Der er meget lidt systematik i chloridindtrængning og skadeudvikling, der kun i meget begrænset omfang afhænger af højde over vandlinjen og orientering i forhold til verdenshjørner. På Langelandsbroen er der dog en klar tendens til kraftigst skadeudvikling på østsiden af pillerne.

Det usystematiske skade- og chloridindtrængningsbillede er eksempelvis forårsaget af usystematiske udførelsesfejl (Langelandsbroen, Storestrømsbroen, [37],[38]) og alkali-kiselreaktioner (Storstrømsbroen, [38]).

Konstruktioner uden væsentlige skader eller reparationer: Farøbroerne (piller, pyloner), Vejle Fjord Broen (sektioner med portland cement og slaggecement), Alssundbroen, broen over Sorterenden, Halsskov Færgehavn.

- Chloridindtrængningen er generelt væsentligt mindre for disse konstruktioner, end for de skadede konstruktioner. Det kan i et vist omfang skyldes, at disse konstruktioner i middel var yngre end de skadede konstruktioner på undersøgelsestidspunkterne.
- Chloridindtrængningen er for de uskadede konstruktioner systematisk aftagende med højden over vandlinjen. Det gælder såvel for de beregnede, effektive diffusionsparametre (den effektive diffusionskoefficient, D , og den effektive overfladekoncentration, C_s) som for den målte indtrængningsdybde af chlorioner, se fig. 5. Sammenhængen mellem D -værdien og højden over vandlinjen viser, at fugtforholdene påvirker indtrængningshastigheden og sandsynligvis også indtrængningsmekanismen.

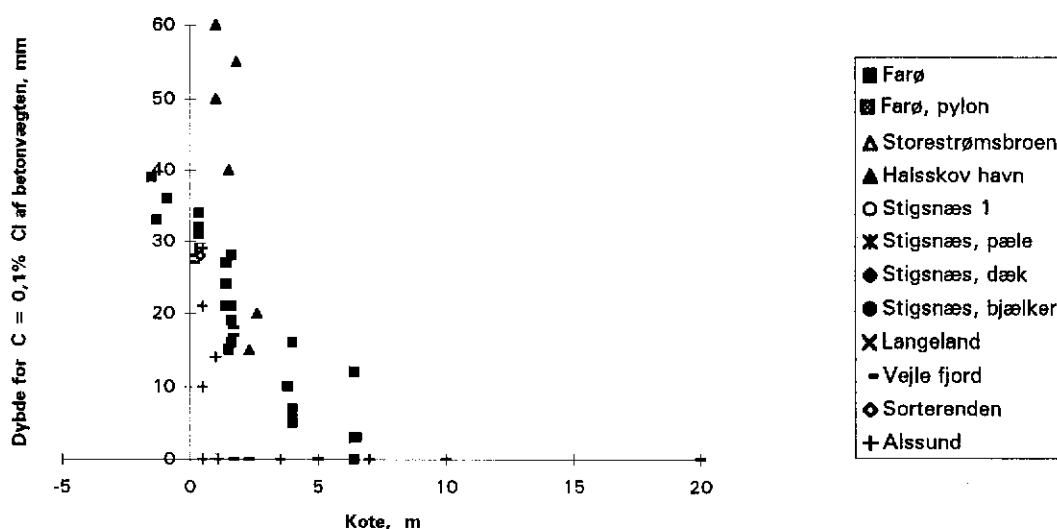


Fig. 5a Indtrængningsdybden af 0,1% chlorid. Uskadede konstruktioner.

