

Chloridudtrækning af beton

Februar 1989
Michael Jansson
Ruth Sørensen



TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
BUILDING MATERIALS LABORATORY

F O R O R D.

Den foreliggende rapport er en revideret udgave af et eksamensprojekt udført ved Laboratoriet for bygningsmaterialer (LBM) i samarbejde med Instituttet for metallære (IFM).

Rapporten omhandler chloridudtrækning fra beton - teoretisk og eksperimentelt.

Målgruppen for denne rapport er personer med interesse for nye metoder til restuarering af armerede betonkonstruktioner.

Vi vil gerne benytte lejligheden til at takke vore projektvejledere Professor Ernest Maahn og lektor Anders Nielsen for de råd og den vejledning vi har modtaget.

Vi vil gerne takke personalet ved LBM for det hyggelige samvær, samt for deres bistand ved løsning af de mange praktiske problemer. Endelig vil vi gerne takke personalet ved IFM for deres venlige og tålmodige hjælp i laboratoriet og ved scanningmikroskopet.

Herudover en særlig tak til Gerda Krarup ved Instituttet for mineralindustri, der har stillet apparatur og ekspertise til rådighed ved fremstilling af planslib.

Vi har til projektet modtaget materialer fra:
Stålvalseværket og Hellesens industrier

Laboratoriet for bygningsmaterialer, DtH, Lyngby
Februar 1989
Michael Jansson og Ruth Sørensen.

S A M M E N D R A G.

Metoden til chloridudtrækning af beton går ud på, at udtrække chlorider ved påtrykning af et elektrisk felt. Armeringsjernet i konstruktionen anvendes som katode og der påmonteres en ydre elektrode som anode. Den eksterne anode anbringes i en elektrolyt på betonoverfladen, chloriderne migrerer ud i elektrolytten, der efter chloridudtrækningen fjernes.

Forsøgene er udført på cylindriske prøvelegemer med armeringen centralt indstøbt.

Metodens effektivitet som funktion af vandcementforhold, tid og strømtæthed er målt. Ændringen i fugtindhold er målt, og der er iagtaget ændringer i mikrostrukturen.

Af målemetoder er anvendt: Rapid chlorid test, energidispersiv røntgenanalyse, elektrokemisk potentialemåling, polarisationsmåling, relativ luftfugtighedsmåling, gravimetri, scanning elektron mikroskopi og visuelle observationer.

Resultaterne viser, at det er muligt at udtrække større mængder chlorid af beton ved hjælp af det påtrykte elektriske felt.

Det er ikke muligt at konstatere, om armeringskorrosionen er effektivt stoppet efter chloridudtrækningen.

Ulemperne ved metoden er, at der efter chloridudtrækningen vil være de nødvendige forudsætninger tilstede for alkalikiselreaktioner, at vedhæftningen mellem armeringsjern og beton bliver dårligere, og at der kommer revner i betonens mikrostruktur.

INDHOLDSFORTEGNELSE.

1. INDLEDNING	1
2. BETONS EGENSKABER	5
2.1 Cements struktur og egenskaber	5
2.2 Transportmekanismer i beton	10
2.3 Chlorider i beton	13
3. KORROSION	19
3.1. Elektrokemisk korrosion	19
3.2. Korrosionsforhold i sund beton	24
3.3. Korrosionsforhold i chloridholdig beton	26
3.4. Korrosionsforhold i karbonatiseret beton	30
4. ELEKTROKEMISK BESKYTTELSE	33
4.1. Katodisk beskyttelse	34
4.2. Chloridudtrækning	36
4.3. Realkalisering	41
5. UDVALGTE MÅLEMETODER	45
5.1. Chlorid måling	45
RCT-test	45
EDS (EDAX)	48
5.2. Bestemmelse af fugttilstand	50
RF-måling	50
Gravimetri	53
Sorptionsisoterm	55
5.3. Elektrokemisk potential måling (EKP) ...	60
5.4. Polarisation	61
5.5. Porestruktur	61
6. EKSPERIMENTEL DEL	65
6.1. Problemstilling	65
6.2. Problemløsning	68
6.3. Forsøgsprogram	72

