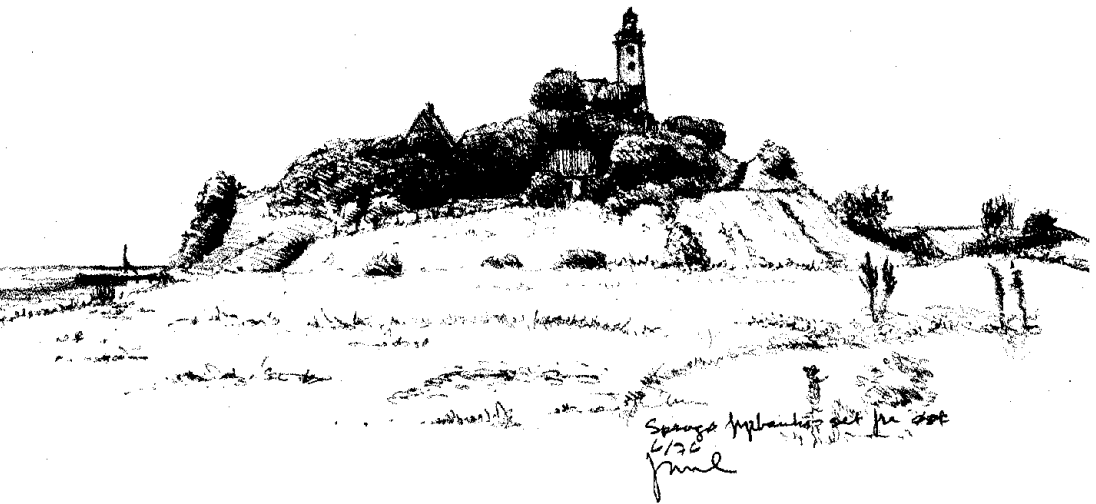
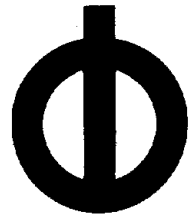
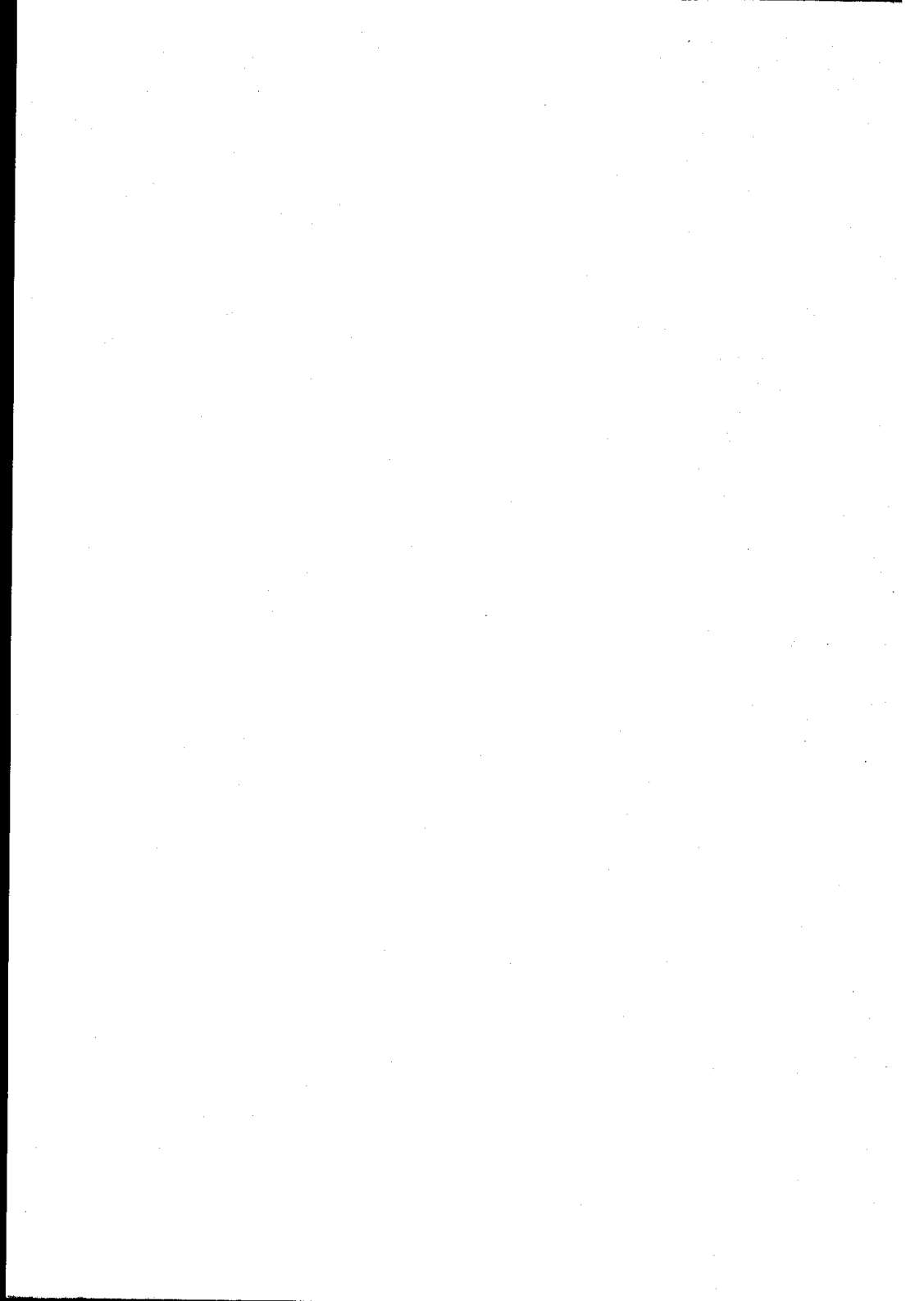


Dansk Betonforening

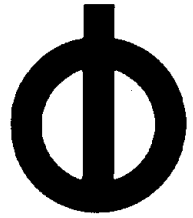


Dansk Betondag 1990

Publikation nr. 36



Dansk Betonforening



Dansk Betondag 1990

Publikation nr. 36

Publikation nr. 36:90

Denne publikation indeholder
de fleste indlæg fra

Dansk Betondag 1990

der blev afholdt
den 6. september 1990
på Hotel Nyborg Strand

Forsidetegning

af Poul Juul

Publikationen er udgivet af:

Dansk Betonforening
c/o Dansk Ingeniørforening
Vester Farimagsgade 29, 1780 København V
Tlf.: 33 15 65 65

<u>Indhold:</u>	<u>Side</u>
N.F. Clauson-Kaas:	
ELEMENTER TIL ØSTTUNNELEN	5
Ervin Poulsen:	
CHLORIDER OG 100 ÅRS LEVETID	19
Jesper Frøbert Jensen:	
BETONELEMENT-HÅNDBOGEN	67
S. Øivind Olesen:	
KVALITETSTILTAG INDEN FOR BETONELEMENTOMRÅDET	73
Preben Hillebo:	
BETONELEMENTPRODUKTION, FREMTIDENS KRAV	81

MT-GROUP I/S
Storebæltsvej 80
4220 Korsør
58 35 00 44

ELEMENTER TIL ØSTBANETUNNELLEN
Produktion, transport og montage
af ing. N.F.Clauson-Kaas

Juni 1990

INDLEDNING.

Tunnellen mellem Halsskov og Sprogø skal fores med ca. 63.000 betonelementer.

Hvert element er en del af en ring, d.v.s. et segment.

En ring består af 4 normal segmenter, 2 modlås segmenter og 1 låsesegment.

Alle ringe har en tilspidsning på 20 mm, som gør det muligt, at følge den projekterede kurveformede linieføring af tunnelen.

Både de enkelte segmenter og de enkelte ringe samles med bolte, og gummipakninger på alle segmenternes sideflader sikrer tætte samlinger.

Segmenterne støbes vandret i opad krummede forme. Der er ialt 98 specielt fremstillede forme til formålet.

Baggrunden for tilrettelæggelsen af segmentproduktionen har i vid udstrækning været dikteret af:

- Bygherrens specifikationer.
- Bygherrens krav om kvalitetssikring i h.t. ISO 9000.
- Kort produktionsperiode.

På grundlag af en lang række forsøg og simuleringer, både med hensyn til produktion af armering, og produktion af beton, er der opført en segmentfabrik på byggepladsen i Halsskov. Produktionen af elementer er i så høj grad som muligt baseret på automatiske processer.

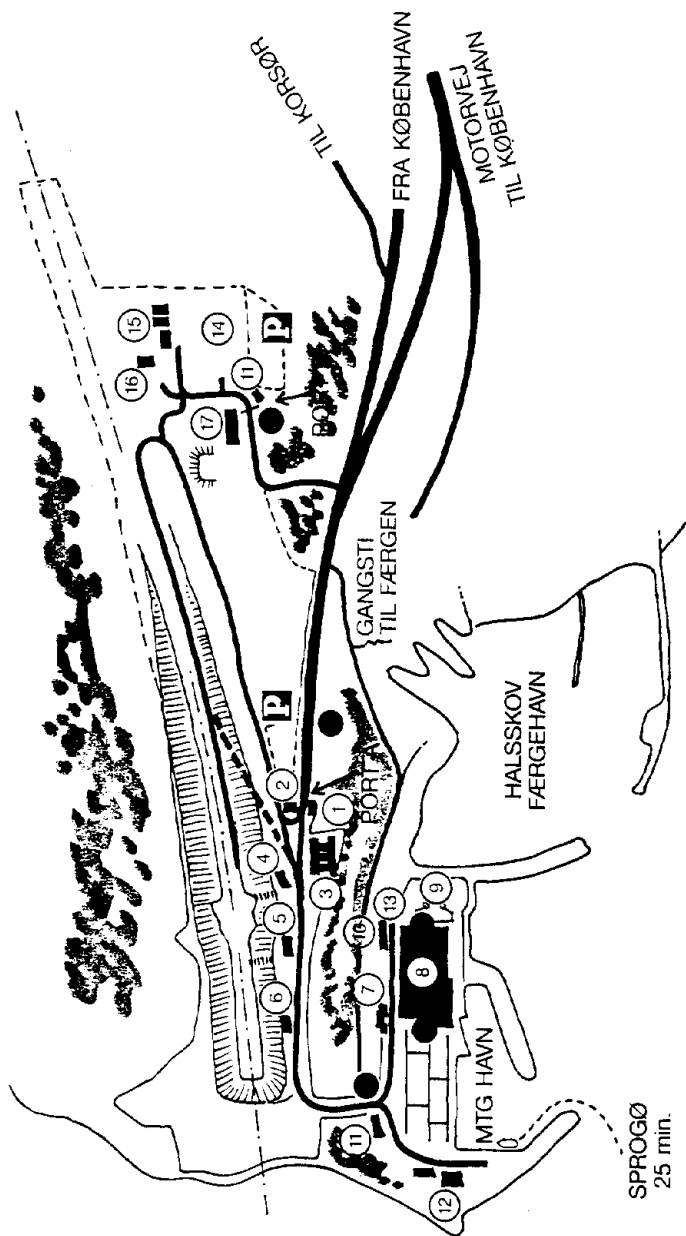
PRODUKTION.

Segmentfabriken er generelt opdelt i 2 produktions områder:

1. Produktion af armeringsnet.
2. Produktion af betonsegmenter bestående af 2 uafhængige produktionslinier. Hver linie har en kapacitet på 6 komplette

HALSSKOV

- 1 Portvagt
- 2 Materialemodtagelse
- 3 Administration
- 4 Tunnelkontor
- 5 Anlægskontor
- 6 Formandskontor
- 7 Segmentkontor
- 8 Segmentfabrikation
- 9 Betonanlæg
- 10 Laboratorium
- 11 Logistikkontor
- 12 Hovedlager
- 13 Betonkontor
- 14 Underentreprenører
- 15 Reservedelslager
- 16 Reservedelslager
- 17 Værksted
- Brandhydrant
- Hegn



SPROGØ
25 min.

ringe (42 segmenter) pr. 8 timers skift. Den samlede produktion pr. døgn er 36 ringe, svarende til 252 segmenter.

Endvidere er der i forbindelse med produktionen af armeringsnettene opstillet et avanceret automatisk epoxypålægningsanlæg, som er i stand til at påføre epoxy på et komplet armeringsnet ved hjælp af en speciel påsmeltningproces.

Endelig er der for enden af de to segment produktionslinier et efterhærtningsrum med en kapacitet på 1680 segmenter. Segmenterne efterhærtnes her indtil 10 modenhedsdøgn. Herefter bliver segmenterne anbragt på et udendørs lager med en kapacitet på 18.000 segmenter. Efter 28 modenhedsdøgn er segmenterne klar til transport til, og montage i tunnellen.

Produktion af armeringsnet.

De enkelte dele af armeringsnettene bliver fremstillet på automatiske klippe-, bukke-, samle- og svejserobotter.

De enkelte armeringsdele bliver samlet ved håndkraft af svejsere.

Svejseteknikken i robotterne er punktsvejsning. Kvaliteten af denne type svejsning kræver helt rene armeringsstænger, hvorfor alle armeringsjern bliver sandblæst inden bearbejdning.

Til håndsvejsning anvendes CO₂ - svejsning.

Det kan nævnes, at hvert standard armeringsnet har 424 punktsvejsninger plus 126 håndsvejsninger d.v.s. ialt 550 mekaniske samlinger.

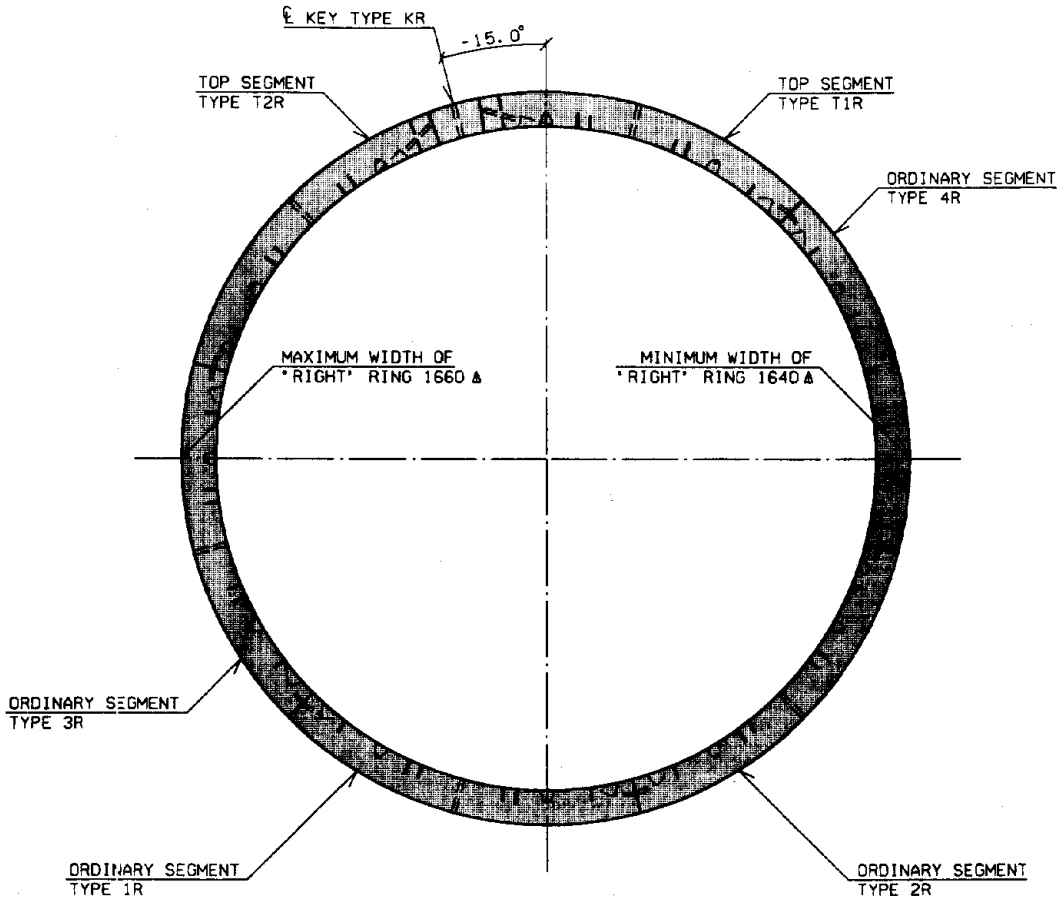
Resultatet er et krumt rumligt armerings "bur".

Påsmeltning af epoxybelægning.

Denne proces starter med endnu en sandblæsning efterfulgt af en rensning med trykluft.

ELEVATION OF "RIGHT" RING, 1:50

LOOKING IN DIRECTION OF DRIVE
(ADDITIONAL INFORMATION AS LEFT RING)



Derefter bliver armeringsnettene opvarmet til ca. 220°C og nedsænket i et fluidiseret bad bestående af epoxypulver, som gennemstrømmes af luft.

De færdige epoxybelagte armeringsnet kontrolleres og er derefter klar til indstøbning i segmenterne.

Produktion af beton segmenter.

Forarbejdet

På grundlag af bygherrens krav til betonen, samt entreprenørens ønsker om tilpasning til en rationel produktion, er der udført en lang række prøvninger af tilslagsmaterialer, prøveblandinger og prøvestøbninger, både i laboratorier og i fuld skala.

Alle disse forprøvninger er afsluttet med en "officiel" fuld skala prøve støbning, hvorunder alle delprocesser demonstreres, og det dokumenteres, at alle delkrav til betonen kan opfyldes.

Gennem disse prøvninger har entreprenøren tilegnet sig et grundigt kendskab til betonens egenskaber og variationsbredden af disse.

Sideløbende med disse prøvestøbninger har entreprenøren foretaget simuleringer og beregninger af betonens temperatur-, modenheds- og dermed styrkeudvikling med henblik på at fastlægge:

- Max. temperatur under hærdeforløbet.
- Kortest mulig produktions tid.
- Udformning af hærdekamre.
- Antal forme.
- Antal produktionslinier.
- Udformning og kapacitet af efterhærtningsrum.

Alt dette under forudsætning af, at der skal kunne produceres 252 segmenter pr. døgn - med en langsom, lavalkali, sulfatbestandig cement!

Resultatet af disse beregninger har, sammen med tilsvarende beregninger for produktion af armeringsnettene, dannet grundlag

for den endelige udformning af segmentfabriken.

Sidst, men ikke mindst, er betonblande anlægget anbragt for enden af segmentfabriken med dertil hørende indkøring, prøveblandinger og dokumentation af blande anlæggets kapacitet og kvalitet.

Beton til segmentproduktionen transporteres til støbestationerne ved hjælp af en conveyor.

Indkøring.

Efter segmentfabrikens færdiggørelse fulgte en indkøringsfase på alle processer.

For betonens vedkommende viste det sig hurtigt, at det var nødvendigt med en række justeringer og supplerende prøvestøbninger for at tilpasse betonen til form- og vibrationsudstyr.

Betonen bliver hovedsagelig tilført i toppen af en krum form. Herfra bliver betonen vibreret ud og ned til enderne af den krumme form, d.v.s., at det er nødvendigt med overform på 2/3 af formen. Overformene fjernes umiddelbart efter vibreringen.

Betonen skal med andre ord være blød og smidig samtidig med, at den skal være stabil og stiv 10 minutter efter udstøbningen for ikke at løbe ud over enderne af formene. Endvidere er der krav om tætte overflader med få luftblærer.

Ved at justere primært på den samlede kornkurve er det lykkedes, at tilfredsstille alle disse krav. Undervejs skulle der hele tiden holdes øje med, at bygherrens krav til stadighed kunne opfyldes.

Resultatet er en lidt speciel beton, som er følsom overfor selv små variationer. Derfor er der en høj grad af overvågning af hele støbeprocessen, både automatisk og manuelt.

Produktions forløbet.

Produktionsudstyret er opbygget på en sådan måde, at hver produktionslinie er i stand til at producere et segment hvert 10. minut og forhærde betonen i løbet af 8 timer tilstrækkeligt til afformning.

Hver produktionslinie består af 12 arbejdsstationer, et hærdekammer og et transportbånd, hvor segmenterne kontrolleres, evt. repareres og køres ud i efterhærtningsrummet.

Arbejdsstation 1.

Ved denne station fjernes en plastoverdækning fra segmentets overflade. Formsiderne løsnes og indstøbte udsparringsdele fjernes. Segmentet løftes op af formen med en kran forsynet med et vacuumåg og anbringes på transportbåndet.

Arbejdsstation 2.

Her bliver formene omhyggeligt rengjort med stålborster og skrabere for at sikre, at al forurening fra den foregående støbning bliver fjernet.

Arbejdsstation 3.

Den rengjorte form bliver inspiceret. Side- og endeformene bliver sat på plads igen i den rette position. Alle dele for udsparringer bliver fæstnet og fastgjort til formen.

Arbejdsstation 4.

Nu bliver formens mål kontrolleret med digitale måle instrumenter. Alle mål bliver registreret og sammenlignet med tolerancerne. Hvis formmålene falder uden for tolerancerne bliver formen skilt ad og samlet påny. Når formens mål er accepteret bliver den forsynet med nummer.

Arbejdsstation 5.

Alle flader, som kommer i kontakt med beton, bliver nu påsprøjtet formolie. Evt. overskud af olie fjernes for at undgå opblanding med betonen i overfladerne.

Arbejdsstation 6.

Ved denne station bliver 2 kraftige montagebolte for indstøbning fastgjort til formen. Disse bolte skal anvendes til den endelige montage af segmentet i tunnellen.

Arbejdsstation 7.

Systemet er lavet på en sådan måde, at når formen ankommer til denne station, ankommer armeringen fra armerings lageret via en monorail over formen. Armeringen forsynes med afstandsklodser og placeres i formen.

Arbejdsstation 8.

Armeringens position kontrolleres og udsparringsbolte for bolte huller monteres i side- og endeformene. Formen er nu færdig samlet.

Arbejdsstation 9.

Den færdige form bliver nu omhyggeligt kontrolleret af en QC-ingeniør/ støbeformand for at sikre, at alle løse dele er fastgjort til formen, at armeringen har det nødvendige dæklag på 35 mm, at nummeret er rigtigt etc.