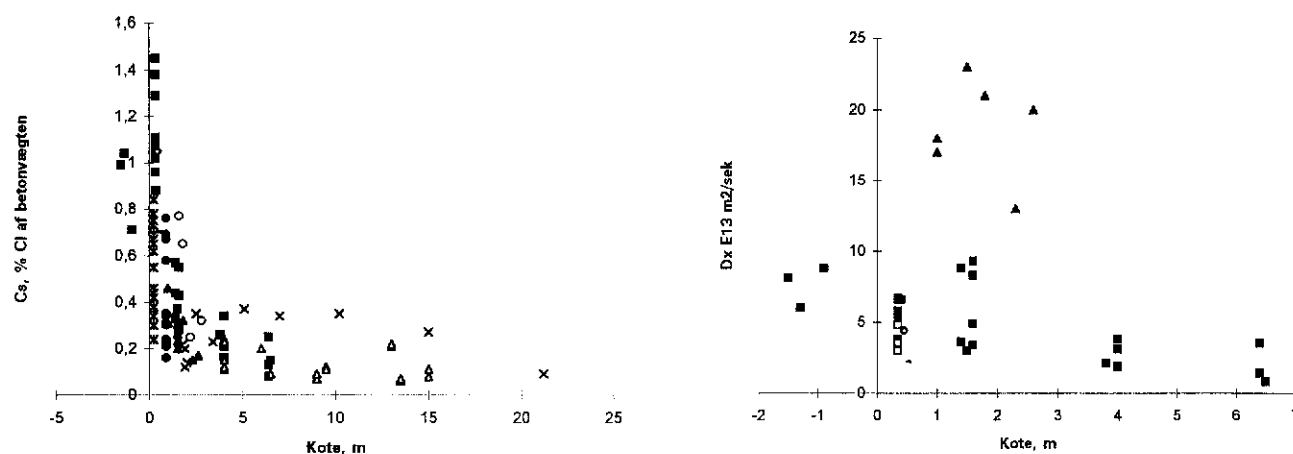


Fig. 5b Effektiv overfladekoncentration, C_s , (samtlige konstruktioner), og effektiv diffusionskoefficient, D , (uskadede konstruktioner).

Den effektive overfladekoncentration af chlorid, C_s , aftager med højden over vandlinjen. Omkring 2,5 m over vandlinjen er der en tydelig overgang, idet der over denne højde udelukkende er fundet værdier på mindre end 0,4% Cl af betonvægten, mens der fra 0 - 2,5 m over vandlinjen er registreret værdier op til 1,4% Cl. For de undersøgte, uskadede konstruktioner er indtrængningsdybden for en chloridkoncentration, der må skønnes at være kritisk (0,1% Cl af betonvægten) mindre end ca. 20 mm i kote 2,5 m og højere, mens indtrængningsdybden i området fra 0 - 2,5 m er op til 40 mm.

Samtlige marine konstruktioner:

- For marine konstruktioner har det ikke på det foreliggende grundlag været muligt at udlede noget om sammenhængen mellem på den ene side beton/konstruktive forhold og på den anden side konstruktionernes tilstand.

Der er dog en tendens til en lavere maximal transporthastighed af chlorioner ind i betonen for lave vand/cementforhold. Vand/cementforholdet for de konstruktioner, der indgår i undersøgelsen, ligger i intervallet fra 0,4 - 0,5.

I revnet beton kan transporthastigheden gennem revnerne blive dominerende. Den beregnede, effektive diffusionskoefficient, D , kan derved blive høj, uafhængigt af vand/cementforholdet.

- Der har ikke kunnet påvises nogen sammenhæng mellem den effektive diffusionskoefficient, D , målt på de forskellige konstruktioner, og konstruktionernes alder. Årsagen hertil kan være varierende betonegenskaber og eksponeringsforhold fra konstruktion til konstruktion.
- Der er ingen tendens til, at de beregnede C_s -værdier (effektiv overfladekoncentration) er højere for de ældre end for de yngre konstruktioner. C_s -værdien synes at være bestemt af den aktuelle beton i det aktuelle miljø.
- Der kan ikke drages generelle konklusioner om anvendeligheden af forskellige reparationsmetoder til marine konstruktioner. Erfaringerne fra Langelandsbroen og Storstrømsbroen viser, at selv omhyggeligt udførte pletreparationer kræver lokal genreparation bl.a. langs kanterne af reparationsområderne efter en kortere årrække.

3.2.3 Landbroer

De følgende erfaringer er opsamlet i forbindelse med særeftersyn af ca. 150 af Vejdirektoratets og DSB's broer. Et udvalg af disse broer er undersøgt to gange i perioden 1991 - 1994.

På de undersøgte broer (alder typisk 20 - 30 år) har **kantbjælkerne** indtil videre kun i begrænset omfang udvist chloridbetingede skader. Der er ikke gennemført nogen systematisk indsamling af erfaringer med kantbjælker.

Brodæk fugtisoleres i henhold til normal praksis, og chloridindtrængning finder ikke sted, så længe isoleringen er tæt. Der findes kun begrænsede mængder af informationer fra broer med utæt fugtisolering. Skadesomfang og -udbredelse må i sådanne tilfælde forventes at være betinget af de aktuelle forhold, og erfaringerne kan derfor ikke generaliseres.

Erfaringer fra **uisolerede brodæk** viser:

- Betonen i alle brodæk er chloridinficeret, men chloridindholdet varierer fra brodæk til brodæk og fra område til område på det enkelte brodæk. Typisk er chloridindholdet størst på vejbanen trods afvanding i dybderenden nær kantbjælken.
- Der er ikke konstateret betydelige skader eller målt korrosion på broerne, som i alder varierer fra 10-25 år.