Forsøgsplan - forprojekt	72
Forforsøg	73
Endelig forsøgsplan	77
6.4. Fremstilling af prøvelegemer	81
Materialer	82
Fremstilling	84
6.5. Chloridudtræknings forsøg	88
Forsøgsopstilling og udførelse	88
Prøveudtagelse og måleprocedure	91
6.6. Resultatbehandling	102
RCT-test	102
EDAX-analyse	111
RF-måling	115
Gravimetri	118
EKP-måling	122
Polarisation	124
Porestruktur	125
Vedhæftning	134
Visuelle observationer	136
7. DISKUSSION	139
8. KONKLUSION	151
LITTERATURLISTE	153
APPENDIX A: Fremstilling af planslib	157
APPENDIX B: Fremstilling af ekstraktionsvæsker ..	161
APPENDIX C: Demoleringsforsøg	163

1.0 I N D L E D N I N G.

Der har i de senere år vist sig omfattende nedbrydning af betonkonstruktioner forårsaget af armeringskorrosion, i denne sammenhæng kan bl.a nævnes boligbyggerierne Høje Gladsaxe og Brøndby Strand.

Der er tale om nedbrydning, når betonkonstruktionens etablerede og ved afleveringen accepterede bæreevne ikke kan bevares i bygværkets stipulerede funktionstid og/eller der i samme periode sker sådanne overfladeændringer, at bygværkets æstetik lider derved.

Nedbrydning som følge af armeringskorrosion sættes igang ved påvirkninger fra omgivelserne, så som chloridindtrængning (tøsaltning) eller kuldioxidindtrængning - som resulterer i karbonatisering.

Ved armeringskorrosion mister armeringen sin oprindelige styrke, idet tværsnitsarealet reduceres efterhånden som processen skrider frem, og oftest revner betonen og dæklaget skaller af p.g.a volumenvirkningen.

Det er derfor nødvendig, dels af sikkerhedsmæssige grunde og dels af æstetiske grunde at reparere bygværket, når nedbrydning er påbegyndt.

Den traditionelle metode er at fjerne den dårlige beton, rense armeringen og udstøbe ny beton.

Denne metode fungerer imidlertid ikke altid tilfredsstillende, f.eks. når betonen er chloridinficeret, hvorfor nye metoder er under udvikling.

Blandt de nye metoder er katodisk beskyttelse af armeringen, chloridudtrækning fra betonen samt realkalisering af betonen. Disse metoder er endnu på det indledende stade herhjemme, og der har været megen debat omkring dem. Katodiskbeskyttelse af armeringsjern har været anvendt på brodæk i USA i en årrække, chloridudtrækning og realkalisering har været afprøvet på enkelte byggerier i Norge.

Fælles for de tre metoder er, at der skabes en strømkreds mellem armeringen som katode og en ydre påsat anode. Ved katodisk beskyttelse anvendes strømmen til at sænke armeringsjernets potentiale, herved hindres/hæmmes den videre korrosion. Ved chloridudtrækningen anvendes strømmen til chloridtransport ud af betonen, mens den ved realkalisering anvendes til indpresning af en basisk væske i betonen, hvorved denne igen bliver alkalisk. Ved de to sidst nævnte metoder stopper korrosionen, idet det armeringspassiverende miljø i betonen genoprettes. Det er af afgørende betydning, at de nye metoder testes grundigt, således at nye skader ikke introduceres ved reparationen, eventuelt med uoverskuelige konsekvenser som resultat.

Der udføres for tiden fuldskala forsøg med katodisk beskyttelse i dansk regi, de to andre metoder, chloridudtrækning og realkalisering, er endnu ikke dokumenterede.

Vi har valgt i vores eksamensprojekt at beskæftige os med chloridudtrækning fra beton, da vi synes, at denne metode indeholder de mest spændende perspektiver. Metoden er enkel og der gribes ikke ind i konstruktionens arkitektur, som f.eks. ved katodisk beskyttelse.

FORMÅLET MED PROJEKTET ER AT UNDERSØGE CHLORIDUDTRÆKNING AF SALTINFICERET BETON TEORETISK OG EKSPERIMENTELT.

DEN TEORETISKE DEL OMHANDLER BL.A. CHLORIDERS BINDINGS- OG TRANSPORTFORHOLD I BETON, ARMERINGSKORROSION OG CHLORIDUDTRÆKNINGSPROCESSEN.

DEN EKSPERIMENTELLE DEL SKAL BELYSE METODENS EFFEKTIVITET SAMT EVENTUELLE ULEMPER VED METODEN.