Arbejdsstation 10.

Denne station er støbestationen. Stationen er omgivet af lydabsorberende vægge af hensyn til den kraftige støj fra vibratorerne.

Når formen er ankommet, afgiver operatøren ordre til blandestationen. Conveyoren afleverer betonen i en støbemaskine over formen.

Ca. 50% af betonen placeres jævnt fordelt i formen inden overformene bliver fastgjort. Under vibreringen efterfyldes formen. Den samlede vibrationstid er ca. 5 minutter.

Når fyldning og vibrering er tilendebragt fjernes overformene.

Arbejdsstation 11.

Efter at have forladt støbestationen bliver overfladen rettet af i niveau med sideformene og revet af med et træpudsebrædt.

Arbejdsstation 12.

Her bliver overfladen færdigglittet med en roterende stålronde, som drives af trykluft. Overfladen tildækkes med en armeret plastfolie og segmentet er klar til hærkning.

Forhærkning.

Det færdigstøbte segment føres automatisk ind i hærketunnellen. Hærketunnellen er opdelt i 2 zoner. Den første har en temperatur på ca. 45°C, den anden ca. 20°C. Segmentet opholder sig ca. 3 1/2 time i hver zone. Efter ca. 7 timers forhærkning forlader segmentet hærketunnellen og en ny cyklus kan starte.

Efterhærkning.

Vi er nu tilbage ved arbejdsstation 1. Segmentet er anbragt på transportbåndet. Efter evt. reparationer transporteres segmenterne ud i efterhærkningsrummet. En kran med vacuumåg anbringer segmenterne i stakke af 7 segmenter og stakkene dækkes med plastfolie.

Segmenterne efterhærder her indtil de har opnået 240 modenheds timer.

Påsætning af pakning.

Inden segmenterne fortsætter til det udendørs lager bliver de forsynet med en gummipakning på alle 4 sider. Segmenterne er udført med en not, hvori pakningerne anbringes. Pakningerne limes til betonen med en speciel lim og holdes under pres med en ramme, som er udformet til formålet.

Udendørs lager.

På det udendørs lager henstår segmenterne indtil fuld hærkning er nået.

Lagerpladsen dækkes af 4 store portalkraner. Disse kraner bruges

dels til den interne transport på lagerpladsen og dels til læsse segmenterne på transportudstyret.

TRANSPORT OG MONTAGE.

I Halsskov transporteres segmenterne fra lagerpladsen på en specialbygget transportvogn til tunnelindgangene. Herfra transporteres de videre ind i tunnellen med tog.

På Sprogø opbygges et mindre bufferlager af hensyn til en evt. isvinter, da segmenterne jo først skal ud på en sejltur før den videre transport.

Inde i tunnellen overfører en kran segmenterne til et montagemagasin. Magasinet er udstyret med en robot, som er i stand til at montere segmenterne i den endelige position, startende i bunden og sluttende i toppen med et låsesegment.

Det lyder måske enkelt, men i virkeligheden er transporten af segmenterne en af de mest kritiske operationer.

Inde i tunnellen er der tæt pakket med diverse installationer, transport udstyr m.v. og den kran, som skal overføre segmenterne fra transporttoget til magasinet kan kun dreje 90° i én retning.

Det er derfor nødvendigt, at segmenterne ikke alene er stakket i den rigtige rækkefølge, men da de tilspidser nogle få millimeter, skal de også vende rigtigt. Denne tilspidsning er i øvrigt forskellig afhængig, om det er en højre ring eller en venstre ring. Højre og venstre ringe monteres skiftevis, så der er masser af muligheder for fejltagelser.

Hvis et segment først er kommet forkert ind i tunnellen er der kun en ting at gøre: Ud igen og vendes.

Segmenterne stakkes i komplette ringe på transportvognen ved lagerpladsen, så allerede her skal stakken være korrekt. Stakkels kranfører!

KVALITETS SIKRING.

I dette projekt har bygherren lagt stor vægt på, at der gennemføres kvalitetssikring i henhold til ISO 9000.

Entreprenørens kvalitetssikringsafdeling har i den forbindelse udarbejdet en omfattende generel kvalitets manual hvorefter alle har at rette sig.

Samtlige underentreprenører har ligeledes udarbejdet kvalitets manualer, som beskriver og dokumentere alle deres aktiviteter.

På beton området har det betydet følgende dokumenter:

- Forprøvning af betonens delmaterialer.
- Forprøvning af betonens sammensætning.
- Forprøvning af betonarbejdets udførelse (Fuld skala prøvestøbning).

Ialt 125 egenskaber er dokumenteret og bragt i overensstemmelse med bygherrens specificationer.

Hertil kommer, at samtlige processer og aktiviteter skal beskrives og dokumenteres i "arbejdsprocedurer" - også alle kontrol-funktioner.

Når alle forprøvnings og arbejdsprocedurer er godkendt af bygherren får man så lov til at gå igang med arbejdet.

Under arbejdets gang udføres en løbende registrering i et omfang svarende til forprøvningsne.

Til trods for, at en overvejende del af disse registreringer foregår på elektroniske medier har både bygherren og entreprenøren måttet anskaffe adskillige containere udelukkende til papir!

N.F.Clauson-Kaas

AEC Rådgivende Ingeniører A/S
Holte Midtpunkt 23-3
DK-2840 Holte

Chlorider og 100 års levetid

af
Ervin Poulsen

September 1990

Indhold

<i>Indledning</i>	side 20
Holdbarhedsproblemer, 22.	
Chloridkilder, 24.	
Historisk tilbageblik, 26.	
<i>Chloridtransport i beton</i>	side 27
Kapillarsugning, 28.	
Permeation, 31.	
Diffusion, 32.	
Særlige forhold, 32.	
<i>Matematiske modeller af chloriddiffusion i beton</i>	side 33
Fick's første lov, 33.	
Fick's anden lov, 34.	
Anormal diffusion, 36.	
<i>Analytiske løsninger</i>	side 38
Konstant chloriddiffusionskoefficient, 38.	
Hærdningens indflydelse, 39.	
Lagdelt betonkvalitetsvariation, 40.	
<i>Numerisk beregning af chloriddiffusion i beton</i>	side 40
Beregning med tabelanvendelse, 41.	
Parabelapproximation, 43.	
Førsteårsindtrængningen, 44.	
Livslængdeanalyse, 45.	
Betonproportionering for livslængde, 48.	
<i>Undersøgelser af chloridindtrængning i beton</i>	side 55
Beton i Storebæltsområdet, 55.	
Beton til Statsbroen Storebælt, 56.	
Prøveblandinger til den faste forbindelse over Storebælt, 59	
<i>Kvalitetssikring</i>	side 60
Krav til betonsammensætning i FAB/SAB, 60.	
Kontrolprøvning, 62.	
Undervisning, 64.	
<i>Efterskrift</i>	side 65
<i>Litteratur</i>	side 65

Chlorider og 100 års levetid

Synopsis. I forbindelse med planlægning og projektering af Statsbroen Storebælt blev emnet "chloridindtrængning i beton" behandlet både teoretisk og eksperimentelt. Der blev herunder foretaget undersøgelser af betonprøver fra konstruktioner i Storebæltsområdet (Sørensen, 1979). Formålet var at analysere korrosionsrisikoen for armeret beton i havvand, specielt i Storebæltsområdet.

Det fremgik af disse undersøgelser, at chloridindtrængning i beton sker hurtigt, selv for de betontyper, der dengang blev foreskrevet til brokonstruktioner, som skulle påvirkes af havvand.

Med ønsket om 100 års levetid for den faste forbindelse over Storebælt, var det på denne baggrund naturligt, at AS Storebæltsforbindelsen ønskede at udvikle en betontype, der bedre end tidligere betontyper var i stand til at bremse for chloridindtrængning; så meget, at man ved et passende valg af armeringsstængers betondækklag kunne forvente 100 års levetid.

AEC Rådgivende Ingeniører A/S har for AS Storebæltsforbindelsen gennemført teoretiske og eksperimentelle undersøgelser vedrørende chloridindtrængning i betoner, hvor det hydrauliske bindemiddel bestod af en blanding af portlandcement, mikrosilica og flyveaske. Nærværende artikel giver et resumé af det foretagne udviklingsarbejde.

Foruden dette konkrete udviklingsarbejde og flere analysearbejder i forbindelse med skadesager, udfører AEC Rådgivende Ingeniører A/S løbende forskning på området chloridindtrængning i beton. Det sker for det første gennem et STVF-projekt om "Højkvalitetsbeton i 90'erne", hvor ét af emnerne er "Prøvning og modellering af chloridindtrængning i beton under last". Dernæst sker det ved deltagelse i BRITE-projektet om "Performance tailoring of structural concrete", hvor to af emnerne er "Available mathematical models on chloride and CO₂ permeability" and "Accelerated tests on chloride and CO₂ permeability".

I nærværende artikel er det søgt at give en samlet, men kort fremstilling af emnet chloridindtrængning i beton og de problemer, der knytter sig hertil for armerede betonkonstruktioners funktionsdygtighed. Emnet er imidlertid stort og det har været nødvendigt, for at begrænse omfanget, at være selektiv ved udarbejdelse af artiklen.

Indledning

Holdbarhedsproblemer

"Beton i havvand" er en af de hyppigst forekommende titler på artikler og andre indlæg af betonteknologisk karakter. Utallige var de mange gode råd og anvisninger, som blev fremsat. Lige meget synes det dog, umiddelbart set, at have hjulpet; problemerne fortsatte, der kom nye indlæg om beton i havvand og der kom nye problemer til.

Helt enkelt kan det dog siges, at der åbenbart er to hovedproblemer med beton i havvand:

- Uarmeret betons holdbarhed i havvand.
- Armerings holdbarhed i holdbar beton i havvand.

Uarmeret betons holdbarhed i havvand er forlængst løst. Med sulfatbestandig cement, hydrauliske tilslagsstoffer (flyveaske, mikrosilica, højovnsslagge), alkaliinaktive tilslagsmaterialer (sand og sten), luftindblanding og et lavt v/c -forhold, kan der opnås en passende lang holdbarhed af uarmeret beton i havvand. Dermed var holdbarhedsproblemet imidlertid ikke løst. Havvand indeholder stoffer, der er aggressive; også over for armering.

Da man havde løst holdbarhedsproblemet for uarmeret beton i havvand, troede man, at problemet med armeret betons holdbarhed i havvand kunne løses på følgende måde:

- Beton skulle bestå af delmaterialer, der er holdbare i beton i havvand.
- Armeringens dæklag skulle være passende tykt.
- Beton skulle være sammensat, udstøbt og komprimeret således, at den bliver "vandtæt" (definitionen manglede dog!).

1926-normen

Efter 1926-normen (DIF, 1926), der var specielt gældende for armeret beton i vandbygningskonstruktioner, bliver blandt andet følgende krævet:

"Betonens cementindhold bør vælges under hensyntagen til de ydre forhold og sandets finhed mellem 380 og 600 kg/m³ hærdnet beton. Mørtlens blandingsforhold bør vælges mellem 1:2 og 1:1 efter rumfang."

Der blev anbefalet armeringsdæklag på 20-50 mm, afhængig af forholdene. Ofte blev betonens overflade beskyttet (tjære).

1949-normen

Efter 1949-normen (DIF, 1949) måtte betonens v/c -forhold højst være 0,55 for armeret beton ved vandlinien i havvand. For armeret beton helt under havvand var kravet, at v/c -forholdet maksimalt måtte være 0,60. Disse vær-

Beton	Beton til typiske vandbygningskonstruktioner i Danmark ved forskelli-
Ce:Sa:St	ge betonarbejder før 1910, dvs. før udsendelsen af 1926-normen for be-
efter rumfang	ton i vandbygningskonstruktioner.
1:2:3,5	Dækblokke på Middelgrundsfortets bølgebryder.
1:2:4	Blokke med granitbeklædning i læmoler ved Vorupør og Hanstholm.
1:2,5:4,5	Fundament til Knippelsbros piller, udstøbt med sænkekasser i vand.
1:3:5	Bund i dok på Refshaleøen.
1:3:6	Det indre af Knippelsbros piller (bag klinkermurværk), Frihavnens kaj- mur (bag granitbeklædning) i Århus havn, de indre blokke i læmoler ved Vorupør og Hanstholm.
1:4:7	Bagerste del af Frihavnens kajmure, sidemure i dok på Refshaleøen, Middelgrundsfortets blokke (men de viste sig ikke holdbare i vandlini- en og blev erstattet af nye blokke af beton 1:2:3,5).

Tabel 1. Eksempler på betontyper, anvendt til vandbygningsarbejder i Danmark omkring dette århundredes begyndelse. Gengivet fra (Suenson, 1911).

dier var gældende for almindelig hærdende portlandcement; for hurtighærdende portlandcement var kravene henholdsvis 0,75 og 0,80.

Der var i 1949-normen "gode råd" at hente i afsnittet om de særlige regler for vandbygningskonstruktioner. Her kunne man således læse, at der ikke til havvandskonstruktioner var særlige krav til cementen ud over de, der var stillet i 1949-normen. Det blev dog tilrådet, hvor vandet var særlig aggressivt fx på grund af stor sulfatholdighed, at anvende særlige cementarter som fx moler-cement, sulfatbestandig cement eller tilsvarende produkter. Om selve betonen stod der følgende:

"Ved vandbygningskonstruktioner er det af stor betydning for betonens holdbarhed, at den er tæt. Særlig gælder dette beton omkring vandlinien og beton i konstruktioner, der er udsat for ensidigt vandtryk. Støbeskel bør så vidt muligt undgås, især i nærheden af vandlinien."

Før normalderen

Omkring århundredeskiftet var det i Danmark almindeligt at anvende blandingsforholdet cement:sand:sten = 1:2:3 efter rumfang til armeret beton i havvand. Ifølge (Suenson, 1907) vil beton 1:2:3 efter rumfang få et cementindhold på ca. 350 kg/m³ beton. Med et vandforbrug på ca 175 liter/m³ beton vil v/c-forholdet blive ca. 0,5.

Det var dog ikke altid, at beton 1:2:3 blev anvendt til vandbygningskonstruktioner. Tabel 1 giver et indblik i hvilken variation af betontyper, der var i brug før vandbygningsnormen trådte i kraft i 1926. Det var ikke altid, at det gik lige godt.

1984-normen

I dag finder man ikke så mange retningelinier for valg af betonsammensætning. Dog anbefales i en pamflet (CtO,1984), at følgende krav opfyldes for beton til havvandskonstruktioner:

- Et *w/c*-forhold på maksimalt 0,50.
- En karakteristisk trykstyrke på mindst 30 MPa.
- Luftindblanding.
- Særlige krav til tilslaget (sand og sten).
- Armeringsdæklag på mindst 30 mm.

Ser man fx på de sidste 20 års armerede betonkonstruktioner i havvand, er det ikke altid holdbarhed, der præger disse betonkonstruktioner.

FAB/SAB-krav

Der er langt mellem de krav, der tidligere blev stillet til armeret beton i havvand (i 1926, i 1949 og i 1984), og de krav, der nu stilles til den beton, som skal anvendes i betonkonstruktioner for den faste forbindelse over Storebælt; hvorfor? – det vil blive søgt belyst i denne artikel.

Chloridkilder

Armerede betonkonstruktioner kan få tilført chlorider ved følgende:

- *Blandeprocessen*, dvs. med betonens delmaterialer (tilslagsmaterialer, tilsætningsstoffer, etc.).
- *Indtrængning*, dvs. fra chloridholdige omgivelser (havvand, tøsalt, etc.).

En speciel tilførsel af chlorider til beton kan komme fra armeringsstænger,

Iontype	Betegnelse	Østersøen	Nordsøen	Atlanten
Calcium	Ca ⁺⁺	0,05	0,43	0,48
Chlorid	Cl ⁻	3,96	16,85	20,00
Kalium	K ⁺	0,07	0,55	0,40
Magnesium	Mg ⁺⁺	0,26	1,11	1,41
Natrium	Na ⁺	2,19	12,10	11,10
Sulfat	SO ₄ ⁻	0,58	2,22	2,81

Tabel 2. Typiske, gennemsnitlige fordelinger og koncentrationer af ioner i forskellige havområder. Koncentrationerne er anført i enheden g/kg havvand og værdierne repræsenterer gennemsnittet for de enkelte havområder. Inden for de enkelte havområder kan der være stor variation i havvandets saltindhold. Gengivet fra DIN 4030-69.

der er opbevaret ubeskyttet mod chlorider på arbejdspladsen (bølgesprøjt, chloridholdig jord, etc.).

Det er muligt ved passende kvalitetssikring at begrænse tilførslen af chlorider til beton via delmaterialerne

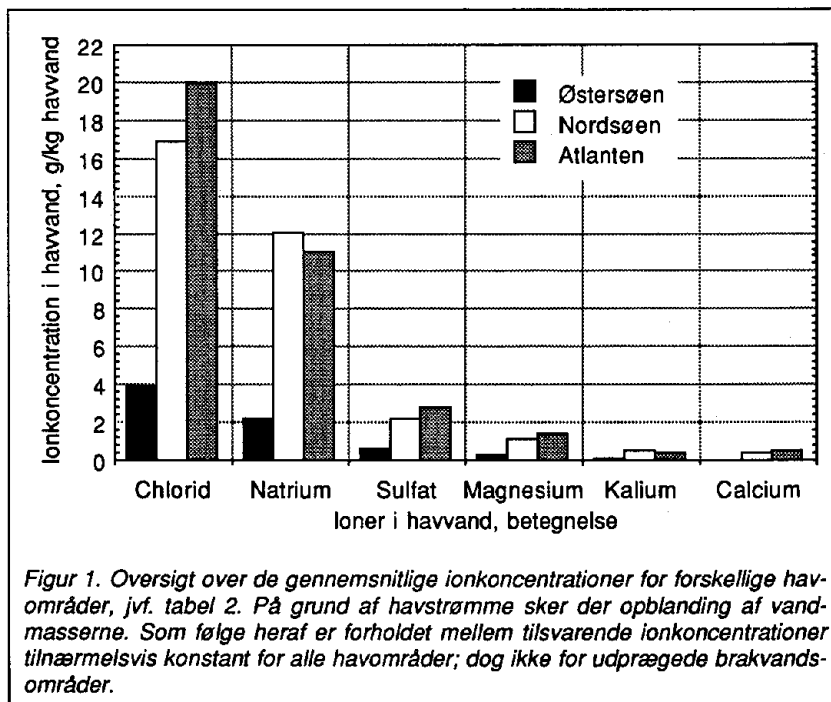
I det følgende vil der blive fokuseret på chloridindtrængning i hærdnet beton fra havvand. De specielle forhold, der gælder for chloridindtrængning fra svømmebadsvand og smeltevand fra glatførebekæmpelse med chloridholdige tørsalte vil ikke blive omtalt her.

Havvand

Havvand indeholder forskellige stoffer (salte); flere af dem er aggressive over for armeret beton. Det typiske, gennemsnitlige ionindhold i havvand fremgår af tabel 2.

Havenes saltindhold varierer ikke alene fra område til område, men saltindholdet varierer også med dybden under havoverfladen. Kystvand har lavt saltindhold, medens stillestående, dyberestående havvand har et højere saltindhold. Det gælder ikke alene for et havområde som Nordsøen; også i Storbælt er der variationer i saltindholdet.

Havvand indeholder desuden luft. Af særlig interesse for armeret betons holdbarhed er fri ilt O_2 og fri, dvs. aggressiv carbondioxid CO_2 . Indholdet af



ilt vil typisk være 6-10 ml/kg havvand, medens iltindholdet i atmosfæren typisk er 210 ml/liter luft ved 1 atmosfære. Ilten har betydning for armeringens korrosion, idet tilstedeværelse af ilt er en nødvendig betingelse for korrosion.

Indholdet af fri carbondioxid kan være så højt, at havvandet alene af den grund kan blive aggressivt over for beton.

Luftbårne chlorider

I havområder og kyststrækninger, især de vestvendte, kan betonkonstruktioner modtage ikke uvæsentlige mængder chlorider som luftbårne chlorider via kraftig blæst. De luftbårne chlorider afsættes på betonoverflader som salt. Derfor kan chloridkoncentrationen på en betonoverflade af en konstruktion i et hav- eller kystområde være ganske høj. For betonoverflader, der er beskyttet mod afvaskning af silende regn, kan der derfor ske en betydelig chloridindtrængning i betonen.

Der findes ingen målinger over de luftbårne chloriders betydning i Danmark. I Sverige er der derimod gennemført målinger ved den svenske vestkyst. Det er konstateret, at luftbårne chlorider over en længere årrække kan bidrage ganske væsentligt til en betonkonstruktions chloridpåvirkning.

I Danmark er betonkonstruktioner nær en kyststrækning (herunder også på havet) placeret i aggressiv miljøklasse, jvf. DS 411.

Historisk tilbageblik

Betonkonstruktioners manglende holdbarhed i havvand har altid været aktuelt og er det stadig. Den viden, der er opnået på området er sket periodevist og i mange lande. En oversigt over udviklingen resumeres i det følgende.

Uarmeret beton i havvand

I Danmark var det især langs Jyllands vestkyst, at betonkonstruktioner havde holdbarhedsproblemer. Den første betonkonstruktion på Jyllands vestkyst var en mole i Esbjerg havn, bygget i 1870. De første høfter af betonblokke blev anlagt i 1876.

Den manglende holdbarhed gav anledning til betonundersøgelser, betonforskning og udvikling af særlige cementtyper. Det blev antaget, at årsagen til betons forvitring var havvandets indhold af sulfat. Denne antagelse gav anledning til anvendelsen af moler; først som tilsætning til beton, senere som tilsætning til cement (Poulsen, 1906).

Udviklingsarbejdet blev ledet af A. Poulsen, der var formand for Danmarks første udvalg vedrørende betons holdbarhed, nedsat for 100 år siden (Poulsen, 1914).