Undersøgelser af **brosøjler** viser:

- Chlorid er den parameter, der har medført eller vil medføre de værste skader på brosøjler i form af korrosion. Skader som følge af alkali-kiselreaktioner er kun konstateret i få tilfælde, og da i forbindelse med initialfejl (svind- og termorevner). Skader, der alene er forårsaget af frost/tø-påvirkning, er ikke konstateret. Suppleres disse skademekanismer med chloridindtrængning og korrosion vil nedbrydningen dog kunne accelerere.
- Trods chlorids skadevoldende virkning er chloridfremkaldt korrosion kun i begrænset omfang et problem på korrekt udstøbte brosøjler. Denne vurdering er baseret på, at undersøgelserne antyder, at den største del af brosøjlerne forventes at have en levetid på over 50 år før reparation er påkrævet.
- Størrelsen af chloridophobningen er betinget af betonens kvalitet (udtrykt ved diffusionskoefficienten), trafikintensiteten, søjlens afstand til vejbanen og den udsprede saltmængde. Betonens kvalitet og den udsprede saltmængde vurderes at være de primære parametre.
- Der er en høj skadesfrekvens på brosøjler og støttemure tæt ved trafikken, antageligt p.g.a. sprøjt med saltholdigt vand.
- Chloridindholdet i betonen varierer fra søjle til søjle på samme bro og mellem de enkelte broer. Der er normalt altid størst chloridindhold ved terrænniveau, hvilket skyldes uhenigtsmæssige afvandingsforhold.
- Den nedre grænse for den kritiske chloridkoncentration er fundet til at ligge omkring 0,05% af tør betonvægt.
- Korrosionsangreb vil sjældent udvikles kritisk, uden der er synlige tegn på overfladen. Fremskredne gruppertæring med ikke-voluminøst rust er dog konstateret lokalt på enkelte søjler i og under terræn.
- Korrosionsskader er normalt mest fremskredne i terrænniveau. I særligt aggressive miljøer ses der dog skader op til 2-3 m over terræn - især på flader mod trafikken.
- I fem af de undersøgte broer er der fundet søjler så skadede, at skaderne kunne udgøre en sikkerhedsrisiko. I de øvrige søjler var skadeomfanget ikke en sikkerhedsrisiko. De fem kraftigt skadede områder er placeret ved terræn eller i støbeskellet mellem fundament og søjle.
- Ved undersøgelser af 17 broer med ca. tre års mellemrum er det konstateret, at de skadede konstruktioner nedbrydes relativt hurtigt, samt at det kun i mindre grad har været muligt at verificere det forventede initieringstidspunkt. Det skyldes bl.a., at den kritiske chloridkoncentration ikke er kendt med tilstrækkelig nøjagtighed.

3.2.4 Bygninger

De mest chloridpåvirkede konstruktionsdele i bygningskonstruktioner fremgår af fig. 6.

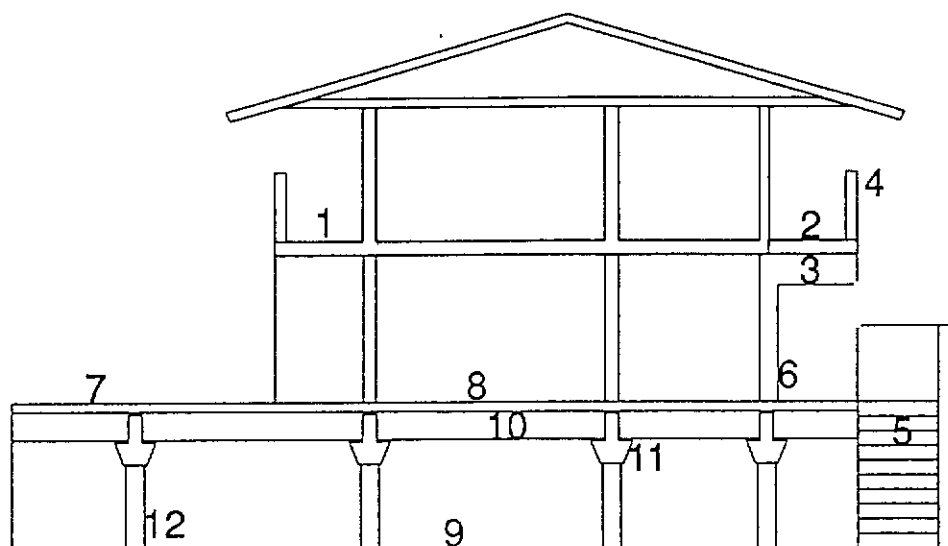


Fig. 6 Eksempel på en bygningskonstruktion med de typisk mest chloridpåvirkede konstruktionsdele. Tallene refererer til:

- | | |
|---------------------------------|---|
| 1. Altaner | 2. Altangange |
| 3. Konsoller | 4. Brystringer |
| 5. Udvendige trapper | 6. Søjler/facadeelementer ved gangareal |
| 7. Parkeringsdæk
(i det fri) | 8. Parkeringsarealer (overdækkede) |
| 9. Parkeringskældre | 10. Dækelementer |
| 11. Primærbjælker | 12. Søjler |

Chloridpåvirkningen af bygningskonstruktioner fremkommer hovedsageligt ved tørsaltning. Chloridpåvirkningen er uensartet, kortvarig, men ofte intens. Nedbrydning af tørsaltpåvirkede bygningskonstruktioner sker ofte som følge af et samspil mellem chloridindtrængning/korrosion og frost/tø-nedbrydning.