Vores indgangsvinkel til problemstillingen er bygningsmaterialelæren. Dette betyder, at vi ikke går i dybden med eksempelvis de kemiske sider af problemstillingen, men i stedet koncentrerer os om aspekter, der traditionelt falder inden for en bygningsingeniørs område.

Rapporten er opbygget på følgende måde:

De første fem kapitler belyser den nødvendige teori i forhold til problemstillingen, mens de sidste tre kapitler omhandler chloridudtrækningsforsøg og resultaterne af dette.

Den teoretiske del af rapporten indeholder en redegørelse for betonens indre struktur og transportmekanismer samt for korrosionsforholdene i beton. Derudover beskrives de tre "nye" metoder til rehabilitering af betonkonstruktioner. Endelig gennemgås det teoretiske grundlag for de i forsøget anvendte målemetoder.

Den eksperimentelle del af rapporten beskriver den iterative proces fra ide til endelig forsøgsplan, samt selve forsøget - fra udstøbning af prøvelegmer til diskussion af forsøgsresultaterne.

2.0 R E L E V A N T E B E T O N E G E N S K A B E R.

I dette kapitel belyses de, i forhold til problemstillingen, relevante betonegenskaber, bl.a. hvorledes væsker og ioner transporteres, samt chloriders bindings- og transportforhold i beton.

2.1 Cements struktur og egenskaber.

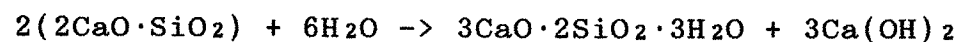
For senere at kunne beskrive forholdene i den chloridificerede beton, belyses først i korte træk de forhold og egenskaber der gælder for den "upåvirkede" beton.

Bindemidlet i almindelig beton er i de fleste tilfælde portlandcement.

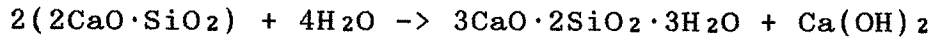
Cementen, der som de vigtigste bestandele indeholder klinkerminerallerne tricalciumsilikat, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, forkortes til C_3S , dicalciumsilikat, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, forkortes til C_2S , tricalciumaluminat, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, forkortet til C_3A og tetracalciumaluminatferrit, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ forkortes til C_4AF , bliver fremstillet af silikatholdige komponenter som f.eks ler eller skifer, og af kalkholdige komponenter som kalksten eller kridt. Materialerne formales og sintres sammen til cementklinker ved temperaturer på $1400-1500^\circ\text{C}$. Det er her de førnævnte klinkermineraller dannes. Cementklinkerne formales til portlandcement under tilsætning af gips.

Ved tilsætning af vand til cementen begynder denne at hydratisere. Ved hydratiseringen omdannes klinkerminerallerne til nye forbindelser. Reaktionerne ved hydratiseringen er endnu ikke helt klarlagte, men for de fire vigtigste klinkermineraller kan hydratiseringen regnes for at forløbe på følgende måder [1] :

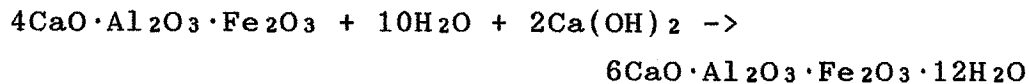
C_3S :



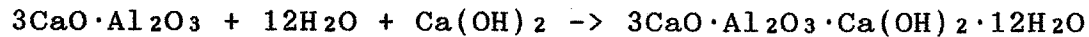
C₂S:



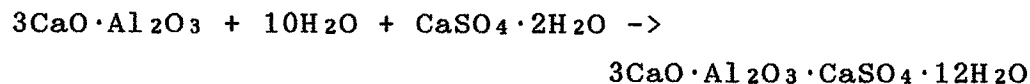
C₄AF:



C₃A:

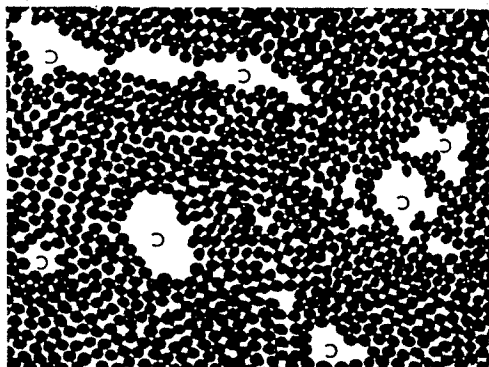


og



Det ses af reaktionerne, at der dannes Ca(OH)₂, hvilket medfører, at porevæskens pH i betonen får en pH fra 12-14. Det i hydratiseringsprodukterne bundne Ca(OH)₂ samt det fri, udfældede Ca(OH)₂ virker som pH-buffer for porevæskens.