En undersøgelse i 1880, som Prazier udførte af beton i Aberdeen havn

(Feld, 1968) viste, at cementpastaens indhold af calcium var udskiftet med magnesium. Det blev udlagt som skadeårsag. En tilsvarende undersøgelse, som Vicat udførte af beton i blandt andet Marseilles havn viste det samme resultat.

Alkaliudvalget fortsatte undersøgelser af betonblokke på Jyllands vestkyst (Idorn, 1958). Det blev her vist, at skadelige alkalikiselsreaktioner var en medvirkende årsag til betonens manglende holdbarhed.

Armeret beton i havvand

Armeringskorrosion i havvandspåvirket beton blev tidligt genstand for undersøgelser. Først i 1924 kom der imidlertid en omfattende registrering af problemets omfang (Atwood, 1924). Mange af de havvandspåvirkede, armerede betonkonstruktioner var imidlertid ikke bygget af beton, der i uarmeret tilstand var holdbar. Derfor blev der draget mange misvisende konklusioner af disse første undersøgelser.

Der er i tidens løb udført mange korttidsforsøg (3-15 år), men der blev ofte draget for optimistiske konklusioner af disse korttidsforsøg. Man havde ingen modeller for transportsprocesserne i beton af de aggressive stoffer fra havvandet til armeringen. Det blev derfor til nogle vage udsagn om, at betonen skulle være "vandtæt" for at modstå indtrængningen.

Efter at teorien for chloridioners diffusion i kapillarporer i betons cementpasta blev fremsat (Collepari, 1972), blev chloriddiffusion i beton mange steder taget op som et særligt forskningsemne. I Danmark igangsatte Statsbroen Storebælt i 1978 en undersøgelse om chloridindtrængning i beton (Sørensen, 1979). Det gav stødet til en øget interesse for studiet af chloriddiffusion i beton, fx i form af eksamensprojekter (Frederiksen, 1985).

I Sverige blev emnet behandlet meget grundigt på CBI, (Tuutti, 1982) og (Byfos, 1987).

Disse grundlæggende arbejder om chloriddiffusion i beton har dannet den nødvendige forudsætning for de udviklingsarbejder, som AS Storebæltsforbindelsen har stået for.

Chloridtransport i beton

Hærdnet betons cementpasta består blandt andet af et system af gennemgående kapillarporer. Beton er derfor både et porøst og et permeabelt materiale. Dimensionen af kapillarporer er af størrelsesorden 2 nm til 5 μm , dvs. fra 20 Å til 50.000 Å. De store kapillarporer dannes af støbevand, der er i overskud ved cementens hydratisering.

Gennem disse kapillarporer kan vand og chloridioner transporteres. Dimensionen af en chloridion er kun af størrelsesordenen 0,2 nm, dvs. ca. 2 Å.

Betonens mikro- og makrodefekter (revner, sand- og stenreder) kan også bidrage til at øge permeabiliteten og dermed lette chloridtransporten. Revner fra plastisk svind, udtørringssvind, hydratiseringsvarme (termorevner) samt fra egenlast og fra nyttelast (fx bøjningsrevner) udgår fra betonoverfladen. De skønnes derfor at bidrage mere til chloridtransport end de indre mikro- og makrodefekter, der ikke har direkte adgang til betonoverfladen.

Kapillarporesystemets udformning afhænger blandt andet af betonens v/c-forhold, cementtypen, puzzolantypen og cementpastaens hærdningsgrad. Defektomfanget afhænger mest af betonarbejdets udførelse, specielt komprimeringen og efterbehandlingen. Nogle betontyper er mere følsomme over for mangelfuld efterbehandling end andre.

Chloridioners indtrængning i beton kan ske på flere måder. Der er nemlig mulighed for flere typer stoftransport i beton. Alle typer vil forekomme samtidig i praksis, men for nogle betontyper vil enkelte transportprocesser dominere. Man skelner mellem følgende transportprocesser for chloridioner i beton, der er påvirket af havvand, enten direkte eller i form af bølgesprøjt:

- *Kapillarsugning*, dvs. indtrængning af havvand som følge af hårrørsvirkningen (havvandet bevæger sig mod de tyndeste hårrør).
- *Permeation*, dvs. indtrængning af havvand som følge af hydraulisk trykforskel (havvandet bevæger sig i retning af det mindste tryk).
- *Diffusion*, dvs. indtrængning af chloridioner som følge af en forskel i chloridionskoncentrationer (chloridioner udjævner chloridionsforskelle).

Kapillarsugning

Havvand kan suges ind i beton som følge af kapillarporemes hårrørskraft. Sugningen kan kun føre havvandet ind i betonen; ikke ud. Når kapillarporerne er fyldte, standser vandbevægelsen.

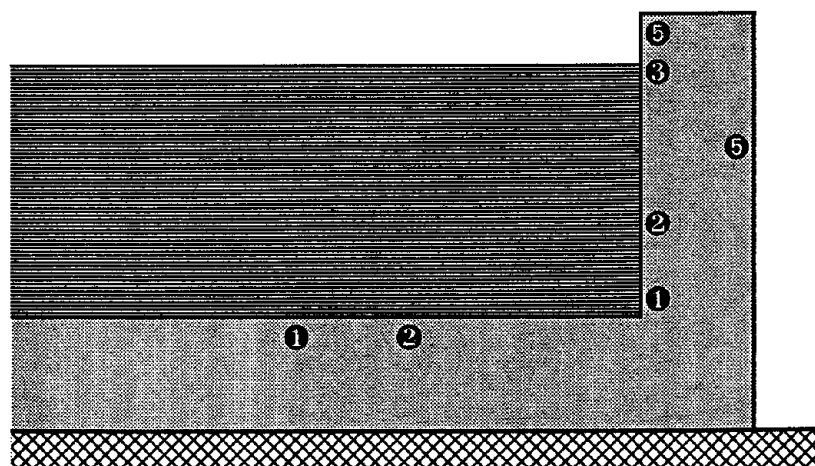
Når tør beton kommer i berøring med havvand, er det de fine kapillarporer, der virker som hårrør og suger havvandet til sig. Luften undviger gennem de grovere kapillarporer, som havvandet i begyndelsen ikke kan trænge ind i, fordi havvandets overfladespænding er for lille i forhold til den udstrømmende lufts overtryk.

Tør beton, der er delvis neddykket i havvand, vil suge havvandet til sig i betonens berøringsflade med havvandet. Kapillarporerne vil fyldes og der vil bevæge sig en "væskefront" i betonen væk fra betonens berøringsflade med havvandet.

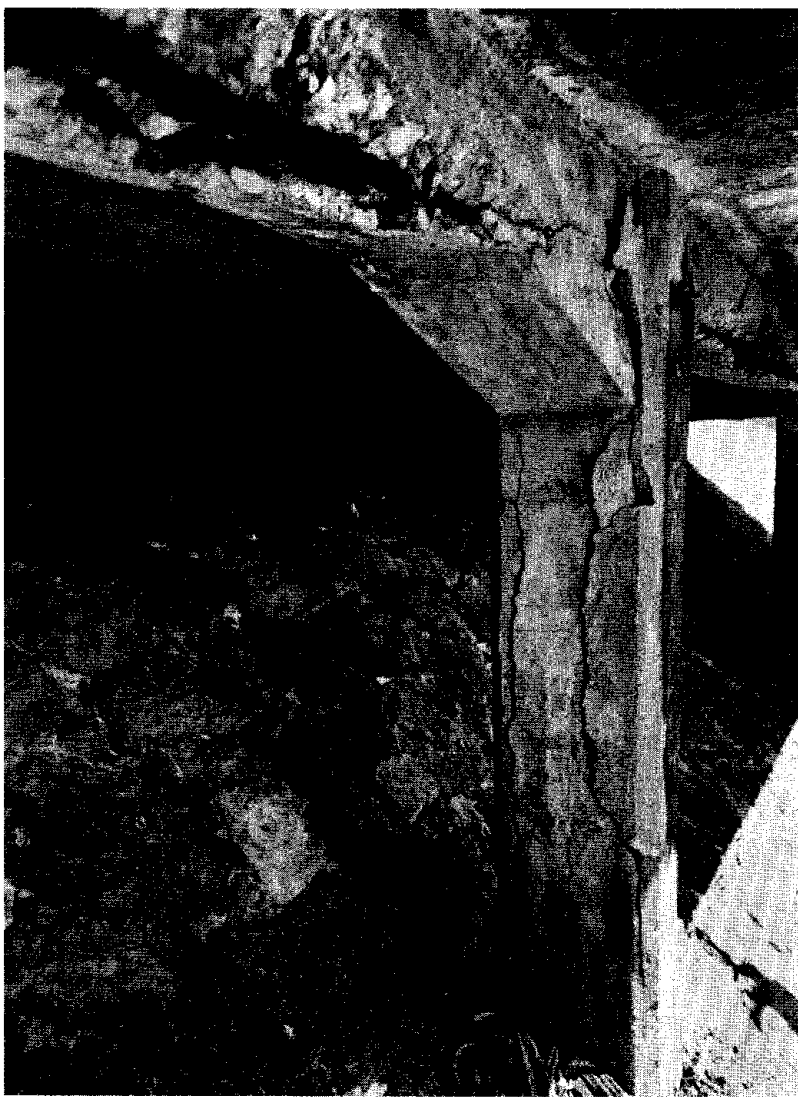
Fra denne "væskefront" kan der ske en fordampning. Hvis tilførslen af havvand ved kapillarsugning og vandafgivelsen ved fordampning balancerer, vil "væskefronten" i betonen blive stabil. "Væskefronten" er ikke nødvendigvis plan; fra hjørner og kanter i en betonkonstruktionsdel vil fordamp-



Armerede betonkonstruktioner i marint miljø er udsat for chloridpåvirkning fra både havvand og fra luftbåren chlorid (bølgesprøjt). Der forekommer alle former for chloridindtrængning, intern chloridtransport og opkoncentration af chlorider i betonen, her chloriddiffusion (1), permeation (2), kapillarsugning (3), opvædning og udtørring (4) samt kapillarsugning med fordampning (5). Det giver mulighed for opbygning af kritisk chloridkoncentration omkring armeringen med korrosion til følge. Bølger frit efter Daniel Herotin.



Figur 2. Chloridindtrængning i betonkonstruktioner sker selv i de simpleste tilfælde som fx i beholdere (svømmebassiner) på mange forskellige måder. Kun i laboratoriet er det muligt at rendyrke de forskellige former for chloridindtrængning i beton. Betons chloridindtrængningsparametre har stor betydning for, hvilken form for chloridindtrængning der kommer til at dominere. Ved høje v/c-forhold vil vandbåren chloridindtrængning stort set dominere. Ved lave v/c-forhold vil chloriddiffusion derimod dominere.



Figur 3. Eksempel på en typisk skade som følge af chloridindtrængning i armeret beton. Fotografiet viser et kajanlæg i Faro, Portugal. Her er der et kraftigt tidevand, som udsætter betonen for skiftevis opvædning og udtørring med chloridophobning til følge. Når chloridindtrængningen i betonen har medført, at chloridkoncentrationen omkring armeringen er blevet kritisk, kan betonen ikke længere beskytte armeringen mod korrosion. Rustprodukterne fylder så meget, at betondæklaget over armeringen bortsprænges. Hvis betonen som her samtidig carbonatiserer (ved ebbe), bliver den kritiske chloridkoncentration ganske lille og skaderne kan derfor indtræde meget tidligt.

ningen (udtørringen) være kraftigst. Her er nemlig forholdet mellem fordampningsflade og vandførsel størst.

Den omgivende lufts relative fugtighed har stor indflydelse på fordampningen fra betonen; det har en eventuel overfladebeskyttelse af betonoverfladen også (beskyttelsens PAM-værdi).

Ved den omtalte fordampning fra "væskefronten" forsvinder der vandmolekyler, ikke chloridioner. Derfor vil der ske en opkoncentration, der i visse tilfælde kan blive så stor, at der udskilles salt (udkrystallisation). For at dette forhold ikke skal få betydning for betonens holdbarhed, må den mængde havvand, der trænger ind i betonen ved kapillarsugning begrænses. Det sker ved at stille krav til betonens v/c -forhold og betonens efterbehandling.

Ved laboratorieforsøg er det vist, at beton med v/c -forhold på 0,30-0,32, som for beton til den faste forbindelse over Storebælt, ikke i forhold til den senere omtalte chloriddiffusion, får tilført en mærkbar chloridmængde, selv om kapillarsugningshøjden er meget stor. Derfor ses der i det følgende bort fra det bidrag til chloridindtrængning i beton, som skyldes kapillarsugning. Derimod er det i en 100-årig periode næppe forsvarligt med vor nuværende viden at se bort fra chloridophobningen bag frie betonoverflader, hvorfra der kan ske fordampning. Det sker fra tunnelelementernes indersider og fra betonpillernes splash zoner, der udsættes for opvædning (kapillarsugning) fra bølger og tidevand med efterfølgende udtørring af betonoverfladen (fordampning).

Der findes beregningsmetoder til beregning af den kapillære stighøjde og den indsugede væskemængde (CtO, 1985). Disse metoder er imidlertid fortrinsvis baseret på viden om beton med v/c -forhold over 0,40. Der savnes dog laboratorieforsøg med beton, hvis v/c -forhold er under 0,40 og der savnes viden om disse betoners opførsel i praksis.

Fra betonkonstruktioner i Nordsøen, hvor v/c -forholdet er under 0,40 ved man, at kapillarsugningen er betydeligt langsommere end det, man kan forudsige fra beregninger, der er ekstrapoleret ud fra viden om beton med et v/c -forhold over 0,40 (Gautefall, 1987).

Permeation

For beton med v/c -forhold over 0,40 er der mulighed for en betydelig vandgennemgang, når betonen udsættes for et énsidigt, passende højt hydraulisk tryk. Vandstrømmen sker gennem kapillarporer og defekter i betonen. Den transporterede vandmængde kan beregnes af Darcy's lov (Darcy, 1856).

Betonen til den faste forbindelse over Storebælt har en kapillarporøsitet, der er så lille, at det ikke ved laboratorieforsøg har været muligt at påvise en signifikant vandstrøm ved et énsidigt hydraulisk tryk på 80 m vandsøjle. Derfor kan man ved laboratorieforsøg se bort fra chloridindtrængning ved

permeation i forhold til chloridindtrængning ved diffusion.

Chloriddiffusion

Når betonens kapillarporer er helt eller delvis væskefyldte og betonen er i berøring med havvand, kan der forekomme chloridtransport i beton ved diffusion. Chloriddiffusion forårsages af den forskel, der er i chloridkoncentrationen mellem havvandet og betonens porevæske. Chloridionerne bevæger sig (Brownske bevægelser) altid mod mindre koncentrationer, dvs., at koncentrationsforskelle søges udjævnet. Derved søger chloridionerne ind i betonens kapillarporer. Chloridionernes dimension er af størrelsesordenen 0,2 nm, dvs. ca. 2 Å, medens kapillarporer er af størrelsesordenen 2 nm til 5 µm, dvs. fra 20 Å til 50.000 Å; der er altså rigelig plads, selv i en "tæt" beton.

Laboratorieforsøg har vist, at chloriddiffusion er betydelig, selv om v/c -forholdet er under 0,40. Ved vandfyldte kapillarporer er kapillarsugningen nul og er v/c -forholdet under ca. 0,40 vil chloridtransport ved permeation være ubetydelig i forhold til chloridtransport ved diffusion.

I tør beton kan der ikke ske chloridtransport, men udendørs beton er aldrig så tør.

Særlige forhold

Betons defekter i overfladen medfører, at chloridtransport kan ske på anden måde end blot fra den teoretiske betonoverflade.

Revner

Overfladedefekter som fx revner fra plastisk svind, udtørringssvind, termorevner og fra snitkræfter (bøjningsmomenter mv.) medfører, at chlorider kan trænge ind i betonen fra en større overflade end teoretisk forventet. Det betyder, at chloridionerne i princippet "skyder genvej" til armeringen og når den tidligere end forventet.

Derfor skal betonens overfladedefekter begrænses. Desuden skal betonens chloridindtrængningsparametre bestemmes på prøver af beton, udboret fra prøvestøbninger, der er udstøbt, komprimeret og efterbehandlet på realistisk måde; undersøgelse af laboratoriebehandlede prøver kan give meget misvisende resultater.

Støbeskel

En særlig form for defekter er støbeskel. Er et støbeskel ikke fremstillet således, at det er lige så tæt som betonen, er et støbeskel at opfatte som en "revne" med det, der deraf følger vedrørende chloridindtrængning.

Man kan i praksis vælge mellem at gøre støbeskel tætte på flere måder;

man kan også vælge at beskytte den armering, der passerer støbeskellet og det kan også gøres på flere måder.

Afstandsklodser

Et særligt problem knytter sig til armeringens afstandsklodser. Selve afstandsklodsen skal være mindst lige så chloridtæt som betonen. Dette er imidlertid ikke nok. Støbeskellet mellem afstandsklod og beton skal også hindre chloridioner i at trænge ind.

Faktisk repræsenterer afstandsklodserne den største risiko for korrosion af armeringen; afstandsklodserne støder direkte op til armeringen og afstandsklodsernes intensitet er ofte stor. Derfor bør valg af afstandsklodser og deres indstøbning i beton vurderes ved chloridindtrængningsforsøg, når der er tale om havvandspåvirkede betonkonstruktioner. Acceptkriteriet skal da være, at chloriderne ikke trænger hurtigere ind ved afstandsklodserne end ellers accepteret langs betonoverfladen.

Efterbehandling

Mangelfuld efterbehandling af beton kan medføre, at man får en stærkt netrevnet betonoverflade. Desuden kan hydratiseringsgraden af cementpastaen blive så ringe, at der ikke opnås den forventede chloridtæthed. Beton med et stort pulverindhold er særlig følsom for mangelfuld efterbehandling.

Yder det yderste betonlag ikke den fornødne modstand mod chloridindtrængningen, svarer det til, at armeringens dæklag mindskes med en tilsvarende tykkelse. Derfor er kontrol med kvaliteten af det yderste betonlag af stor betydning for, at chloriderne ikke trænger hurtigere ind i betonen end beregnet.

Matematiske modeller for chloriddiffusion i beton

Diffusionsprocessen, hvor chloridioners tilfældige bevægelser (Brownske bevægelser) søger at udjævne koncentrationsforskelle, har meget til fælles med varmeledning. Fourier opstillede i 1822 en teori for varmeledning i varmeledende materialer.

Ficks første lov

A. Fick adopterede denne teori i 1855 til brug for stofdifusion i permeable materialer, men tænkte ikke specielt på chloriddiffusion i beton. Forudsætningerne for Ficks diffusionsteori er, at transporten pr. arealenhed pr. tidsenhed (fluxen) F for det diffunderende stof er ligefrem proportional med for-

skellen i stofkoncentrationen pr. længdeenhed $\partial C/\partial x$ i det permeable materiale; det er simpelthen den simpleste sammenhæng, hvis der skal være nogen. Dette kan matematisk formuleres på følgende måde:

$$F = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x}$$

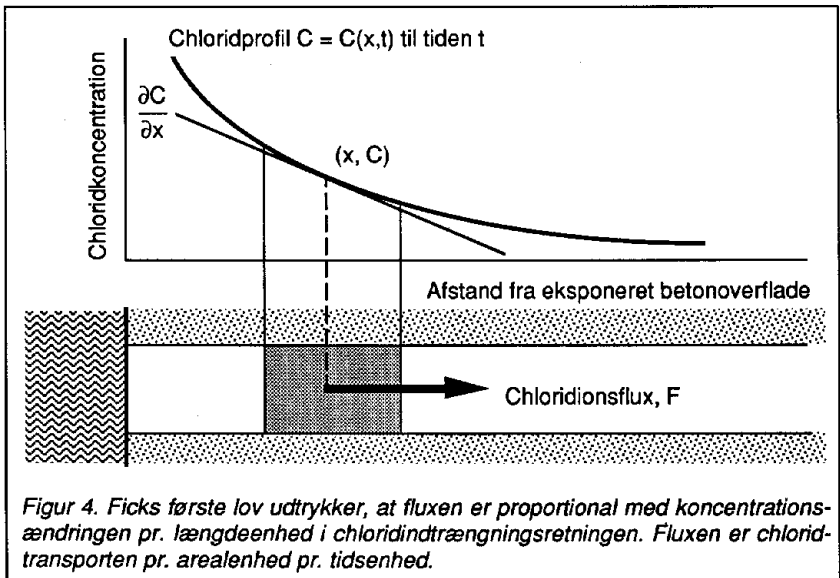
Det negative fortegn angiver, at stoftransporten sker mod mindre stofkoncentration. Proportionalitetskoefficienten D benævnes stoffets diffusionskoefficient i det permeable materiale. Denne simple afhængighed omtales i litteraturen som Ficks første lov for diffusion.

Ficks anden lov

Når stofdiffusionen foregår, vil der ske en ændring af materialets stofkoncentration C med tiden t i ethvert punkt x af det permeable materiale; i hvert tilfælde til at begynde med. Der er altså tale om en ikke-stationær tilstand, hvor stofkoncentrationen i ethvert punkt af det permeable materiale vokser (eller ændrer sig).

På længere sigt kan der opnås en stationær tilstand, dvs. at stofkoncentrationen C et givet sted i materialet forbliver konstant. Det betyder, at man har, at $\partial C/\partial t = 0$. Det er imidlertid et specialtilfælde, som ikke har interesse for chloriddiffusion i beton. Den stationære tilstand behandles derfor ikke i denne forbindelse.

For ikke at komplicere problemerne mere end højst nødvendigt, forudsættes det, at der er tale om en endimensional stofdiffusion. Stofdiffusionen



sker med parallelle strømmlinier i det permeable materiale, jvf. figur 2.

Der betragtes et stangformet dellegeme, parallel med stoftransporten i det permeable materiale. Tværsnitsarealet vælges lig med $dA = 1$. Mellem to snit med afstanden dx befinder der sig da et materialerumfang $dV = dx$, da det stangformede legeme som nævnt har tværsnitsarealet $dA = 1$. Pr. tidsenhed $dt = 1$ vil der pr. arealenhed ved abscissen x blive tilført en stofmængde, der pr. definition er lig med fluxen F .