En systematisk og offentlig tilgængelig erfaringsindsamling og -formidling angående detailproblemer i bygningskonstruktioner sker blandt andet i BYG-ERFA-regi. Her findes dog ikke adgang til de data, der på en fyldestgørende måde kan bruges til at beskrive chloridindtrængningen i beton i bygningskonstruktioner. De enkelte bygningsejere, der har haft problemer eller mistanke om problemer, der er afledt af chloridindtrængning i beton, ejer sådanne informationer om deres bygninger, og udenforstående kan ikke umiddelbart få adgang til dem. Dette besværliggør i denne sammenhæng en detaljeret erfaringsformidling på området.

Altaner, der udelukkende er opholdsaltaner, bør ikke saltes. Altangange bør kun saltes, hvis de er konstrueret til det. Saltes der alligevel, opstår der undertiden holdbarhedsproblemer. Problemerne afhænger af altanens konstruktive udformning. To meget anvendte typer er:

- In-situ støbte etageadskillelser, der er forlænget, så altanen/altangangen er udkraget.
- Præfabrikerede betonaltanelementer, der er lagt op på konsoller.

Begge typer kan give holdbarhedsmæssige problemer, men af forskellige årsager. Med hensyn til udformningen af nye betonaltaner henvises til ref. [39].

Konsoller, der bærer altanelementer, udsættes for chloridpåvirkning, når altanernes afvandingsforhold er utilstrækkelige eller i forbindelse med utætte fuger. Det kan være overordentligt kompliceret at reparere sådanne konsoller. I de seneste år er undertiden anvendt en dobbeltsikring bestående af katodisk beskyttelse i kombination med traditionel reparation.

Brystninger og søjle/facadeelementer, der er placeret tæt på gangarealer bliver påvirket af chlorid som følge af opsprøjtet smeltevand, sne og sjap. Chloridpåvirkningen afhænger derfor betydeligt af niveauet i forhold til den tørsaltede flade.

Udvendige trapper bliver typisk skadet som følge af en kombination af frost/tø-påvirkning og samtidig saltning. **Uoverdækkede P-dæk** udsættes for tilsvarende vejrpåvirkninger, men da sådanne dæk ofte er udført med en fugtisolering på oversiden, er antallet af skadetilfælde lille.

Overdækkede P-dæk og tørrændæk i P-kældre er udsat for stærkt varierende chloridpåvirkninger. Påvirkningerne afhænger af bl.a. trafikintensitet, parkeringsmønstre, udstrøet saltmængde og afvandingsforhold. Overdækkede P-kældre og tørrændæk i P-kældre udføres ofte uden fugtisolering og med utilstrækkelige afvandingsforhold, hvilket har medført en ret stor skadeshyppighed.

3.2.5 Svømmehaller (bassiner og omgivende konstruktionsdele)

Korrosionsmiljøet i svømmehaller er særdeles aggressivt. Det skyldes en kombination af en række faktorer, herunder: NaCl-tilsætning til bassin vandet, udbredt anvendelse af syreholdige rengøringsmidler, høj luftfugtighed, store arealer, der hyppigt udsættes for sprøjt, samt konstant høj temperatur.

Den lange række af skader, der er set på svømmehaller opført i 1960'erne og 1970'erne, kan opdeles i generelle skader, ofte forårsaget af en kombination af alkali-kiselskader og chloridbetinget korrosion, samt skader forårsaget af u hensigtsmæssigt udførte detaljer. Med vore dages beton-teknologiske viden er det muligt, at fremstille beton af en tilstrækkelig god kvalitet til at sikre en tilfredsstillende generel holdbarhed. Problemerne synes snarere at bestå i at løse de mange konstruktive detailproblemer, så skader undgås. Der henvises i øvrigt til ref. [40].

Tabel 6 giver et overblik over de forhold, der erfaringsmæssigt giver anledning til problemer ved opførelsen af nye svømmehaller, samt ved reparation af eksisterende svømmehaller. I tabellen er angivet en "indikator". Indikatoren er beregnet som produktet af skadeomfang og omkostningerne til udbedring af skaderne. Indikatoren kan anvendes som retningsgivende for, hvilken prioritet de forskellige dele af en svømmehal kan tillægges ved dens opførelse eller vedligeholdelse. En høj værdi af indikatoren svarer til en høj prioritet. Tabellen er en erfaringsbaseret vurdering af ca. 25 svømmehallers tilstand.

Tabellen gælder for konstruktioner, der ikke er skadet af alkalikiselreaktioner. Tabellen viser, at det i særlig grad er detaljer omkring støbeskel og dæk/vægsamlinger, der kræver opmærksomhed.