Det er hydratiseringsprodukterne, også kaldet cementgelen, der binder betonen sammen, men det er ikke så meget den kemiske sammensætning af disse, der har indflydelse på den hårdnede betons egenskaber, som den fysiske struktur [28].

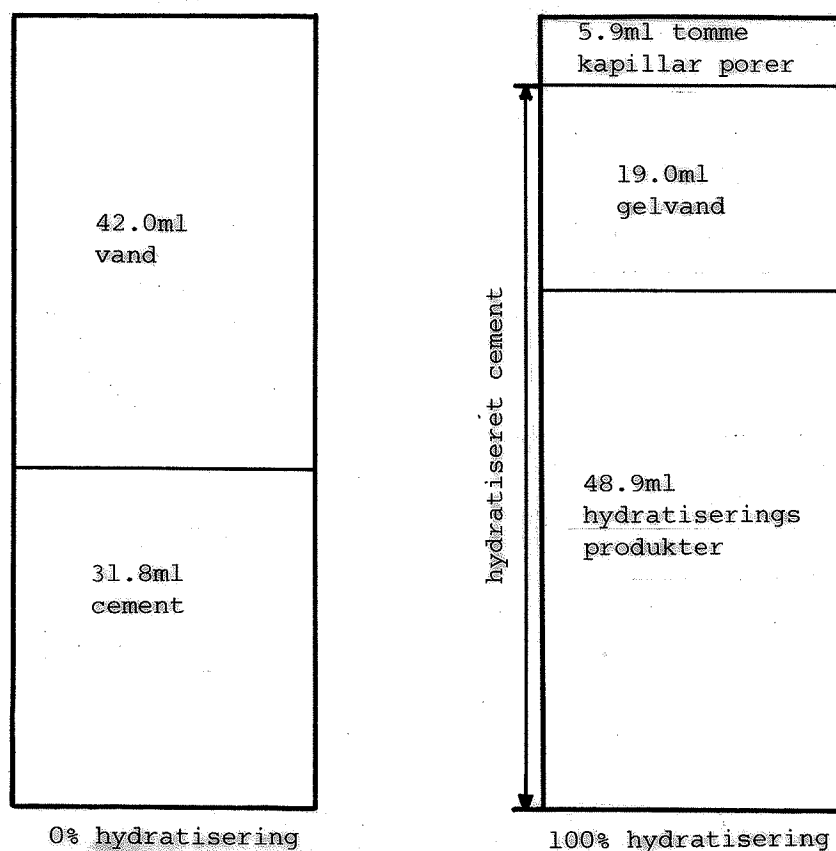


Figur 2.1.1. Simplificeret model af pasta-strukturen [28].

○ = kapillarporer

● = gelpartikler, og de små mellemrum er gelporer, dog i overdrevet størrelse.

Cementgelen, som er en kompakt masse i cementpastaen, har en karakteristisk porøsitet kaldet gelporer. Da mængden af cementgel sædvanligvis ikke er tilstrækkelig til at udfylde den plads, der var optaget af blandevandet, vil der opstå hulrum i cementpastaen. Hulrummene kaldes kapillarporer [29]. Forløbet er illustreret på figur 2.1.2.



Figur 2.1.2. Volumenændringer under hydratiseringen af cementpasta med $v/c = 0.42$ [28].

Cementgel er de hydratiserede cementpartikler, mens cementpastaen består af cementgel, kapillarporer og eventuelle uhydratiserede cementpartikler.

Kapillarporerernes diameter ligger i størrelsen 2 nm til 5 μm [1]. Selve kapillarporøsiteten afhænger både af v/c -forholdet og hydratiseringsgraden, da den som nævnt er den del af volumenet, der ikke udfyldes af cementgelen. For v/c -forhold højere end 0.38 [28], udfyldes

hele volumenet ikke, og der dannes et system af porer, der gør pastaen permeabel. Efterhånden som hydratiseringen forløber, vil kapillarporerne blive afskåret fra hinanden af den voksende gel. Det er derfor et spørgsmål om tid før pastaen er tæt. Det gælder dog ikke for v/c-forhold over 0.7, da der selv ved fuldstændig hydratisering ikke er gel nok til udfylde alle kapillarporerne.