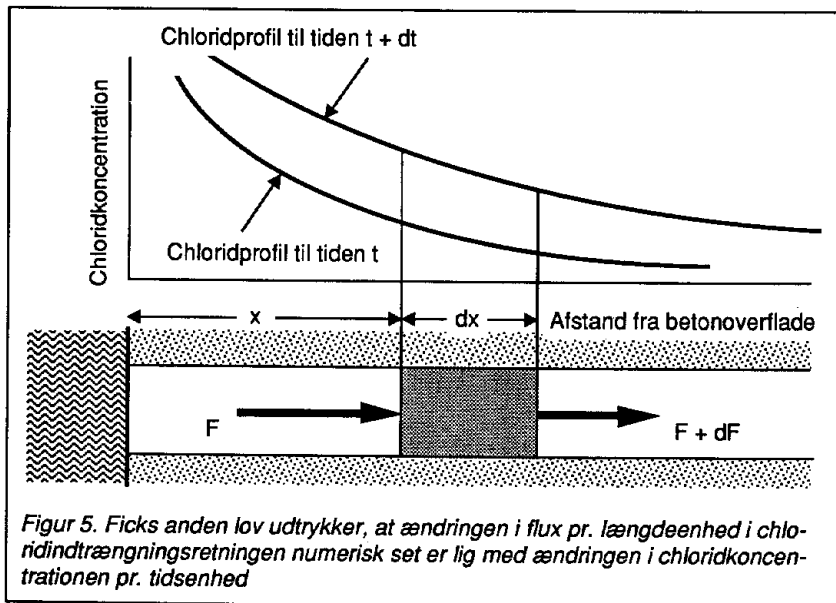
Tilsvarende vil der gennem det andet snit ved abscissen $x + dx$ passere en stofmængde, der pr. tidsenhed pr. arealenhed er fluxen dette sted. Da fluxen ændrer sig i x -aksens retning, vil den ophobede stofmængde pr. tidsenhed i det lille materialerumfang pr. rumfangsenhed blive $\partial C / \partial t$. Heraf følger, at den samlede ændring i det lille materialerumfang bliver:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \cdot dx = F - \left(F + \frac{\partial F}{\partial x} \cdot dx \right) = -\frac{\partial F}{\partial x} \cdot dx$$

Indsættes udtrykket for Ficks første lov $F = -D \cdot \partial C / \partial x$, findes følgende udtryk:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

Helt almindeligt vil diffusionskoefficienten være en funktion af stedet x i materialet, af tiden t og af stofkoncentrationen C i materialet, dvs. at man har $D = D(x, t, C)$. I mange simple tilfælde vil diffusionskoefficienten imid-



Figur 5. Ficks anden lov udtrykker, at ændringen i flux pr. længdeenhed i chloridindtrængningsretningen numerisk set er lig med ændringen i chloridkoncentrationen pr. tidsenhed

lertid med passende tilnærmelse kunne regnes at være konstant $D = D_0$, dvs. uafhængig af x , t og C . Udtrykket får da denne simple form, der i litteraturen er kendt under navnet Fick's anden lov:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_0 \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Forudsætningerne for at anvende Ficks anden lov på ovenstående simple form er altså, at diffusionskoefficienten er konstant, dvs.:

- Materialet, hvori stofdiffusionen skal ske, skal være permeabelt og homogent (dvs. ens i alle punkter).
- Materialet må ikke ændre sine diffusionsegenskaber med tiden eller med stofkoncentrationen.
- Der må ikke ske en kemisk reaktion eller en fysisk binding mellem det permeable materiale og det diffunderende stof.

Disse forudsætninger er ikke opfyldt for chloriddiffusion i beton. Når det alligevel er muligt at anvende Ficks anden lov på den simple form for chloriddiffusion i beton, fx ved prøvningsmetoder for chloriddiffusion, skyldes det, at man under prøvningen har tilpas lille variation i D til, at man kan få passende gode resultater ved at forudsætte Ficks anden lov gældende.

Skal man anvende Ficks anden lov på chloriddiffusion i beton over en længere periode, må der foretages passende korrektioner for variationer i D eller man må anvende Ficks anden lov i dens generelle form. Dette vil blive omtalt senere i artiklen.

Anormal diffusion

En diffusionsproces, der ikke følger Ficks anden lov i sin simple form, dvs. for $D = D_0$ eller i sin udvidede form for $D = D(x,t,C)$, kaldes en ikke-Ficks diffusion eller en anormal diffusion. Da forudsætningerne for Ficks anden lov er de simplest mulige, er der ingen grund til på forhånd at forvente, at chloridindtrængning i beton ved diffusion vil følge Ficks anden lov.

Eksempler på anormal diffusion kan være stofdiffusion i materialer, hvor den tidligere diffusionshistorie har betydning for den efterfølgende diffusion og hvor materialets spændingstilstand har indflydelse. Der er dog ingen observationer, der tyder på, at chloriddiffusion i beton må betegnes som anormal diffusion.

Diffusion med kemisk eller fysisk binding

Der er ét forhold, som kunne lede tanken hen på, at chloriddiffusion i beton ville være anormal og således ikke følge Ficks anden lov. Idet chloridioner

diffunderer i betonens porevæske, vil der kunne ske en binding af chloridioner til cementens og eventuelle puzzolaners hydratiseringsprodukter. Den chloridmængde, der bindes, afhænger af cementens og de eventuelle puzzolaners chloridbindingsevne. Chloridbindingsevnen kan variere meget med cementtypen og tilstedeværelsen af puzzolaner, men også andre parametre har betydning, fx

- anioner, som sulfat og carbonat,
- kationer, som calcium, kalium og natrium,
- temperaturen og
- porevæskens pH-værdi.

Det skal her specielt bemærkes, at carbonatiseret beton ikke binder chloridioner. Når derfor chloridholdig beton carbonatiserer, så frigøres de tidligere bundne chlorider, således at chloridionskoncentrationen øges i den carbonatiserede betons porevæske. Det betyder, at der vil foregå en "sekundær" chloriddiffusion fra den carbonatiserede beton mod den ucarbonatiserede betons porevæske, hvor chloridionskoncentrationen er mindre.

Chloridbindingen kan være både af kemisk og fysisk natur. Der kan dannes mange forskellige reaktionsprodukter; ét af de produkter, der kan dannes ved fysisk binding er Friedels salt, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$.

Effektiv chloriddiffusionskoefficient

Når der samtidig med en chloriddiffusion gennem armeringens betondæklag sker en fysisk/kemisk reaktion og dermed en binding af de diffunderende chloridioner i dæklaget, vil der trænge færre chloridioner frem til armeringen end hvis cementen ikke kunne binde chloridionerne.

Chloridbindingen virker altså som om betonens chloriddiffusionskoefficient havde været mindre. Det vil derfor ikke være muligt at bedømme chloridindtrængningen i beton alene ud fra chloriddiffusionskoefficientens størrelse.

I det simpleste tilfælde kan man forudsætte, at chloridbindingen S er proportional med chloridkoncentrationen det pågældende sted, dvs. $S = R \cdot C$. Chloridbindingen får indflydelse på den tidsmæssige ændring af chloridkoncentrationen og derfor må der gælde følgende relation:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_o \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial S}{\partial t}$$

Indsættes $S = R \cdot C$, findes

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_o \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - R \cdot \frac{\partial C}{\partial t}$$

Ved ordning af denne differentilligning, får man følgende udtryk:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_o}{1 + R} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = D_{eff} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

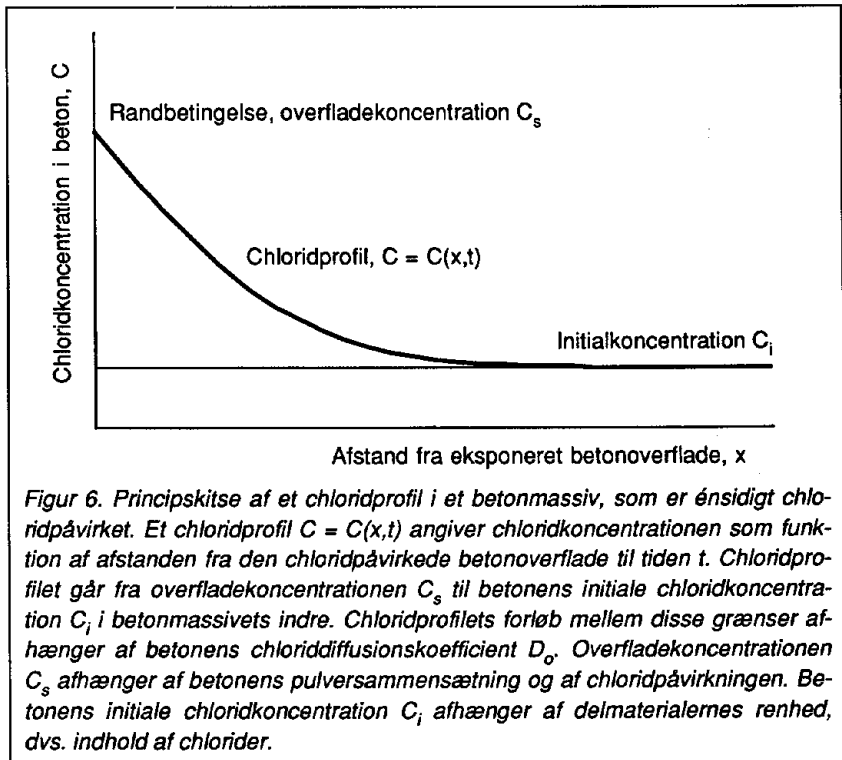
Det betyder, at chloriddiffusion med chloridbinding under de her benyttede forudsætninger kan opfattes som Ficks diffusion med en effektiv chloriddiffusionskoefficient D_{eff} , der er mindre end D_o .

Analytiske løsninger

Ficks anden lov kan løses i mange af de tilfælde, som har interesse for vurdering af chloridindtrængning i beton. Nogle af disse løsninger for det halv-uendelig betonmassiv er anført i det følgende.

Konstant chloriddiffusionskoefficient

Påvirkes et udstrakt betonmassiv af en konstant chloridpåvirkning, fx neddykket i havvand, og forudsættes betonens chloriddiffusionskoefficient i den



betragtede tidsperiode at være konstant, får Ficks anden lov følgende form:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_0 \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Løsningen hertil betegnes betonens chloridprofil. De tilhørende rand- og tidsbetingelser er følgende:

- For $x = 0$ og til enhver tid t , er $C = C_s$, der er profilets randbetingelse.
- For $x \rightarrow \infty$ og alle t , vil $C \rightarrow C_i$, der er betonens initiale chloridindhold.

Løsningen til denne partielle differentialligning kan for $x \geq 0$ og $t \geq 0$ skrives på følgende form, (Bohr, 1942 s. 109) og (Ditlevsen, 1966 s. 205):

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erf} \frac{x}{\sqrt{4 \cdot t \cdot D_0}}$$

Heri står funktionen $y = \operatorname{erf} z$ for Gauss' fejlfunktion, defineret ved:

$$\operatorname{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z \exp(-\zeta^2) \cdot d\zeta$$

Af bekvemmelighedsgrunde definerer man den komplementære funktion til fejlfunktionen ved:

$$\operatorname{erfc} z = 1 - \operatorname{erf} z$$

således at man også kan skrive løsningen til Ficks anden lov i dette specialtilfælde som:

$$C(x, t) = C_i + (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{4 \cdot t \cdot D_0}}$$

Hærdningens indflydelse

Beton kan blive udsat for chloridpåvirkning før den er fuldt udviklet, dvs. at chloriddiffusionskoefficienten er blevet konstant. Især for beton med flyveaske, er der en mærkbar formindskelse af chloriddiffusionskoefficienten fra 28 M-døgn til 365 M-døgn. Der kan gå flere år, før chloriddiffusionskoefficienten for sådanne betoner kan regnes konstant. I sådanne tilfælde må man regne med, at chloriddiffusionskoefficienten har én værdi ved chloridpåvirkningens start og at chloriddiffusionskoefficienten derefter aftager med betonens modenhed. Man har altså $D = D(t)$.

Når chloriddiffusionen starter, er D stor, og chloridindtrængningen er derfor hurtig. Efterhånden som betonens modenhed stiger, vil D aftage og

chloridindtrængningens videre forløb vil derfor ske langsommere. For en tidsafhængig chloriddiffusionskoefficient får Ficks anden lov formen:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D(t) \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Indføres en ny variabel $T = T(t)$ ved $dT/dt = D(t)$, kan den partielle differentialligning reduceres til:

$$\frac{\partial C}{\partial T} = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Derved er problemet ført over i det kendte grundtilfælde for Ficks anden lov, hvor løsningen direkte kan opskrives. Den fundne løsning skal derefter transformeres ved at indsætte $T = T(t)$.

Lagdelt betonkvalitet

En mangelfuld efterbehandling af beton vil medføre, at betonens overfladelag får andre chloriddiffusionsegenskaber end den indre beton, der har haft gode hærdebetingelser. Den manglende eller mangelfulde efterbehandling kan forårsage overfladedefekter som fx revnedannelser, lille hærdningsgrad og/eller carbonatisering; alt sammen noget, der påvirker betonens modstand mod chloridindtrængning.

Betydningen af en mangelfuld efterbehandling kan naturligvis på den sikre side vurderes ved at se bort fra det overfladelag på betonkonstruktionen, som har fået defekter. Dybden af dette overfladelag kan fx fastlægges ved en tyndslibsanalyse.

Denne simplifikation kan imidlertid være noget på den sikre side. Forudsættes det, at det defekte overfladelag har en konstant chloriddiffusionskoefficient, der er større end den indre betons, kan effekten beregnes som anført i (Carslaw, 1959 s. 321).

Numerisk beregning af chloriddiffusion i beton

Som det fremgår af ovenstående, indeholder de kendte analytiske løsninger funktioner, som ikke normalt findes på en lommeregner. I de større matematiske håndbøger er der imidlertid tabeller for funktionen $y = \operatorname{erfc} z$. Derfor vil det være muligt at beregne chloridindtrængningen i beton, når betonens værdier for chloridprofillets randbetingelse C_s , diffusionskoefficient D_0 og det initiale chloridindhold C_i er kendte.

<i>z</i>	0,	1,	2,
,0	1,0000	0,15730	0,004678
,1	0,8875	0,11980	0,002979
,2	0,7773	0,08969	0,001863
,3	0,6714	0,06599	0,001143
,4	0,5716	0,04772	0,000689
,5	0,4795	0,03390	0,000407
,6	0,3961	0,02365	0,000236
,7	0,3222	0,01621	0,000134
,8	0,2579	0,01091	0,000075
,9	0,2031	0,00721	0,000041

Tabel 3. Tabel over den komplementære fejlfunktion $y = \text{erfc } z$. For $\text{erfc } 1,3 = 0,06599$.

Beregning med tabelanvendelse

I tabel 3 kan værdier for funktionen $y = \text{erfc } z$ aflæses for $0 \leq z < 3$. Det er stort set alt, hvad der er nødvendigt; resten af beregningerne kan foretages på lommeregner, hvis regnearbejdet tilrettelægges på passende måde.

Chloridprofilen $C = C(x, t)$ i et halvuendeligt betonmassiv med konstant chloridpåvirkning og konstant chloriddiffusionskoefficient D_0 , kan opskrives på basis af værdierne z på følgende måde:

$$C(x, t) = C_i + (C_s - C_i) \cdot \text{erfc } z$$

Til et givet tidspunkt t kan de tilsvarende indtrængningsdybder x_t for $C(x, t)$ beregnes af udtrykket:

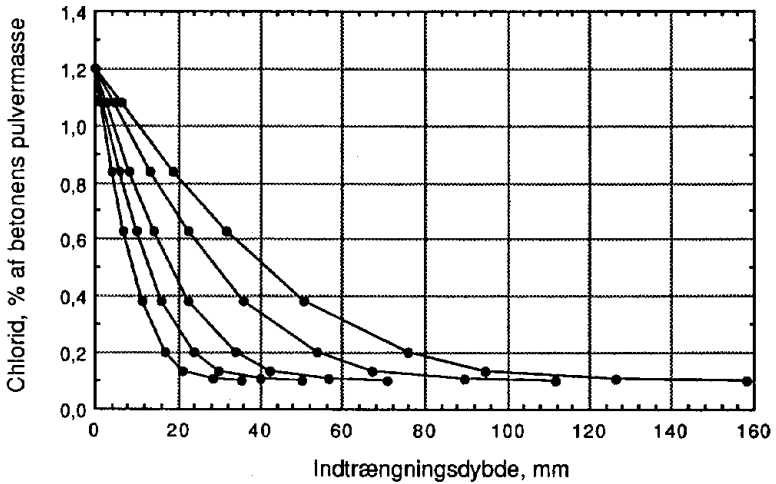
$$x_t = z \cdot \sqrt{4 \cdot t \cdot D_0}$$

Dette er illustreret med en numerisk behandling i følgende eksempel.

Eksempel 1. Chloridprofilen i en beton skal beregnes efter 25, 50 og 100 års konstant chloridpåvirkning. Betons chloriddiffusionsparametre forudsæt-

<i>z</i>	<i>erfc z</i>	<i>C(x, t)</i>	<i>x</i> ₅	<i>x</i> ₁₀	<i>x</i> ₂₀	<i>x</i> ₅₀	<i>x</i> ₁₀₀
0,0	1,0000	1,200	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,8875	1,076	1,4	2,0	2,8	4,5	6,3
0,3	0,6714	0,839	4,2	6,0	8,5	13,4	19,0
0,5	0,4795	0,628	7,1	10,0	14,1	22,4	31,6
0,8	0,2579	0,387	11,3	16,0	22,6	35,8	50,6
1,2	0,08969	0,199	17,0	24,0	33,9	53,7	75,9
1,5	0,0339	0,137	21,2	30,0	42,4	67,1	94,9
2,0	0,0047	0,105	28,3	40,0	56,6	89,4	126,5
2,5	0,0004	0,100	35,4	50,0	70,7	111,8	158,1

Tabel 4. Beregning af chloridprofiler i beton som anført i eksempel 1. Værdierne z og $\text{erfc } z$ er fra tabel 3.



Figur 7. Chloridprofiler i den beton, der er behandlet i eksempel 1, jvf. tabel 4. De viste chloridprofiler, regnet fra venstre mod højre, svarer til eksponeringstider på 5 år, 10 år, 20 år, 50 år og 100 år. Den pågældende beton har en konstant chloriddiffusionskoefficient, som er $D_0 = 10 \text{ mm}^2/\text{år}$, en randbetingelse på 1,2 % af betonens pulvermasse og det initiale chloridindhold er 0,05 % af betonens pulvermasse, jvf eksempel 1.

tes at være konstante, nemlig randbetingelsen $C_s = 1,2 \%$ af betonens pulvermasse, chloriddiffusionskoefficient $D_0 = 10 \text{ mm}^2/\text{år}$ og det initiale chloridindhold $C_i = 0,1 \%$ af betonens pulvermasse.

Beregningerne foregår på skemaform, idet man starter med at opskrive værdier for z med passende intervaller og de dertil hørende værdier for $\text{erfc } z$, jvf. tabel 3. Derefter beregnes $C(x,t)$. Fx for $z = 0,8$ er $\text{erfc } 0,8 = 0,2579$, således at

$$C(x,t) = 0,1 + (1,2 - 0,1) \cdot \text{erfc } 0,8 = 0,387 \%$$
 af pulvremassen

Ønsker man at vide, hvor langt ind i betonen denne chloridkoncentration er trængt, fx i løbet af $t = 100$ år, findes følgende:

$$x_{100} = 0,8 \cdot \sqrt{4 \cdot 100 \cdot 10} = 50,6 \text{ mm}$$

I tabel 4 er beregningerne opstillet og i figur 7 er de tilsvarende chloridprofiler optegnet, svarende til forskellige chloridpåvirkningsperioder.

Den her anviste opstillingsform egner sig fx til beregning af chloridprofiler ved hjælp af regneark, hvis men én gang for alle har indført tabelværdierne for den komplementære fejlfunktion, $y = \text{erfc } z$, i regnearket.

Parabelapproksimation

Selv om ovenstående beregning af chloriddiffusion i beton ikke er kompliceret, vil en løsning af den transcendente ligning

$$C(x, t) = C_i + (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{4 \cdot t \cdot D_o}}$$

kun kunne ske ved numeriske metoder. Ingeniørens almindelige arbejdsmetode med at have en formel til ethvert formål, er nok mulig ved tabelhjælp, men ikke særlig bekvem.

Ficks anden lov er en tilnærmet formulering af chloridindtrængning i beton ved diffusion. En korrekt løsning til Ficks anden lov vil derfor også være en tilnærmet løsning.

Det er da naturligt at undersøge, om der er andre tilnærmede løsninger til Ficks anden lov, som er simple, men gode nok for praksis. Det kan også udtrykkes på følgende måde: Når man ikke kan finde den korrekte løsning og derfor skal anvende en tilnærmet løsning, så kan man lige så godt finde og bruge den simpleste af de tilnærmede, men brugbare løsninger.

Der findes mange approksimationer til den komplementære fejlfunction $y = \operatorname{erfc} z$. Som regel tilfredsstiller disse approksimationer dog ikke det elementære krav om simpelhed. I matematikken er det næstbedste ofte en parabelapproksimation. For $y = \operatorname{erfc} z$ kan man således anvende følgende approksimation:

$$\operatorname{erf} z \approx \left(1 - \frac{z}{\sqrt{3}} \right)^2$$

for $0 \leq z < \sqrt{3}$. For $z \geq \sqrt{3}$ anvendes approksimationen $\operatorname{erfc} z \approx 0$. Her er der gjort det valg at anvende konstanten $\sqrt{3}$, fordi den er let at huske, men den medfører ikke nødvendigvis den nøjagtigste approksimation. Med denne approksimation kan betons chloridprofil skrives på den simple form:

$$C(x, t) \approx C_i + (C_s - C_i) \cdot \left(1 - \frac{x}{\sqrt{12 \cdot t \cdot D_o}} \right)^2$$

gældende for $0 \leq x < \sqrt{12 \cdot t \cdot D_o}$. For $x \geq \sqrt{12 \cdot t \cdot D_o}$ anvendes approksimationen $C(x, t) = C_i$. Anvendelsen af parabelapproksimationen er illustreret i det følgende eksempel.

