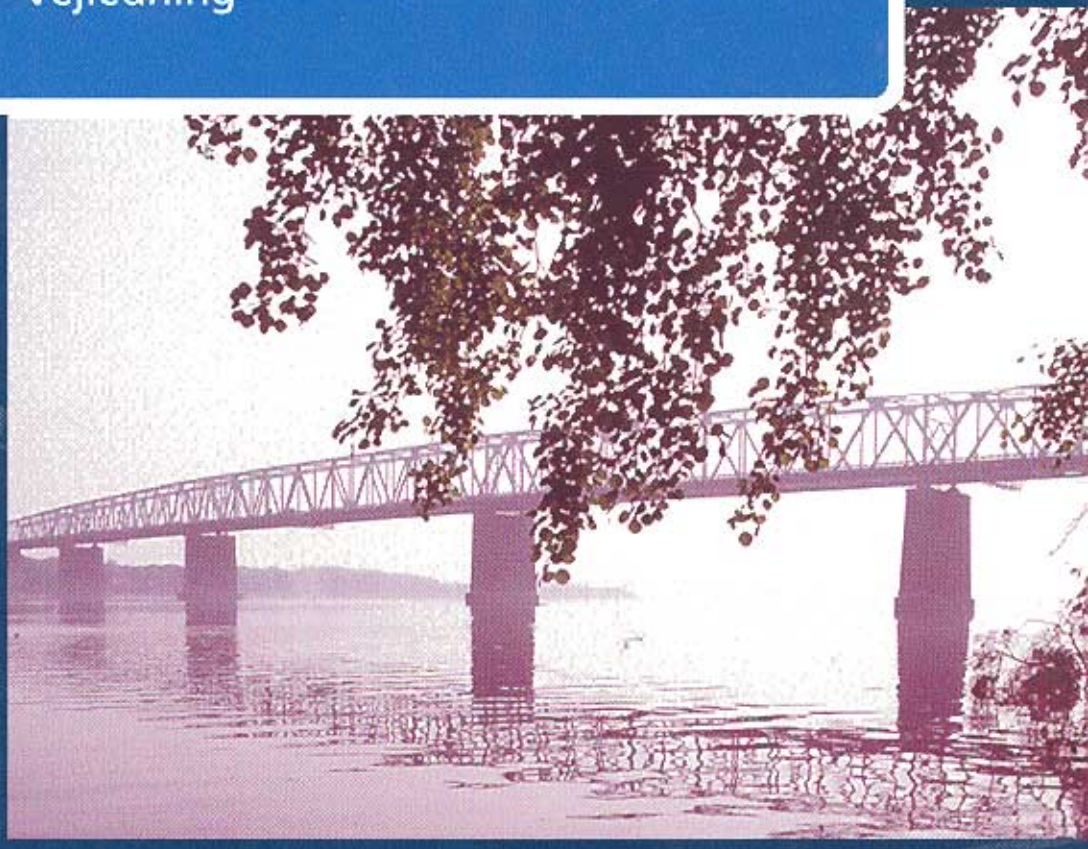
HETEK

Chloridindtrængning i beton
Vejledning



Rapport nr. 87
1997

Vejdirektoratet

IRRD Information

Title in English:	HETEK, Chloride penetration into concrete - manual
Titel på dansk:	HETEK, Chloridindtrængning i beton - vejledning
Authors:	J.M. Frederiksen & E. Poulsen
Subject classification:	Field 32: Concrete

Key words:

Concrete	4755
Chloride	7314
Bridge	3455
Salt (de-icing)	2598
Moisture content	5920
Suction	5771
Drying	5184
Diffusion	6769
Cracking	5211
Environment	2455
Denmark	8028

Uncontrolled terms: Threshold value

Abstract:

This report is part of a series of reports generated in the research project HETEK headed by the Danish Road Directorate. The present sub task is concerning chloride transport into concrete and this report should be regarded as the main report of this sub-task and a manual for design, execution and maintenance concrete structures exposed to chloride.

The aim of the manual is to give the reader a systematic basis for the design, execution, survey and maintenance of concrete bridge structures exposed to de-icing salts and/or marine environment in the climatic zone around Denmark and the South of Sweden.

The manual presents a complete system comprising mathematical models, expectation values, acceptance criteria and rules of thumb to ease the design and construction of durable concrete in saline environments. The manual does not give the full design or construction basis, only those parts that are directly connected to the durability of concrete towards chloride ingress.

In the end the manual presents an overview of the results of this entire HETEK sub task.

UDK: 691.32, 547.22, 553.63
ISBN: 87 7491 787 0
ISSN: 0909 4288

Indhold

1 Forord ..... side 1
1.1 Baggrund ..... side 1
1.2 Formål ..... side 2
1.3 Opbygning ..... side 2
1.4 Detaljerede oplysninger ..... side 3
1.5 Begrænsninger ..... side 3

2 Introduktion ..... side 5
2.1 Chlorids skadevirkning i armeret beton ..... side 5
2.2 Nogle betydningsfulde begreber ..... side 5
2.3 Chloridindtrængningens tidsafhængighed ..... side 6

3 Betons holdbarhed ..... side 9
3.1 Formulering af behov ..... side 9
3.2 Nedbrydningsårsager ..... side 9
3.3 Forholdsregler mod gængse nedbrydningsårsager ..... side 9
3.4 Betingelser for chloridmodstandsevne ..... side 10
3.5 Levetidsberegninger ..... side 10

4 Projektering ..... side 11
4.1 Generelle synspunkter ..... side 11
4.2 Krav til delmaterialer, betonsammensætning og fremstilling ..... side 11
4.3 Lokalmiljøklasser ..... side 12
4.4 Betons respons på chloridpåvirkning ..... side 13
4.5 Tærskelværdier for korrosionsinitiering ..... side 13
4.6 Marine betonkonstruktioner ..... side 13
4.7 Konstruktioner i vejmiljøet ..... side 20
4.8 Konstruktioner udsat for marin atmosfære og tøsalt ..... side 21
4.9 Eksempel på estimering af initieringsperioden ..... side 21
4.10 Levetid ..... side 22
4.11 Sikkerhedsfilosofi ..... side 24
4.12 Konstruktive revners betydning ..... side 25
4.13 Krav til dæklagsdimensionering ..... side 25
4.14 Opstilling af acceptkriterier ..... side 27
4.15 Prøvningsmetoder ..... side 27
4.16 For- og kontrolprøvning ..... side 28

5 Udførelse ..... side 29
5.1 Betonsammensætning ..... side 29
5.2 Udførelsesmetoder ..... side 29
5.3 Fine revners betydning ..... side 30

6 Drift og vedligeholdelse ..... side 33
6.1 Økonomiske aspekter ..... side 33
6.2 Plan for inspektion ..... side 33
6.3 Inspektionsomfang ..... side 33
6.4 Inspektionsmetoder ..... side 34
6.5 Vedligeholdelse og overfladebeskyttelse ..... side 35
6.6 Reparationer ..... side 35

7 Sammenfatning af delopgaven ..... side 37
7.1 Status ved delopgavens begyndelse ..... side 37
7.2 Undersøgelse af *v/c*-forholdets betydning ..... side 38
7.3 Undersøgelse af danske vejbroer in-situ ..... side 38
7.4 Teoretisk grundlag for estimering af chloridindtrængning ..... side 39
7.5 Samling af prøvningsmetoder ..... side 40

8 Konklusion ..... side 41

9 Referencer ..... side 43

10 Symbolforklaring ..... side 49

1 Forord

I HETEK projektet er der 8 delopgaver. Nærværende delopgave omhandler chloridindtrængning i beton. Delopgaven er udført af konsortiet ACCE, der består af AEC, Chalmers og Cementa.

1.1 Baggrund

Vejdirektoratet har igangsat en række forsknings- og udviklingsprojekter i 1995. De skal gennemføres og rapporteres i løbet af 1996 og primo 1997. Hele projektet er navngivet HETEK, hvilket er en forkortelse af Højkvalitetsbeton, Entreprenørens TEKnologi. Projektet indeholder 8 delopgaver:

1. Prøvningsmetoder til bestemmelse af højkvalitetsbetons chloridmodstandsevne
2. Prøvningsmetoder til bestemmelse af højkvalitetsbetons frostbestandighed
3. Selvudtørring
4. Hærdeteknologi
5. Udstøbning og bearbejdning (komprimering)
6. Efterbehandling
7. Vejledning i prøvestøbninger
8. Reparationer i udførelsesfasen

Hver delopgave skal beskrive state-of-the-art, identificere behovet for supplerende forskning, udføre en del af denne og ende med at give en vejledning om emnet for entreprenøren.

Fra denne delopgave er der tidligere udgivet en række rapporter. State-of-the-art rapporten om chloridindtrængning i beton er udkommet som første rapport i denne delopgave. Den første forskningsrapport beskriver et eksperimentelt studium af betydningen af *v/c*-forholdet for chloridindtrængning. Den anden forskningsrapport beskriver chloridindtrængning i vejmiljøet på baggrund af feltundersøgelser af chlorid- og fugtindhold i en række vejbroer. Den tredje rapport giver den teoretiske baggrund for delopgavens endelige mål: Et system til estimering af levetiden for anlægskonstruktioner af beton udsat for chloridpåvirkning fra havvand eller tøsalte.

1.1.1 Vedrørende HETEK-1

Forskningskonsortiet ACCE blev valgt til at gennemføre HETEK's første delopgave HETEK-1, der omhandler højkvalitetsbetons modstandsevne overfor chloridindtrængning. Målet for HETEK-1 er at revurdere eksisterende prøvningsmetoder og udvikle nye metoder til bestemmelse af chloridindtrængning i højkvalitetsbeton. Metoderne skal kunne tage hensyn til forskelle i miljøpåvirkninger på betonkonstruktioner. Kvantitative godkendelseskriterier skal fastlægges for at sikre overensstemmelse mellem de holdbarhedsmæssige krav og økonomien i forbindelse med anvendelse af metoderne skal vurderes.

1.1.2 Forskningskonsortiet

Forskningskonsortiet ACCE består af 3 partnere: AEC, Chalmers Tekniske Højskole og Cementa AB.

AEC Rådgivende Ingeniører A/S er et dansk privatejet rådgivende ingeniørfirma. AEC beskæftiger sig hovedsageligt indenfor området betonkonstruktioner og med emner relateret til reparation, holdbarhed og vedligehold af disse. Typiske kunder hos AEC er andre rådgivere, entreprenører, bygherrer, forsikringsselskaber og leverandører samt producenter af materialer til reparation og vedligehold. Firmaet har to afdelinger: Konstruktionsafdelingen, der tilbyder konsulentbistand vedrørende specielle bygningsopgaver og traditionel rådgivning indenfor byggebranchen. Afdelingen for materialeteknologi, AEClaboratoriet, udfører tilstandsvurderinger af betonkonstruktioner, foreskriver og udvikler reparationsmetoder og foretager materialeteknologiske prøvninger. Forsknings- og udviklingsopgaver indenfor betons holdbarhed løses for klienter og/eller finansieres af fondsmidler.

Chalmers Tekniske Højskole uddanner civilingeniører og forskere og udfører forskning indenfor en række grundlæggende og anvendte videnskaber og teknologier. Afdelingen for Bygningsmaterialer hos Chalmers deltager som partner i HETEK-1. Afdelingens væsentligste forskningsområde er transportprocesser i porøse bygningsmaterialer, hovedsageligt cement- og træbaserede materialer samt overfladebehandling af disse. Eksempler på afdelingens betonforskning er: Fugtkapacitet og transportegenskaber af beton, selvudtørring og udtørring af hærdnende højkvalitetsbeton, plastisk svind og revnedannelse i ung beton, chloridindtrængning i betonkonstruktioner eksponeret for havvand og tøsalte. Sammenhænge mellem betons sammensætning, mikro- og porestruktur og egenskaber studeres eksperimentelt, og opførslen i forskellige omgivelser modelleres og verificeres på betonkonstruktioner.

Cementa AB er cementproducent i Sverige. Cementas aktiviteter med hensyn til betonforskning er følgende: Højkvalitetsbeton, dvs. høj styrke, lavt vandindhold og lav permeabilitet. Beton og miljø, dvs. spørgsmål vedrørende fugt i beton og emissioner fra beton. Holdbar beton, dvs. langtidsforsøg med chloridindtrængning, permeabilitet, styrkeudvikling og carbonatisering. Ekstruderingsbeton (jordfugtig), dvs. rheologiske aspekter vedrørende fremstilling af betonelementprodukter.

1.2 Formål

Formålet med denne vejledning er at opsummere den viden, der er præsenteret i de tidligere rapporter udgivet i forbindelse med denne delopgave af HETEK og gøre denne viden anvendelig i praksis. Det søges således at beskrive det mest præcise grundlag for projektering, udførelse og vedligeholdelse af betonkonstruktioner i infrastrukturer placeret i chloridholdige miljøer, dvs. marine miljøer og vejmiljøer.

1.3 Opbygning

Vejledningen er opdelt i 10 kapitler med den mest projektrelaterede information samlet i kapitel 4 og 5. De øvrige kapitler er af mere informativ karakter for at give en komplet vejledning.

Hovedforfatterne af anvisningens enkelte afsnit er:
J M Frederiksen: 1-3, 4.1-4.9, 4.11-4.16, 5-9
E Poulsen: 4.4, 4.7, 4.10, 4.11.
J M Frederiksen har redigeret og kvalitetssikret, L-O Nilsson og P Sandberg har givet kritik.

1.4 Detaljerede oplysninger

Denne vejledning indeholder mange udsagn. De fleste af disse er baseret på undersøgelser beskrevet i de tidligere udgivne rapporter i denne HETEK delopgave, se kapitel 9 i nærværende vejledning. Der henvises til disse rapporter såfremt læseren ønsker at studere den teoretiske baggrund for modellerne og mange af udsagnene, se referencelisten bagest i rapporten.

1.5 Begrænsninger

De modeller, der i denne vejledning anvendes til beregning (estimering) af chloridindtrængning og forudsigelse af tidspunktet for korrosionsinitiering i armeret beton, er empiriske. Det vil sige, at de er baseret på *erfaringer*.

Da erfaringsgrundlaget, trods mange års forskningsindsats over hele verden, er begrænset til blot 2½ års eksponering og analyser i den marine feltstation i Träslövsläge på den svenske vestkyst ca. 10 km syd for Varberg, er usikkerheden i de anvendte modeller ukendt. Usikkerheden forventes at være relativt stor, dog uden at nogen kan udtale sig nøjagtigt om usikkerhedens størrelse. Kort efter publicering af denne vejledning i 1997 vil der indløbe flere data fra Träslövsläge. Disse data vil kunne bidrage til dels at vurdere de hér anvendte modellers nøjagtighed, dels at forbedre modelnøjagtigheden.

Det endelige svar på modelnøjagtigheden kan kun fås, hvis man på grundlag af dagens viden opfører en armeret betonkonstruktion, placerer den i miljøer som omhandles af denne vejledning og venter i 100 år med at se, om holdbarheden svarer til forudsigelserne. Denne problemstilling har været kendt allerede fra før starten af denne HETEK-delopgave, men det har været målet med opgaven at gøre brug af den eksisterende viden og erfaring for på den måde at skabe det bedst mulige grundlag for projektering, udførelse og vedligeholdelse af armerede betonanlægskonstruktioner.

2 Introduktion

Denne vejledning henvender sig til ingeniører, som arbejder med projektering, udførelse, drift og vedligeholdelse af anlægskonstruktioner af armeret beton, der udsættes for chlorid fra omgivelserne. Først introduceres læseren til emnet, og enkelte definitioner gives.

Denne vejledning er skrevet for ingeniører, som skal administrere, projektere, udføre og vedligeholde trafikanlæg af armeret beton, der kan blive eksponeret for chlorid fra omgivelserne, fx fra havvand, fra sprøjt af tøsalt eller fra andet chloridholdigt vand.

Vejledningen er først og fremmest skrevet med henblik på anvendelse på nye konstruktioner, men kan også i nogen grad finde anvendelse i forbindelse med eksisterende konstruktioner, der er opført før udgivelsen af denne vejledning.

2.1 Chlorids skadevirkning i armeret beton

Når beton påvirkes af vand med opløst salt (fx NaCl) vil de opløste ioner (hér chlorid (Cl^-) og natrium (Na^+)) kunne trænge ind i betonen. I armeret beton har dæklaget på armeringen normalt en tykkelse på 30-50 mm. Hvis chloridkoncentrationen ved armeringen bliver tilstrækkelig stor, vil armeringen normalt begynde at ruste, men på dette tidspunkt kan betonen endnu være fuldt intakt.