Gelporerne er, som vist på figur 2.1.1, meget mindre end kapillarporerne. Deres diameter ligger i størrelsen 1,5-20 nm [1], og udgør et forbundet system. Gelporerne udgør omkring en trediedel af den samlede gelmængde. Ved stigende hydratisering øges volumet af gelporer på bekostning af kapillarporerne.

Den fysiske struktur er afhængig af tid, temperatur og fugtighed, f.eks. giver en høj temperatur hurtigere hydratisering, og dermed hurtigere styrkeudvikling, men denne hurtigere styrkeudvikling sker på bekostning af slutstyrken.

Det er derfor vigtigt, at cementen har vand nok til hydratiseringsprocessen - den må ikke udtørre. Den hårdnende beton anbringes derfor i et miljø, hvor den holdes vandmættet, da hydratiseringen kun kan finde sted i vandfyldte porer. For at holde porerne vandfyldte kan betonen lagres under vand eller lagres forseget. Ved forseglet lagring skal man være opmærksom på, at hydratiseringen kun kan fortsætte, hvis mængden af vand i cementpastaen er mindst to gange den mængde vand, der allerede er bundet. Selvudtørringen er derfor af stor betydning for blandinger med v/c-forhold mindre end 0.5, da der her ikke er store mængder vand tilstede. For blandinger med et v/c-forhold højere end 0.5 er hydratiseringsgraden for forseget lagring den samme som ved vandlagring. Hertil kommer at kun ca. halvdelen af det i cementpastaen tilstedeværende vand kan indgå i kemiske forbindelser, uanset om den tilstedeværende mængde er mindre end den mængde, der skal anvendes i forbindelserne [28].

Det vand, der findes i hårdnet cementpasta, kan opdeles i fire former:

Kemisk bundet vand

Fysisk bundet vand

Kapillært fastholdt vand

Frit vand

Det kemisk bundne vand er det vand, som bliver en integreret del af hydratiseringsprodukterne. Det kaldes også for det ikke-fordampelige vand.

Det fysisk bundne vand er det vand, der er adsorberet på overfladen af gelpartiklerne med van der Waalske bindinger. Det fysisk bundne vand fylder gelporer og indre overflader.

Det kapillært fastholdte vand fastholdes i kapillarporerne ved hjælp af overfladespændingen.

Det frie vand findes i kapillarporer, revner og huller.

Det fysisk bundne vand, det kapillært fastholdte vand og det frie vand kaldes tilsammen for det fordampelige vand [29].

I det ovenstående er cementen og forhold omkring denne beskrevet, men cementen er kun en del af betonen, som herudover også består af tilslag (sand og sten) og vand, samt evt. additiver.

Tilslaget udgør typisk $3/4$ af det samlede betonvolumen [28], og det er derfor en vigtig del af betonen. Dårligt tilslag vil kunne påvirke betonens styrke og holdbarhed. Det dårlige tilslag kan f.eks. indholde reaktiv flint, der kan medvirke til alkalikisel reaktioner, se kapitel 4, følgeskader heraf kan medføre kortslutning af diffusionsvejene for indtrængende ioner.

Kornformen af tilslaget er også af betydning, idet der ved komprimeringen kan opsamles vand under flade sten, hvilket kan give grove porer.

Mængden af det fordampelige vand i cementpastaen i en almindelig vandmættet beton varierer fra ca. 60 % ved blandingstidspunktet, til omkring 40 % når cementpastaen er fuldstændig hydratiseret [31]. Dette vand indeholder en del forskellige ioner, men hovedsagelig Na^+ , K^+ , Ca^{++} , SO_4^{--} og OH^- , hvor koncentrationerne varierer fra

beton til beton. Undersøgelser har vist, at en sådan fugtig beton stort set opfører sig som en elektrolyt med en specifik modstand af størrelsesordenen $100 \Omega m$. Derimod har ovntørret beton en specifik modstand af størrelsesordenen $10^9 \Omega m$, hvilket betyder at en sådan beton er en god isolator [28].