Eksempel 2. Situationen, som er beskrevet i eksempel 1, skal behandles med tilnærmelsesformlen. Med $D_o = 10 \text{ mm}^2/\text{år}$ og en konstant chloridpåvirkning i $t = 100$ år, er $\sqrt{12 \cdot t \cdot D} = \sqrt{12000} = 109 \text{ mm}$. En tilnærmet værdi for chloridindtrængningen kan altså findes indtil en chloridindtrængning i en

dybde på $x = 109$ mm. Til tiden $t = 100$ år og i dybden $x = 50$ mm bag betonoverfladen er chloridkoncentrationen derfor med tilnærmelse:

$$C(x,t) \approx 0,1 + (1,2 - 0,1) \cdot (1 - 50/109)^2 = 0,43 \% \text{ af pulvermassen}$$

medens den "korrekte" værdi var 0,387 % af pulvermassen, jvf. eksempel 1. Det svarer til en "fejl" på ikke over 10 %.

Førsteårsindtrængningen

Løsningen til Ficks anden lov for et halvuendeligt betonmassiv

$$C(x,t) = C_i + (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{4 \cdot t \cdot D_o}}$$

kan ordnes og gives følgende form:

$$x = K \cdot \sqrt{t}$$

Heri er

$$K = \sqrt{4 \cdot D_o} \cdot \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C(x,t) - C_i}{C_s - C_i} \right)$$

Denne materialeparameter benævnes førsteårsindtrængningen, idet $t = 1$ år medfører, at $K = x$. Enheden for K er mm/ $\sqrt{\text{år}}$, hvis indtrængningen måles i mm og eksponeringstiden måles i år. Som det ses, er førsteårsindtrængningen i en given situation afhængig af $C(x,t)$. Som regel vælges den kritiske chloridindtrængning for ucarboniseret beton

$$C(x,t) = C_{cr} = 0,4 \% \text{ af betonens pulvermasse.}$$

Med det fundne tilnærmelsesudtryk for chloridprofilen findes førsteårsindtrængningen at være:

$$K \approx \left(1 - \sqrt{\frac{C(x,t) - C_i}{C_s - C_i}} \right) \cdot \sqrt{12 \cdot D_o}$$

To betoner kan godt have samme værdier for chloriddiffusionskoefficienten D_o , men forskellige værdier af K , hvis C_s og C_i er forskellige for de to betoner. Derfor kan beton ikke bedømmes alene på chloriddiffusionskoefficienten D_o , hvad angår chloridindtrængning i betonen ved diffusion.

Tilnærmelsesformlen for førsteårsindtrængningen er en simpel måde at sammenfatte de tre parametre D_o , C_s og C_i i én parameter og det giver praktiske lettelser i vurderingen af de tre størrelser. Formlen for førsteårsind-

trængningen kan omskrives til følgende overskuelige form:

$$\sqrt{\frac{K^2}{12 \cdot D_o}} + \sqrt{\frac{C_{cr} - C_i}{C_s - C_i}} \approx 1$$

Det skal bemærkes, at begrebet førsteårsindtrængningen K kun her en mening, hvis $C_s > C_{cr} > C_i$.

Eksempel 3. For de betragtede chloridprofiler i eksempel 1 er førsteårsindtrængningen, svarende til fx $C(x,t) = C_{cr} = 0,4$ % af betonens pulvermasse, lig med

$$K = \frac{50,6}{\sqrt{100}} = 5,1 \text{ mm}/\sqrt{\text{år}}$$

Indtrængningen af chloridkoncentrationen $C(x,t) = C_{cr} = 0,4$ % af pulvermassen i løbet af fx $t = 25$ år, vil da være

$$x_{25} = 5,1 \cdot \sqrt{25} = 25,3 \text{ mm}$$

Livslængdeanalyse

Ved en livslængdeanalyse forstås her en beregning af den tid, det tager for chloridindtrængningen at opbygge en kritisk chloridkoncentration i betonen omkring det yderste armeringslag, således at den naturlige beskyttelse mod korrosion ikke længere er til stede.

Kritisk chloridkoncentration.

Når chloridkoncentrationen i betonen omkring en armeringsstang er vokset til $C_{cr} = 0,4$ % af betonens pulvermasse, vil armeringens naturlige beskyttelse mod korrosion i betonen være ophævet. Derfor behøver armeringen ikke nødvendigvis at ruste det pågældende sted; andre betingelser som fx tilstedeværelse af ilt og katode/anode-forholdet kan være afgørende (Henriksen, 1990).

Der er ikke tale om en skarp grænse for C_{cr} . Ofte anvender man derfor følgende kriterier for ucarboniseret beton, baseret på engelske undersøgelser (Browne, 1980) af betonprøver fra marine, armerede betonkonstruktioner, jvf. tabel 5. Dette er i dag et almindeligt accepteret rustkriterium for ucarboniseret, slapt armeret beton. For spændbeton gælder dog andre og lavere værdier.

Ved skadeanalyse anvender man ofte en forudsætning om, at den skadelige chloridkoncentration er $C_{cr} = 0,05$ % af betonmassen, da man sjældent kender betonens pulverindhold. Dette kriterium er brugbart i praksis.

Chloridkoncentration % af betonens pulvermasse	Sandsynlighed for armeringskorrosion
Under 0,4	Kan negligeres
0,4 – 1,0	Er mulig
1,0 – 2,0	Er sandsynlig
Over 2,0	Er sikker

Tabel 5. Almindeligt accepterede værdier for kritisk chloridkoncentration i ucarbonatiseret beton omkring blød armering. Værdierne er baseret på en engelsk undersøgelse (Browne, 1980).

Haussmans tærskelværdi.

Den nødvendige betingelse for, at armeringen kan ruste i chloridholdig beton er, at betonens porevæske op til armeringen har en koncentration af frie chloridioner $[\text{OH}^-]$, givet ved følgende ulighed:

$$[\text{Cl}^-] \geq 0,6 \cdot [\text{OH}^-]$$

Dette er eftervist ved forsøg i laboratoriet, men ikke med armering i beton (Haussman, 1967). Haussmans tærskelværdi skal forstås på den måde, at porevæskens chloridkoncentration skal være større end 60 % af porevæskens hydroxylionkoncentration. Betingelsen er som nævnt nødvendig, men den er ikke tilstrækkelig; der skal fx være mulighed for en tilførsel af ilt til armeringen.

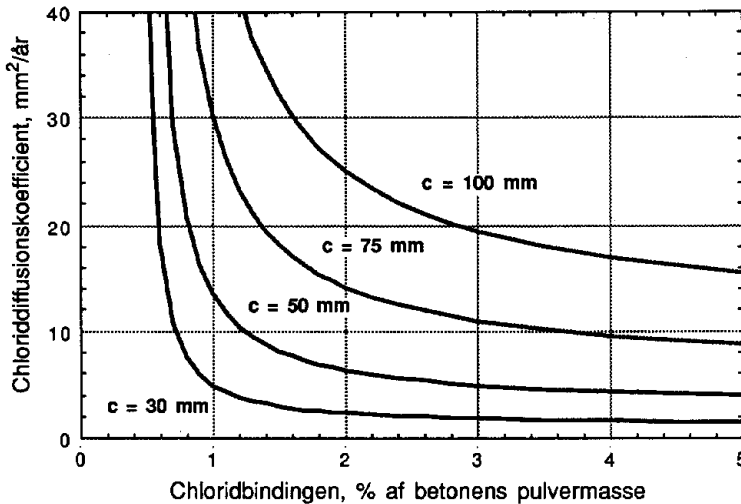
Man skal være opmærksom på, at C_{cr} kan være mindre end 0,4 % af betonens pulvermasse, hvis $[\text{OH}^-]$ er mindre end normalt. Hvis betonen er konstant våd, således at ilttilgangen er begrænset, kan korrosionshastigheden blive så lav, at det kan opfattes som om C_{cr} er højere end 0,4 % af betonens pulvermasse.

Ser man énsidigt på Haussmans tærskelværdi, så bør man vælge en beton med så høj værdi af $[\text{OH}^-]$ som muligt. Det vil ofte blive en beton med et højt cementindhold og med en ikke-sulfatbestandig portlandcement med et højt alkaliindhold. Valget skal imidlertid ske ud fra en helhedsvurdering og ikke med fokusering på blot én parameter.

Kriterium for 100 års funktionstid

For at finde det nødvendige kriterium for 100 års funktionstid, vælges følgende parametre:

- Eksponeringstid: $t = 100$ år.
- Armeringsdæklag: $c = 50$ mm.
- Kritisk chloridkoncentration: $C_{cr} = 0,4$ % af betonens pulvermasse.
- Initial chloridkoncentration: $C_i = 0,05$ % af betonens pulvermasse.



Figur 8. Teoretisk relation mellem betons chloridbinding C_s , chloriddiffusionskoefficient D_o og armeringens dæklag c for opnåelse af 100 års funktionstid. Forudsætningerne er en kritisk værdi på $C_{cr} = 0,4$ % af betonens pulvermasse og et initialt chloridindhold på $C_i = 0,05$ % af betonens pulvermasse.

Skal funktionstiden være $t \geq 100$ år med et armeringsdæklag på $x = c = 50$ mm, kræver det, at førsteårsindtrængningen for $C_{cr} = 0,4$ % af betonens pulvermasse bliver

$$K \leq \frac{50}{\sqrt{100}} = 5 \text{ mm}/\sqrt{\text{år}}$$

Det skal her pointeres, at dette krav gælder for betonen i konstruktionen i det pågældende miljø og ikke for betonen i en accelereret laboratorieprøvning.

For at finde hvilken relation, der skal herske mellem D_o og C_s for at dette bliver opfyldt, anvendes tilnærmelsesformlen for førsteårsindtrængningen K . Dermed findes følgende relation:

$$5 \geq \left(1 - \sqrt{\frac{0,4 - 0,05}{C_s - 0,05}} \right) \cdot \sqrt{12 \cdot D_o}$$

som kan omskrives til formen:

$$\sqrt{\frac{2,08}{D_o}} + \sqrt{\frac{0,35}{C_s - 0,05}} \geq 1$$

Heraf ses det tydeligt, at en betons chloridindtrængningsegenskaber ikke kan baseres på D_o alene. I figur 8 er ovenstående relation optegnet for dæklaget $c = 50$ mm. Gennemføres ovenstående beregninger for varierende værdier

af armeringens dæklag c , findes følgende betingelse:

$$c \geq \left(1 - \sqrt{\frac{0,35}{C_s - 0,05}} \right) \cdot \sqrt{1200 \cdot D_0}$$

Heaf findes dæklaget c i enheden mm, når overfladekoncentrationen indsættes i enheden % af betonens pulvermasse og chloriddiffusionskoefficienten indsættes i enheden $\text{mm}^2/\text{år}$. I figur 8 er denne relation optegnet for et passende udvalg af tykkelsen c af armeringens dæklag.

Betonproportionering for livslængde

Ved proportionering af beton for holdbarhed (modsat styrke) må der på principielt forskellig måde tages hensyn til følgende to årsager til forvitring af armeret beton:

- Uforligelige delmaterialer i beton.
- Aggressive stoffer fra betonens omgivelser.

Har man ved proportionering og ved betonarbejdets udførelse undgået uforligelige delmaterialer, er der tale om en "sikring for livet." Man kan dog kun undgå uforligelige delmaterialer ved at vide hvilke delmaterialer, der er forligelige og ved at føre en effektiv kontrolprøvning.

Chloridbremsning er det afgørende krav

Aggressive stoffer fra betons omgivelser omfatter ikke blot chloridholdige salte; mange andre stoffer kan skade beton og armering. At undgå armeringskorrosion fra chloridindtrængning i en passende lang årrække stiller imidlertid langt de største krav til betonen. Derfor har betonproportioneringen som hovedopgave at sikre armeringen mod chloridindtrængning i betonens stipulerede funktionsperiode.

Det kan kun ske ved at gøre betonen passende chloridtæt i forhold til armeringens betondæklag. Det stiller krav til følgende forhold:

- Delmaterialer (især cement, mikrosilica og flyveaske).
- Sammensætning (især v/c -forholdet, m/c -forholdet og f/c -forholdet).
- Komprimering (især bearbejdelighed og vibreringsudstyr).
- Efterbehandling (især fugtafgivelse, temperaturstigning og -gradient).
- Konstruktionsudformning (især revner, støbeskel og afstandsklodser).

Traditionel betonproportionering for styrke og/eller holdbarhed er en fastsættelse af betonens sammensætning, dvs. blanderecepten.

Beton, der skal have en stor modstand mod chloridindtrængning, vil have

væsentligt ændrede egenskaber i forhold til traditionel beton, både i frisk, hærdnende og hærdnet tilstand. Derfor må fastsættelse af betonrecepten ske på betingelse af, at de ovenfor nævnte forhold lader sig gennemføre i praksis. Det har i praksis vist sig at være en vanskelig opgave. Optimal korngradering og blandeprocessen kan blive afgørende; det har ikke hidtil været almindelig praksis i Danmark.

Forhåndsviden om chloriddiffusion i beton

Der er udført mange chloridindtrængningsforsøg på betoner med forskellige delmaterialer og med varierende sammensætning. I disse forsøg har blandt andet cementtype og v/c -forhold varieret, ligesom der har været anvendt varierende mængder af mikrosilica og/eller flyveaske. Det er dog ikke endnu lykkedes at opstille en analytisk relation, der muliggør en troværdig estimering af chloridbindingsevnen C_s og chloriddiffusionskoefficienten D_o .

Der er i og for sig udført forsøg nok, internationalt set, til at det burde kunne lade sig gøre. Anvendelse af forskellige prøvningsmetoder samt forskellige typer cement, mikrosilica og flyveaske gør imidlertid, at disse resultater kun vanskeligt kan samordnes og behandles under ét. Derfor er man nødt til at basere betonproportioneringen på undersøgelse og vurdering af prøveblandingers evne til at modstå chloridindtrængning. Det er dog vigtigt for resultaternes pålidelighed, at prøveblandingernes udstøbning og efterbehandling sker på realistisk måde; laboratorieblandinger afspejler ikke virkeligheden.

Ved planlægning af prøveblandinger er det muligt at udnytte en vis almen forhåndsviden om chloridindtrængning i beton ved diffusion. Det vides således, at betons chloridbremsende egenskaber forbedres med følgende ændringer, alt andet lige:

- Nedsættelse af v/c -forholdet.
- Tilsætning af mikrosilica og/eller flyveaske.

jvf. (Hansson, 1985), (Byfors, 1986) og (Byfors, 1987). En énsidig fastsættelse af et ekstremt lavt v/c -forhold og høj koncentration af mikrosilica og flyveaske må dog ikke medføre, at betonen får defekter som følge af mangelfuld komprimering eller at efterbehandlingen i praksis er for krævende. Proportioneringen, teoretisk som i praksis, skal altid ske ud fra en helhedsbetragtning på betingelse af, at hovedkravet om mindst 100 års funktionstid tilgodeses.

FAB-udvalgets opgave

Der er i Danmark ikke tradition for, at bygherren specificerer betonrecepten. Entreprenøren får valgfrihed inden for visse kravgrænser, som er fastlagt i

betonbeskrivelsen. Desuden er der normer, som skal overholdes.

Det var en af FAB-udvalgets opgaver at fastlægge de kravgrænser, inden for hvilke entreprenøren frit kunne fastlægge betonrecepten.

FAB's prøveblandinger

Sammensætning. FAB-udvalgets medlemmer fastlagde, ud fra praktiske erfaringer, visse hovedretningslinier for betonsammensætningen og lod derefter en analyse af prøvningsresultater fra ni prøveblandinger være retningsgivende for det endelige kravkompleks.

De ni prøveblandinger blev fastlagt således, at betonernes pulverindhold og vandindhold var tilstræbt at være konstant på henholdsvis 395 kg/m³ beton og 135 liter/m³ beton. Ellers varierede de ni betoners indhold af cement, mikrosilica og flyveaske systematisk.

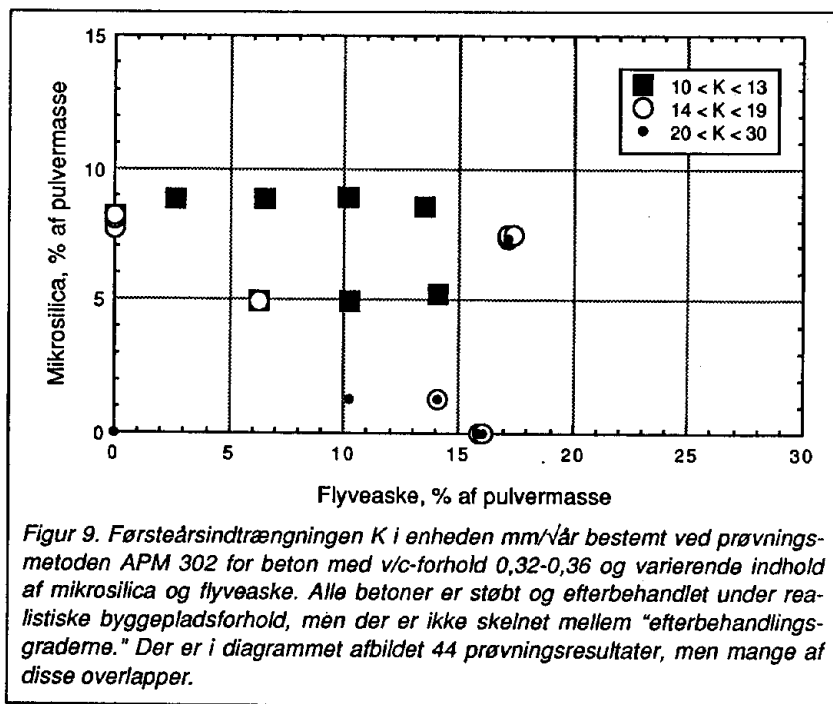
Vurderingsgrundlag. Pulverkombinationerne blev fastlagt således, at det skulle blive muligt at udvælge den pulverkombination, som gav den bedste kvalitet, dvs. ikke alene vurderet ud fra den største modstand mod chloridindtrængning, men også med hensyntagen til, at der blev opnået en mikrostruktur med et minimum af defekter. Det var naturligvis en forudsætning, at den valgte betons andre egenskaber (bearbejdélighed og styrke) var tilfredsstillende.

Planlægningen. Før blanding og udstøbning af de ni prøveblandinger blev tilslagets korngradering optimeret således, at minimalt vandbehov, tilstrækkelig kitmasseindhold og et stabilt stenskelet blev opnået, samtidig med at betonen i frisk tilstand blev bedømt til at have følgende karaktertræk:

- Robusthed.
- Pumpbarhed.
- Stabilitet.

Alle prøveblandinger blev gennemført hos Unicon Beton I/S i Roskilde.

Egenskabsudvikling. Tidligere undersøgelser af den pågældende betontype havde vist, at der var en udpræget følsomhed over for efterbehandlings effektivitet. På grund af det store pulverindhold (395 kg/m³ beton) og det lille vandindhold (135 liter/m³ beton) er denne betontype meget tæt, ikke alene i hærdnet tilstand, men også i frisk og hærdnende tilstand. Det betyder, at fordampning af fugt fra betonoverflader ikke kan kompenseres ved naturlig tilførsel af fugt fra betonens indre ved vanddiffusion og bleeding. Derfor er fordampningshastigheden af mindst lige så stor betydning for revne- og defektdannelse som mængden af den fordampede fugt.



Figur 9. Førsteårsindtrængningen K i enheden mm/vår bestemt ved prøvningsmetoden APM 302 for beton med v/c-forhold 0,32-0,36 og varierende indhold af mikrosilica og flyveaske. Alle betoner er støbt og efterbehandlet under realistiske byggepladsforhold, men der er ikke skelnet mellem "efterbehandlingsgradene." Der er i diagrammet afbildet 44 prøvningsresultater, men mange af disse overlapper.

Det blev derfor valgt at variere "efterbehandlingsgraden" for de udstøbte prøvelegemer, ved at lade forskallingen sidde til betonen havde opnået en modenhed af henholdsvis 2 M-dg, 4 M-dg, 7 M-dg, 14 M-dg og 28 M-dg. Derefter blev følgende egenskaber og karakteristika bestemt ved prøvning:

- Bearbejdelighed efter DS 423.12 ved sætmål.
- Luftindhold efter DS 423.15 med press-ur-meter.
- Chloridindtrængning ved prøvningsmetoden APM 302.
- Udtræksprøvning efter DS 423.31 ved LOK-test og CAPO-test.
- Trykstyrke efter DS 423.23 af udborede betonkerner.
- Mikrodefekter efter TI-B 5 ved mikrostrukturel analyse.
- Luftboblefordeling og luftindhold efter TI-B 4.
- Frostbestandighed ved frost/tø-prøvning efter SS 13 72 44.

Sideløbende med disse undersøgelser blev trykstyrkeudviklingen af støbte betoncylindre bestemt.

Måleresultater. Af de mange måleresultater fra de ni prøveblandinger, skal kun resultaterne fra chloridindtrængningsforsøgene omtales nærmere her. Det skal dog nævnes, at de registrerede sætmål ved udstøbningen lå mellem

90 og 120 mm.

Ved prøvningen blev D_o , C_s og D_i målt og førsteårsindtrængningen K blev beregnet, svarende til $C_{cr} = 0,4$ % af pulvermassen.

Sammen med resultater fra andre chloridindtrængningsprøvninger med tilsvarende betontype på AEClaboratoriet ($0,32 \leq v/c \leq 0,36$), er fordelingen af K vist i afhængighed af betonernes indhold af mikrosilica og flyveaske (% af pulvermassen) i figur 9. For samtlige betoner var gabet for det ækvivalente v/c -forhold på $0,32 \leq v/c \leq 0,36$ med de i FAB anvendte aktivitetsfaktorer på 2,0 for flyveaske og 0,5 for mikrosilica. Det tilsvarende gab for førsteårsindtrængningen K blev for de ni prøveblandinger bestemt ved prøvningsmetoden APM 302 til $11 \leq K \leq 27$ mm/ $\sqrt{\text{år}}$, (AEC, 1986).