Vurderet omfang af skader i svømmehaller	A = Gennemsivning B = Revnedannelser C = Armeringskorrosion						I = Holdbarhed II = Udformning III = Påvirkning			Indikator A2+B2+C2
	Skadesomfang			Omkostninger			Skadesårsag			
Skadessted	A	B	C	A	B	C	I	II	III	
Bassinvægge	1	2	1	3	1	3	1	3	1	8
Dæk	2	2	1	2	2	1	1	3	1	9
Skvulpe-/overløbsrender	1	3	2	1	2	3	1	3	2	13
Dæk/vægsamling	3	1	3	3	1	3	1	3	1	19
Konstruktioner omkring bassin	1	1	3	1	1	2	2	2	1	8
Terrassering	1	3	2	1	1	2	1	1	2	8
Adgangstrapper	1	3	2	1	1	2	1	1	2	8
Søjler/Dragere	1	1	3	1	2	3	1	3	2	12
Springtårne	1	1	3	1	2	3	1	2	3	12
Hæve/Sænkebroer	1	1	3	1	1	2	1	3	3	8
Vandruitschebaner	1	1	0	1	1	0	1	2	1	2
Fuger	3	2	1	1	1	2	3	1	3	7
Støbeskel i bassin	3	3	3	2	2	3	2	3	2	21
Gennemføringer/undervandsvinduer	3	1	2	3	2	3	1	3	2	17
Udlignings- og filterbassiner	1	3	3	2	2	3	1	1	3	17

Omfang/Omkostning/Årsag: 0 = Ingen; 1 = Lille; 2 = Middel; 3 = Stor

Tabel 6: Vurdering af skadetyper, -årsager og -omfang i svømmehaller uden samtidige alkaliskel-skader. Den beregnede indikator peger på hvilke detaljer, der bør ofres særlig opmærksomhed ved projektering og vedligeholdelse.

Bassiner mm.:

Holdbarhedsproblemer som følge af generel chloridindtrængning i urevnede bassinvægge forventes ikke at blive et problem, hvis betonen er tilstrækkeligt tæt, og dæklaget tilstrækkeligt tykt. Eventuelt kan man indbygge en ekstra sikkerhed ved anvendelse af en chloridtæt eller chloridbremsende membran.

Få revner, fx opstået som følge af en for stor temperaturdifferens og/eller et for stort differenssvind imellem bassinvæg og bund (fundament), kan og bør tætnes ved injektion, når revnevidden ikke længere ændres væsentligt. Erfaringen siger, at hvis bassinvæggen herved bliver tæt, vil den også forblive tilstrækkelig tæt til, at det ikke giver anledning til skader på beton og armering.

Ofte ses utætheder ved støbeskellene i svømmebassiner, specielt ved bund/vægsamlingen, ved endevæggene, samt der hvor bassindybden eventuelt ændres over en kort strækning. Er støbeskellet utæt, er korrosion på den bærende armering sandsynlig. Hvis støbeskellet har været utæt i en periode, inden der igangsættes reparation, bør armeringen inspiceres, før det rigtige indgreb kan foretages. Det kan overvejes at anvende rustfri stål, når armeringen skal passere støbeskellet.

En række installationer, som fx adgangstrapper og hæve-sænke broer og -bunde, monteres i bassinvæggene. Installationen, der typisk udføres ved klæbeanker-montage, kan give anledning til skader på betonkonstruktionen. Den sikreste måde at undgå dette problem ved udførelsen af nye konstruktioner er at medtage fastgørelsesstederne i detailprojekteringen af betonkonstruktionen.

Gennemføringer samt installation af undervandsvinduer kræver særlige foranstaltninger for at blive vandtætte.

Skulpe/overløbsrender og dæk/vægsamlinger er ligeledes kritiske detaljer. Udførelsesmæssigt må en overløbsrende foretrækkes frem for en skulperende, idet udstøbningsforholdene her er bedst, om end ikke gode. Fælles for skulpe- og overløbsrender er, at fugen mellem dæk og væg skal tætnes direkte oven på betonen. Denne fuger er kritisk, og den skal være tæt for at forhindre bassinvandet i at trænge ned i vederlaget for dækket, på bassinvægsydside og på dækunderside, hvor det vil kunne fordampe og efterlade salte på betonoverfladen. Disse salte vil efterhånden føre til armeringskorrosion, og undertiden smuldrer betonen.

Øvrige konstruktioner og detaljer:

De gulve (dæk), der støder op til og omgiver et svømmebassin er næsten lige så chloridpåvirkede som bassinvæggene. En klinkebelægning yder en vis beskyttelse, men ofte er fuger- og læggemørtlen så porøs, at den må opfattes som vandførende. Derfor skal overfladen på betondækket være lige så modstandsdygtig mod bassinvand som bassinvæggene. Endvidere skal afvandingsforholdene såvel på klinkeoverfladen som på betondækket være veldefinerede.

Øvrige konstruktioner så som søjler, bjælker, terrassering (tilskuerpladser) og springtårne er chloridpåvirkede p.g.a. sprøjt og det bassinvand, de badende medbringer fra bassinet. Konstruktionerne påvirkes derfor i særlig grad, hvis disse konstruktioner anbringes tæt på bassinet.