Rustangrebet vil ske som grubetæring, hvorfor rustangrebet vil udvikle sig til en kærvlignende form. Når kærven bliver tilstrækkelig stor, ændres armeringens trækarbejdslinie på det angrebne sted og omkring dette. Teoretisk set skal bare ca. 8% af arealet være tæret væk, før armeringens evne til opførsel som et lineærelastisk-idealplastisk materiale er forsvundet.

Kærven vil optage hele deformationen ved træk i armeringen, hvorved flydeevnen bliver begrænset til flydningen i kærven. Da denne er betydeligt mindre end, hvis deformationen var jævnt fordelt over en større strækning, vil det rustangrebne armeringsstål opføre sig som et sprødt materiale.

I de danske normer, hvor armeret betons evne til opførsel som et plastisk materiale i brudtilstanden er en forudsætning, vil brudbæreevnen således blive drastisk påvirket, når der opstår grubetærring i kritiske snit. En sådan situation bør derfor forebygges. Én måde er at sørge for, at tiden før en kritisk (farlig) chloridkoncentration når frem til armeringen, bliver passende lang.

2.2 Nogle betydningsfulde begreber

I forrige afsnit blev den centrale del af chlorids skadevirkning beskrevet. Senere vil *midlet* mod denne skadevirkning: *lang tid før chlorid når frem* blevet behandlet. Men først skal nogle centrale begreber forklares/defineres.

Den *kritiske chloridkoncentration* (*tærskelværdien*), C_{cr}, er den koncentration, der netop får stål indstøbt i beton til at ruste (korrodere). Det har længe været kendt, at der ikke kun findes én kritisk chloridkoncentration. For hver betontype og hver miljøtype

findes der en tærskelværdi. I kapitel 4 findes kvalificerede bud på tærskelværdier for forskellige betontyper med forskellige *v/b*-forhold (masseforholdet mellem det effektive vandindhold og den tilsatte mængde bindemiddel (dvs. cement og eventuelle puzzolaner)) og i forskellige miljøer.

Initieringsperiode er den tid, der går fra betonen fremstilles og til, at der ved armeringen er ophobet så meget chlorid, at tærskelværdien for initiering af korrosion er nået. *Propageringsperioden* er den tid i hvilken korrosionsangrebet på armeringen udvikler sig. Normalt anses *levetiden* for at bestå af initieringsperioden og en del af propageringsperioden, men da korrosionsangreb på armeringen kan få fatale følger for konstruktionens sikkerhed og reparation, regnes levetiden hér at være lig med initieringsperioden.

Chloridindtrængningshastigheden beskrives ved hjælp af en transportparameter, der benævnes *chloriddiffusionskoefficienten, D*. Er *D* lille, bliver chloridindtrængningshastigheden lille og vice versa.

For at kunne bedømme tiden til *korrosionsinitiering* (dvs. initieringsperioden) kræves endvidere kendskab til *chloridpåvirkningen*. Erfaringen viser, at der *ikke* endnu eksisterer en simpel og umiddelbart forståelig sammenhæng imellem chloridkoncentrationen i den væske, som påvirker betonen og betonens chloridkoncentration i overfladen (overfladekoncentrationen). *Overfladekoncentrationen*, C_s er en betydningsfuld parameter, idet den bestemmer, hvor stor chloridkoncentrationen bliver til en given tid et stykke inde i betonen. Er overfladekoncentrationen lille bliver koncentrationen længere inde i betonen (alt andet lige) tilsvarende lille og vice versa. Sammen med tærskelværdien og chloriddiffusionskoefficienten er overfladekoncentrationen den tredje væsentlige parameter ved beregning af initieringsperioden.

Endelig er betonens chloridindhold ved fremstillingen ganske afgørende. *Initialchloridindholdet*, C_i bestemmes af delmaterialernes chloridindhold, hvorfor dette bør og kan begrænses generelt. Jo højere initialchloridindholdet er, jo mindre margin er der til den kritiske chloridkoncentration.

2.3 Chloridindtrængningens tidsafhængighed

Der er i løbet af de seneste ca. 5-10 år arbejdet intenst over hele verden med at forstå, hvilke processer, der styrer chloridindtrængning i beton, og hvordan chloridindtrængningen kan forudsiges.

Det viste sig i begyndelsen at være kompliceret at beskrive og forudsige selv den simplest tænkelige situation: *beton konstant neddykket i chloridholdig væske under konstante laboratoriebetingelser*. De seneste års fremskridt har dog muliggjort sådanne forudsigelser. Men altså endnu kun som laboratoriebetingelser.

I flere tilfælde har det efter chloridprofilmålinger på beton i konstruktioner, der er naturligt eksponeret, været forsøgt at forudsige udviklingen frem til næste måletermin og at beregne restlevetiden. Ved næste måletermin har det typisk vist sig, at forudsigelserne var forkerte, hvorfor der er rejst begrundet tvivl om beregningsgrundlaget for forudsigelserne.

Erfaringer og nøje studier har vist, at hverken chloriddiffusionskoeffienten eller overfladekoncentrationen er tidsuafhængige, hvilket man dog antog indtil 1990. Da blev det, pga. en stor eksperimentel indsats over hele verden efterhånden klart, at både diffusionskoefficienten og overfladekoncentrationen er stærkt tidsafhængige.

Der findes matematiske modeller, der kan beskrive transportprocesser i porøse materialer. Den simpleste model er Ficks 2. lov, der er en partiel differentialligning. Løsninger til Ficks 2. lov med forskellige begyndelses- og randbetingelser findes i matematiske opslagsværker. I sådanne opslagsværker findes dog ingen løsninger til Ficks 2. lov, når både diffusionskoefficient og overfladekoncentration kan variere med tiden samtidig.

Mejlbro-Poulsen modellen er en analytisk løsning til Ficks 2. lov, hvor både diffusionskoefficent og overfladekoncentration kan variere med tiden. Modellen bygger på avanceret analytisk matematik, der ikke er umiddelbart tilgængelig for ikke-matematikere. Imidlertid er selve løsningen formuleret på en konventionel form og tabelleret, således at løsningen kan sammenlignes med andre løsninger til Ficks 2. lov. I kapitel 4 beskrives, hvordan modellen kan anvendes ved hjælp af diagrammer og minimal brug af beregninger.

3 Betons holdbarhed

Nærværende kapitel giver en kort indføring i nogle grundlæggende problemstillinger i forbindelse med planlægning, projektering og udførelse af betonkonstruktioner, der skal være holdbare overfor chlorid under *danske* forhold.

3.1 Formulering af behov

En bærende betonkonstruktion har et primært hovedformål. Dette hovedformål skal klart oplyses således, at funktionskravene kan beskrives og søges opfyldt bedst muligt. Det skal også fastlægges, hvor længe bygværket tænkes anvendt til det definerede hovedformål. Endelig skal der sættes rammer for, hvilken økonomi bygværket skal opføres og drives for.

Er alle disse forhold defineret før projektering, kan og bør der tages højde her for i alle henseender, idet målet må være at projektere og udforme bygværket således, at det til enhver tid opfylder sine funktionskrav og gør dette til den lavest mulige pris (fx laveste nutidsværdi af alle udgifter i bygværkets stipulerede levetid).

3.2 Nedbrydningsårsager

En forudsætning for, at alle disse intentioner kan opfyldes er, at bygværkets holdbarhed er tilfredsstillende. Utilstrækkelig holdbarhed medfører forhøjede udgifter til drift og vedligeholdelse og/eller en kortere levetid end stipuleret. Kendskab til hvilke nedbrydningsårsager, der kan blive afgørende for konstruktionens holdbarhed, er derfor en nødvendighed.

For en armeret betonkonstruktion, der skal anbringes i chloridholdige omgivelser, vil netop chloridindtrængningen kunne fremme de dominerende nedbrydningsårsager. Andre væsentlige nedbrydningsårsager under danske forhold er fx skadelige alkalikiselreaktioner og skader som følge af frost/tøpåvirkning.

3.3 Forholdsregler mod gængse nedbrydningsårsager

Forholdsreglerne til imødegåelse af skadelige alkalikiselreaktioner har været kendt siden begyndelsen af 1960'erne og har fra midten af 1980'erne været omfattet af de statslige bygherrers betonbeskrivelser i Danmark. Forholdsreglerne består i at begrænse cementens alkaliindhold og tilslagets indhold af alkalireaktive bjergarter. Manglende bestandighed over for alkalikiselreaktioner hører derfor til sjældenhederne blandt nyere danske betonbygværker opført efter midten af 1980'erne.

Forholdsreglerne for imødegåelse af skader som følge af frost/tøpåvirkning har været kendt siden starten af 1950'erne og har siden starten af 1970'erne været en del af betonnormerne. Forholdsreglerne består i at indblande fine og jævnt fordelte luftbobler i betonen. Manglende frostbestandighed hører derfor til sjældenhederne blandt danske betonbygværker opført efter midten af 1970'erne.

Forholdsregler for tilstrækkelig imødegåelse af skader som følge af chloridindtrængning har ikke på samme måde som for alkalireaktion og frost/tø været kendt. Derfor er der ikke i normer og anvisninger opstillet præcise krav, der giver en tilstrækkelig og fornøden sikkerhed. Forholdsreglerne har i løbet af det seneste tiår i Danmark udviklet sig til anvendelse af øgede dæklag, tætte betoner med lavt *v/c*-forhold og tilsætning af mikrosilica og/eller flyveaske samt anvendelse af særlige og specielle tiltag på en lang række punkter. Det er endnu for tidligt at udtale noget om skadehyppigheden som følge af chlorids skadevirkning i nyere danske betonkonstruktioner opført efter slutningen af 1980'erne.

3.4 Betingelser for chloridmodstandsevne

Som det fremgår af foregående afsnit bestemmes modstandsevnen mod alkalireaktion og frost/tø af andre hovedparametre end de, der anvendes ved stræben for bedre chloridmodstandsevne. Man kan derfor teoretisk forestille sig en beton, der er modstandsdygtig overfor chloridindtrængning, men som enten ikke er frostbestandig og/eller ikke er beskyttet mod skadelig alkalireaktion.

Det ligger følgelig i sagens natur, at en betons modstandsevne over for chloridindtrængning er afhængig af, om betonen både er frostbestandig og (vha. passende valgte delmaterialer) er beskyttet mod skadelig alkalireaktion.

Det er svært eller måske umuligt at fremstille en betonkonstruktion uden utilsigtede revnedannelser og defekter, der ikke er en naturlig del af betonen. En betons evne til at modstå chloridindtrængning er således også stærkt afhængig af (det utilsigtede) revne- og defektomfang. (Revner som følge af beregningsmæssig statisk last hører ikke til utilsigtede revner.)

3.5 Levetidsberegninger

Det er ønsket om kendskab til bygværkets totaløkonomi, der nødvendiggør levetidsberegninger. For at kunne udføre levetidsberegninger kræves indgående kendskab til de nedbrydende faktorer.

Mens holdbarheden og dermed levetiden over for alkalireaktion og frost/tø groft taget er fastlagt fra starten (ved valg af delmaterialer og betonsammensætning), er holdbarheden overfor chloridindtrængning afhængig af en lang række forhold under betonens fremstilling, støbning og efterbehandling samt af miljøets påvirkning og betonens "respons" på miljøet.

Levetidsberegninger må derfor ikke opfattes som et præcist mål, men som et kvalificeret gæt. Nøjagtigheden af en levetidsberegning burde være stor pga. de store økonomiske konsekvenser, men det er den ikke. Der kan ikke sættes tal på nøjagtigheden, men et fælles modelgrundlag bør ligge til grund for alle levetidsberegninger. Dette vil gøre levetidsberegninger mere ensartede og objektive, hvilket må være at foretrække fremfor "spåkoneri". Kontrol af levetidsberegninger tager lige så lang tid som selve levetiden!

Dette projekts vigtigste formål har netop været at opstille dette modelgrundlag som forudsætning for valg af prøvningsmetoder. Modellen præsenteres i kapitel 4.

4 Projektering

Den projekterende har ansvaret for konstruktionens udformning i detaljer og skal udforme konstruktionen, så den opfylder bygværksejerens og samfundets krav. Ydermere skal udformningen være mulig at udføre i praksis med rimelige midler.

4.1 Generelle synspunkter

I alle nedbrydningsprocesser i beton (bortset fra vandalisme) indgår fugt/vand. I tørt miljø nedbrydes beton normalt ikke bortset fra ved slid og påkørsel. Når man opfører betonkonstruktioner udendørs eller i våde indendørs miljøer bør man altid sørge for, at vand ikke kan samle sig, hverken lokalt eller på større flader medmindre dette er hensigten (fx bassiner). Opadvendte vandrette flader bør helst undgås.

Grove revner er ikke tilladt iht. danske normer (bortset fra i tørt indendørs klima), men støbeskel er normalt uundgåelige og kan utilsigtet blive til sådanne revner. Derfor bør støbeskel placeres hensigtsmæssigt og, hvis det kan undgås, ikke nær ved miljømæssigt og konstruktivt hårdt påvirkede snit. Om etablering af støbeskel se afsnit 5.2.

Armeringsarrangementet skal tillade, at ethvert tværsnit kan udstøbes korrekt. Dæklaget uden på armeringen skal beskytte konstruktionen mod fremtidig nedbrydning, hvorfor en defektfri udstøbning specielt hér bør gives en høj prioritet.

Endelig har det vist sig, at visse detaljer på konstruktionen kan være svære eller umulige at inspicere og vedligeholde. Eksempelvis kan detaljer i forbindelse med vederlag være meget omkostningskrævende at reparere. Hvor det er muligt, bør derfor gives en "inspicerbar" udformning.

4.2 Krav til delmaterialer, betonsammensætning og fremstilling

Betonens pris kan være afgørende for, om en betonleverandør bliver valgt til opgaven, hvorfor den billigste blanding, der opfylder alle krav, normalt vil blive valgt. Der er ofte en nær sammenhæng imellem pris og egenskaber, hvorfor det er vigtigt at specificere, hvad der kan accepteres, og hvad der ikke kan.

Delmaterialerne til beton i en konstruktion i et chloridholdigt miljø bør normalt og om muligt være af højere kvalitet end til andre konstruktioner. I kapitel 3 er kort nævnt nogle nedbrydningsprocesser, som kan være fatale for betonens sammenhæng og nært relaterede til betonens delmaterialer.

Betonens tæthed afgøres primært af bindemidlets (eller rettere kitmassens) tæthed. Det har dog stor betydning, at også tilslaget er tæt. Når bjergarter er tætte i sig selv, men har ensidigt orienterede spalteplaner (normal iboende) og revner (evt. fra nedknusningen), kan det være årsager til fravalg af en handelsvare.

Betonen skal være velproportioneret, robust og let at bearbejde, så blanding, transport og udstøbning bliver enkel og sikker. Det lyder banalt, men da der samtidig kan være

behov for en luftindblandet beton med et bindemiddel af både cement, flyveaske og mikrosilica samt et lavt *v/b*-forhold er opgaven ofte ikke så enkel endda.

4.3 Lokalmiljøklasser

Man kan opdele det miljø som betonkonstruktioner udsættes for i deres virke efter miljøets aggressivitet. Dette er gjort i den danske betonnorm, hvorved fire miljøklasser er fremkommet: Passiv, moderat, aggressiv og særlig aggressiv miljøklasse. Hvis miljøet er fugtigt og chlorid forekommer henregnes det til aggressivt eller særlig aggressivt miljø.

I dansk udendørs atmosfære forekommer desuden frost, hvilket betyder, at beton i konstruktioner, der under opførelsen eller i den endelige funktion, kan udsættes for frost i vandmættet tilstand, skal være frostbestandig.

Det chloridholdige marine miljø og vejmiljøet kan underopdeles i et antal lokalmiljøer, idet chloridpåvirkningen er forskellig afhængig af stedet på konstruktionen. Afstanden fra vandlinien eller kørebanen er en af de mest betydende parametre. Ved stræben efter at projektere en konstruktion økonomisk kan man indplacere de enkelte konstruktionsdele/-afsnit i forskellige lokalmiljøer.

En passende inddeling i lokalmiljøer, der er relevante i såvel marint miljø som i vejmiljøer, er givet nedenfor. Desuden gives eksempler på konstruktionsdele tilhørende de enkelte lokalmiljøer. Det er hensigten med denne opdeling at eksemplificere, antallet af forskellige chloridpåvirkninger, der kan forekomme på én konstruktion. Opdelingen er bl.a hensigtsmæssig når man planlægger inspektion på et bygværk, mens den for mange (især mindre) konstruktioner vil være for detaljeret som paradigma for opdeling i forskellige miljøklasser med deraf varierende dæklag og/eller betonkvalitet.