Transporten af den elektriske strøm gennem den fugtige beton kan betragtes som en transport af ioner gennem det fordampelige vand i cementpastaen. En forøgelse af fugten og/eller antallet af ioner vil betyde et fald i den elektriske modstand, og vice versa [31]. Den elektriske modstand afhænger tillige af v/c-forholdet, idet den falder hurtigt med stigende v/c-forhold. Ved tilsætning af salt til betonen, f.eks. gennem blandevandet, er formindskelsen af modstanden størst for betoner med høje v/c-forhold, mens den er ganske lille i betoner med lave v/c-forhold [28]. Dette skyldes sandsynligvis forskellen i porestrukturen, og at der er mere cementgel til at binde ionerne i disse betoner.

Den elektriske modstand er tillige afhængig af temperaturen [31], da ionernes hastighed afhænger af denne.

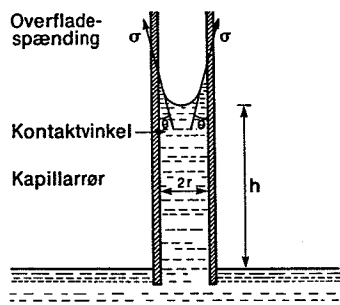
2.2 Transportmekanismer i beton.

Transport af væske og ioner i beton kan ske v.h.j.a. forskelle i væsketryk eller damptryk.

I det følgende beskrives kapillartransport og diffusion.

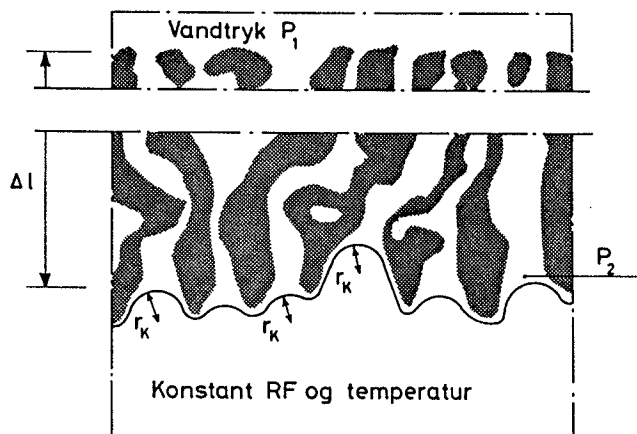
Ved kapillartransport er den drivende kraft væsketrykket. Transporten sker ved, at der dannes krumme væskeoverflader, såkaldte menisker, i kapillarporerne, se figur 2.2.1.

Der skelnes mellem to former for kapillartransport, stationær kapillarsugning og opfugtning ved kapillær opsugning [32].



Figur 2.2.1. Menisken i en kapillarpore [1].
Princippet ved kapillær opfugtning.

Stationær kapillarsugning finder sted, når det porøse materiale befinder sig mellem et konstant vandtryk på den ene side og et konstant klima på anden side, dvs. konstant relativ fugtighed og konstant temperatur.



Figur 2.2.2. Princip ved stationær kapillarsugning [32].

Under menisken dannes et hydraulisk undertryk, der trækker væsken frem til overfladen, hvor den så kan fordampe.

Kapillær op sugning finder sted, når de gennemgående kapillarporer bringes i kontakt med en væskeoverflade. Væsken suges ind i materialet ved det førnævnte hydrauliske undertryk, se figur 2.2.1. Det hydrauliske undertryk kan findes af:

$$p_h = -(2\sigma \cos\theta)/r \quad , (se \text{ figur } 2.2.1)$$

hvor

p_h = hydraulisk tryk

σ = væskens overfladespænding

θ = kontaktvinkelen mellem væske og overflade

r = porens radius

I betonberegninger sættes ofte $\theta = 0$, og der fås så følgende udtryk:

$$p_h = -(2\sigma)/r \quad , [1]$$

Transport ved diffusion sker betydeligt langsommere end ved kapillar transport, da der her er tale om udligning af koncentrationsforskelle i enten gas- eller væskefase. Diffusionshastigheden afhænger af:

- 1) Klimaet i omgivelserne, dvs. den relative luftfugtighed, temperaturen og trykket.
- 2) Diffusionskonstanterne og koncentrationen af de involverede faser.
- 3) De tekniske parametre af betonen, inklusiv dennes kapillarporøsitet [3].

Stoftransport ved diffusion kan opdeles i transport i en stationær tilstand, der kan udtrykkes ved Ficks første lov, og transport i en ikke-stationær tilstand, som kan udtrykkes ved Ficks anden lov.