Eksponeringsbetingelserne med prøvningsmetoden APM 302 er en temperatur på 25 °C, en chloridkoncentration på 100.000 mg/liter og en eksponeringstid 16-99 døgn; for de ni FAB-prøveblandinger dog 35 døgn. I figur 9 er måleresultater fra ialt 44 undersøgelser indtegnet; flere måleresultater overlapper.

Prøvningsresultater. Det ses af figur 9, at en tilsætning af mikrosilica til betonen på 5-10 % af betonens pulvermasse har en dominerende effekt sammenlignet med en tilsætning af flyveaske ved disse korttidsforsøg. De bedste måleresultater (mindste førsteårsindtrængning) blev opnået ved et kombineret indhold af mikrosilica og flyveaske på henholdsvis 5-10 og 10-15 % af betonens pulvermasse ved disse korttidsforsøg.

Fra litteraturen vides det, (Hjorth, 1984) og (Hansson, 1989), at virkningen af flyveaske først viser sig markant som en langtidseffekt; mikrosilica derimod markerer sig allerede fra starten. Langtidseffekten fra flyveaske er dog ikke målt på de ni prøveblandinger; den indregnes som ekstra sikkerhed.

Resultatet af chloridindtrængningsforsøgene med prøveblandinger med v/c -forhold på 0,32-0,36 kan herefter for korttidsforsøg med prøvningsmetoden APM 302 resumeres på følgende måde:

- Tilsætning af mikrosilica på 5-10 % af betonens pulverblanding har en markant effekt på betonens modstand mod chloridindtrængning.
- En begrænset tilsætning af flyveaske forbedrer modstandsevnen mod chloridindtrængning for beton, der i forvejen har et indhold af mikrosilica på 5-10 % af betonens pulvermasse.
- Får betonen et indhold af mikrosilica under 5 % af betonens pulvermasse, falder modstanden mod chloridindtrængning markant, uafhængigt af betonens flyveaskeindhold.
- Får beton et indhold af flyveaske over 15 % af betonens pulvermasse, falder modstanden mod chloridindtrængning markant, uafhængigt af betonens mikrosilicaindhold.

- Den gunstigste effekt på modstanden mod chloridindtrængning synes, bedømt ved prøvningsmetoden APM 302, at være et samtidigt indhold af mikrosilica og flyveaskeindhold på henholdsvis ca. 7,5 og ca. 12,5 % af betonens pulvermasse.

Fra prøvning til "virkeligheden"

Prøvningsmetoden APM 302 anvender eksponeringsbetingelser, der accelererer chloridindtrængning i beton. Eksponering for beton i prøvningsmetoden APM 302 og i konstruktionen i Storebæltsområdet, kan resumeres på følgende måde:

Eksponering	Enhed	Beton i APM 302	Beton i Storebælt
Chloridkoncentration	mg/liter	100.000	20.000
Modenhed	M-år	0,1 - 0,2	1 - 100
Temperatur	°C	25	5 - 10

Tabel 6. Oversigt over eksponering af beton i prøvningsmetoden APM 302 og skøn over eksponering af beton i konstruktioner i Storebæltsområdet.

Der vil være stor variation i eksponeringen af beton i konstruktionen i Storebæltsområdet. De anførte skøn for "virkeligheden" skal naturligvis tages med store forbehold; derfor vil en omregning fra accelereret prøvning til "virkeligheden" kun give en begrundet tendens.

Resultater fra APM 302. Måleresultaterne kan for beton med w/c -forhold på 0,32-0,36 og med en tilsætning af mikrosilica og flyveaske på henholdsvis 5-10 og 10-15 % af betonens pulvermasse beskrives med følgende opnåede data:

- Randbetingelse: $2,92 \leq C_s \leq 4,84$ % af betonens pulvermasse.
- Diffusionskoefficient: $22 \leq D_o \leq 62$ mm²/år.
- Førsteårsindtrængningen: $11 \leq K \leq 13$ mm/ $\sqrt{\text{år}}$.

Disse resultater søges omregnet til bedste skøn for, hvad det betyder for betonen i konstruktioner i Storebæltsområdet efter de skøn, der er anført i ovenstående tabel 6.

Det sker ved i det følgende at vurdere, hvad et sæt typiske chloridindtrængningsdata, bestemt ved prøvningsmetoden APM 302,

$$\{C_s; D_o; C_i; K\} = \{4; 35; 0; 14\}$$

i de sædvanlige enheder, kan regnes at svare til ved en typisk chloridpåvirkning i konstruktionen, jvf. tabel 6.

Chloridkoncentration. AECLaboratoriet har sideløbende med chloridindtrængningsforsøgene, målt chloridbindingen på tynde betonskiver af de pågældende betonen ved forskellige chloridkoncentrationer. Det tyder på, at C_s stort set er proportional med chloridkoncentrationen, når denne, som tilfældet er her, er under 100.000 mg/liter.

Benyttes denne antagelse, vil chloridbindingen i konstruktionens beton kunne regnes at være

$$C_{s,konstr} = 4 \cdot 20.000 / 100.000 = 2,8 \% \text{ af betonens pulvermasse}$$

Fra litteraturen vides det, at D_o også er afhængig af chloridkoncentrationen. Der er dog tale om en lille indflydelse, som der ses bort fra i denne sammenhæng.

Modenhed. Fra litteraturen vides det, at betonens modenhed har indflydelse på chloriddiffusionskoefficienten, specielt, når der er flyveaske i betonen. For beton med v/c -forhold på 0,40 og anvendelse af dansk portlandflyveaskecement, vil diffusionskoefficienten ca. halveres ved en øgning af modenheden fra 28 M-dg til 90 M-dg (Hjorth, 1984), medens der for beton uden flyveaske er tale om en knap så stor formindskelse (Hansson, 1989).

Der er her tale om laboratorieprøver; i praksis vil efterbehandlingen være væsentligt ringere end for laboratorielagrede betonprøver. Regnes med, at betonen til konstruktioner for den faste forbindelse over Storebælt med tiden får en formindskelse, svarende til 70 % af den målte værdi ved 28 M-dg, findes følgende værdi:

$$D_{o,konstr} = 0,7 \cdot 35 = 25 \text{ mm}^2/\text{år}$$

Temperaturen. Svarende til $D_o = 25 \text{ mm}^2/\text{år}$, $C_s = 2,8 \%$ af betonens pulvermasse og $C_i = 0,05 \%$ af betonens pulvermasse, findes førsteårsindtrængningen at være:

$$K \approx \left(1 - \sqrt{\frac{0,4 - 0,05}{2,8 - 0,05}} \right) \cdot \sqrt{12 \cdot 25} = 11 \text{ mm}/\sqrt{\text{år}}$$

Fra litteraturen (Hansson, 1989) og forsøg på AECLaboratoriet (Sørensen, 1990) vides det, at der er en mærkbar nedsættelse af førsteårsindtrængningen med en formindskelse af temperaturen. Det er ifølge disse forsøg næppe urealistisk at regne med formindskelse af førsteårsindtrængningen på ca. 50 % ved en ændring af temperaturen fra 25 °C til ca. 5 °C.

Konklusion. På denne baggrund skønnes det, at førsteårsindtrængningen for betonen i konstruktionen bliver af størrelsesordenen ca. 5 mm/ $\sqrt{\text{år}}$; dét, der

skal til for at kunne sikre en funktionstid på 100 år, når armeringen har et dæklag af velhærdnet, defektfri beton efter kravene i FAB/SAB.

Der er således anvendt en faktor på ca. 2,5 fra accelereret prøvning til "virkelighed." Der er naturligvis usikkerheder i ovenstående beregninger, men der er også skjulte sikkerheder. Kun en systematisk undersøgelse af chloridindtrængningen i kommende betonkonstruktioner med hensyn til prøvning og "virkelighed" kan nedsætte usikkerheden ved den her valgte matematiske model.

Undersøgelser af chloridindtrængning i beton

For at undersøge og vurdere afvigelser fra den etablerede diffusionsteori, gennemgås resultater fra undersøgelse af chloridindtrængning i beton, udtaget fra beton, der er udstøbt og efterbehandlet under realistiske forhold. Det er valgt at fokusere på data fra beton med relation til Storebælt. Der findes desuden mange andre forsøgsresultater, både fra undersøgelser i laboratoriet og fra undersøgelser af betonkonstruktioner i chloridholdige miljøer; de forbigås dog i denne artikel.

Det har stor betydning for vurderingens troværdighed, at det er "virkelig" beton, der undersøges og ikke "laboratoriebeton" med dens "perfekte" udstøbning og efterbehandling, som efterlader et minimum af defekter.

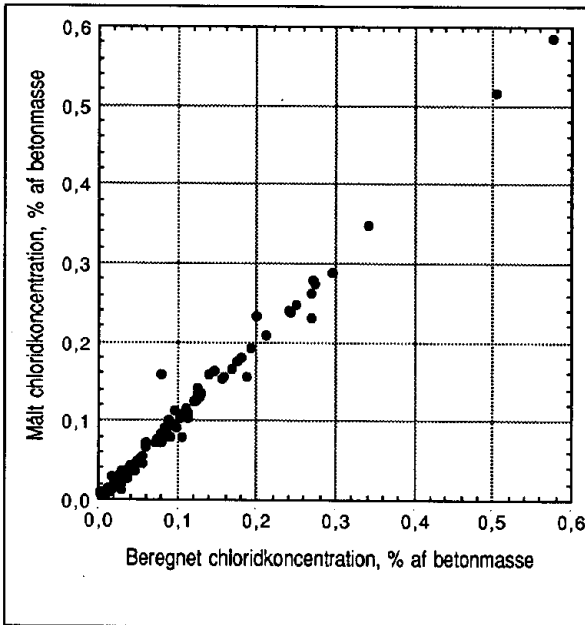
Beton i Storebæltsområdet

I 1978 igangsatte Statsbroen Storebælt en undersøgelse af chloridindtrængningen i beton i konstruktioner i Storebæltsområdet. Følgende betonkonstruktioner blev undersøgt:

- Langelandsbroen, bygget 1962.
- Halsskov Færgenhavn, bygget 1958 og udbygget 1962.
- Gulfhavn Stigsnæs, bygget 1967.

Undersøgelsens formål var at klarlægge mekanismen for chloridindtrængning i beton og at vurdere risikoen for chloridforårsaget armeringskorrosion, (Sørensen, 1979) og (Sørensen, 1982). På basis af dette pionerarbejde i Danmark kan følgende konkluderes:

- Chloridindtrængning i beton sker ved diffusion.
- Chloriddiffusionskoefficientens værdi synes ikke at være relateret til betons åbne porøsitet.



Figur 10. Afbildning af 129 stk. målte chloridkoncentrationer i beton i relation til de beregnede chloridkoncentrationer samme steder efter Ficks anden lov og ud fra de samme parametre for indtrængning af chlorid; alle data er fra (Sørensen, 1979). Det kan konkluderes, at antagelsen om, at chloridindtrængningen i de undersøgte betoner er foregået ved diffusion efter Ficks anden lov kan siges at være tilstrækkelig nøjagtig for praktiske formål. Den undersøgte beton havde været chloridbelastet i op til 20 år ved prøveudtagningen.

- Randbetingelsen for betons chloridkoncentration er afhængig af eksponeringsbetingelserne.
- Kritisk (rustfremkaldende) chloridkoncentration i beton findes ikke at afvige signifikant fra det normalt accepterede, dvs. en chloridkoncentration på ca. 0,4 % af betonens pulvermasse.
- Chloridindtrængningen havde ved armeringslaget (dæklag ca. 50 mm) opbygget en koncentration af chlorider, svarende til den kritiske værdi på ca. 10 år (Poulsen, 1985 s. 86).

Undersøgelsen er udført på DTH, Institutet for Metallære. Forsøgsrapporten (Sørensen, 1979) indeholder alle forsøgsdata og er derfor et betydningsfuldt kildemateriale. Overensstemmelsen mellem observerede og estimerede værdier ud fra samme chloridindtrængningsparametre fremgår af figur 9.

Det kan konkluderes, at en antagelse af, at chloridindtrængning foregår ved diffusion efter Ficks anden lov ikke er dårligere end så mange andre modelantagelser inden for betontechnologien; måske tværtimod.

Beton til Statsbroen Storebælt

I 1979 lod Statsbroen Storebælt, som led i forundersøgelserne, udstøbe prøveblokke af beton. Betonkerner fra disse prøveblokke blev i 1988 udtaget til undersøgelse for chloridindtrængning efter prøvningsmetoderne APM 207,

(AEC, 1989) og APM 302, (AEC, 1986). På udtagelsestidspunktet havde prøveblokkene været eksponeret i ni år i et marint miljø (Halsskov havn). Prøveblokkene havde dog ikke i alle ni år været konstant eksponeret for havvand.

Betonens delmaterialer, sammensætning og resultatet af efterbehandling-
en (BKF, 1979) samt de målte chloridindtrængningsparametre, både målt på
de observerede chloridprofiler ved APM 207 og ved accelereret prøvning
ved APM 302 fremgår af tabel 7.

Prøveblok	Enheder mv.	1,1	1,2	T 1,1	T 1,2
Delmaterialer					
Cement, Aalborg Portland	Type	PC(A/L/S)		PC(A)	
Sand, Carl Nielsen	Betegnelse	Søsand 0-4 mm		Søsand 0-4 mm	
Sten, Sydsten	Betegnelse	Granit 2-25 mm		Granit 2-25 mm	
L-TSS, Sika	Betegnelse	Sika Air		Sika Air	
P-TSS, Sika	Betegnelse	Sika A 40		Sika A 40	
Sammensætning					
Cement	kg/m ³ BE	350	350	410	410
Vand	liter/m ³ BE	150	150	170	170
Tilslag	kg/m ³ BE	1875	1875	1795	1795
Luft	liter/m ³ BE	35	35	26	26
v/c-forhold	rent tal	0,43	0,43	0,42	0,42
Efterbehandling					
Temperaturdifferens	°C	23	3	34	18
Revnedannelse	ja/nej	ja	nej	ja	nej
Støbedato	år/mdr/dg	78-13-12	78-13-12	79-01-23	79-01-23
Prøvning efter APM 302					
n	stk	–	3	–	3
D _o	mm ² /år	–	1009	–	1029
C _s	% af PU	–	3,00	–	3,80
C _i	% af PU	–	0,00	–	0,00
K	mm/√år	–	71	–	80
t	døgn	–	41,9	–	41,8
Prøvning efter APM 207					
n	stk	3	4	1	1
D _o	mm ² /år	108	169	139	99
C _s	% af PU	1,10	0,83	0,86	1,12
C _i	% af PU	0,00	0,00	0,00	0,00
K	mm/√år	15	15	16	16

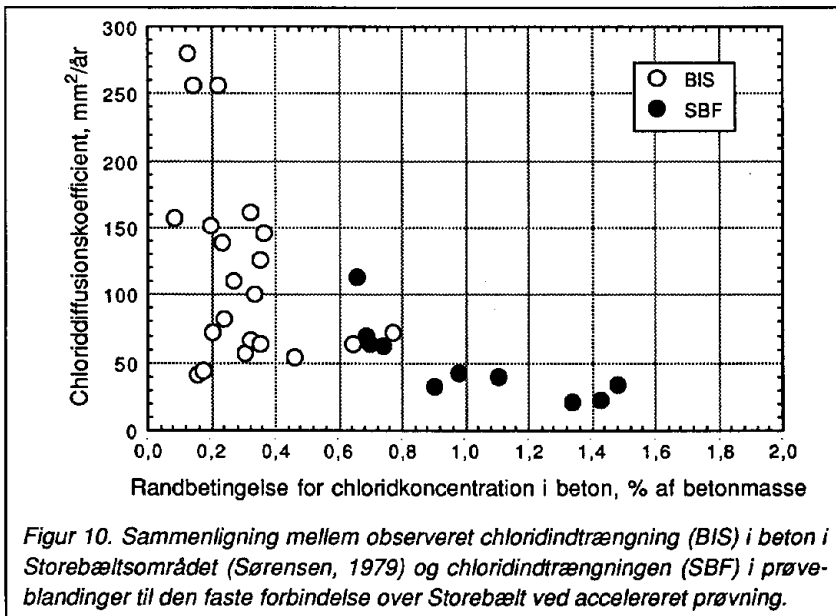
Tabel 7. Oversigt over betondata for prøveblokke, udstøbt for Statsbroen Storebælt og eksponeret i ni år i Halsskov færgehavn i marint miljø. Desuden anføres måleresultater fra undersøgelse af chloridindtrængning i betonen efter prøvningsmetoderne APM 302 og APM 207. I tabellen betegner BE og PU henholdsvis beton og pulver. Der er i øvrigt anvendt følgende betegnelser: *n* er antallet af prøveemner, *D_o* er chloriddiffusionskoefficienten, *C_s* er randbetingelsen for betonens chloridkoncentration, *C_i* er betonens initiale chloridkoncentration, *K* er førsteårsindtrængningen og *t* er eksponeringstiden.

Følgende egenskaber og karakteristika blev målt for beton i udvalgte prøveblokke:

- Trykstyrken ved CAPO-test, jvf. DS 423.31.
- Chloridindtrængningsparametre efter APM 302.
- Chloridindtrængningsparametre efter APM 312.
- Mikrostrukturelle karakteristika efter TI-B 4 og 5.

Her er det imidlertid kun resultaterne af bestemmelsen af chloridindtrængningsparametrene efter APM 302 og APM 207, der vil blive omtalt. Undersøgelsens formål var at undersøge chloridindtrængningen i en brobeton, der var veldefineret med hensyn til delmaterialer, sammensætning, efterbehandling og eksponering. Måleresultater og betonernes data er givet i tabel 7. Følgende kan konkluderes:

1. En (kritisk) chloridkoncentration på ca. 0,4 % af betonens pulvermasse var i løbet af de ni års eksponering i marint miljø opbygget i betonen i en dybde af ca. 35 mm.
2. Der kunne ikke observeres væsentlig forskel på førsteårsindtrængningen som følge af forskellige cementtyper og revneintensiteter.
3. Ved accelereret prøvning efter APM 302 findes en førsteårsindtrængning på $K = \text{ca. } 75 \text{ mm}/\sqrt{\text{år}}$, medens "virkeligheden" kun fremviser en førsteårsindtrængning på $K = \text{ca. } 14 \text{ mm}/\sqrt{\text{år}}$.



Figur 10. Sammenligning mellem observeret chloridindtrængning (BIS) i beton i Storebæltområdet (Sørensen, 1979) og chloridindtrængningen (SBF) i prøveblandinger til den faste forbindelse over Storebælt ved accelereret prøvning.

Disse resultater er bemærkelsesværdige på flere punkter og de kan kommenteres på følgende måde:

- ad 1. Beton er ikke "chloridtæt" blot v/c -forholdet er under 0,45.
- ad 2. Det er observeret, at acceleret prøvning efter APM 302 giver en førsteårsindtrængning, som er 5-6 gange større end dén, "virkeligheden" giver ved APM 207. Efter den omregning, der er anvendt for betontype A til den faste forbindelse over Storebælt, er der skønnet det halve værdi, dvs. ca. 2,5.
- ad 3. Det skønnes, at årsagen til, at indflydelse fra cementtype og revnetensitet ikke kan observeres, er, at den undersøgte beton er meget chloriddiffusionsåben. Derfor kan indflydelsen, der her er differensen mellem to store tal, ikke registreres med sikkerhed.

Prøveblandinger til den faste forbindelse over Storebælt

Der blev udført prøvestøbninger i Herning 1988-04-09/10 med beton, der var fremstillet efter de dengang opstillede krav. Der er til beton i tunnelelementerne stillet krav om en begrænsning af betonens chloriddiffusionskoefficient til maksimalt $D = 600 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$, svarende til $D = \text{ca. } 20 \text{ mm}^2/\text{år}$. Undersøgelser af prøver fra denne prøvestøbning viste, at dette krav næppe kunne forventes overholdt ved kontrolprøvningen af betonen til tunnelelementerne uden at de stillede krav til betonens sammensætning og efterbehandling blev justeret. Derfor gennemførte AS Storebæltsforbindelsen en undersøgelse af ni prøveblandinger med det formål at optimere pulverensammensætningen således, at der blev opnået mindst mulig værdi for førsteårsindtrængningen under betingelse af, at betonen forblev robust, pumpbar og stabil.

En nærmere beskrivelse af disse forsøg findes i afsnittet om *Betonproportionering for livslængde*, hvortil henvises.

I figur 10 er sammenhørende værdier af C_s og D_o for de ni prøvestøbningers betoner afbildet sammen med de tilsvarende værdier fra undersøgelsen af chloridindtrængning i beton i Storebæltsområdet (Sørensen, 1979).

Det bemærkes, at der selv ved den accelererede prøvning APM 302 efter 28 M-dg blev opnået en markant forbedring af målte chloridindtrængningsdata for alle ni betoner i forhold til brobetoner, der var konditionsmæssige 20-30 år tidligere og vel at mærke, målt efter 10-20 års lagring og efter en prøvningsmetode, der svarer til APM 207.

Kvalitetssikring

Foruden ønsket om 100 års levetid for den armerede beton, var det et byg-herrekrav, at kvalitetssikringen blandt andet omfattede følgende forhold:

- Der skal stilles krav til betonen således, at det med rimelighed kan forventes, at der opnås en levetid for armeret beton på mindst 100 år.
- Kontrolprøvning skal sikre, at betonen i konstruktionen opnår de ønskede egenskaber og karakteristika.
- Entreprenørens mandskab skal efteruddannes på betonkurser, både med hensyn til behandling af beton og udførelse af LOK/CAPO-test.
- Betonblanding må kun ske med delmaterialer, der er godkendt ved en forprøvning.
- Der skal være sporbarhed for alle betonsatser.

Kommentarer til nogle af ovenstående punkter er givet i det følgende.