1 Vejmiljø

a) Det "våde" vejmiljø, dvs. konstruktionsdele som kan "se" himlen og som udsættes for direkte regn, fx kantbjælker og fløjmure. Dette lokalmiljø kan eventuelt underopdeles i yderligere to lokalmiljøer:
   - Fra 0 til 2 m over vejniveau og i afstanden 0 til 5 m fra vejbanekant.
   - Området uden for ovennævnte grænser.

b) Det "tørre" vejmiljø, dvs. konstruktionsdele som er placeret under en brobane og som derfor ikke kan "se" himlen og som ikke udsættes for direkte regn, men kun for "trafiksprøjt", fx søjler og endevederlag.

2 Marint miljø

a) Neddykkede konstruktioner placeret under kote -3 m i forhold til laveste minimalvandstand, fx sænkekasser.
b) Konstruktioner placeret i splash zonen, her defineret som værende over kote -3 m i forhold til laveste minimalvandstand og under kote +3 m i forhold til højeste maksimalvandstand, fx bropilleskafter.
c) Konstruktioner over kote +3 m i forhold til højeste maksimalvandstand, fx bropiller og undersider af marine broers brobaner.

3 Kombinationen af 1a og 2c, fx marine broers vejbaneoverbygning.

Betonkonstruktioners modstandsevne over for chloridpåvirkning bestemmes af følgende:

- Tykkelsen af betondæklaget på armeringen
- Typen af bindemiddel (herunder bindemiddelsammensætningen)
- Tætheden af betondæklaget (fx *v/b*-forholdet)
- Typen af armering (fx rustbart contra rustfast stål)

Det er målet med ovenstående opdeling at opnå en klar forskel imellem de enkelte lokalmiljøer, således at man opnår passende spring imellem forholdsregler fra ét lokalmiljø til det næste i rækken. Spring i dæklag bør således være 10 mm eller derover, mens spring i *v/b*-forholdet bør være 0,1 eller derover.

Der vil for hver type (størrelse) af konstruktion være en økonomisk balance imellem antallet af lokalmiljøer og antallet af dæklagsspring og/eller spring i betonkvalitet samt eventuel anvendelse af rustfaste armeringstyper.

4.4 Betons respons på chloridpåvirkning

Betons respons på chloridpåvirkning måles ved de chloridprofiler, som dannes i det eksponerede overfladelag. Chloridprofilet kan fx sammenlignes med den spændingsfordeling (respons), der opstår i en bjælke som følge af en mekanisk last (påvirkning).

Et chloridprofil i en betonoverflade, som gennem en periode har været påvirket af chlorid beskrives til tiden t ved tre parametre:

- Den opnåede chloridkoncentration i betonoverfladen C_{sa}.
- Den opnåede diffusionskoefficient D_a.
- Eksponeringstiden $\Delta t = t - t_{ex}$, hvor tiden regnes fra betonens blanding og t_{ex} betegner det tidspunkt, hvor betonen eksponeres for chlorid for første gang.

Det har vist sig, at både C_{sa} og D_a er tidsafhængige og afhængige af lokalmiljøet. Desuden afhænger begge parametre af betonens sammensætning. Der kan ikke gives en fysisk-kemisk forklaring på disse fænomener, og de kan således ikke modelleres endnu.

Betons respons på chloridpåvirkning må (om muligt) beskrives ved både lokalmiljøet og ved betonens parametre. Da der ikke kan ske en fysisk-kemisk modellering må erfaringer fra feltundersøgelser lægges til grund, hvor det er muligt.

4.5 Tærskelværdier for korrosionsinitiering

I Frederiksen et al. [1997a] er angivet en tilnærmelsesformel, med hvilken man kan estimere tærskelværdier for korrosionsinitiering i forskellige miljøer. Formlen er baseret på en tabel (også i Frederiksen et al. [1997a]), som er fremkommet ved hjælp af ingeniørmæssige skøn og ekstrapolation af måledata. I figur 8 nedenfor er denne formel gengivet på grafisk form, således at tærskelværdien kan aflæses for de forskellige miljøer. Det er en forudsætning for graferne i figur 8, at dæklaget er mindst 25 mm og er uden revner med vidde større end 0,1 mm.

4.6 Marine betonkonstruktioner

I den marine feltstation i Träslövsläge havn på den svenske vestkyst ca. 10 km syd for Varberg bliver en række forskellige betontypers respons på det marine miljø undersøgt.

Ud fra en indgående analyse af de data, der forelå efter ca. 2½ års eksponering, er det forsøgt vha. *Mejlbro-Poulsen modellen* at fremskrive chloridprofilerne til 100 års eksponering vel vidende, at det sandsynligvis vil være forbundet med meget store usikkerheder. Til trods for dette må det anses for at være det bedste estimat, der kan gøres med den forhåndenværende viden og erfaring.

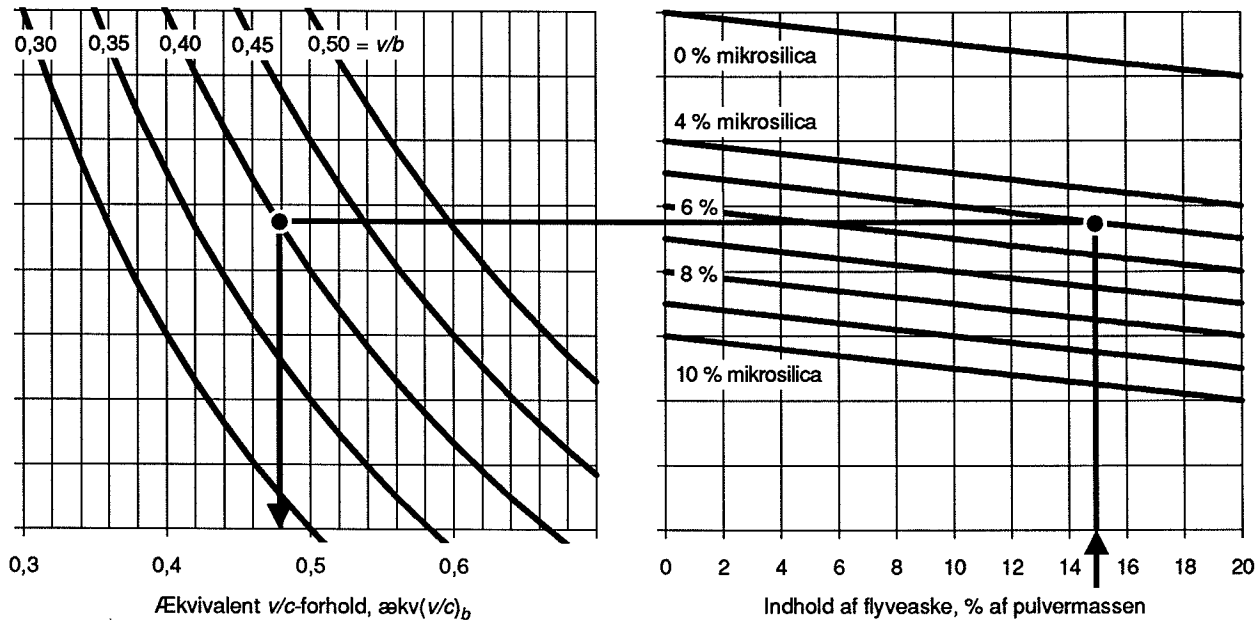
Det er fundet bekvemt at beskrive den tidsafhængige randbetingelse C_{sa} og den tidsafhængige transportkoefficient D_a ved hjælp af førsteårsværdier og 100-årsværdier.

Forventningsværdier for parametrene overfladekoncentration og chloriddiffusionskoefficient efter 1 år og 100 år kan estimeres efter formler angivet i Frederiksen et al. [1997a]. Der er til det brug fastlagt værdier af effektivitetsfaktorer for mikrosilica og flyveaske, samt miljø- og tidsfaktorer for de fire parametre.

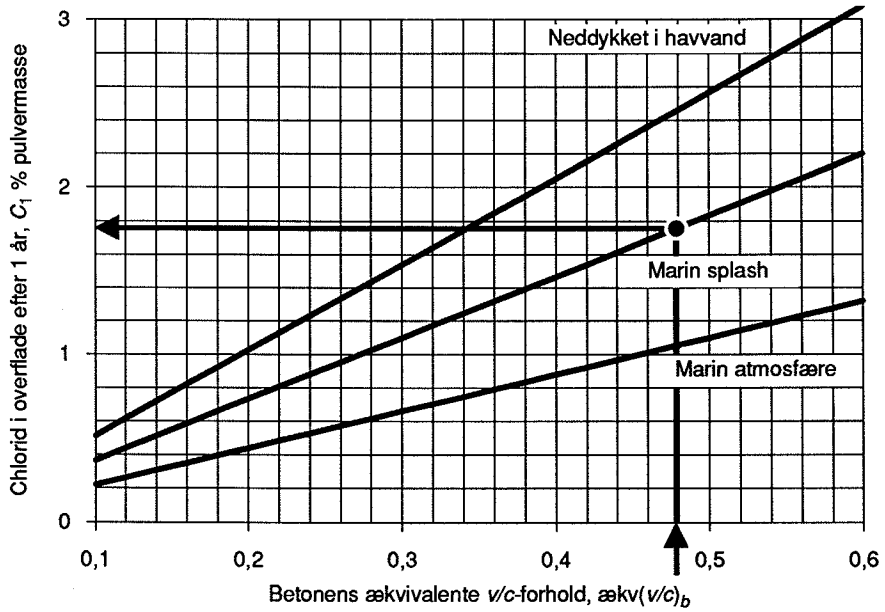
Disse formler gengives ikke hér, men på de følgende 5 sider vises det på diagramform, hvordan et estimat for initieringsperioden bestemmes ved hjælp af *Mejlbro-Poulsen modellen*, når man har kendskab til betonsammensætningen.

Diagrammerne kan anvendes til at estimere betonens respons i de tre forskellige marine miljøer, til brug ved foreløbig dimensionering af dæklag og ved foreløbig betonproportionering samt ved opstilling af acceptkriterier, jf. afsnit 4.14.

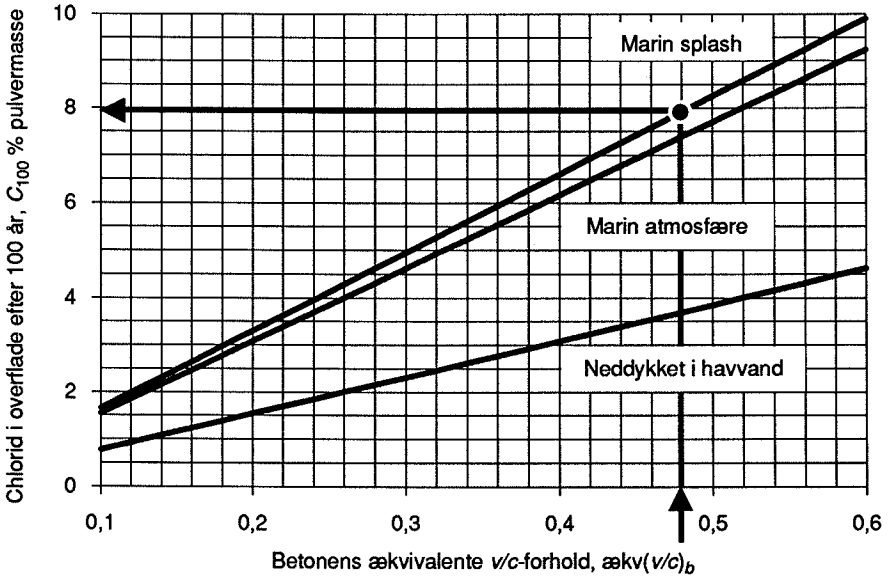
Ved hjælp af figur 1, 2 og 3 fastlægges først C_1 og C_{100}. Dernæst benyttes figur 4, 5 og 6 til at fastlægge D_1 og D_{100}. I figur 7 transformeres disse fire parametre til de grundlæggende parametre i *Mejlbro-Poulsen modellen* dvs. de fire parametre α, D_{aex}, S_p og p. I figur 8 aflæses tærskelværdien for korrosionsinitiering, mens det dimensionsløse dæklag aflæses i figur 9. Endelig i figur 10 estimeres initieringsperiodens længde. Hele proceduren illustreres i afsnit 4.9, hvor der også gives et skema, der kan lette arbejdsgangen med aflæsningerne i diagrammerne.



▲ *Figur 1. Diagram for ækv(v/c)$_b$ i afhængighed af miljøpåvirkning og v/b. For beton med et flyveaskeindhold på 15 % af pulvermassen og et mikrosilicaindhold på 5 % af pulvermassen samt v/b = 0,40 findes, at ækv(v/c)$_b$ = 0,48.*

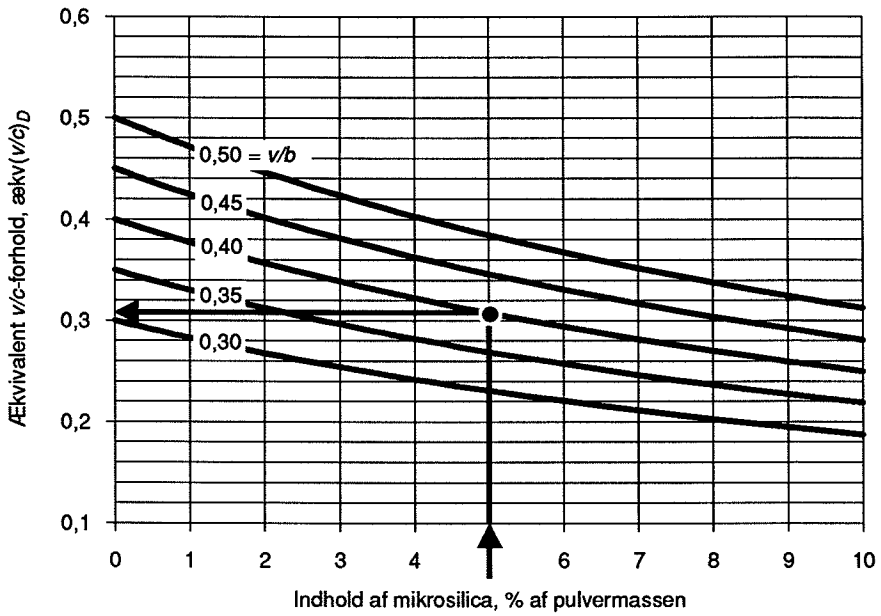


▶ *Figur 2. Diagram for C_1 i afhængighed af miljøpåvirkning og ækv(v/c)$_b$. For beton i marin splash og med ækv(v/c)$_b$ = 0,48 findes C_1 = 1,75 % af pulvermassen.*

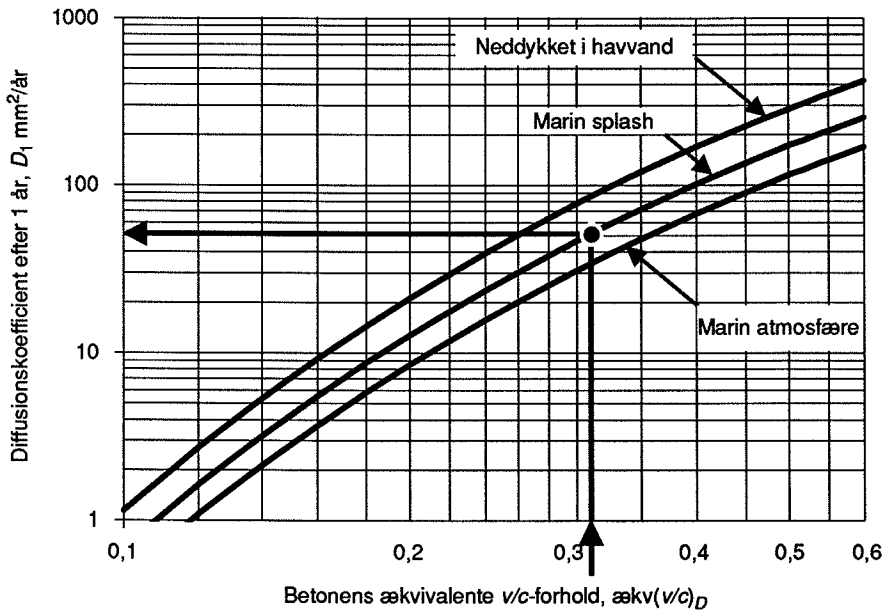


▶ *Figur 3. Diagram for C_{100} i afhængighed af miljøpåvirkning og ækv(v/c)$_b$. For beton i marin splash og med ækv(v/c)$_b$ = 0,48 findes C_{100} = 7,9 % af pulvermassen.*