Fugernes funktion er at komplettere flader og samlinger, så effektiv rengøring er mulig. Derudover har fugerne en vandafvisende funktion. Utætte fuger kan forøge chloridpåvirkningen af konstruktioner i fx ingeniørgangen. I svømmehaller er problemet med hårde mørtelfuger, at de ofte angribes af rengøringsmidler. Bløde fuger kan miste deres vedhæftning, krakkelere eller eventuelt pilles ud af badegæsterne.

4 Anbefalinger

Konstruktions- og udførelsesfase:

- Konstruktive forholdsregler, der hindrer eller reducerer adgang af chlorid til betonoverfladen, bør altid have høj prioritet. Ved at hindre eller reducere adgangen af chlorid kan kommende reparationer undgås, og omkostninger til fremtidig tilstandsvurdering minimeres.
- Ved betonproportioneringen bør der altid optimeres ud fra en helhedsbetragtning. Det kan være hensigtsmæssigt at vælge en betonsammensætning, der ikke er optimal ud fra et snævert hensyn til tæthed mod chloridindtrængning gennem cementpastaen, men som til gengæld er afpasset valget af konstruktiv udformning og produktionsform, således at mængden af defekter minimeres. Forundersøgelser, der dækker hele produktionsprocessen, bør altid udføres i god tid, hvis nye kombinationer af betonsammensætning og produktionsteknologi skal tages i anvendelse.
- Vedligeholdelsessynspunkter bør inddrages allerede i designfasen. Skader opstår hyppigt i forbindelse med detaljer, som fx fuger der viser sig vanskelige at vedligeholde.
- Omhyggelig kontrol og tilsyn med arbejdets udførelse anbefales.

Driftfasen:

- Det sikreste skøn over en konstruktions restlevetid fås ved at opstille - og regelmæssigt opdatere - en levetidsmodel for konstruktionen. Denne fremgangsmåde kan i særlig grad anbefales for konstruktioner, der ønskes forebyggende vedligeholdt. Opdatering af modellen sker på grundlag af regelmæssige tilstandsvurderinger af konstruktionen påbegyndt før det tidspunkt, hvor der opstår skader. Eventuelt suppleres med overvågning ved hjælp af indbyggede måleelektroder. Informationer om initierings- og propageringsforløbet for ældre, tilsvarende konstruktioner kan eventuelt indgå i modelopstillingen.
- På trods af at der tages principielle forbehold mod en generel og ukritisk anvendelse af Fick's anden lov i forbindelse med restlevetidsvurderinger af betonkonstruktioner, kan det anbefales, at denne transportmodel fortsat anvendes under forhold, hvor man må antage, at diffusion er den dominerende transportmekanisme. I den forbindelse skal det nøje overvejes, hvilke fejl man introducerer i sine vurderinger ved at anvende en transportmodel, der ikke fuldt ud afspejler de fysiske forhold.

Alternativet til en fortsat anvendelse af Fick's anden lov ville være at bygge restlevetidsvurderinger alene på erfaringer og skøn eller at anvende andre transportmodeller, hvis sammenhæng med de fysiske forhold i betonen er dårligere beskrevet end det er tilfældet for Fick's lov. Det skønnes, at usikkerheden herved vil være større end ved at anvende Fick's lov.

- Det kan anbefales, at der udarbejdes systemer for registrering af informationer om større konstruktioner. Disse informationer bør omfatte nøgleoplysninger om materialer, konstruktion og udførelse. Derudover bør det tilstræbes, at tilstandskontrollen af sådanne konstruktioner systematiseres, således at prøveudtagning og målinger udføres og præsenteres på en ensartet og sammenlignelig måde, med mindre der er tekniske begrundelser for at gøre det anderledes. Denne fremgangsmåde vil på længere sigt gøre det muligt med større sikkerhed at uddrage erfaringer om årsagssammenhænge i forbindelse med holdbarhed.
- Ved planlægningen af tilstandskontrol med henblik på en efterfølgende restlevetidsvurdering kan det anbefales, at planlægningen afpasses efter usikkerheden på de parametre, der påvirker levetiden. Stor usikkerhed på bestemmelsen af den kritiske chloridkoncentration og propageringsfasen kan typisk gøre det mindre væsentligt at kortlægge chloridindtrængningen med stor nøjagtighed.
- Det kan anbefales, at større bygherrer etablerer en systematisk, stikprøvevis opfølgning på virkningen og holdbarheden af pletreparationer, diverse typer af overfladebehandlinger og andre vedligeholdelsesprincipper. Denne fremgangsmåde vil på længere sigt gøre det nemmere at foretage et rationelt valg af vedligeholdelsesmetoder.

Videnopbygning om materialer og metoder:

- En målrettet indsats for at verificere anvendeligheden af levetidsmodeller anbefales. Indsatsen omfatter både modeller til levetidsbaseret design og til restlevetidsvurderinger af eksisterende konstruktioner.