Krav til betonsammensætning i FAB/SAB

Der kunne peges på flere betonbeskrivelser, som umiddelbart kunne tænkes at fungere som paradigma for FAB/SAB for beton til den faste forbindelse

Betonens egenskaber og karakteristika	Enheder	Betontype A		Betontype B	
		min.	max.	min.	max.
ækv. v/c-forhold	rent tal	—	0,35	—	0,45
eff. VA	liter/m ³ BE	—	135	—	140
CE	kg/m ³ BE	300	—	300	—
FA	% af PU	10	—	10	—
MS	% af PU	4	8	4	8
FA + MS	% af PU	—	25	—	25
PU = FA + MS + CE*	kg/m ³ BE	—	400	—	—
Cl ⁻	% af PU	—	0,05	—	0,1
ækv. Na ₂ O	kg/m ³ BE	—	3	—	3
ibl. LU*	vol% af KM	8	20	8	20
nat. LU	vol% af KM	—	7	—	7

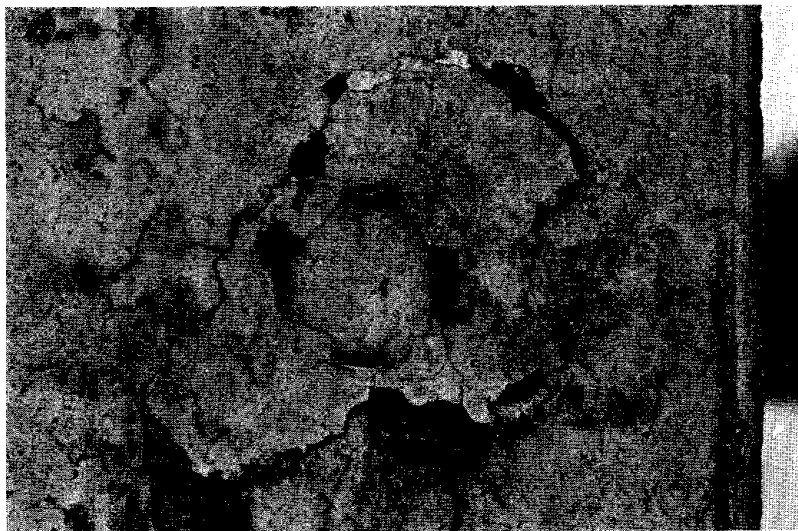
*Tabel 8. Oversigt over talmæssige krav til sammensætning af beton for den faste forbindelse over Storebælt. Til beregning af betonens ækv. v/c-forhold skal der anvendes aktivitetsfaktorer på 0,5 og 2,0 for henholdsvis flyveaske (FA) og mikrosilica (MS). Tabellen er udformet svarende til hovedbetontyperne A og B. Inden for disse betontyper er der varianter, således at de med * mærkede krav til egenskaber/karakteristika kan variere. Fx er pulverkravet, $PU \leq 400 \text{ kg/m}^3 \text{ BE}$, kun gældende for beton til tunnelelementer og kravet til indblandet luft i betonens kitmasse (KM), $8 \leq \text{ibl. LU} \leq 20 \text{ vol\% af KM}$, gælder kun for beton, der bliver udsat for frost.*

over Storebælt. Her tænkes på basisbetonbeskrivelsen og på VD/DSB-AAB. Ingen af disse betonbeskrivelser arbejder imidlertid med de miljøpåvirkninger, der eksisterer ved havvandspåvirkning i en stipuleret levetid på 100 år, specielt hvad angår alkalireaktioner og chloridindtrængning. AS Storebæltsforbindelsen ønskede, at ethvert krav blev motiveret ud fra ønsket om en stipuleret levetid for den armerede beton på 100 år og at der blev iagttaget følgende:

- Krav blev dokumenteret ved forsøg, dvs. *saglighed*.
- Enhver tvivl skulle komme betonen til gode, dvs. *sikkerhed*.
- Færrest mulige betontyper, dvs. *simpelhed*.

I tabel 8 er krav til betonsammensætningen vist for de betonhovedtyper A og B. Der er varianter inden for disse betonhovedtyper, men de omtales imidlertid ikke her.

Saglighed, sikkerhed og simpelhed er blevet kendetegnet for beton efter FAB/SAB. Til gengæld er der blevet tale om beton for specialister. Derfor må der advares mod at foreskrive FAB/SAB-krav til beton i almindelighed, uden at sikre sig, at entreprenøren informeres om denne betontypes særkendetegn, får den fornødne tid til at øve sig på prøveblandinger og får lejlighed



Figur 11. En afstandsklods danner et støbeskel mod den omgivende beton. Derfor skal både afstandsklodsens materiale og dette støbeskel have samme modstand mod chloridindtrængning som betonen. Fotografiet viser en afstandsklods af plast, hvor armeringen er rustet som følge af chloridindtrængning fra tørsaltbelastning.

til at dokumentere sin formåen ved prøvestøbning.

Man må ikke glemme, at der gennem en række skærpede krav til betonens sammensætning er løst ét problem (skadelig chloridindtrængning), men man har til gengæld fået andre problemer. Betonen til den faste forbindelse over Storebælt er meget følsom over for svigtende eller mangelfuld efterbehandling og den er meget kohæsiv, dvs. klistret, hvis betonens sætnål ikke er passende stort. Hvis denne beton har en konsistens, som ikke er afstemt efter forskallingens geometri og armeringsintensitet og den udsættes for mangelfuld efterbehandling, kan det føre til, at man ikke opnår den ønskede modstand mod chloridindtrængning. Tværtimod kan man få en beton af en ringe kvalitet, dvs. en beton med mange defekter i mikro- og makrostrukturen. Derved muliggøres skadelige angreb fra aggressive omgivelser.

Hvis man først har lært denne betontype at kende og fx anvender et sætnål, der er ca. 50 mm større end dét, man ville fordré ved en normal betontype under de givne omstændigheder og i øvrigt opfylder kravene til efterbehandlingen, så har det vist sig, at der ikke er de store problemer med betonarbejdet.

Kontrolprøvning

Entreprenøren udfører prøvestøbning under nøje kontrol. Det betyder, at der er størst mulig sikkerhed for, at de stillede krav er blevet overholdt. På basis af resultaterne fra prøvestøbningen (frisk, hærdnende og hærdnet beton) fastlægges værdier med tilhørende tolerancer for en række styringsparametre. Her skal blot én af disse styringsparametre omtales.

Som omtalt i det foregående, er betonen følsom over for manglende eller mangelfuld efterbehandling. Betonen er meget tæt, både i frisk, hærdnende og hærdnet tilstand. Det betyder, at betonoverfladen skal beskyttes mod fugtafgivelse. Hvis betonoverfladen udtørres på grund af svigtende fugtisolering, vil der ikke hurtigt kunne føres fugt fra betonens indre til betonoverfladen. Det betyder, at der er risiko for, at der kan opstå overfladedefekter i form af revnedannelse og utilstrækkelig hydratisering. Overfladebeskyttelsen skal i øvrigt være effektiv i meget længere tid end vanligt for at sikre imod dannelse af overfladedefekter.

Betonens sammensætning er fastsat således, at der er en passende modstand mod chloridindtrængning. Denne fastsættelse er sket under forudsætning af, at betonens overfladelag kun har et begrænset mål af strukturdefekter og at hydratiseringen er passende fremskreden. Det skal ved kontrolprøvning dokumenteres, at alle betonoverflader, der senere udsættes for aggressiv påvirkning, er konditionsræssige. Det kan naturligvis konstateres ved chloridindtrængningsforsøg eller mikrostrukturel analyse (tyndslib). Begge disse undersøgelser foregår på eksterne laboratorier og er tidskræven-



Figur 12. En armeret betonkonstruktions yderste betonlag skal beskytte armeringen mod korrosion. Ud fra en holdbarhedsmæssigt synsvinkel har betonens overfladelag en større betydning end resten af konstruktionens beton. Samtidig er betonen i konstruktionens overfladelag mere udsat i en tidlig alder for at få skader end resten af betonen; det drejer sig om fx termorevner, svindrevner, komprimeringsfejl, luftansamlinger og defekter fra formdeformation. En effektiv produktionskontrol kan ske med udtræksprøvning ved LOK-test og/eller CAPO-test, jvf. DS 423.31. Ved LOK/CAPO-test kontrolleres de yderste 25 mm af konstruktionens overfladelag. LOK/capo-test er meget følsom over for forekomsten af defekter.

de. Resultatet af undersøgelserne vil derfor ofte foreligge for sent. In-situ selvkontrol vil derfor være at foretrække.

Der findes mange former for in-situ prøvning af betonoverflader. Da eventuelle defekter sjældent strækker sig længere ind i betonoverfladen end 10-15 mm, skal der vælges en prøvningsmetode, som kan registrere defekter i dette overfladelag og i øvrigt har lille spredning, således at antallet af prøver pr. kontrolafsnit og antallet af emner pr. prøve kan begrænses mest muligt.

Trykstyrkemåling ved LOK-test og CAPO-test, jvf. DS 423.31, har vist sig at være meget følsom over for forekomsten af overfladedefekter i beton og have en lille spredning, (BSI,1989). I forbindelse med prøvestøbningen følges betonoverfladens trykstyrke ved LOK/CAPO-test, svarende til 1, 2, 3, 7, 14 og 28 M-dg. På basis heraf erklærer entreprenøren en tilstræbt værdi for udtrækskraften med tilhørende tolerance, bestemt efter 28 M-dg ved LOK/CAPO-test. Tilsynet får forelagt dette erklærede interval til accept. Derfor taler man om det erklærede og accepterede interval.

Ved støbning af de efterfølgende kontrolafsnit skal betonens egenskaber og karakteristika opfylde både de stillede krav i FAB/SAB og det erklærede og accepterede interval for udtrækskraften.

Samlingen af styringsparametre er valgt således, at man ved styringen på bedste måde sikrer sig, at betonen i kontrolafnittene bliver identisk med den accepterede beton i prøvestøbningen, både med hensyn til delmaterialer, sammensætning og efterbehandling.

Prøvningsfrekvensen for LOK/CAPO-test af betonoverfladens kvalitet er mindst 2 prøver pr. 100 m³ udstøbt beton. Hver prøve skal omfatte mindst 2 LOK-test bolte (emner). Når der anvendes både LOK-test og CAPO-test skyldes det, at en prøvning med LOK-test kan svinge; en forkastet LOK-test bolt erstattes af en prøvning med CAPO-test.

Betonens mikrostruktur undersøges også for defekter. Prøvningsfrekvensen er mindst 1 prøve pr. 5000 m³ udstøbt beton. Hver prøve skal omfatte mindst 3 udborede betonkerner (emner).

Kun for tunnelelementernes beton undersøges betonens chloridindtrængningsparametre.

Undervisning

En væsentlig del af kvalitetssikringen sker gennem undervisning af entreprenørens og tilsynets mandskab. Denne undervisning omfatter gennemgang af den teoretiske baggrund for de stillede krav til betonens delmaterialer, sammensætning, transport, udstøbning, komprimering og efterbehandling. Desuden gennemgås de krævede prøvningsmetoder, hvad enten de finder anvendelse på eksterne eller på interne laboratorier.

Det af entreprenørens mandskab, som skal udføre kontrol af betonen med LOK-test og CAPO-test gennemgår et todages, praktisk orienteret kursus. På dette kursus opøves de praktiske færdigheder med hensyn til prøvning samt vedligeholdelse og justering af prøvningsudstyret. Kurset afsluttes med en prøve og efter bestået prøve får kursisterne tildelt et diplom.

Efterskrift

Forfatteren takker AS Storebæltsforbindelsen og AEC Rådgivende Ingeniører A/S for tilladelse til at offentliggøre den teoretiske baggrund for de krav, der er stillet i FAB/SAB til beton for at opnå en ønsket modstand mod chloridindtrængning samt de opnåede resultater fra de ni prøveblandinger, som dannede grundlaget for de stillede, talmæssige krav.

Litteratur

- 1856 Darcy, H. P. G. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. V. Dalmont. Paris.
- 1906 Poulsen, A. *Mo-ler til cement i havvand*. Ingeniøren nr. 29. København.
- 1907 Suenson, E. *Jærnbeton*. Bluhmes boghandel, København.
- 1911 Suenson, E. *Byggematerialer*. Bluhmes boghandel. København.
- 1914 Poulsen, A. *Betons holdbarhed*. Ingeniøren nr. 31. København.
- 1924 Atwood, W. G. et al. *The disintegration of cement in sea water*. American Society of Civil Engineering, vol. 87. USA.
- 1926 DIF. *Foreløbige regler for beregning og udførelse af jærnbetonkonstruktioner i vandbygning*. Dansk Ingeniørforening. København.
- 1942 Bohr, H. et al. *Matematisk analyse IV*. Gellerups Forlag. København.
- 1949 DIF. *Beton- og jærnbetonkonstruktioner, DS 411 udgave 1*. Dansk Ingeniørforening. København.
- 1958 Idorn, G. M. *Concrete on the west coast of Jutland, part I & II*. Alkaliudvalget, progress report B 1. København.
- 1959 Carslaw, H. S. et al. *Conduction of heat in solids*. Oxford Science Publication. Oxford.
- 1966 Ditlevsen, O. *Elementær matematisk fysik*. Teknisk Forlag. København.
- 1987 Hausmann, D. A. *Steel corrosion in concrete*. Materials Protection. USA.
- 1968 Feld, J. *Constructions failures*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- 1972 Collepardi, M. et al. *Penetration of chloride ions into cement pastes and concrete*. American Ceramic Society, vol. 55. USA.
- 1979 BKF. *SSB-forundersøgelse*. B3270/B2253. BKF, ATV. København.
- 1979 Sørensen, B. *Dæklagsundersøgelse i Storebæltsområdet, chloridindtrængning i*

- beton. DTH, Institutet for Metallære. Lyngby.
- 1980 Browne, R. D. et al. *Marine durability survey of the Tongue Sands Tower*. Concrete in the ocean program. Technical report no. 5. C&CA. London.
- 1982 Sørensen, B. et al. *Penetration rate of chloride in marine concrete structures*. Nordic Concrete Research, no. 1. Oslo.
- 1982 Tuutti, K. *Corrosion of steel in concrete*. Cement och betonginstitutet, fo. 4:82. Stockholm.
- 1984 CtO. *Beton, fra 1973-normen til 1984-normen*. Aalborg Portland. Aalborg.
- 1984 DIF. Norm for betonkonstruktioner, DS 411 udgave 3. Dansk Ingeniørforening. København.
- 1984 Hjorth, L. *Chloridindtrængning i beton*. CtO's informationsdag 1984. Aalborg Portland. Aalborg.
- 1985 CtO. *Beton-bogen*. Aalborg Portland. Aalborg.
- 1985 Frederiksen, J. M. et al. *Chloridindtrængning i beton*. Eksamensprojekt, DIAB. Lyngby.
- 1985 Hansson, C. M. et al. *The effect of cement type on the diffusion of chloride*. Nordic Concrete Research no. 4. Oslo.
- 1985 Poulsen, E. et al. *13 betonsygdomme, hvordan de opstår, forløber og forebygges*. Beton 4, Statens Byggeforskningsinstitut. Hørsholm.
- 1986 AEC. *Chloridindtrængningshastighed i beton*. Prøvningsmetode APM 302. AEClaboratoriet. Holte.
- 1986 Byfors, K. *Chloride binding in cement paste*. Nordic Concrete Research no. 5. Oslo.
- 1987 Byfors, K. *Influence of silica fume and flyash on chloride diffusion and pH-values in cement paste*. Cement and Concrete Research, vol. 17. Pergamon Journals, Ltd. USA.
- 1987 Gautefall, O. et al. *Dykket rørbru, betonteknologiske aspekter*. SINTEF rapport STF65 A87046. Trondheim.
- 1989 AEC. *Chloridprofil (mikro)*. Prøvningsmetode APM 207. AEClaboratoriet. Holte.
- 1989 BSI. *Recommendations for the assessment of concrete strength by near-to-surface tests*. Draft BS 1881 testing concrete. British Standard Institution. London.
- 1989 Hansson, C. M. et al. *Chlorides in concrete*. Materials Research Society, Symposium Proceeding, vol. 137. USA.
- 1989 Henriksen, C. *Korrosion af armering i beton*. Beton-Teknik 3/15/1989. CtO Aalborg Portland. Aalborg.
- 1990 Sørensen, H. et al. *Testing and modelling of chloride penetration into concrete*. Nordisk Betong, specialpublikation. Stockholm

LEMMING & ERIKSSON
Rådgivende Ingeniører as
Gl. Lundtoftevej 1 F
2800 Lyngby

BETONELEMENT-HÅNDBOGEN

af

Jesper Frøbert Jensen

JULI 1990

BETONELEMENT-HÅNDBOGEN

Baggrund

I efteråret 1988 vedtog Betonelement-Foreningen at iværksætte udarbejdelse af en håndbog for anvendelse af betonelementer i byggeriet. Formålet med håndbogen er mangesidigt:

- o orientere om betonelementbyggeriets muligheder
- o orientere om metoder i planlægning og udførelse
- o fremme rationel anvendelse af betonelementer
- o lette projekteringen

Håndbogen vil indgå som et element i kvalitetssikringen på området. Dels ved at anviser rammer for godt byggeri, dels ved at vejlede om løsninger på sædvanlige delopgaver i projekteringen.

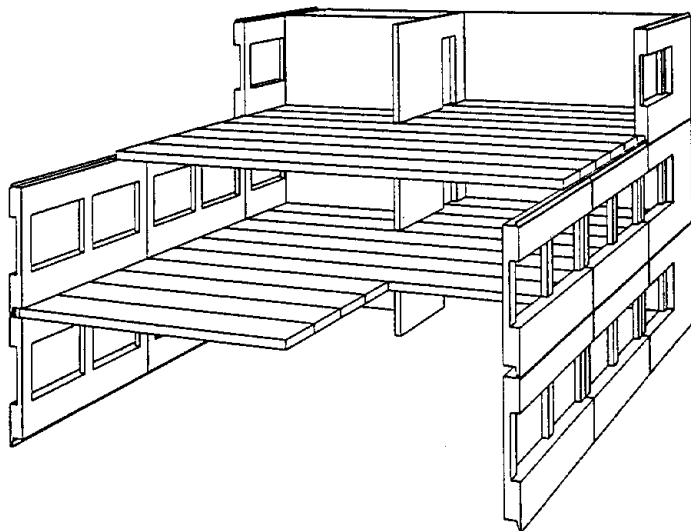
Af praktiske grunde er det valgt at opdele håndbogen i 4 bind. Dette kan bl.a. være en lettelse ved den fremtidige ajourføring.

Bind 1: Betonelementbyggeri

Dette bind henvender sig til alle med interesse for byggeri. Indledningsvis præsenteres en række moderne betonele-

mentbyggerier tillige med en beskrivelse af de almindelige træk ved betonelementbyggeri.

Videre følger illustration og beskrivelse af de almindeligt anvendte byggesystemer indenfor boligbyggeri, administrationsbyggeri og industribyggeri.



Bindet omfatter endvidere en gennemgang af faseforløbet i en byggesag med særlig vægt på forholdene vedrørende planlægning og kontrahering. Herunder også orientering om rimelige tidsplaner.

Endelig bliver udførelsesteknikken gennemgået. Dette gælder såvel arbejdet på elementfabrikken som montage m.v. på byggepladsen.

Bind 2: Modulprojektering og betonelementer

Del 2 indledes med en gennemgang af det projektmateriale, der sædvanligvis må udarbejdes som grundlag for et betonelementbyggeri. Endvidere gennemgås de vigtigste aspekter ved modulkoordineringen, dels vedrørende selve den overordnede disponering af råhuset, dels vedrørende koordineringen med kompletterende dele og installationer.

Herefter følger en systematisk præsentation af de almindeligt forekommende elementtyper på markedet. Det drejer sig om ca. 20 typer, der fordeler sig på dæk, trapper, bjælker, søjler, vægge og facader. For hver elementtype omfatter præsentationen:

- o almen produktbeskrivelse
- o dimensioner
- o overflader
- o udsparinger og indstøbningsdele
- o bæreevner
- o tolerancer
- o pilhøjder og nedbøjninger
- o brand, lyd og varme
- o specialudformninger
- o konstruktive forhold.

Alle disse punkter er dog ikke relevante for samtlige elementer. For de fleste elementtyper udarbejdes et designdiagram til overslagsdimensionering, så den projekterende let kan skyde sig ind på det rigtige elementvalg.

Foruden gennemgangen af hovedtyperne indeholder del 2 også en kort præsentation af en række specialelementer.

Bind 3: Beregninger

Den første del af dette bind omhandler statiske beregninger. Der gennemgås belastninger og lastspecifikationer, ho-

vedstabilitet, bygningsdelsstatik samt detailstatik.

I gennemgangen beskrives de fysiske modeller, der ligger til grund for beregningerne. Der er lagt vægt på at anvise metoder og eksempler, der gør det enkelt at udføre beregninger. Samtidig hjælper den samlede gennemgang af statikken til et bedre overblik.

I den anden del af bindet gennemgås behandlingen af brand, lyd og varme. Der anføres hvilke krav der stilles og hvorledes de overholdes.

Bind 4: Eksempelsamling

Dette bind omfatter i alt ca. 100 opslag med eksempler på projekttegninger. Hvert opslag omhandler en sædvanlig grundløsning, i de fleste tilfælde en samlingdetalje.

For hver grundløsning anføres de hovedparametre, som den projekterende skal tage stilling til i det enkelte projekt. I tilknytning hertil anbefales de parametervalg, der svarer til standardløsninger.

Hvor det er nødvendigt, begrundes de anbefalede parametervalg i tilhørende noter.

Endelig omfatter hvert opslag et typisk eksempel på en projekttegning vedrørende den pågældende grundløsning.

Beton- og Konstruktionsinstituttet
Dr. Neergaards Vej 13
2970 Hørsholm

KVALITETSTILTAG INDEN FOR BETONELEMENTOMRÅDET

S. Øivind Olesen
Instituttleder

Juni 1990

KVALITETSTILTAG INDEN FOR BETONELEMENTOMRÅDET

Introduktion

Blandt de mange kvalitetsfremmende tiltag på byggeområdet skal her fortrinsvis omtales initiativer med særlig betydning for projektering og produktion af betonelementer; nemlig:

- Ændringer i betonnormen, DS411, og i de tekniske bestemmelser for Betonelementkontrollen, BEK/TB, som følge af Basisbetonbeskrivelsen (BBB).
- Udbygning af kvalitetsstyringen i elementfabrikkerne.
- Tilpasninger, som følge af EF's indre marked.