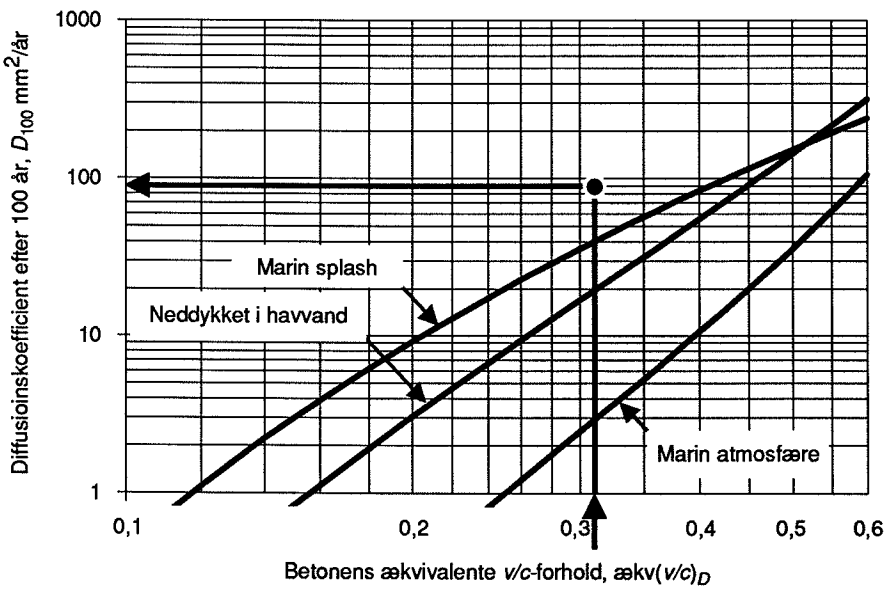
▶ *Figur 4. Diagram for ækv(v/c)$_D$ for beton i afhængighed af miljøpåvirkning. For beton med et mikrosilicaindhold på 5 % af pulvermassen og et flyveaskeindhold på 15 % af pulvermassen samt med v/b = 0,40 findes, at ækv(v/c)$_D$ = 0,31.*

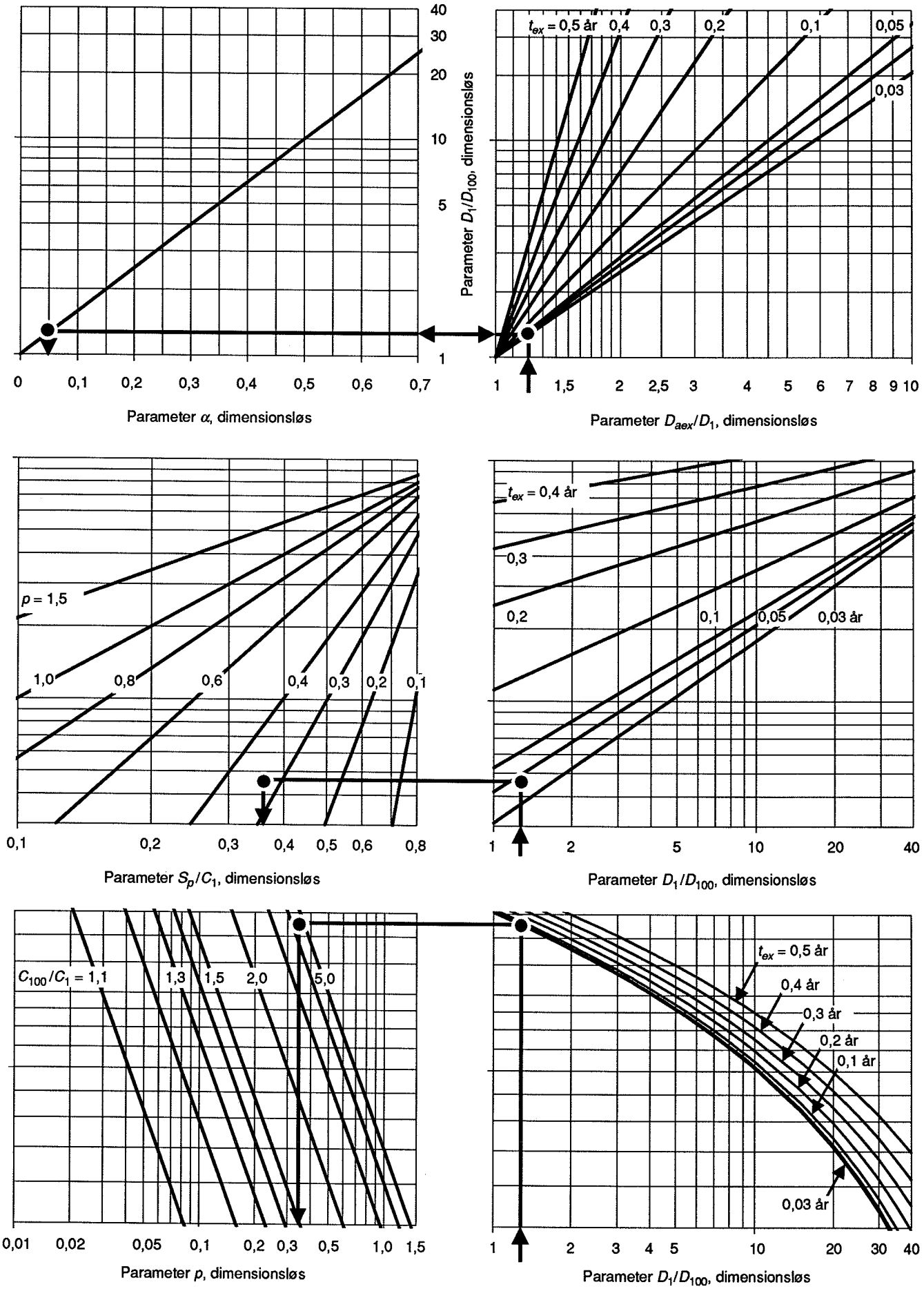


▶ *Figur 5. Diagram for D_1 i afhængighed af miljøpåvirkning og ækv(v/c)$_D$. For beton i marin splash og med ækv(v/c)$_D$ = 0,31 findes D_1 = 50 mm^2/år.*

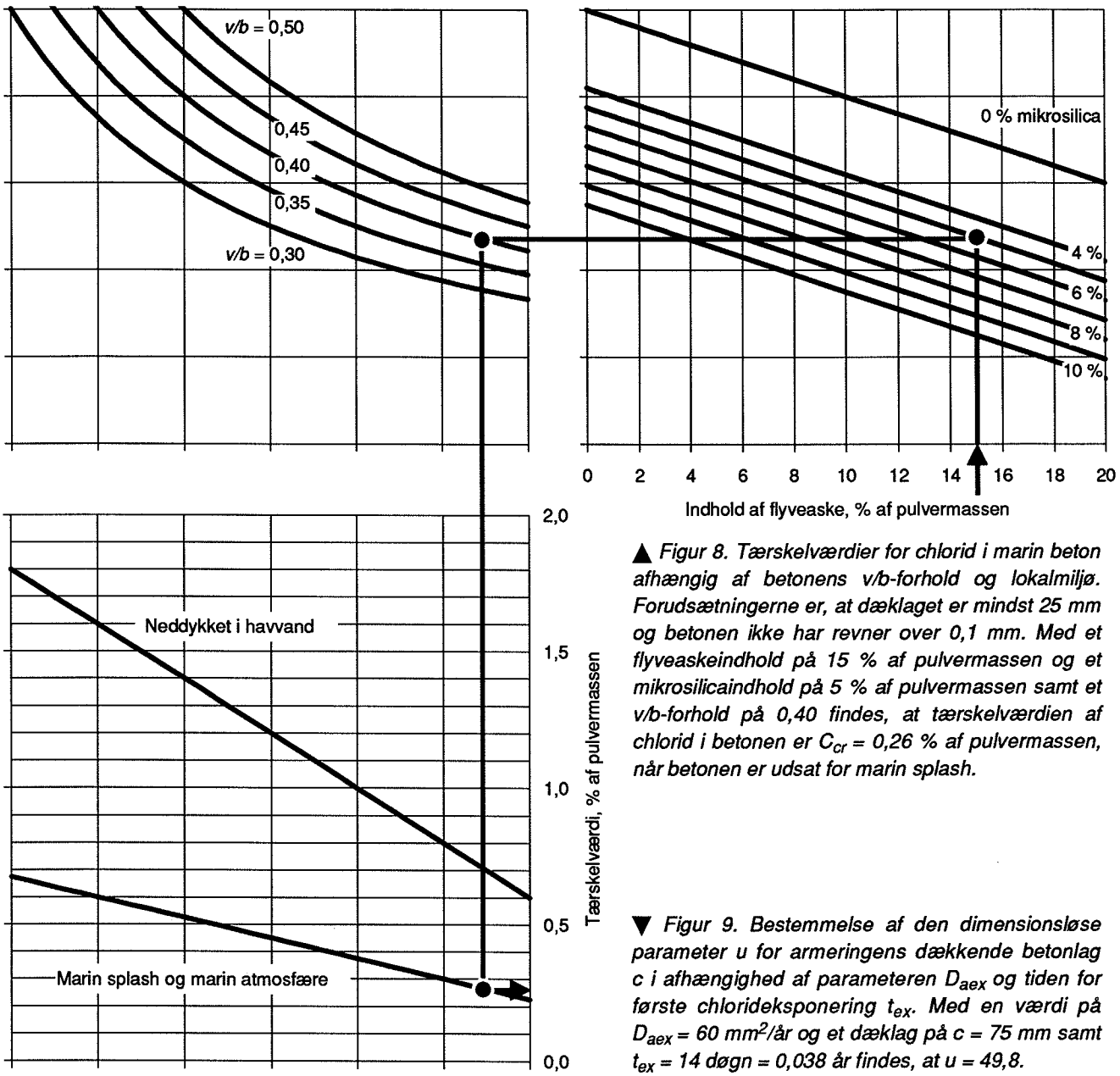


▶ *Figur 6. Diagram for D_{100} i afhængighed af miljøpåvirkning og ækv(v/c)$_D$. For beton i marin splash og med ækv(v/c)$_D$ = 0,31 findes D_{100} = 40 mm^2/år.*

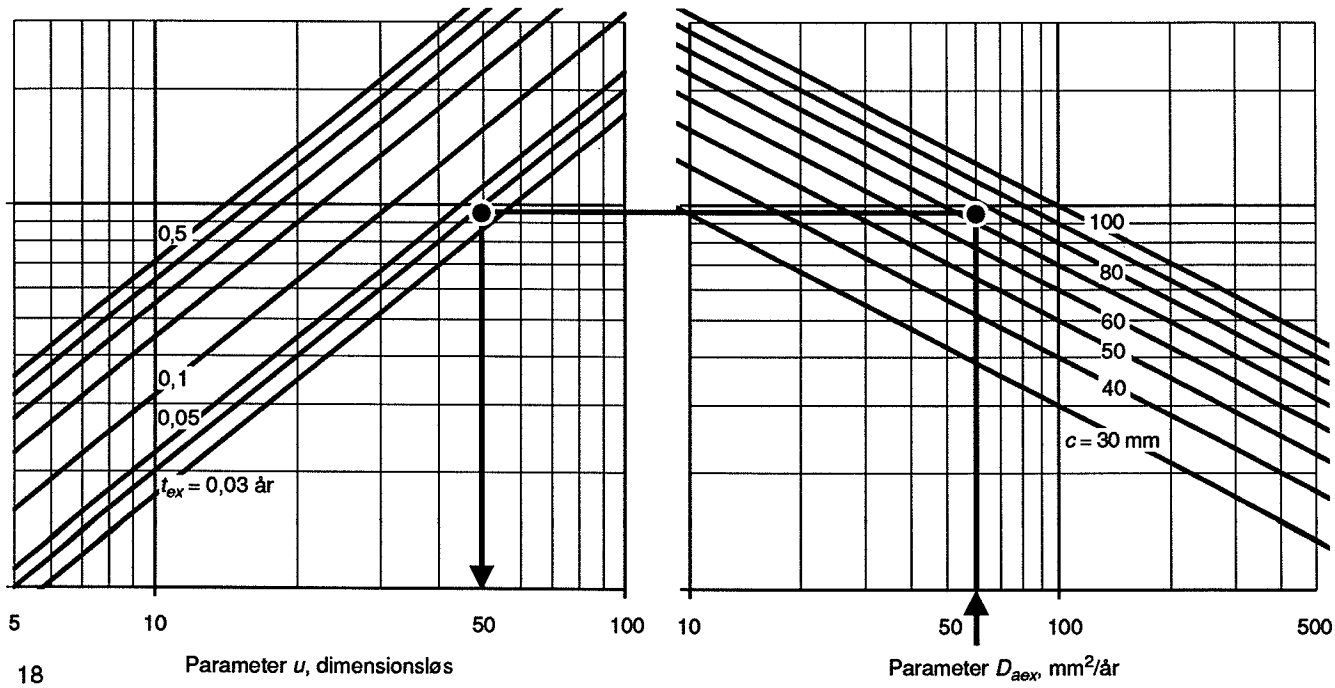




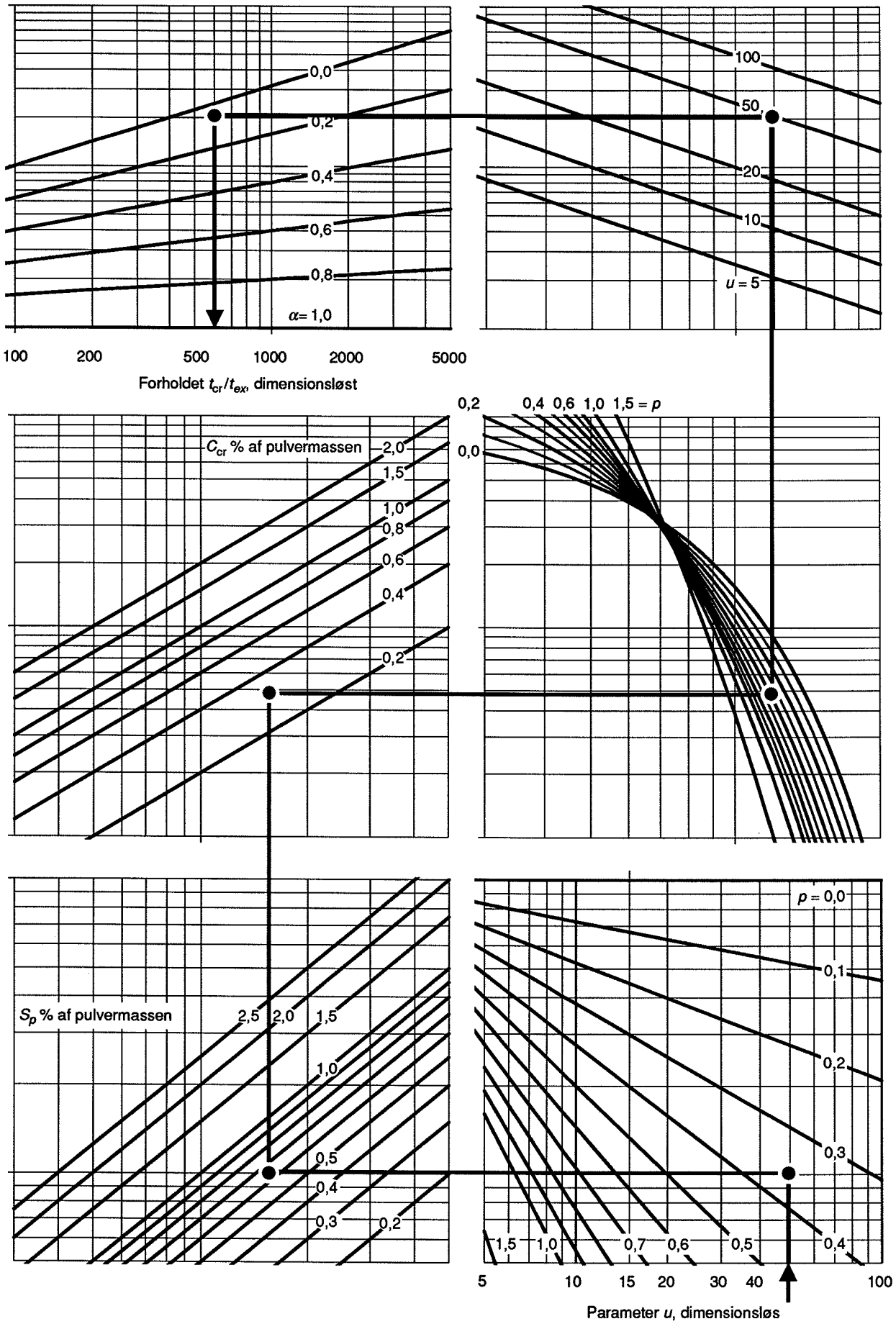
Figur 7. Diagram til bestemmelse af basisparametre α, D_{aex}, S_p and p, ud fra kendskabet til D_1, D_{100}, C_1, C_{100} og t_{ex}. Med D_1 = 50 mm²/år, C_1 = 1,7 % af pulvermassen og t_{ex} = 0,038 år samt D_1/D_{100} = 1,3 og C_{100}/C_1 = 4,8 findes af diagrammet, at α = 0,05, D_{aex} = 1,2 · 50 = 60 mm²/år, p = 0,34 og S_p = 0,36 · 1,7 = 0,61 % af pulvermassen.