Væsentlige forhold, der bør undersøges, er chloridindtrængningens tidsafhængighed samt hvorledes den kritiske chloridkoncentration kan fastlægges for en given konstruktion (eller et område heraf). I den forbindelse kan udvikling af en metode til måling af frit chlorid anbefales. Metoden skal være generelt anvendelig, dvs. kunne bruges på et bredt udsnit af forskellige betontyper og fugtindhold.

- Udvikling og eftervisning af alternative transportmodeller kan anbefales. Her tænkes i særdeleshed på modeller, der kvantitativt tager hensyn til fugttransport (typisk udtørring/opfugtning). For tætte betontyper kan det endvidere være relevant at undersøge, om modeller baseret på fx percolationsteori giver mere sikre levetidsforudsigelser.
- Undersøgelse af anvendeligheden af sandsynlighedsteoretiske metoder anbefales. Sådanne metoder gør det i princippet muligt at foretage en analyse på basis af usikre data. Estimeres fx tiden til korrosionsinitering på basis af usikre data, vil usikkerheden på estimatet være tilsvarende stor, men vil kunne nedbringes ved efterfølgende tilstandsvurdering.
- Systematiske undersøgelser af den holdbarhedsmæssige effekt af mikrodefekter bør gennemføres hurtigst muligt. Ud fra et forsigtighedshensyn søges forekomsten af mikrodefekter i dag minimeret, selvom den holdbarhedsmæssige effekt af disse defekter ikke er kendt. De økonomiske konsekvenser af denne fremgangsmåde kan være store.
- Videnopbygning om effekten af tilsætningsstoffer på chloridindtrængning og holdbarhed anbefales. Disse stoffers indflydelse på de forhold, der styrer chloridindtrængningen er generelt dårligt belyst.
- Udviklingen af ikke-destruktive metoder til vurdering af korrosion eller brud i kabler i rør bør holdes under observation. Formaliseret kontakt til udenlandske forskningsprogrammer bør etableres. Manglen af en relevant metode til dette formål skønnes at være den væsentligste mangel med hensyn til metoder til tilstandsvurdering.

Litteraturliste

1. DIF-Norm for jernbetonkonstruktioner, revideret udgave 1930, Dansk Ingeniørforening, 1930.
2. DIF, Dansk Ingeniørforenings norm for betonkonstruktioner, 2. udg., DS 411, Normstyrelsen, 1973.
3. Plum, N. M., Jessing, J., Bredsdorff, P., and Spoehr, H., A new approach to testing of building materials, Bulletin RILEM, no. 30, pp. 123-138, 1966.
4. Fagerlund, G., Service life of structures, Proc. Rilem symposium Quality control of concrete Structures, Stockholm, vol. 3, pp. 199-215, Cement och Betong Institutet, Stockholm, 1979.
5. Nielsen, A., Betonkonstruktioners levetid, Nordisk Betong, no. 5, pp. 25-26, 1976.
6. Tuutti, K., Stålets korrosionsförlopp i osprucken betong - en hypotes, CBI forskning 4:77, Cement och Betong Institutet, Stockholm, 1977.
7. Tuutti, K., Corrosion of steel in concrete, CBI research, Fo 4, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.
8. Crank J.: Mathematics of diffusion. 2nd. edition, Oxford University Press. 1975.
9. Betonsvømmebassiners tilstand. Undersøgelser af skader på og reparationer af betonsvømmebassiners. Fase 2. Undersøgelse af skadestyper. Dansk Svømmebadsteknisk Forenings publikation no. 24/1988.

10. Hausmann, D. A., Steel corrosion in concrete, *Materials Protection*, November, pp. 19-23, 1967.
11. Petterson, K., Chloride threshold value and the corrosion rate in reinforced concrete. Nordisk Miniseminar: Feltnmålinger for Levetidsmodellering, Lund, 1995.
12. Browne, R.D. et al, Marine durability survey of the Tongue Sands Tower. Concrete in the oceans programme. Technical report no 5. C&CA, London, 1980.
13. CEB Design Guide. Durable concrete structures. Thomas Telford Ltd. 1989.
14. Concrete Society, Technical report no. 22. Non-structural cracks in concrete.
15. Basis betonbeskrivelsen for bygningskonstruktioner, Bygge- og Boligstyrelsen, København, 1986.
16. Betonbogen, 2. udgave, CTO, 1985.
17. Udbuds- og anlægsforskrifter for betonbroer. AAB. Vejdirektoratet, Okt. 1989.
18. Frandsen J., Planlægning og udførelse af støbning og efterbehandling specielt for konstruktioner til den faste forbindelse over Storebælt, udgivet til kursusbrug for A/S Storebæltsforbindelsen af Dansk Betoninstitut A/S, København, 1992.
19. DIF, Dansk Ingeniørforenings norm for betonkonstruktioner, 3. udg., 6. oplag, DS 411, Normstyrelsen, 1994.
20. Klinghoffer, O., In situ monitoring of reinforcement corrosion by means of electrochemical methods. Nordisk Miniseminar: Feltnmålinger for Levetidsmodellering, Lund, 1995.
21. Geiker, M.R., Henriksen, C. og Thaulow, N. Design for durability: A case story. *Concrete 2000*, redigeret af R.K. Dühr og M.R. Jones. E&FN Spon, 1993.
22. Poulsen, E., Beton og 100 års levetid, Dansk betondag 1990, Dansk betonforenings publikation nr. 36.
23. Sandberg, P. og Tang, L., A field study of the penetration of chlorides and other ions into a high quality concrete marine bridge column. *Canmet/ACI, SP145-29*, pp 469-486, 1994.
24. Kloridbestandighed for kystbruer af betong. *Byggforsk* 1993.
25. Kloridbetinget korrosion. Undersøgelse af kloridbelastning og korrosion på brosøjler. Vejdirektoratet, 1991.
26. Nilsson, L.-O., Massat, M and Luping, T., The effect of non-linear chloride binding on the prediction of chloride penetration into concrete structures. *Canmet/ACI, SP145-24*, pp 469-486, 1994.
27. Vejdirektoratet, M30-066 og M30-0068, Farøbroerne, Chloridprojekt, Opfølgende målinger, 1994. (Ikke offentliggjort).
28. Fagerlund, G., A composite-material model for the chloride diffusivity of uncracked and micro cracked concrete. Nordisk Miniseminar: Chloridindtrængning i betonkonstruktioner, Chalmers 1993.