Ficks første lov kan skrives som en førsteordens differentialligning:

$$I = -D(\partial c / \partial x) \quad , [4]$$

hvor

I = Stoftransport pr. arealenhed pr. tidsenhed

D = Diffusionskoefficienten

c = Koncentrationen

x = Længdekoordinaten

Det negative fortegn angiver, at transporten sker fra områder med høj koncentration til områder med lav koncentration [32]. Diffusionskoefficienten er et mål for den stofs specifikke permeabilitet og viser den mængde, der diffunderer pr. tidsenhed i relation med koncentrationsgradienten [33]. Ved diffusion efter Ficks første lov er der et konstant koncentrationsniveau i indtrængningsfronten [33].

Ficks anden lov kan skrives som en andenordens differentialligning:

$$\partial c / \partial t = D(\partial^2 c / \partial x^2)$$

hvor

t = tiden

For begge de viste udtryk er diffusionskoefficienten uafhængig af koncentrationen. Udtrykkene kompliceres yderligere, hvis transporten sker i flere dimensioner. Et eksempel på transport i beton efter Ficks første lov er diffusion af gasformig CO_2 gennem de åbne porer i en lufttør beton.

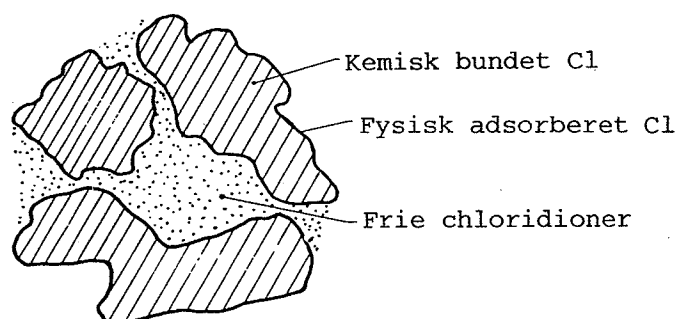
2.3 Chlorider i beton.

Dette afsnit omhandler chlorider i beton, hvor de kommer fra, hvorledes de er bundet, og hvordan de bevæger sig.

Årsagerne til, at der kommer chlorider i beton, er mange. De kan være blandet i fra begyndelsen, enten tilsat

som accelleratorer i form af calciumchlorid, CaCl_2 , eller de kan være blandet i som forurening via tilslag eller blandevand. Chloriderne kan også trænge ind i den færdige beton, hvis konstruktionen er udsat for tørsalting, som det er tilfældet med veje, broer og altangange. Konstruktioner placeret i havvand f.eks. bropiller og havnekonstruktioner kan også blive chloridbelastede. Endelig tilsættes der salt til vandet i svømmebade herhjemme, hvilket også giver anledning til chloridindtrængning.

Chloriderne i betonen findes bundet i hydratiseringsprodukterne, adsorberede på porevæggene, som krystaller i porene eller som frie ioner, chloridernes bindingsforhold ses på figur 2.3.1.



Figur 2.3.1. Chloriders bindingsforhold [2].

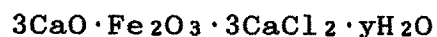
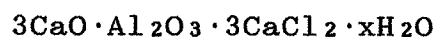
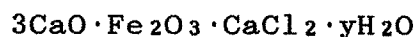
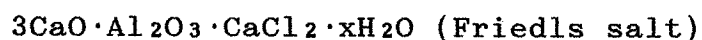
Chlorider er i sig selv relativt uskadelige for selve betonen, der kan dog i visse tilfælde forekomme saltsprængninger foruden, at betonoverfladen kan få fugtskjolder, idet salt har stor fugtbindingsevne.

I armeret beton derimod er chloriderne farligere, da de her kan medvirke i armeringskorrosion ved at nedbryde passivlaget, herom i afsnit 4.3. Det er dog ikke alle chloriderne, som trænger ind i betonen, der kan medvirke til den chloridinitierede armeringskorrosion. De kemisk bundne og adsorberede chlorider kan ikke medvirke, men vil dog fungere som bufferkapacitet for de frie chlorider. I det tilfælde, hvor chloriderne trænger ind i en

hærdnet beton, vil hydratiseringsprodukternes evne til at binde chlorider påvirke indtrængningshastigheden. Hydratiseringsprodukterne kan sammenlignes med et lager, der succesivt fyldes efterhånden som chloriderne trænger ind. Jo større bindingsevne, des længere tid tager det chloriderne at nå armeringen i en farlig koncentration. Dette gælder sandsynligvis både for chloridtransport ved diffusion og kapillartransport [35].