▲ *Figur 8. Tærskelværdier for chlorid i marin beton afhængig af betonens v/b-forhold og lokalmiljø. Forudsætningerne er, at dæklaget er mindst 25 mm og betonen ikke har revner over 0,1 mm. Med et flyveaskeindhold på 15 % af pulvermassen og et mikrosilicaindhold på 5 % af pulvermassen samt et v/b-forhold på 0,40 findes, at tærskelværdien af chlorid i betonen er C_{cr} = 0,26 % af pulvermassen, når betonen er udsat for marin splash.*



▼ *Figur 9. Bestemmelse af den dimensionsløse parameter u for armeringens dækkende betonlag c i afhængighed af parameteren D_{aex} og tiden for første chlorideksponering t_{ex}. Med en værdi på D_{aex} = 60 mm²/år og et dæklag på c = 75 mm samt t_{ex} = 14 døgn = 0,038 år findes, at u = 49,8.*



Figur 10. Diagram til bestemmelse af initieringsperioden t_{cr} ud fra de seks betydende parametre α, D_{aex}, S_p, p, t_{ex} og C_{cr}. Med u = 49,8 (se figur 9), S_p = 0,61 % af pulvermassen (se figur 7) og C_{cr} = 0,26 % af pulvermassen (se figur 8) samt α = 0,05 (se figur 7) og p = 0,34 (se figur 7) findes initieringsperioden $t_{cr} = 600 \cdot 0{,}038 = 23$ år.

4.7 Konstruktioner i vejmiljøet

Der eksisterer endnu ikke tilstrækkelige data til at give en detaljeret beskrivelse af vejmiljøet. Indtil videre må man nøjes med at drage analogier mellem vejmiljøet og det marine miljø. Analogierne baserer sig på den ingeniørmæssige intuition. Hertil kan dog tillægges kvalitative erfaringer fra udenlandske undersøgelser og undersøgelser af eksisterende konstruktionsdele fra det tørre vejmiljø på enkelte danske broer samt foreløbige resultater af eksperimentelt arbejde på den svenske feltstation, der er placeret på hovedvejen Rv 40 mellem Borås og Göteborg.

Det lokale vejmiljø omkring en motorvejsbro kan efter de nu foretagne observationer, jf. Frederiksen et al. [1997a], opdeles i et "vådt" vejmiljø og et "tørt" vejmiljø. Observationerne omfatter ret begrænsede målinger på motorvejsbroer i Danmark og på den ca. to år gamle eksponeringsstation i Sverige.

Observationerne er begrænsede derved, at der endnu kun er få målinger, som belyser den tidsmæssige udvikling af chloridprofiler i betonkonstruktioner, der eksponeres i "våde" og "tørre" vejmiljøer i Danmark. Disse observationer er derfor suppleret med information fra udenlandske inspektioner af chloriddiffusivitet af betonkonstruktioner i vejmiljøer.

Der er overalt i Europa og Nordamerika en voksende interesse for de problemer, som vejmiljøer kan skabe for betonkonstruktioner. Derfor kan der fremover forventes et stigende antal undersøgelser af sådanne betonkonstruktioner med opnåelse af mere viden til følge.

I det følgende søges vejmiljøer og betons respons derpå beskrevet ud fra *Mejlbro-Poulsen* modellen, dvs. ved fire parametre: α, D_{aex}, S_p og p. Ud fra disse retningslinier må man søge at estimere værdier af D_1, D_{100}, C_1 og C_{100}. Derefter kan de styrende parametre bestemmes, som vist i eksemplet i afsnit 4.9 for det marine miljø.

4.7.1 "Tørre" vejmiljøer

Om betons chloriddiffusivitet i "tørre" vejmiljøer kan der ud fra foretagne observationer, jf. Frederiksen et al. [1997a], konkluderes følgende:

- C_{sa} er observeret at være ca. 0,50 % af betonen ved en eksponeringstid på ca. 40 år.
- C_{sa} er observeret at falde med stigende *niveau over* vejbanen.
- C_{sa} er observeret at falde med stigende afstand fra vejbanen.
- C_{sa} er observeret at være størst på læsiden i forhold til trafikken.
- Produktet $t \cdot D_{aex}$ vil stige med tiden og hurtigt blive konstant.

4.7.2 "Våde" vejmiljøer

Om betons chloriddiffusivitet i "våde" vejmiljøer er der ikke foretaget ret mange systematiske observationer, jf. Frederiksen et al. [1997a], men der kan dog konkluderes følgende:

- C_{sa} vil stige i vinterperioden og falde i sommerperioden, men vil sandsynligvis hurtig stabiliseres.
- C_{sa} er observeret at falde med stigende niveau over vejbanen.
- C_{sa} er observeret at falde med stigende afstand fra vejbanen.
- Produktet $t \cdot D_{aex}$ vil stige med tiden og næppe blive konstant.

4.8 Konstruktioner udsat for marin atmosfære og tøsalt

Der er kun rapporteret om få inspektioner af kombineret marint miljø og vejmiljø. På nuværende tidspunkt (1997) kan det kun anbefales at regne med en øget chloridpåvirkning, men en superposition af påvirkningerne synes dog ikke at være observeret.

4.9 Eksempel på estimering af initieringsperioden

I det følgende vises et eksempel på, hvordan man ved aflæsning i diagrammer samt brug af en lommeregner kan estimere initieringsperioden t_{cr} for en valgt pulversammensætning og et valgt betondæklag.

En beton tænkes udført med tilsætning af pulver og vand som anført nedenfor.

Cement	80% af bindemiddel
Flyveaske	15% af bindemiddel
Mikrosilica	5% af bindemiddel
v/b-forhold	0,40

Dæklaget vælges til 75 mm i splash zonen, og tidspunktet for første chloridpåvirkning af konstruktionen fastsættes til 14 døgn (0,038 år). Ved hjælp af figur 1, 2 og 3 aflæses de to parametre $C_1 = 1{,}7$ mas% af pulver og $C_{100} = 8{,}1$ mas% af pulver. Af figur 4, 5 og 6 aflæses $D_1 = 50$ mm^2/år, $D_{100} = 39$ mm^2/år.

Dernæst udregnes forholdene $C_{100}/C_1 = 4{,}8$ og $D_1/D_{100} = 1{,}3$, hvorefter de fire grundlæggende parametre D_{aex}, α, p og S_p kan aflæses ved hjælp af figur 7, således som det er vist dér. Af figur 8 aflæses tærskelværdien til $C_{cr} = 0{,}26$ mas% af pulver og af figur 9 aflæses det dimensionsløse dæklag u til 50.

Endelig aflæses den dimensionsløse initieringsperiode i figur 10 til 600. Ved multiplikation med det valgte tidligste eksponeringstidspunkt t_{ex} = 14 døgn = 0,038 år, fås initieringsperiodens længde til 600 · 0,038 = 23 år.

Er den fundne initieringsperiode ikke tilstrækkelig stor vælges et større dæklag, og der aflæses på ny i figur 10. Kan et acceptabelt dæklag ikke opnås, vælges en anden betonsammensætning (lavere *v/b*-forhold og evt. større indhold af mikrosilica). Når det nødvendige og tilstrækkelige dæklag er fastlagt, udledes på tilsvarende måde dæklaget for de øvrige lokalmiljøer.

Skemaet i figur 11 kan være en hjælp til at gennemføre estimeringen ved diagrammetoden.

Marint lokalmiljø:			
Ref.	**Beskrivelse**	**Værdi**	**Enhed**
	Cementindhold		mas% af pulver
	Flyveaskeindhold		mas% af pulver
	Mikrosilicaindhold		mas% af pulver
	v/b-forhold		masseforhold
	Eksponeringstidspunkt, t_{ex}		år
	Dæklag, *c*		mm
	I figur 1, 2 og 3 aflæses		
	ækv $(v/c)_b$		-
	C_1		mas% af pulver
	C_{100}		mas% af pulver
	I figur 4, 5 og 6 aflæses		
	ækv $(v/c)_D$		-
	D_1		mm^2/år
	D_{100}		mm^2/år
	Beregn		
	D_1/D_{100} =		-
	C_{100}/C_1 =		-
	I figur 7 aflæses		
	p		-
[1]	S_p/C_1		-
	α		-
[2]	D_{aex}/D_1		-
	Beregn		
	$S_p = C_1 \cdot [1]$ =		mas% af pulver
	$D_{aex} = D_1 \cdot [2]$ =		mm^2/år
	I figur 8 aflæses		
	C_{cr}		mas% af pulver
	I figur 9 aflæses		
	u		-
	I figur 10 aflæses		-
[3]	t_{cr}/t_{ex}		-
	Beregn		
	Initieringsperiode, $t_{cr} = t_{ex} \cdot [3]$ =		år

Figur 11. Skema til hjælp ved estimering af initieringsperioden ved diagrammetoden.

4.10 Levetid

Bygherre og samfund stiller krav til, at en betonkonstruktion opfylder sin funktion i en passende lang tid, "levetiden". Samfundet har formuleret sine krav i normer og standarder og bygherren formulerer supplerende krav i konstruktionens arbejdsbeskrivelse og bygningsdelsbeskrivelse.

Betonkonstruktioner er gennem danske normer sikret at opnå initiale egenskaber og karakteristika, som synes acceptable, medens en bevarelse af disse (holdbarheden) synes at have været problematisk for marine og/eller tøsaltede betonkonstruktioner. Tiden synes først nu at være moden, til at stille krav til at disse betonkonstruktioner skal opnå en nærmere specificeret "levetid".

4.10.1 Definition af levetid

Umiddelbart kan det synes rimeligt at stille krav om en vis levetid eller holdbarhed af en betonkonstruktion. Før man stiller dette krav, må man imidlertid gøre sig klart, hvad begrebet "levetid" står for. Man kan her naturligt tage udgangspunkt i skadeudviklingen for en armeret betonkonstruktion, som påvirkes af chlorid. Her er de naturlige faser normalt:

- Chlorid trænger ind til armeringen. Tærskelværdien nås og korrosion initieres (initieringsfasen).
- Rustprodukter bliver synlige på betonkonstruktionens overflade.
- Revnedannelser og afskalninger foregår som følge af korrosionsprodukternes volumenforøgelse.
- Nedsættelse af normmæssig sikkerhed på grund af bortrustet armering.

Det er klart, at samfundet må kræve, at sikkerheden bevares i bygværkers stipulerede "levetid". Bygherren vil desuden kunne have forskellige holdninger til udviklingen af et bygværks tilstand:

- *Offentligheden.* Rustudfældninger, revner og afskalninger vil forringe bygværkets handelsværdi og er derfor uønskede.
- *Æstetik.* Brugere af skadede betonkonstruktioner har kun sjældent den fornødne indsigt i betydning af rustudfældninger, revner og afskalninger og vil derfor være negative over for brugen.
- *Offentlig sikkerhed.* Nedfaldende betonstykker er til fare for personer, som færdes i og omkring bygværket.

Korrosionsskader på armering forårsaget af chlorid kan være vanskelig og bekostelig at standse, når de først er kommet i gang. Af økonomiske grunde vil man derfor sikre sig mod, at korrosionen starter. Men også af tekniske og sikkerhedsmæssige grunde er dette berettiget. En grubetæret armeringsstang kan være sprød som støbejern. I denne vejledning regnes "levetiden" i et punkt i en chloridpåvirket konstruktion som "initieringsperioden", dvs. den tid, der går, fra betonens blanding til armeringen i det pågældende punkt begynder at ruste. Den model som anvendes i vejledningen, kan bruges til at estimere initieringstidspunktet i ethvert punkt af en bygningsdel.

En bygningsdel i en konstruktion kan have forskellige lokalmiljøer, varierende betonegenskaber (chloriddiffusivitet), varierende dæklag, mv. Korrosion vil derfor ikke starte på ét tidspunkt overalt i en bygningsdel. Spørgsmålet er da, hvor meget igangværende korrosion man skal tolerere på det tidspunkt, man definerer som "levetiden" eller "initieringsperioden" for bygningsdelen. I overensstemmelse med dansk normgivning ville det ikke være urimeligt at definere "levetiden" eller "initieringsperioden" for en bygningsdel som tiden fra betonens støbning og til at 5 % af armeringsarealet i bygningsdelen er begyndt at ruste.

4.11 Sikkerhedsfilosofi

Anvender man en deterministisk beregningsmetode af "levetid", som er baseret på middelværdier af de styrende parametre vil den virkelige "levetid" blive mindre end beregnet i ca. 50 % af de gennemregnede tilfælde. Dette er naturligvis ikke acceptabelt. Eksemplet i afsnit 4.9 er alene baseret på middelværdier.

Problemstillingen er imidlertid ikke væsentlig forskellig fra beregning af bæreevne og deformation, som kendes fra materiale- og konstruktionsnormer. I disse normer er der indført en sikkerhed, således at man kun får svigt i få tilfælde, hvis man gentager proceduren. Det skal i den forbindelse bemærkes, at der er forskel på sikkerheden ved beregning af en bjælkes bæreevne og nedbøjning. For en bjælkes *bæreevne* må man kræve en høj sikkerhed (lille sandsynlighed for at bjælken bryder sammen), medens man for bjælkens *nedbøjning* ikke kræver så stor sikkerhed (for stor nedbøjning kan være et økonomisk problem, men der er ingen risiko for personskader).

Der skal være lille sandsynlighed for korrosionsskader på armering som følge af chloridangreb, men sker det, er skaden varslet (rust, revner og afskalning). Det kan blive et økonomisk problem, men der er normalt ikke risiko for personskader. Der har været rapporteret enkelte tilfælde af uvarslet kollaps af betonkonstruktioner med korrosionsskader som følge af chloridangreb, men da har der også været andre konstruktive fejl involveret.

Konklusionen må være, at der kan regnes med en begrænset sikkerhed, specielt når de styrende parametre bliver underkastet kontrol i byggefasen.

4.11.1 Deterministisk projektering

Man kan i princippet gå to veje:

- Man kan basere beregning af levetid på middelværdier af de styrende parametre (miljøparametre og betons chloriddiffusivitet), men anvende en regningsmæssig levetid, som er lig med den krævede plus et tillæg på 25 - 50 år, hvis den krævede levetid er 100 år.
- Man kan basere beregning af levetid på karakteristiske værdier af de styrende parametre (miljøparametre og betons chloriddiffusivitet), men anvende en levetid, som er lig med den krævede, fx 100 år.

Begge metoder er praktisk mulige, men det ligger uden for denne vejlednings sigte at opstille sådanne overordnede krav til projektering af betonkonstruktioner.

Den første metode er den simpleste i dagens praksis, hvor der endnu ikke er etableret et tilstrækkeligt grundlag af observationer til at kunne udarbejde karakteristiske værdier for de styrende parametre for chloridholdige miljøer og betonens respons herpå.

4.11.2 Stokastisk projektering

Når der er tale om store marine og trafikale anlæg af armeret beton, kan en projektering ved deterministiske metoder med fx karakteristiske værdier vise sig at blive kostbar. I sådanne tilfælde vil det undertiden vise sig fordelagtigt at anvende probabilistiske metoder til vurdering af sandsynligheden for at bygningsdeles "levetid" bliver mindre end krævet.

Anvendelse af probabilistiske metoder kræver indgående kendskab til den anvendte matematiske models pålidelighed og de statistiske fordelinger af styrende parametre for chloridindtrængning i den pågældende beton. Har man ikke tilstrækkelig talbaseret

information om disse parametres statistiske opførsel, må man estimere den statiske fordeling på den sikre side. Der er to principielt forskellige probabilistiske metoder, som kan bringes i anvendelse, nemlig sikkerhedsindeksmetoden og probabilistiske metoder.