Basisbetonbeskrivelsens virkning på DS411 og BEK/TB

Basisbetonbeskrivelsen blev tildelt juridisk slagkraft gennem Boligministeriets cirkulære fra 1987 om brugen af beton i statsligt og statsstøttet byggeri. Konsekvensen heraf blev ret hurtigt en skelnen i praksis mellem "BBB-beton" og "DS411-beton", idet brugerne tilsyneladende opfattede BBB's mere detaljerede og konkrete krav som skærpselser i forhold til DS411, mens intentionen - med nogle få undtagelser - snarere var en klargøring af, hvordan DS411's funktionsorienterede krav kunne overholdes.

Denne situation blev anset for at være uholdbar i det lange løb, og Dansk Ingeniørforening har derfor nu gennemført ændringer i DS411, hvorved reelle forskelle i kvalitetskravene i det store og hele skulle være fjernet. Det kan således nævnes,

- at vejledningsteksten i DS411 angiver, at BBB's krav til

tilslag bør benyttes, med mindre det kan dokumenteres, at normkravet kan tilfredsstilles på anden vis,

- at BBB's krav til chloridindhold er overført til en vejledning i DS411,
- at BBB's krav til maksimalt v/c-tal og minimal trykstyrke i de forskellige miljøklasser er overført til DS411,
- at BBB's krav til den friske betons luftindhold er overført til DS411's vejledning.

Det er dog værd at bemærke, at man ikke har fundet anledning til at overføre BBB's krav om struktur- og luftporeanalyse ved forprøvning til DS411. Dette begrundes med, at der efter normudvalgets opfattelse hersker en betydelig usikkerhed om relevansen af de nugældende BBB kravformuleringer på dette punkt.

Betonelementkontrollen (BEK) har i foråret 1990 gennemført en revision af de tekniske bestemmelser for ordningen. Den direkte anledning er BBB og ændringen af DS411, men man har dog samtidigt benyttet anledningen til også at revidere en række punkter, som erfaringen har vist var mangelfulde.

Kvalitetsstyring i betonelementbranchen

Gennem adskillige år har branchens kvalitetsstyring været centreret omkring Betonelementkontrollen og de dertil knyttede aktiviteter. Selv om optagelse i ordningen indebærer en ekstern vurdering af virksomhedens produktionsapparat - herunder både fysiske og personelle ressourcer - er den løbende stikprøvekontrol først og fremmest indrettet på at kontrollere, at de producerede elementers egenskaber overholder kravene i produktionsgrundlaget (tegningerne). Det er derfor principielt muligt, at de producerede elementer overholder alle stillede krav, men at de ikke desto mindre er uegnede til deres formål. Den fra sag til sag varierende fordeling af ansvaret for detailprojekteringen mellem køber og producent gør imidlertid, at BEK normalt kun kan gribe ind, såfremt der er tale om helt indlysende overtrædelser af DS411/BBB.

Branchen har på denne baggrund taget initiativ til at udbygge kvalitetsstyringen gennem en vejledning i udarbejdelse af ks-håndbog i en betonelementfabrik. Vejledningen skal lette arbejdet i den enkelte virksomhed med at udbygge det eksisterende ks-system, således at det inden for en overskuelig fremtid kan tilfredsstille kravene i DS/ISO 9001, som dækker kvalitetsstyring af udvikling/konstruktion, produktion, installation og service.

Vejledningen behandler faserne i opbygning og indførelse af et ks-system med hovedvægten på emner, som er specielle for elementbranchen. Til vejledningen hører to bilag, nemlig et eksempel (fra det fiktive Betonbyg A/S) på den ordreorienterede sagsgang i salgs- og projekteringsfaserne samt et forslag til Betonbyg A/S's håndbogsstruktur.

Arbejdet med anvisningen har illustreret et klart behov for en bedre sikring af dialogen mellem de ofte mange parter, som er involveret i en byggesag. Ofte indgås der økonomisk bindende aftaler på grundlag af et meget løst projektmateriale, og uden at aftalen indeholder en tilstrækkelig præcis angivelse af rollefordelingen mellem parterne og af tidsplanerne for etablering af færdigt projektmateriale. Uklarhed om disse emner giver alt for ofte anledning til "hovsa-løsninger". Vejledningen skulle derfor gerne tilskynde den enkelte virksomhed til at udnytte egne muligheder for at forbedre kommunikationen med kunden om disse emner. Forbedringen vil også gøre det lettere for kunden at overskue egne forpligtelser med hensyn til aflevering af oplysninger til detailprojekteringen og vil dermed formindske fejlriskoen.

Konsekvenser af EF's indre marked

Dannelsen af det indre marked i EF vil på flere områder medføre ændringer, men omfanget af disse kan det dog i dag være vanskeligt at forudse. På det byggetekniske område vil ændringerne være affødt af Byggevedirektivet, som pålægger medlemslandene at træffe de fornødne foranstaltninger til at sikre, at varer bestemt til brug i bygværker kun kan markedsføres, hvis direktivets "væsentlige krav" er overholdt.

Dette indebærer principielt, at nationale normer og standarder efterhånden vil blive erstattet af fælles EF regler, hvilket i praksis vil sige CEN standarder (CEN = Comité Européen de Normalisation). DS411 må således forventes afløst af (en kommende) Eurocode 2 og den første udgave af BBB's afløser foreligger også (som ENV 206).

Hele denne harmoniseringsproces har som nævnt udgangspunkt i Byggevaredirektivets "væsentlige krav", som er affattet i meget overordnede vendinger på mindre end én A-4 side, og det er disse hensigtserklæringer, der i de nærmeste år skal omsættes til konkrete standarder. Arbejde af speciel interesse for betonelementbranchen foregår p.t. i 3 tekniske komiteer (CEN TC 250 om Eurocodes, CEN TC 104 om betontechnologi og CEN TC 229 om præfabrikerede produkter) med et utal af "working groups" og "task groups". De danske delegater udpeges gennem det danske medlem af CEN, nemlig Dansk Standardiseringsråd, og for hver af de tre komiteer er der etableret danske følgegrupper, hvori Dansk Ingeniørforenings normarbejde er stærkt repræsenteret.

Byggevaredirektivet forudsætter også, at der etableres regler for attestering af overensstemmelser med tekniske specifikationer. Hensigten er, at et produkt, der er godkendt i ét EF land, uden videre skal kunne markedsføres i et andet. Intentionerne herom er nedlagt i "global metode i forbindelse med certificering og prøvning", hvor der som grundlag for en overensstemmelseserklæring indgår forskellige kombinationer af afprøvning og kontrol foretaget af henholdsvis producenten, et autoriseret certificeringsorgan og et autoriseret laboratorium. Systemet forudsætter eksistensen af 3 parts organer på nationalt niveau og en procedure for godkendelse af disse organers kompetence landene imellem.

Det er naturligvis nærliggende, at man i Danmark bør søge at bruge de allerede eksisterende kontrolordninger på betonområdet som udgangspunkt for den kommende ordning. Derfor har de fire kontrolordninger og de tre brancheforeninger på området igangsat et udredningsprojekt, som dels skal belyse behovet for certificering og dels skal klarlægge, om de eksisterende kontrolordninger bør ændres - og i givet fald hvordan - for at kunne dække branchens certificeringsbehov.

Der sker i disse år temmelig mange ting, som direkte eller indirekte får betydning for kvaliteten af fremtidigt dansk betonbyggeri, og som i hvert fald kommer til at påvirke de betingelser, hvorunder erhvervet udøves. Afhængigt af temperament kan man måske øjne både potentielle fremskridt og tilbageskridt i den proces, der er sat i gang både nationalt og i EF regi. Under de herskende konjunkturer i den danske byggebranche kan det måske være svært at afse de fornødne ressourcer til at deltage i processen, men man må gøre sig klart, at processen kører, hvad enten vi deltager eller ej. Spørgsmålet er næppe, om vi har råd til at være med, men i hvilken grad vi har råd til at undvære et dansk fingeraftryk på processens resultater.

Højgaard & Schultz
Betonelement a/s
Vasekær 9, 2730 Herlev

Betonelementproduktion, Fremtidens krav

af: Preben Hillebo

INDHOLD

Side

Tendenser for fremtidens betonelementproduktion	3 - 5
Betonelementbyggeriets omfang i fremtiden	5 - 6
Projektering af betonelementer i fremtiden	7 - 8
Udseende og holdbarhed	8 - 9
Antal fabrikker i Danmark om 20 år	9
Konklusion	10

Betonelementproduktion, Fremtidens krav

1. Tendenser for fremtidens betonelementproduktion

Den danske betonelementproduktion er startet efter 2. verdenskrig i halvtredserne og tog rigtig fart i "de gyldne tressere".

Produktionen blev fremmet ved en præferencestilling inden for boligbyggeriet, således at det praktisk taget ikke var muligt at bygge etageboligbyggeri uden anvendelse af betonelementer.

De danske betonelementfabrikker har hidtil fungeret som komponentleverandører og leveret direkte til kunderne på byggepladserne. Disse har selv foretaget den videre indbygning og anvendelse.

Imidlertid er denne forretningsform langsomt ved at ændres, således at de danske betonelementfabrikker i fremtiden mere og mere vil komme til at fungere som leverandører af "totale præfab. leverancer", bestående af betonelementleverance, stålkonstruktionsleverance, vindues- og glaspartier, tagdækning og undergulve. Alt monteret og indbygget til et færdigt lukket råhus.

Dette er ikke et koncept, som er helt nyt. Det anvendes i større og større udstrækning i udlandet og væsentligst i Sverige, Norge, Finland og England.

Vi vil i fremtiden se en større anvendelse af kompositkon-

struktioner bestående af beton, stål og træ. I det hele taget vil vi i fremtiden se flere og flere stålkonstruktioner i DK, hjulpet frem af fællesnormer i Europa, som vil begunstige stål på betonens bekostning.

De enkelte betonelementprodukter har ikke undergået væsentlig udvikling i mange år. Der kan dog anføres følgende:

Sandwichfacadeelementet er udviklet i halvtredserne og har ikke undergået nogen væsentlig ændring, bortset fra en større udnyttelse af betonens mange muligheder med hensyn til formbarhed og udseende.

Altså er udviklingen hovedsagelig gået på det æstetiske, men det er selvfølgelig også væsentligt.

Jeg tror ikke, der vil ske nogen videre ændring, førend der udvikles et støbebart betonlignende materiale med tilstrækkelig styrke, varmeisoleringsevne og overflademuligheder, og som kan støbes massivt. Det vil sige en opgivelse af sandwich-elementet.

Alternativt kunne det være en udvikling af en kompositkonstruktion med stål.

Et andet væsentligt emne for facadeelementproduktionen er den tilhørende fremstilling af forme. Disse laves i dag som for 30 år siden på en stålbund med monterede sider i stål eller træ. Der er megen arbejdstid i denne proces, og det kræver stor ekspertise. Jeg tror, det bliver svært i fremtiden at skaffe tilstrækkeligt med kvalificerede medarbejdere.

Det store spring fremad kunne ske, hvis der blev udviklet et formmateriale, hvori man med digitalstyrede procesmaskiner kunne udfræse en form ud fra de data, som alligevel er indlagt i fabrikernes egne CAD-anlæg.

Efter endt brug skulle formmaterialet kunne omsmeltes og genanvendes til nye forme.

At dette ikke er nogen utopi kan ses af, at der allerede kører prototyper på sådanne processer udenlands. Det anvendte materiale er en form for voks.

For de øvrige produkter som vægge, dæk og tagplader vil udviklingen gå mod lettere produkter samt mod en højere automatisering.

For huldækproduktionen ses allerede fabrikker rundt om i verden, som kører mere eller mindre automatiseret.

For søjler og bjælker tror jeg, vi vil se en udvikling gående hen imod en større anvendelse af stålkonstruktioner samt kompositkonstruktioner af stål og beton.

2. Betonelementbyggeriets omfang i fremtiden

Betonelementbyggeriet har i Danmark vundet større og større markedsandel, men denne stigning er stort set stoppet nu.

Vi har nået et niveau, hvor yderligere expansion er vanskelig.

Betonelementbyggeriet i Danmark har i dag kun én væsentlig konkurrent: Det murede byggeri.

Imidlertid er denne konkurrence kun så som så, da der praktisk taget altid findes en bagmur af beton eller letbeton bag enhver muret facade.

I andre lande møder betonelementbyggeriet stor konkurrence fra in-situ beton samt stål-og træ-løsninger. Dette skyldes bl.a. at man i disse lande stadig hænger fast i de søjle-bjælkeløsninger, som vi i Danmark forlod i begyndelsen af halvfjerds-erne.

Betonelementbyggeriets omfang vil i fremtiden blive påvirket af flere faktorer, som trækker hver sin vej.

Tilgangen af lærlinge til murerfaget er konstant faldende, og desuden er arbejdslønandelen meget høj for det murede byggeri. Begge forhold vil bevirke et fald i omfanget, hvilket igen skulle give en fordel for betonfacadeelementer.

Til gengæld tror jeg, som tidligere nævnt, at vi i fremtiden vil se flere stålkonstruktioner, og frem for alt blandede konstruktioner af beton og stål.

Hvor der ikke i Danmark er de store muligheder for udvidet markedsandel, så findes der imidlertid uhyre store muligheder i de fleste andre lande.

Vi vil derfor i de kommende år se, at de største danske elementfabrikker vil etablere sig udenlands, sandsynligvis i samarbejde med udenlandske partnere.

Et spændende marked har åbnet sig i alle de østeuropæiske lande. Der er i disse lande stor tradition for betonelementbyggeri, der er et stort behov for specielt boligbyggeri, og den eksisterende boligmasse er af meget ringe kvalitet.

Alle forudsætninger for et godt marked er således til stede. Spørgsmålet er blot finansieringen, men jeg tror, den politiske vilje er så stor, at det nok løses.

3. Projektering af betonelementer i fremtiden

Fremstillingen af arbejdstegninger er i dag uden tvivl langt det største problem for alle betonelementfabrikker i Danmark og i udlandet.

Den traditionelle fremgangsmåde er følgende:

Når det færdige arkitektprojekt foreligger, bliver dette bearbejdet af den rådgivende ingeniør, som fremsender projektoplysninger til betonelementfabrikkerne i form af montageplaner, elementskitser, hulplaner og samlingsdetaljer.

På baggrund heraf udfører fabrikernes konstruktionsafdelinger de nødvendige arbejdstegninger.

Dette er en meget tung og langsommelig proces, som ikke vil kunne anvendes i fremtiden. Det er der hverken tid eller penge til.

Med indførelsen af CAD hos alle rådgivere og fabrikker, og vel at mærke CAD-systemer, som umiddelbart "kan snakke sammen", er det muligt at indføre en projekteringsproces, som er hurtigere, sikrere og uden unødigt ressourcespild, idet der umiddelbart kan arbejdes videre på det grundlag, som allerede er udført af de foregående parter i projekteringsfasen.

Jeg tror, at vi i fremtiden mere og mere vil se fabrikkerne overtage projektoplysningerne direkte fra arkitektprojektet og herudfra udføre alle de nødvendige ingeniørtegninger, såsom montageplaner, fugearmeringsplaner, samlingsdetaljer, afstivningsplaner etc., etc.

Dette passer også godt sammen med mine forventninger om, at fabrikkerne i fremtiden skal levere "totale præfab. råhuse". Det er simpelthen nødvendigt for at styre denne type af byggerier.

Dette betyder klart et mindre konstruktionsarbejde for de rådgivende ingeniører og mere til fabrikernes; men det stemmer overens med strukturen i andre lande, og med de ændringer, der er sket indenfor andre entrepriser og leverancer, som f.ex. dør-og vinduesleverancer, glas-og stålpartier, loft-og vægssystemer, ventilations-og el-entrepriser.

Under alle omstændigheder er det helt klart nødvendigt i fremtiden at få ændret kraftigt på den herskende projekteringspraksis.

4. Udseende og holdbarhed

I takt med betonelementernes stadig større anvendelse til prestigebyggeri, specielt indenfor erhvervsbyggeriet, som f. ex. kongrescentre, banker, forsikringsselskaber, hovedkontorer for markante virksomheder etc., etc., er kravene, specielt til udseende steget kraftigt.

Det drejer sig om ensartethed i farve og struktur samt geometrisk præcision.

Med forhåbentlig udsigt til mange, store og markante byggerier i Københavns Havn i de kommende år, er der ingen tvivl om, at kravene til udseende vil blive endnu større og sikkert på kanten af, hvad de danske betonelementfabrikker kan præstere i dag.

Det er derfor nødvendigt i fremtiden at satse kraftigt inden for udviklingen af betonprodukter og formsystemer, der kan leve op til disse krav.

Også med hensyn til holdbarhed vil kravene blive strammet.

Vi har for hver normrevision siden 2. verdenskrig fået strammet kravene, og der er absolut ingen grund til at tro, at denne udvikling vil stoppe - tværtimod.

Fortidens synder med betonskader i milliardklassen, specielt på altankonstruktioner, taler deres tydelige sprog.

Det er derfor nødvendigt i fremtiden at fortsætte den store forskningsindsats, som allerede pågår indenfor betonområdet.

Kun de bedste producenter får lov til at producere betonelementer i fremtiden.

5. Antal fabrikker i Danmark om 20 år

Indtil for 3 år siden havde antallet af betonelementfabrikker i Danmark stort set været konstant i mange år.

Af Betonelement-Foreningens statistik fremgår, at der har været ca. 23 medlemmer.

I dag er der 16 fabrikker, eller snarere fabriksgrupper.

Denne udvikling er sket på kun 3 år, og det skal noteres, at det er nogle af de store fabrikker, der har slået sig sammen.

De mange fusioner og opkøb, som sker i industrien generelt op til Det Indre Marked den 1/1-1993 har således også vundet indpas i betonelementindustrien.

Desuden ser vi af nogle af de store europæiske entreprenørgiganter, som Skanska og NCC, involverer sig kraftigt i den danske betonelementindustri.

Jeg tror, at denne udvikling vil fortsætte, således at vi i år 2010 vil have 4 - 5 fabrikker, eller rettere grupper af fabrikker, som foruden produktionsfaciliteter i Danmark også vil have betydelige interesser i andre europæiske fabrikker.

Konklusion

Den danske betonelementindustri er inde i en meget spændende, men også meget krævende fase, som vil ændre den fra at være en lokal dansk betonkomponentleverandør til at være en europæisk leverandør af totale præfab. leverancer.

Til Deres notater:

Til Deres notater:

Til Deres notater:

Til Deres notater:

Til Deres notater:

Til Deres notater:

Nr. 4:77 "The Role of Ready mixed Concrete in constr.indust"	Kr. 15,-
" 6:77 "Seminar om BRUDMEKANIK" Afh. 29.sept. 1977	" 60,-
" 2:78 "Flydebeton" af B. Hølen og H.H. Bache	" 20,-
" 3:78 "Dansk Betondag 1978"	" 20,-
" 4:78 "Prøvningsmetoder for beton" Møde 1.3.78	" 40,-
" 5:78 "Beton i svømmebade"(Anders Nielsen&Sv.E.Petersen)	" 30,-
" 6:79 "Betonuddannelserne i Danmark" (C de Fontenay)	" 0,-
" 7:79 "Dansk Betondag 1979"	" 55,-
" 8:79 "Nedbrydn.af beton & svingn.påvirkn.af bygværker"	" 35,-
" 9:80 "Farø broerne" Møde 3.10.1979	" 45,-
" 11:81 "Brandpåvirkede betonkonstruktioner" Møde 21.1.81	" 35,-
" 12:81 "Tilsætningsstoffer til beton" Datablad II.udg.81	" 30,-
" 14:81 "Luftindblanding i beton" Debatmøde 26.11.1980	" 25,-
" 15:82 "Plastificering af beton" Møde 30.9.81	" 35,-
" 17:83 "Holdbare svømmebassiner" (Sv. E. Petersen)	" 45,-
" 18:83 "Dansk Betondag 1983"	" 70,-
" 19:83 "Proportionering af holdbar beton"	" 60,-
" 20:84 "Demolering og genbrug af beton"	" 45,-
" 21:84 "Dansk Betondag 1984"	" 45,-
" 22:85 "Beton og frost" Nordisk Workshop okt. 1984	" 95,-
" 23:85 "Dansk Betondag 1985"	" 50,-
" 24:85 "Betonelementer - Europæisk udvikl" Møde 18.10.85	" 60,-
" 25:85 "In-situ ikke-destruktiv prøvning" Møde 6.11.1985	" 55,-
" 26:86 "Dansk Betondag 1986"	" 50,-
" 27:86 "Chlorider i armeret beton" Møde 11.12.86	" 55,-
" 28:86 "Luftporestruktur" Møde 22.1.86	" 70,-
" 29:87 "Dårlig beton - hvad nu?" Møde 18+25.3.87	" 70,-
" 30:87 "Store bro- og tunnelprojekter" Møde 26.11.86	" 60,-
" 31:87 "Dansk Betondag 1987"	" 55,-
" 32:88 "Dansk Betondag 1988"	" 60,-
" 33:89 "Dansk Betondag 1989"	" 40,-
" 34:89 "Anvisning for genanvendelsesmaterialer i beton til passiv miljøklasse"	" 30,-
" 35:90 "Anvisning for efterbehandling af beton"	" 30,-
Uden nr. Kontroljournaler 1988 - Blanketter m/vejledn.	" 75,-

Denne samt de overfor nævnte publikationer kan fås ved skriftlig henvendelse til:
 Dansk Ingeniørforening, Møderestiteringen
 Vester Farimagsgade 29
 1780 København V

Da vore publikationer sælges til kostpris, er prisen for denne endnu ikke fastlagt.

ISSN 0108-0406

ISBN 87-87823-27-6

TEKNISK FORLAG A/S - KØBENHAVN