Hvordan chloridmængden fordeles mellem bundne og frie ioner afhænger af cementens indhold af aluminatfase, C₃A, og ferritfase, C₄AF, det afhænger også af indholdet af andre ioner i porevandet samt af den specifikke overflade.

Undersøgelser [35] har vist, at mængden af bundne chlorider mindskes ved forøgelse af OH⁻ eller SO₄²⁻ i porevandet. Dette skyldes formodentlig, at disse ioner kan konkurrere med chloriderne i komplekserne [8], som



De chloridholdige komplekser har ved lave chloridkoncentrationer en anden sammensætning, end hvis der er tale om høje chloridkoncentrationer. Ved høje chloridkoncentrationer bindes der forholdsvis mere chlorid i de dannede forbindelser [4].

Chloridbindingsevnen kommer til at påvirke korrosionsprocessen, uanset om chloriderne blandes i betonen eller trænger ind senere.

Selvom mekanismerne for depassivering af stålet i betonen ikke er helt kendt vides det, at risikoen for korrosion øges, hvis forholdet mellem chlorid og hydroxid i porevandet er højt. En stor chloridbindingsevne, altså en lav koncentration af chlorid i porevandet, er en fordel [35]. Grænseværdien for, hvornår chloridkoncentra-

tionen er så stor, at lokal korrosion kan optræde, følger omtrentlig

$$cc1-/coH- = 0.61 \quad , [2]$$

hvor

cc1- = chloridkoncentrationen

coH- = OH--koncentrationen

Chloridkomplekserne med C₃A bliver ustabile, når pH i betonen falder, f.eks. på grund af karbonatisering af cementpastaen. Ved denne proces bliver chlorider frigivet [36]. På denne måde kan et relativt lavt chloridindhold i hele betonen blive presset ind mod armeringen, således at der her er mulighed for at opnå et kritisk chloridniveau.

Undersøgelser foretaget ved LBM indikerer en ændring i porestørrelsesfordelingen, når chlorider trænger ind i hårdnet cementpasta. Undersøgelserne er foretaget ved hjælp af lavtemperaturmikrokalorimetri. Der er foretaget forsøg med hårdnet cementpasta, der er tørret ved 50 °C og derefter mættet med vand, med en 3 % NaCl-opløsning eller med en 10 % NaCl-opløsning.

Forsøgene viser, at frysningen primært sker ved lavere temperaturer for stigende NaCl-koncentration, dette kan skyldes et stigende antal af mindre porer eller en frysepunktssænkning pga. tilstedeværelse af NaCl [37]. I bilag 2.3.1 findes et resultat fra disse forsøg.

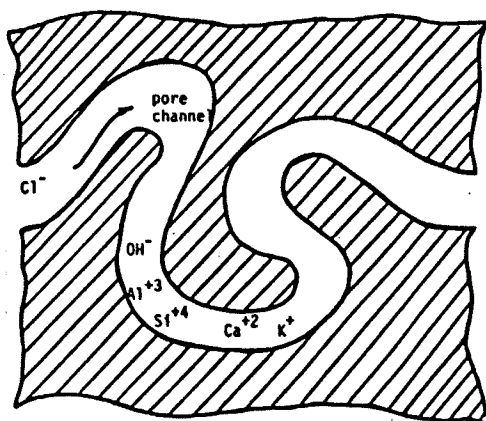
Når chloriderne trænger ind i fugtig hårdnet beton, påvirkes de af kemiske og adsorptive sekundære kræfter [33]. Indtrængningen regnes derfor efter Ficks anden lov. Udfra en approximeret løsning af denne kan indtrængningsdybden udtrykkes som:

$$X = \sqrt{Dt} \quad , [33]$$

hvor

X = indtrængningsdybden

På figur 2.3.2 ses en skematisk model af en bugtet pore, hvori chloridionens vandring bliver hæmmet af interaktion med andre ioner. Ionerne kan findes i selve poren, eller som en del af det elektriske dobbeltlag [34].



Figur 2.3.2. Model af pore med ioner, der hæmmer chloridvandringen [34].

Tilslidst skal det nævnes, at chloridionens vandring i et elektrisk felt ikke alene er påvirket af porestrukturen men også af diffusionsmekanismerne.