Sikkerhedsindeksmetoden

Man kan søge at beskrive chloridindtrængningsproblemet og den medfølgende korrosionsrisiko på den måde, at et sæt af parametre skal falde i et bestemt område (korrosionsdomæne), for at der sker korrosion. Afstanden mellem det punkt, som beskrives af de pågældende parametres forventningsværdier, og grænsekurven for korrosionsområdet er da et mål, som benævnes sikkerhedsindekset. Denne sikkerhedsmetode er anvendt, fx ved fastlæggelse af partialkoefficienter i de danske konstruktionsnormer. Et stort sikkerhedsindeks svarer til stor sikkerhed, medens et lille sikkerhedsindeks svarer til en lille sikkerhed. Metoden er uafhængig af de styrende parametres statistiske fordelingsformer.

Probabilistisk metode

Ved en probabilistisk metode skal man foruden at kende levetidens afhængighed af de styrende parametre også kende disse parametres statistiske fordeling. Dette kendskab kan være baseret på observationer eller være estimeret ud fra ingeniørmæssig erfaring med emnet.

Den statistiske fordeling af levetiden kan beregnes med ovennævnte kendskab. Det er imidlertid kun muligt at foretage disse beregninger på en ret store computere.

Det kan være vanskeligt at fastsætte den sikkerhed, som skal anvendes ved vurdering af betonkonstruktioners levetid, hvor man endnu kun har lille erfaring. Derfor bliver de probabilistiske metoder normalt anvendt på nye konstruktioner, som skal have samme sikkerhed som en ældre betonkonstruktion, der har fungeret tilfredsstillende. Med tiden vil der dog kunne opnås erfaringer med den nødvendige sikkerhed i forbindelse med holdbarhed af betonkonstruktioner i chloridholdige miljøer.

4.12 Konstruktive revners betydning

I Frederiksen et al. [1997a] er beskrevet, hvilken betydning revner har for chloridindtrængning og korrosion. Her skal kort resummeres de forudsætninger, der ligger til grund for de her anvendte modeller.

De tærskelværdier, der påregnes at være gældende, forudsætter, at der ikke er revnevidder større end 0,1 mm. Derfor skal revner forårsaget af de konstruktive forhold begrænses til revnevidder mindre end 0,1 mm. Dette svarer stort set til de krav, der normalt stilles i den danske betonnorm til aggressivt miljø.

4.13 Krav til dæklagsdimensionering

Ved hjælp af de modeller, der er angivet i Frederiksen et al. [1997a], kan forventningsværdier for dybden af den kritiske chloridkoncentration udregnes. Resultatet af en sådan beregning er vist i tabel 1 for fem forskellige betontyper.

Tabel 1. Forventningsværdier for dybden af den kritiske chloridkoncentration efter 100 års eksponering i marint miljø.

	Neddykket	Splash zone	Atmosfære
100% cement			
v/b =0.3	14	75	13
v/b =0.4	62	133	34
v/b =0.5	144	186	71
95% cement + 5% mikrosilica			
v/b =0.3	15	51	6
v/b =0.4	49	95	16
v/b =0.5	105	136	32
90% cement + 10% mikrosilica			
v/b =0.3	15	37	3
v/b =0.4	45	72	9
v/b =0.5	95	105	18
80% cement + 20% flyveaske			
v/b =0.3	29	76	13
v/b =0.4	96	140	36
v/b =0.5	215	196	75
80% cement + 5% mikrosilica+ 15% flyveaske			
v/b =0.3	25	52	6
v/b =0.4	75	100	17
v/b =0.5	173	144	34

Fastsættelse af dæklaget for en given betonsammensætning og et givet lokalmiljø på en konstruktion kan ske ved at vurdere de usikkerheder, der er indbygget i tabel 1. Der er tale om *estimerede* forventningsværdier - *ikke* om præcise værdier. Det er op til den enkelte rådgiver og bygherre at fastsætte den fornødne sikkerhed. Der kan hentes inspiration i Frederiksen et al. [1997a], men ikke en sikker løsning på dette problem.

Den p.t. enkleste måde at indbygge sikkerhed er angivet i afsnit 4.11.1, idet man multiplicerer den stipulerede (dvs. den ønskede levetid) med en faktor (fx 1,25-1,5) for at få den i projektet krævede initieringsperiode.

Den projekterende har herefter blot tilbage at specificere det *maksimalt tilladelige* dæklag, idet det minimale dæklag er fastsat i betonnormen. Entreprenøren er hermed fri til at vælge betonsammensætning, idet kravene til betonen herefter fremkommer af det opbyggede "levetidssystem".

Man kan forestille sig, at den projekterende vælger at specificere den maksimale dæklagstykkelse i afhængighed af armeringsgraden (fx for splash zonen), idet det må forudsættes, at der over en vis dæklagstykkelse (normalt ca. 75 mm) skal ilægges en skinarmering. Det er herefter entreprenørens opgave at vælge den mest økonomiske udførelsesmetode.

4.14 Opstilling af acceptkriterier

De i nærværende rapport angivne diagrammer eller de i Frederiksen et al. [1997a] angivne formeludtryk for parametrene C_{cr}, C_1, C_{100}, D_1 og D_{100} samt den beskrevne model giver de parametre, der skal tilstræbes. I Frederiksen et al. [1997a] er desuden angivet relationer imellem marine lokalmiljøer i Träslövsläge og laboratoriemålinger iht. prøvningsmetoden NT Build 443.

Dette tilsammen muliggør, at der kan opstilles blot ét acceptkriterium for en beton, selvom denne vil blive anvendt i tre forskellige miljøer i en konkret konstruktion. Man gør følgende:

1. Entreprenøren foreslår en betonsammensætning.
2. Betonens parametre estimeres.
3. Initieringsperioderne for hver af de aktuelle lokalmiljøer beregnes som angivet i eksemplet i afsnit 4.9.
4. Det kontrolleres, om den specificerede initieringsperiode kan estimeres til at være opnået med det (af entreprenøren) valgte dæklag og det valgte eksponeringstidspunkt for betonen. Er dette ikke opfyldt vælges en anden betonsammensætningen og/eller et andet dæklag indtil den estimerede initieringsperiode er større end eller lig med den foreskrevne.
5. For den således fastlagte betonsammensætning aflæses eller beregnes nu parameteren C_1 for *den marine splash zone*, mens D_1 aflæses eller beregnes for *den neddykkede marine zone*. Hertil kan enten formlerne i Frederiksen et al. [1997a] eller diagrammerne i figurene 2-4 og figurene 5-7 anvendes. *Dette gøres uanset, hvilket marint miljø betonen er tænkt anvendt i.*
6. De således fremkomne værdier benævnes nu C_1' og D_1'.
7. Kravet til betonens tæthed overfor chloridindtrængning fremkommer ved, at der for netop disse to parametre eksisterer en empirisk relation med laboratoriemålinger efter prøvningsmetoden NT Build 443, jf. Frederiksen et al. [1997a]. Relationen er, at $3 \times C_1' = C_{sp}$, hvor C_{sp} er overfladekoncentrationen bestemt i laboratoriet iht. NT Build 443, mens $2 \times D_1' = D_{pex}$, hvor D_{pex} er diffusionskoefficienten bestemt i laboratoriet iht. NT Build 443.

For betonen behandlet i afsnit 4.9 ville kravet være blevet, at $C_{sp} < 1{,}7 \times 3 = 5{,}1$ mas% af pulverindholdet eller ca. 1 mas% af betonen og $D_{pex} < 84 \times 2$ mm^2/år = 168 mm^2/år, men det vides allerede fra afsnit 4.9, at den beton ville have en estimeret forventet initieringsperiode i splash zonen på blot 23 år.

Der er, som det er fremgået, en indbyrdes afhængighed imellem betonens sammensætning og acceptkriteriet, idet sidstnævnte er fremkommet ved hjælp af en levetidsestimering netop baseret på den valgte bindemiddelsammensætning og forholdet mellem vand og bindemiddel (pulver) i betonen.

4.15 Prøvningsmetoder

I Frederiksen [1997c] er givet en samling af en del prøvningsmetoder med relevans for chloridindtrængning i beton. Af disse metoder kan nogle anvendes ved forprøvning, mens andre alene er tiltænkt kontrolprøvning og evt. til indledende valg af betonsam-

mensætning. Der er også metoder beregnet til undersøgelse af specielle chloridindtrængningsforhold i beton, fx omkring revner, støbeskel og afstandsklodser.

4.16 For- og kontrolprøvning

Er acceptkriteriet for en beton til en konstruktion beskrevet iht. de ovenfor givne retningslinier, skal betonen altså underkastes prøvning iht. NT Build 443, når den er (præcis) 28 døgn gammel. Ved den indledende forprøvning kan denne prøvning udføres på støbte cylindre, indtil man har sikret sig, at man har valgt en tilstrækkelig tæt beton, der opfylder acceptkriteriet.

I forbindelse med udførelsesforprøvningen (prøvestøbningen) bør der udbores mindst tre kerner fra repræsentative steder. Dette skal ske inden betonen har nået en alder på ca. 7 døgn, idet prøvningen da kan nå at blive iværksat rettidigt.

I forbindelse med kontrolprøvning bør opnåelsen af passende modstand mod chloridindtrængning verificeres ved at udtage borekerner fra selve konstruktionen. Målingen skal naturligvis udføres i dæklaget iht. NT Build 443.

Omfanget af prøvning, der indbefatter udtagning af borekerner fra konstruktionen bør begrænses, men dog udføres i omfang, der svarer til anden prøvning på udborede kerner. Sikring af ensartede betonegenskaber mht. chloridindtrængning kan ske ved hjælp af kontrolmålinger af elektrisk resistivitet på standardcylindre, jf. Frederiksen [1997c].

5 Udførelse

Entreprenøren har ansvaret for konstruktionens udførelse og skal planlægge arbejdet på en sådan måde, at den projekterendes krav og specifikationer bliver opfyldt. Det forudsættes a priori, at arbejdet udføres af en entreprenør, der får betonen leveret fra egen eller en ekstern betonfabrik.

5.1 Betonsammensætning

Betonleverandøren skal fremsætte et forslag til betonsammensætning således, at holdbarhedskravet og kravet til maksimalt dæklag kan opfyldes. Der skal desuden tages højde for projektets krav til styrke og andre holdbarhedsegenskaber (fx krav om frostbestandighed) samt for entreprenørens krav til den friske beton.

Prisen for betonen vil spille en væsentlig rolle, men "prisen" for en beton fremkommer som bekendt ikke blot som delmaterialernes pris. Omkostninger til udvikling, forprøvning samt løbende dokumentation af betonen udgør betydelige dele af betonprisen. Det ligger i sagens natur, at betonleverandøren vil tilstræbe den billigste beton, der opfylder alle krav.

Det vil normalt kræve større omhu at levere beton til chloridpåvirkede konstruktioner end til andre konstruktioner, hvorfor betonens pris naturligt må forventes at være højere. Det vil alt taget i betragtning sandsynligvis være fordelagtigt at begrænse antallet af betontyper til en eller to, fx en særlig tæt beton til marin splash zone og en anden til de to øvrige marine miljøer.

Der kan hentes inspiration til valg af pulversammensætning og vand/pulver-forhold i tabel 1.

5.2 Udførelsesmetoder

Entreprenøren har normalt mulighed for at vælge imellem forskellige udførelsesmetoder. Igen spiller økonomien en vigtig rolle. Der findes specielle forskallingssystemer, hvor fx en tekstildug medvirker til at forbedre overfladens udseende og tæthed. Sådanne systemer kan naturligt vinde markedsandele, hvis de positive effekter kan kapitaliseres og opvejes af besparelser andre steder i udførelsen. Effekten af sådanne tiltag kan måles i laboratoriet, jf. Frederiksen [1997c], og kan principielt medregnes i den hér præsenterede model. Det ligger dog uden for vejledningens formål at behandle dette.

Klampsjern og afstandsklodser er eksempler på detaljer som skal vælges og udformes med omhu. Der opnås ikke en varig vedhæftning imellem beton og en glat overflade af plast. Afstandsholdere bør være af et ikke rustbart materiale, fx beton. Anvendes betonafstandsklodser, skal man dog være opmærksom på, om man kan opnå et tilfredsstillende støbeskel imellem afstandsklods og beton. Dårlig sammenhæng og utætheder ved afstandsklodser vil føre til hurtig korrosion af den bagvedliggende armering. Tætheden af en sådan sammenstøbning kan måles i laboratoriet, jf. Frederiksen [1997c].

Dæklaget på armering, der ligger lige ved siden af huller efter klampsjern skal være som forskrevet til det pågældende lokalmiljø. Hvis hullet efter et klampsjern skal være tæt, skal der udvises stor omhu for at sikre dette.

Erfaringer fra store anlægsbyggerier i begyndelsen af 1990'erne har vist, at støbeskel kan udføres af høj kvalitet. Den flade, der skal være støbeskel, skal renses tidligt efter afbindingen, fx dagen efter støbningen. Stenene frilægges delvist ved hjælp af højtryksspuling (jetspuling) med rent vand, så der opstår en ruhedsdybde på ca. 5 mm. Den herved fremkomne flade skal renses for byggestøv, inden der støbes på den, men er i øvrigt klar til at indgå i et støbeskel med tæthed omtrent som den øvrige beton. Dette kan verificeres ved hjælp af laboratoriemålinger, jf. Frederiksen [1997c].

Reparationer bør undgås - de er tegn på manglende omhu og/eller dårlig planlægning (herunder hører også projektering). Reparationer svigter ofte før de ureparerede naboområder, hvilket er utilfredsstillende for alle parter. Håndtering af reparationer i udførelsesfasen er mere indgående behandlet i HETEKs delopgave 8. Der foreligger en række rapporter og en vejledning om emnet fra denne delopgave, hvorfor interesserede henvises dertil, jf. referencelisten i kapitel 9.

Forprøvning bør opfattes som et godt tilbud til at støtte planlægning af udførelsen. Uanset egne erfaringer, vil det altid være gavnligt at ofre forprøvningen seriøsitet, idet eventuelle problemer i en foranstående produktionsfase kan opdages og eventuel nødvendig korrektion udføres. Hærdnet armeret beton er besværligt at fjerne! I HETEKs delopgave 7 er forprøvning behandlet. Der foreligger en række rapporter og en vejledning om emnet fra denne delopgave, hvorfor interesserede henvises dertil, jf. referencelisten i kapitel 9.

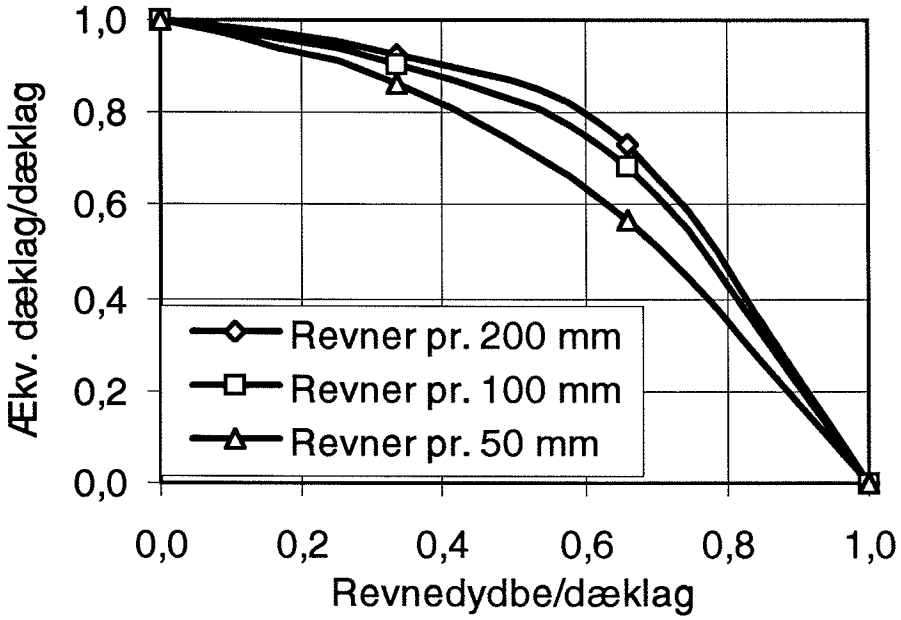
Selve støbningen af betonen kan være bestemmende for kvaliteten af det færdige resultat. I HETEKs delopgave 5 er komprimering behandlet. Der foreligger en række rapporter og en vejledning om emnet fra denne delopgave, hvorfor interesserede henvises dertil, jf. referencelisten i kapitel 9.