29. Bentz, D.P. og Garboczi, E.J., Percolation of phases in a three-dimensional cement paste microstructural model, *Cement and Concrete Research*, Vol 21, No 2/3, pp 325, 1991.
- 30: Johansen, V., og Thaulow, N., The modelling of micro structure and its potential for studying transport properties and durability. RILEM Workshop, Juli 1995.
- 31: Hansson, C.M. and Sørensen, B., The threshold concentration of chloride in concrete for the initiation of reinforcement corrosion, ASTM STP 1065, 1990.
- 32: Sandberg, P., Chloride initiated reinforcement corrosion. Licentiate thesis, Lund Institute of Technology, 1995.
- 33: Erfaringer med anvendelse af mikrosilicabeton. Fiskebækbroens kantelementer, Vejdirektoratet, Driftsområdet, Rapport nr. 20. 1995.
- 34: Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Proceedings fra internationalt symposium, Berlin. 1995.
- 35: Udbuds- og anlægsforeskrifter, Betonbroer, Vejledning i overfladebeskyttelse af betonbroer, Vejdirektoratet, København, 1993.
- 36: Frederiksen, J.M., Beskyttelse af beton mod salt, malingsystemer, metodeudvikling, modeller, Vejdirektoratet, Broafdelingen, Rapport 7, København 1994.
- 37: 206-0003 Langelandsbroen. TILSYNSRAPPORT. Reparation af bro piller og underside af overbygningen, Vejdirektoratet, 1984. (Ikke offentliggjort).
- 38: Storstrømsbroen, Reparation af piller, DSB, 1986. (Ikke offentliggjort).
- 39: Olesen, S.Ø. & Abrahamsen, P., Betonaltaners konstruktive udformning, *Beton 5*, Statens Byggeforskningsinstitut., Hørsholm, 1987.
- 40: Norm for Svømmebadsanlæg, Forslag til dansk standard, udkast, København, august 1994.

Dansk Betonforening's publikationer:

Publ. nr.	Titel	Løssalgspris	
34:89	"Anvisning for genanvendelsesmaterialer i beton til passiv miljøklasse"	Kr.	45
Uden nr.	Tillæg til nr. 34:89 (udg. 1995)	Kr.	45
35:90	"Anvisning for efterbehandling af beton"	Kr.	30
36:90	"Dansk Betondag 1990"	Kr.	55
37:91	"Dansk Betondag 1991"	Kr.	70
38:92	"Anvisning i katodisk beskyttelse"	Kr.	45
39:92	"Dansk Betondag 1992"	Kr.	70
40:93	"Dansk Betondag 1993"	Kr.	60
41:94	"Dansk Betondag 1994"	Kr.	60
42:95	"Dansk Betondag 1995"	Kr.	70
Uden nr.	Kontroljournaler 1988 – Blanketter m/vejl.	Kr.	75
Uden nr.	"Concrete Across Borders 1994"	Kr.	250
Uden nr.	"Nordic Concrete Development 1995"	Kr.	150
Uden nr.	Abonnement "Nordic Concrete Research"	NKr.	100
Uden nr.	Tidl. udgivelser "Nordic Concrete Research" pr. stk.	NKr.	150
Uden nr.	Abonnement på DBF's publikationer	25% rabat	

Ovenstående kan rekvireres ved skriftlig henvendelse til:

Ingeniørforeningen i Danmark

Mødereistreringen
Vester Farimagsgade 29
1780 København V

Fax nr. 33 15 37 07

ISSN -0106-0406
ISBN-87-87823-45-4