En omkostningskrævende aktivitet er efterbehandlingen. Man har fra starten af dette århundrede troet på, at lang efterbehandlingstid gav det bedste resultat. Erfaringer og studier har vist, at hvad der måtte tabes i dagene efter udstøbningen kan senere indhentes, idet regn og fugt fra omgivelserne vil hjælpe til. I HETEKs delopgave 6 er forskellige efterbehandlingsmetoder undersøgt. Der foreligger en række rapporter og en vejledning om emnet fra denne delopgave, hvorfor interesserede henvises dertil, jf. referencelisten i kapitel 9.

5.3 Fine revners betydning

I Frederiksen et al. [1997a] er der gennemført et teoretisk studie af fine revners betydning for chloridindtrængning i beton. Fine revner defineres som værende revner med vidder imellem 0,01 mm og 0,1 mm Fine revner kan typisk stamme fra udførelsen, og være forårsaget af differenstøjninger i betonen, fx pga. uensartet svind eller temperaturbetinget tvang.

Det er i Frederiksen et al. [1997a] vist, at såfremt fine revner vinkelret på overfladen *ikke* når igennem dæklaget, så vil revne*afstanden* og revne*længden* vinkelret på overfladen være bestemmende for, hvor meget revnerne vil reducere dæklagets effektive tykkelse, jf. figur 12.



Figur 12. Effekten af revnedybden ⊥ på overfladen for dæklagets ækvivalente tykkelse ved forskellige intensiteter af fine revner, jf. Frederiksen et al [1997a]

6 Drift og vedligeholdelse

Bygværksejeren har også forpligtelser. For at sikre mod for hurtig udvikling af skader, bør bygværket holdes under kvalificeret opsyn. Det kan dog være nødvendigt at støtte "opsynet" med analyser så vedligeholdelse og reparationer kan udføres rettidigt og økonomisk.

6.1 Økonomiske aspekter

Udgifter til jævnlig inspektion af et bygværk bør naturligvis begrænses til et rimeligt niveau. Dog skal der ofres tilstrækkeligt med ressourcer til, at man bevarer en overbevisning om, at alt går efter planen.

Det er klart, at et bygværk, hvor udførelsesfasen var problematisk, og hvor der måske var et stort antal reparationer under udførelsen, vil kræve en større inspektionsinsats end et byggeri, hvor udførelsen forløb planmæssigt. De fleste byggerier forløber dog ikke planmæssigt, men det betyder ikke nødvendigvis stærkt forøgede udgifter til den jævnlige inspektion.

6.2 Plan for inspektion

Som det fremgår af kapitel 4, vil det være hensigtsmæssigt med en inspektionsindsats, der i starten sker med korte intervaller, men hvor intervallerne ca. fordobles indtil de har nået en længde på ca. 10 år. Eksempelvis vil inspektionstidspunkter, regnet fra eksponeringens start, på ½, 1, 2, 4, 8, 16, 25, 35, 45 år osv. være passende.

Formålet med den intensive inspektion i begyndelsen er at vinde reaktionstid, såfremt udviklingen tyder på, at chloridindtrængningen sker hurtigere end forventet. Desuden opbygges et bedre grundlag for verifikation eller justering af modellerne.

6.3 Inspektionsomfang

For den aktuelle konstruktion må man afgøre, hvor mange lokalmiljøer det er rimeligt at opdele konstruktionen i. Jo større konstruktion, jo flere lokalmiljøer. De tre marine lokalmiljøer (jf. afsnit 4.3) vil sandsynligvis være et passende maksimum for de fleste marine broer. I vejmiljøet, der nok er mere komplekst (jf. afsnit 4.7), vil der være flere lokalmiljøer. Men da vejbroer ofte er væsentligt mindre end marine broer, vil det ikke være rimeligt at inddele i tilsvarende flere lokalmiljøer. Dér må man anvende en grovere inddeling.

Hvis der i konstruktionen findes flere forskellige betonkvaliteter, der er chloridpåvirkede skal antallet af prøver øges svarende hertil.

Indenfor et lokalmiljø kan der være forskellige grader af påvirkning. For eksempel vil læsiden i forhold til den dominerende vindretning på en bropille have den største chloridpåvirkning. I Nilsson et al. [1996] og i Frederiksen et al. [1997a] er det beskrevet mere detaljeret, hvordan miljøpåvirkningerne kan variere på forskellige konstruktioner.

Er formålet med inspektionen at opnå kendskab (eller forbedret kendskab) til chloridindtrængningens fremadskriden generelt, må man sørge for at placere prøverne på en sådan måde at følgende krav opfyldes. Prøverne skal

- udtages udenfor områder med lokaldefekter,
- så vidt muligt udtages så der er plads til efterfølgende prøveudtagninger,
- udtages så den mest intense påvirkning i det pågældende lokalmiljø bliver målt.

Ønsker bygherren at udføre overvågning ved hjælp af målinger direkte på konstruktionen, bør der så vidt muligt tages højde her for allerede i forbindelse med projekteringen.

6.4 Inspektionsmetoder

På en konkret konstruktion kan det være rimeligt at kortlægge chloridpåvirkningens variation ved hjælp af billige metoder, herunder hører:

- erfaringer,
- visuelle metoder og/eller
- kvantitative chloridanalysemetoder.

Til dette formål er metodefrihed acceptabelt fordi "målingerne" kun har en relativ betydning indenfor den enkelte konstruktion.

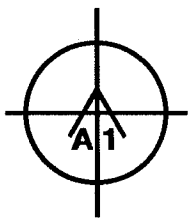
Langt hovedparten af en inspektion finder sted visuelt og med en udstrakt brug af fotos. Da chloridindtrængning ikke kan ses, men kun måles, skal der udtages passende prøver til dette formål.

Selve prøveudtagningen skal ske under hensyntagen til konstruktionens fortsatte virke. Udtagning af borekerner med vandkølet diamantbor med efterfølgende analyse under laboratorieforhold må foretrækkes, fordi chloridprofilmålingerne da kan tilrettelægges således, at hvert punkt i chloridprofilet giver bedst mulig information. I Frederiksen et al. [1997c] er gengivet egnede laboratoriemetoder til dette formål.

Det bør desuden overvejes, om der skal udføres målinger af fugtprofiler. Én af erfaringerne fra Andersen [1996] er, at der i overdækkede konstruktionsdele i vejmiljøet kan være så lave fugtindhold, at chloridindtrængning af den grund er forhindret.

Det er væsentligt, at man forinden udtagning af en borekerne lokaliserer armeringen både fordi man derved kan undgå at bekadige den og fordi man da samtidig kan måle dæklagstykkelsen (forudsat at armeringsdimensionen er kendt). Borestedernes placering i konstruktionselementet registreres med en målskitse og/eller et foto.

I Andersen [1996] er det demonstreret, hvor vigtigt det er at måle carbonatiseringsdybden i forbindelse med chloridprofiler, ider evtuelle afvigelser fra den normalt forventede kurveform ofte kan forklares med omdannelser i cementpastaen, ofte pga. carbonatisering.



Figur 13. Markering af enden på en borekerne. Pilen markerer "opad" eller "nord" på henholdsvis en vandret og lodret borekerne. På en vandret kerne bør koten af den vandrette streg noteres som prøvens kote.

6.5 Vedligeholdelse og overfladebeskyttelse

God beton og en fornuftig konstruktionsudformning kræver lidt vedligeholdelse, mens dårlig beton og/eller en uhensigtsmæssig udformning kræver megen vedligeholdelse. I sidstnævnte tilfælde kan overfladebeskyttelse med malebehandling være en løsning.

Vedligeholdelsestiltag bør altid nøje vurderes med hensyn til rentabilitet, idet betonen og konstruktionen som udgangspunkt er skabt specielt til det pågældende miljø. Derfor kan selv simple vedligeholdelsesarbejder, der gentages år efter år, være urentable i forhold til at "lade stå til".

Beslutning om vedligeholdelsestiltag bør ske på et sikkert grundlag, og har man fulgt udviklingen nøje, kan man sætte ind med et optimalt tiltag på et optimalt tidspunkt. I så fald vil vedligeholdelsestiltaget blive rentabelt.

6.6 Reparationer

Det er som regel billigere at forebygge end at helbrede. Hvis man derfor qua planlagt og jævnlig inspektion har indblik i udviklingen, burde det ikke blive nødvendigt at reparere. Der er dog næsten altid lokale defekter eller småfejl, som giver anledning til lokale reparationsindgreb.

Sådanne småreparationer skal dog også vurderes i en helhed, idet betydningen rent konstruktivt kan være meget lille, mens den visuelle betydning kan være stor.

7 Sammenfatning af delopgaven

Nærværende afsnit giver en sammenfatning af denne HETEK delopgave. Det er hensigten at give læseren et overblik over delopgavens rapporter og hovedresultater - og hvor hvad kan læses. Alle de nedennævnte rapporter er engelsksprogede. Kun nærværende vejledning findes både på dansk og på engelsk.

7.1 Status ved delopgavens begyndelse

Nilsson et al. [1996] introducerer først læseren til emnet ved hjælp af kvalitative beskrivelser af de komplicerede sammenhænge, der hersker i forbindelse med chloridindtrængning i beton. Dernæst behandles og beskrives matematiske modeller for og eksperimentelle erfaringer med chloridbinding, chloriddiffusion og andre former for chloridtransport i beton. Efterfølgende behandles prøvningsmetoder og -principper for de forskellige målinger af chloridbinding og -transport. Betydningen af de mest betydende parametre, der styrer chloridindtrængning gennemgås. Korrosionsinitiering behandles, hvorefter modeller for forudsigelser af chloridindtrængning behandles.

Rapporten konkluderer, at det "gamle" modelgrundlag er blevet fejlanvendt i manglende erkendelse af forskellen på materialeegenskaber og tilsyneladende egenskaber. Materialeegenskaberne kan meget vel være (næsten) konstante, mens de tilsyneladende egenskaber er tidsafhængige.

Det opsummeres endeligt, hvilke mangler der er i kendskabet til chloridindtrænging i beton og identificerer behov for yderligere opklaring. Blandt de højest prioriterede behov for opklaring var følgende:

- Betingelser for korrosionsinitiering.
- Prøvningsmetoder for konvektion af chlorid.
- Transportprocesser i ikke-vandmættet beton.
- Chloridbinding, betydningen af forskellige bindemidler og temperaturvariationer.
- Mekaniske egenskaber af armering med chloridangreb.
- Studier af miljøbetingelserne in-situ ved opfugtnings- og udtørringssituationer.
- Sande elektrokemiske potentialer i afhængighed af lokalmiljøet in-situ.
- Mikroklimaets betydning for chloridindtrængning forskellige steder på en konstruktion.
- Sammenhængen mellem "opnåede" og "potentielle" parametre til beskrivelse af chloridindtrængning.
- Årstidsafhængigheden af transportparametrene.
- Muligheden for at tilpasse modellerne for forudsigelse af chloridindtrængningen til 100 års naturlig eksponering.

Specielt med henblik på HETEK blev følgende emner udpeget som de mest påtrængende:

- Undersøgelse af *v/c*-forholdets betydning for basale karakteristika mht. chloridindtrængning.
- Sammenligning af modellerede chloridprofiler og chloriprofiler målt ved laboratorieeksponering af beton.
- En begrænset teoretisk analyse og modellering af konvektion af chlorid i beton i forbindelse med varierende miljøbetingelser.
- Analyse af tilgængelige og nye feltmålinger af chloridindtrængningen i danske betonvejbroer.
- En analyse af vejmiljøet i forbindelse med tøsalteksponering.
- En forbedring og teoretisk verifikation af den analytiske prediktionsmetode (dvs. den empiriske model eller *Mejlbro-Poulsen modellen*) til også at gælde i vejmiljøet.

Den supplerende forskning og udredning har haft til hensigt opfylde alle de førnævnte punkter så godt som muligt indenfor projektets rammer.

7.2 Undersøgelse af *v/c*-forholdets betydning

Det har længe været kendt, at *v/c*-forholdet havde en væsentlig indflydelse på betonens tæthed generelt og dermed også på tætheden overfor chloridindtrængning specielt. I de seneste år er der dog udviklet nye og bedre prøvningsmetoder til bestemmelse af parametre til beskrivelse af chloridindtrængning i beton. Der manglede derfor kendskab til sammenhængen metoderne imellem og en bestemmelse af de målte parametres afhængighed af *v/c*-forholdet, jf. Frederiksen et al. [1996].

Syv betoner med dansk Lavalkali-Sulfatbestandig Cement og med konstant cementpastavolumen, men med forskellige *v/c*-forhold er blevet undersøgt. Der er anvendt tre forskellige prøvningsmetoder: NT Build 443, Accelereret chloridindtrængning, CTH-metoden, der er en målemetode, som anvender elektromigration samt APM 219, der er en elektrisk resistivitetsmåling.

Der blev fundet en klar og entydig sammenhæng mellem chloridtransportparametre og *v/c*-forholdet. Der blev som ventet fundet en god overensstemmelse imellem NT Build 443 og CTH-metoden for den aktuelt undersøgte beton, der var uden puzzolaner (flyveaske, mikrosilica og højovnsslagge). Det er ligeledes fundet, at resistivitetsmålingen kan give nogle pålidelige måleresultater, der vil kunne bruges i sammenhæng med fx løbende kvalitetskontrol af en betonproduktion. Resistivitetsmålingen er billig og hurtig at gennemføre, men er samtidig den mindst differentierende måling af de tre undersøgte.

7.3 Undersøgelse af danske vejbroer in-situ

I fem danske vejbroer er chloridindtrængningens udvikling blevet undersøgt, jf. Andersen [1997]. Undersøgelsen har taget udgangspunkt i tidligere udførte undersøgelser, hvoraf kun ganske få viste sig at være af en sådan kvalitet, at det var meningsfuldt at basere de videre undersøgelser på resultaterne. Da de tidligere undersøgelser alene var udført på brosøjler, blev de opfølgende undersøgelser, der er udført i forbindelse med denne delopgave, udført på de samme konstruktionsdele. De tidligere undersøgelser er alle udført i årene 1991-92.

Så vidt muligt er der udtaget prøver i umiddelbar nærhed af det sted, hvor prøverne fra de tidligere undersøgelser blev udtaget. Dette har muliggjort gode sammenligninger med de tidligere målte chloridprofiler, så den tidsmæssige udvikling af

chloridindtrængningen kunne analyseres. Samtidig med chloridprofilmålingerne blev der også målt fugtprofiler i konstruktionerne.

Undersøgelserne viste, at der havde været ingen eller kun en meget begrænset udvikling af chloridprofilerne. Fugtprofilmålingerne viste, at betonens fugtighed var ca. 70-80 %RF, hvilket er lidt lavere end luftens gennemsnitsfugtighed, der på årsbasis er ca. 79% i København. Undersøgelserne bekræftede desuden flere tidligere undersøgelser mht. chloridpåvirkningens aftagen med højden over vejbanen. Endelig viste undersøgelserne, at chloridpåvirkningen er større på bagsiden end på forsiden i den undersøgte konstruktionsdel i forhold til trafikken.

En del af observationerne var overraskende, men de har givet anledning til større forståelse af problemstillingen:

- Når betonen er tilstrækkelig "tør" (fugtighed på 70-80 %RF), sker der ingen eller kun en meget begrænset udvikling af chloridprofilerne.
- En forklaring på, at betonen i de undersøgte konstruktionsdele (søljer/søjlevægge under brobaner) er "tør", kan være, at disse er beskyttet mod direkte regn og samtidig er beskyttet mod den natlige udstråling (afkøling) til himmelrummet (dvs. konstruktionsdelene er lidt varmere end den omgivende luft, hvorved en gennemsnitsfugtighed, der lidt lavere end luftens gennemsnitsfugtighed, kan forklares).
- På grund af den foregående forklaring kan der eksistere to hovedgrupper af vejmiljøer: et "tørt" og et "vådt".

Vejmiljøet er dog så ufuldstændigt udforsket, at en tilstrækkelig forståelse ikke er opnået endnu. Der er dog forskning i gang om emnet i det svenske betonholdbarhedsprojekt "Beständighet Tösaltede Betongkonstruktioner". Foreløbige resultater herfra er inddraget og nyttiggjort i denne delopgave, men i løbet af få år, vil der sandsynligvis været opnået en større grad af indsigt i vejmiljøets gåde.

7.4 Teoretisk grundlag for estimering af chloridindtrængning

Rapporten, jf. Frederiksen et al. [1997a] er det teoretiske grundlag for chloridtransportmodellerne og de anbefalinger, der gives i denne vejledning. Rapporten består af tre dele: Modeller, data og projektering.

Første del rummer det komplette matematisk-fysiske grundlag for modellerne samt eksempler på modellernes anvendelse og formåen i relation til laboratoriemålinger og indbyrdes. Desuden behandles revners betydning, dels fra en rent teoretisk synsvinkel, dels mht. armeringskorrosion i praksis.

I anden del præsenteres og behandles de data, der er lagt til grund for de anbefalinger, der senere gives.

Tredje del rummer de mere projekteringsrelaterede dele, idet der foreslås beton- og miljøafhængige modeller for konkrete parametre, og der gives eksempler på deres anvendelse. Desuden vises, hvad man kan forvente sig af videnskabelige chloridindtrængningsmodeller nu og i fremtiden. Endelig gives to eksempler på, hvordan man kan anvende *Mejlbro-Poulsen modellen* dels ved projektering af nye marine konstruktioner, dels ved eftersyn af eksisterende konstruktioner.

Rapporten sammenfatter de opnåede resultater og giver konklusioner, hvorfra det skal fremhæves, at ikke uvæsentlige modelusikkerheder er konstateret.

7.5 Samling af prøvningsmetoder

For fuldstændighedens skyld er en række relevante prøvningsmetoder blevet samlet i ét bind, jf. Frederiksen [1997c]. Rapporten gengiver kopier af de detaljerede prøvningsmetodebeskrivelser, der ligger til grund for det meste af det arbejde, der er udført i forbindelse med udviklingen af de nu beskrevne modeller. Prøvningsmetoderne er alle afprøvede under laboratorieforhold og er fundet egnede:

- NT Build 208, Hardened Concrete, Chloride Content.
- NT Build 357, Concrete, Repairing Materials And Protective Coating: Carbonation Resistance.
- NT Build 443, Hardened Concrete, Accelerated Chloride Penetration (tidligere kendt under metodebetegnelsen APM 302).
- APM 207, Concrete Testing, Hardened Concrete: Micro Chloride Profile.
- APM 214, Concrete Testing, Hardened Concrete: Calcium Content.
- APM 219, Betonprøvning, Hærdnet beton, Elektrisk Resistivitet.
- APM 303, Betonprøvning, Hærdnet beton, Bestemmelse af tærskelværdi for korrosionsinitiering.
- APM 321, Betonprøvning, Hærdnet beton, Kvalitativ 2D chloridindtrængning.
- APM 402, Betonprøvning, Hærdnet beton, Den chloridbremsende evne for maling på beton.
- CTH Rapid Method: Recommended Procedure for Determination of Chloride Diffusion Coefficient by using CTH Rapid Method.

Rapporten gengiver prøvningsmetodernes anvendelsesområde.

8 Konklusion

Det præsenterede system til estimering af levetider kan anses for at være komplet, hvad angår det marine miljø, mens vejmiljøet kun har kunnet behandles kvalitativt pga. mangel på gode data fra eksisterende konstruktioner og systematiske data fra feltanalyser.

Selvom "levetidssystemet" kan anses for at være komplet mht. det marine miljø, er det ikke blevet afprøvet i praksis og evt. svagheder i forbindelse med den praktiske applikation er ikke afsløret. Desuden er "systemets" unøjagtighed ukendt, men der må forventes *betydelige afvigelser* imellem længden af "reelle" initieringsperioder og de med systemet (og modellerne) "estimerede".

"Levetidssystemets" styrke er, at grundstammen (*Mejlbro-Poulsen modellen*) er opbygget på et sammenhængende analytisk matematisk grundlag, der er tilpasset til erfaringer fra praksis. Dertil er knyttet en række erfaringsdata, således at betydningen af forskellige miljøforhold og forskellige betonsammensætninger kan estimeres. Endelig er der skabt simple relationer imellem feltdata og laboratoriedata, således at operationelle acceptkriterier kan formuleres. Hele systemet er så vidt muligt baseret på objektivitet i forhold til erfaringerne (data). "Levetidsystemets" svaghed er paradoksalt nok, at det er baseret på erfaringer. Erfaringsmængden vil til stadighed kunne blive påstået at være "for lille" eller "for dårlig", men det er der kun én løsning på: at indsamle flere gode data!

9 Referencer

Nedenfor gives referencer til alle de rapporter og vejledninger, der er publiceret i forbindelse med hele HETEK-projektet. Hovedreglen er, at rapporterne er engelsksprogede, men at hovedrapporter og vejledninger tillige er dansksprogede.

Delopgave 1, Chloridindtrængning i beton

Nilsson et al. [1996]: Report No. 53
Titel: HETEK, Chloride penetration into concrete, state-of-the-art, Transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models
Forfattere: L.-O. Nilsson, E. Poulsen, P. Sandberg, H. E. Sørensen, O. Klinghoffer

Frederiksen et al. [1996]: Report No. 54
Titel: HETEK, The effect of the *w/c* ratio on chloride transport into concrete - Immersion, migration and resistivity tests
Forfattere: J. M. Frederiksen, H. E. Sørensen, A. Andersen, O. Klinghoffer

Andersen [1996]: Report No. 82
Titel: HETEK, Investigation of chloride penetration into bridge columns exposed to deicing salt
Forfatter: A. Andersen

Frederiksen et al. [1997a]: Report No. 83
Titel: HETEK, A system for estimation of chloride ingress into concrete, Theoretical background
Forfattere: J.M. Frederiksen, L.-O. Nilsson, E. Poulsen, P. Sandberg, Tang L. & A. Andersen

Frederiksen et al. [1997b]: Rapport nr. 87
Titel: HETEK, Chloridindtrængning i beton - vejledning
Forfattere: J.M. Frederiksen & E. Poulsen

Frederiksen et al. [1997c]: Report No. 94
Titel: HETEK, Chloride Penetration into Concrete - Relevant test methods
Editor: J. M. Frederiksen

Frederiksen et al. [1997b]: Report No. 123
Titel: HETEK, Chloride penetration into concrete - manual
Forfattere: J.M. Frederiksen & E. Poulsen

Delopgave 2, Frostbestandighed

Report No. 55, 1996
Titel: HETEK, Method for test of the Frost Resistance of High Performance Concrete, State of the Art
Forfattere: Peter Laugesen, Mette Geiker, Erik Jørgen Pedersen, Niels Thaulow, Finn Thøgersen

Report No. 86, 1996
Titel: HETEK, Method for test of the Frost Resistance of High Performance Concrete, Supplementary Research.
Forfattere: Kirsten Eriksen, Anders Henrichsen, Jens Ole Frederiksen, Mette Geiker, Per Goltermann, Bent Grelk, Peter Laugesen, Erik Jørgen Pedersen, Niels Thaulow, Finn Thøgersen.

Report No. 93, 1997
Titel: HETEK, Method for test of the Frost Resistance of High Performance Concrete, Performance Testing Versus In Situ Observations.
Forfattere: Kirsten Eriksen, Anders Henrichsen, Jens Ole Frederiksen, Mette Geiker, Per Goltermann, Bent Grelk, Peter Laugesen, Erik Jørgen Pedersen, Niels Thaulow, Finn Thøgersen.

Report No. 97, 1997
Titel: HETEK, Method for test of the Frost Resistance of High Performance Concrete, Summary, Conclusions and Recommendations.
Forfattere: Anders Henrichsen, Peter Laugesen, Mette Geiker, Erik Jørgen Pedersen, Niels Thaulow.

Report No. 105, 1997
Titel: HETEK, Frostprøvningsmetoder til bestemmelse af højkvalitetsbetons frostbestandighed. Opsummering, konklusion og anvisning.
Forfattere: Anders Henrichsen, Peter Laugesen, Mette Geiker, Erik Jørgen Pedersen, Niels Thaulow

Delopgave 3+4, Styring af revner i ung beton

Report No. 52, 1996
Titel: HETEK, Control of Early Age Cracking in Concrete, State of the Art
Forfattere: Erik Steen Pedersen, Helle Spange, Erik Jørgen Pedersen, Anders Boe Haugaard-Nielsen, Jacob Hougaard Hansen, Ole Mejlhede Jensen, Birgitte Friis Dela

Report No. 59, 1996
Titel: HETEK, Control of Early Age Cracking in Concrete, Phase 1: Early Age Properties of Selected Concrete
Forfattere: Helle Spange, Erik Steen Pedersen

Report No. 98, 1997
Titel: HETEK, Control of Early Age Cracking in Concrete, Phase 8: Modelling of Support Conditions.
Forfattere: Helle Spange, Erik Steen Pedersen.

Delopgave 5a, Konstruktiv udformning og arbejdsudførelse

Report No. 85, 1997
Titel: HETEK, Structural Design and Workmanship, State of the Art
Forfattere: Find Meyer, Erik Skettrup

Report No. 95, 1997
Titel: HETEK, Vejledning i udformning som forbedrer udførelsen af armerede betonkonstruktioner.
Forfatter: Find Meyer

Report No. 96, 1997
Titel: HETEK, Guidelines for Structural Detailing to improve Concreting
Forfatter: Find Meyer

Delopgave 5b, Stavvibrering

Report No. 74, 1997
Titel: HETEK, Anvisning i stavvibrering
Forfattere: Jens Frandsen, Karin-Inge Schultz

Report No. 81, 1997
Titel: HETEK, Recommendation for Poker Vibration
Forfattere: Jens Frandsen, Karin-Inge Schultz

Report No. 88, 1997
Titel: HETEK, Undersøgelse af stavvibrering
Forfattere: Jens Frandsen, Karin-Inge Schultz

Report No. 89, 1997
Titel: HETEK, Investigation of Poker Vibration
Forfattere: Jens Frandsen, Karin-Inge Schultz

Delopgave 5c, Laboratorieundersøgelse af vibrering

Report , 1996
Titel: HETEK, Laboratorieundersøgelser af vibrering, Afgangsprojekt, efterår 1996. DTU - Institut for Anvendt Bygge- og Miljøteknik
Forfattere: Anne Kirstine Gjaldbæk, Pernille Konner

Report No. 90, 1997
Titel: HETEK, Laboratory Tests of vibration
Forfattere: Anne Kirstine Gjaldbæk, Pernille Konner, Jens Frandsen

Delopgave 6, Efterbehandling

Report No. 37, 1996
Titel: HETEK, Curing, State of the Art
Forfattere: Anette Berrig, Marlene Haugaard, Per Fogh Jensen

Report No. 38, 1996
Titel: HETEK, Curing, Supplementary Research, Proposal
Forfattere: Marlene Haugaard, Anette Berrig

Report No. 73, 1996
Titel: HETEK, Curing, Phase 1: Laboratory Tests
Forfattere: Kirsten Riis, Marlene Haugaard

Report No. , 1997
Titel: HETEK, Curing, Phase 2: Evaluation of Test Results
Forfattere: Tommy Nielsen

Delopgave 7, Vejledning i prøvestøbninger

Report No. 40, 1996
Titel: HETEK, Guide for Trial Castings, State of the Art
Forfatter: Find Meyer

Report No. 65, 1996
Titel: HETEK, Pre-Testing of Concrete, Constituent Materials, Composition and Workmanship
Forfatter: Find Meyer

Report No. 84, 1996
Titel: HETEK, Test Panels and Exposure Sites
Forfattere: Find Meyer, Lasse Toft

Rapport Nr. 91, 1997
Titel: HETEK, Forprøvning af fremstilling af betonkonstruktioner. Hovedrapport og orienterende beskrivelse
Forfatter: Find Meyer

Report No. 92, 1997
Titel: HETEK, Pre-Testing of Concrete Properties and Workmanship. Main Report and Guidelines
Forfatter: Find Meyer

Intern rapport, 1996
Titel: State of the Art, Bilagsrapport. Oplysninger fra 12 projekter

Delopgave 8, Reparationer i udførelsesfasen

Report No. 67, 1996
Titel: HETEK, Repair during the Construction Phase, State of the Art
Forfattere: Ole Viggo Andersen, Anders K. Christoffersen, Bodil Børgesen, Bent Foverskov

Report No. 68, 1997
Titel: HETEK, Repairs during the Construction Phase, Field Studies
Forfattere: Ole Viggo Andersen, Anders K. Christoffersen, Bodil Børgesen

Report No. 69, 1997
Titel: HETEK, Guidelines for Repairs during the Construction Phase
Forfattere: Ole Viggo Andersen, Anders K. Christoffersen, Bent Foverskov

Interne rapporter:

1996
Title: HETEK, Reparationer i udførelsesfasen. Afvigelser i udførelsesfasen

1996
Title: HETEK, Reparationer i udførelsesfasen. Arbejdsprocedurer for reparationer

1996
Title: HETEK, Reparationer i udførelsesfasen. Oversigt over reparationsmaterialer

1996
Title: HETEK, Reparationer i udførelsesfasen. Prøvningsmetoder og godkendelseskriterier

1996
Title: HETEK, Reparationer i udførelsesfasen. Billedmateriale

1997
Title: HETEK, Reparation i udførelsesfasen, Feltstudier. Bilagsrapport

10 Symbolforklaring

Nedenfor gives en liste over de i rapporten anvendte symboler og forkortelser samt tilhørende måleenheder, når dette er relevant.

Symbol	Enhed[1]	Beskrivelse
Latinske bogstaver		
c	m	Tykkelse af betondæklag uden på armering.
$C(x,t)$	mas%	Chloridkoncentration i beton i dybden x under betonoverfladen til tiden t.
C_{cr}	mas%	Chloridtærskelværdi.
C_i	mas%	Initialchloridindhold i beton.
C_r	mas%	Referencechloridindhold i beton.
C_s	mas%	Overfladechloridkoncentration i beton.
C_{sa}	mas%	Overfladechloridkoncentration i beton, fundet ved regressionsanalyse i et opnået chloridprofil efter naturlig eksponering.
C_1	mas%	Overfladechloridkoncentration (randbetingelse) i et opnået chloridprofil efter 1 års naturlig eksponering.
C_{100}	mas%	Overfladechloridkoncentration (randbetingelse) i et opnået chloridprofil efter 100 års naturlig eksponering.
D_a	m^2/s	Opnået transportkoefficient, der karakteriserer et chloridprofil efter naturlig eksponering i en uspecificeret tid.
D_{aex}	m^2/s	Opnået transportkoefficient, der karakteriserer et chloridprofil efter naturlig eksponering til tiden t_{ex}.
D_{pex}	m^2/s	Potentiel transportkoefficient, der karakteriserer et chloridprofil efter en standardiseret eksponering i laboratoriet til tiden t_{ex}.
ækv $(v/c)_b$	1	Det ækvivalente v/c-forhold mht. randbetingelserne C_1 og C_{100}.
ækv $(v/c)_{cr}$	1	Det ækvivalente v/c-forhold mht. tærskelværdien for korrosionsinitiering.
ækv $(v/c)_D$	1	Det ækvivalente v/c-forhold mht. den opnåede diffusionskoefficient efter et års eksponering D_1.
t	s	Tid.
t	s	Betonens alder.

[1] Med mindre andet er anført anvendes den her givne enhed.

t_{cr}	s	Initiatieringsperioden for armeringskorrosion.
t_{ex}	s	Tiden for første chlorideksponering.
t_{in}	s	Inspektionstidspunkt.
Δt	s	Varigheden af chlorideksponeringen.
v	m	Revnevidde.
x	m	Dybden bag den eksponerede betonoverflade.
x_{cr}	m	Dybden bag den eksponerede betonoverflade, hvori den kritiske chloridkoncentration er opnået.

Græske bogstaver

α	1	En parameter der beskriver den tidsafhængige reduktion af den opnåede chloriddiffusionscoefficient.
τ	1	Tidsparameter.

Indices

sa	Overflade, opnået.
ex	Eksponering.
p	Base i Mejlbros Λ og Ψ funktioner.
min	Minimum.
max	Maksimum.
i	Initial.
cr	Kritisk.

Forkortelser

v/b	kg/kg	Vand/binder-forhold (*vand:* den totale mængde frit vand i blandingen; *binder:* Portland cement, flyveaske, mikrosilica, og/eller højovnsslagge).
v/c	kg/kg	Vand/cement forhold (vand: den totale mængde frit vand i blandingen; *cement:* Portland cement).
ACCE		AEC, Chalmers, CEmenta.
BMB		"Beständighet Marina Betongkonstruktioner" - Et svensk forskningsprojekt.
BTB		"Beständighet Tösaltade Betongkonstruktioner" - Et svensk forskningsprojekt.
CE		Cement.
ækv		Ækvivalent.
FA		Flyveaske.
NT		Nordtest.
HETEK		Forkortelsen for det danske forskningsprojekt Højkvalitetsbeton - Entreprenørens TEKnologi.
OPC		Almindelig portland cement
RH		Relativ fugtighed
SF		Mikrosilica.
SRPC		Sulfatbestandig portland cement.