



**AALBORG UNIVERSITY**  
DENMARK

**Aalborg Universitet**

## **13 betonsygdomme**

*Hvordan de opstår, forløber og forebygges*

Poulsen, E.

*Publication date:*  
1985

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*

Poulsen, E. (1985). *13 betonsygdomme: Hvordan de opstår, forløber og forebygges*. SBI forlag. Beton Nr. 4

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# 13 betonsygdomme

Hvordan de opstår, forløber og forebygges

ATV-UDVALGET VEDRØRENDE BETONBYGVÆRKERS HOLDBARHED  
BETON 4 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1985





# 13 betonsygdomme

Hvordan de opstår, forløber og forebygges

ERVIN POULSEN med flere



**Beton.** I denne serie udsendes orienterende og vejledende publikationer om betonteknologi og betonbyggeri med henblik på forebyggelse/reparation af skader. Serien Beton udgives i samarbejde med ATV-udvalget vedrørende betonbygværkers holdbarhed.

**SBI-publikationer.** Statens Byggeforskningsinstituts publikationsserier er i øvrigt: Anvisninger, Meddelelser, Nomogrammer, Pjecer, Rapporter, Særtryk, Ydeevnebeskrivelser samt Byplanlægning og Landbrugsbyggeri. Salg sker gennem boghandelen eller direkte fra SBI. Institutets publikationsliste og årsberetning er gratis og kan rekvireres fra SBI.

**SBI-abonnement.** Institutets publikationer kan foruden ved løskøb fås via et abonnement, som desuden sikrer abonnenterne løbende orientering om alle nye SBI-udgivelser. Oplysning om de forskellige abonnements omfang fås hos SBI.

ISBN 87-563-0583-4.

ISSN 0109-1263.

Pris: 91,50 kr. inkl. 22 pct. moms.

Oplag: 3000.

Tryk: Dyva Bogtryk, Glostrup.

Tegninger: Helle Vestergaard.

Fotos: Ervin Poulsen.

Omslag: Henning Holmsted.

Statens Byggeforskningsinstitut:

Postboks 119, 2970 Hørsholm. Telefon 02-86 55 33.

Eftertryk i uddrag tilladt, men kun med kildeangivelsen:  
*Beton 4: 13 betonsygdomme, 1985.*

# Indhold

Forord .....	8
Indledning .....	10
- Styrke sikrer ikke holdbarhed, 10	
- Betonkvalitet, hvad er det?, 12	
- Miljøpåvirkning, 13	
- Udførelse og kontrol, 15	
- Prøvningsmetoder, 16	
- Hvorfor denne publikation?, 17	
- Hvad står der i publikationen?, 18	
- Hvad ved vi ikke?, 20	
- Litteratur, 20	
Nedbrydningens fysik og kemi .....	21
- Nedbrydningstyper, 21	
- Vands betydning for betons nedbrydning, 23	
- Samspil mellem flere nedbrydningsårsager, 23	
- Betons gennemtrængelighed, 24	
■ Alkalireaktioner .....	27
<i>Alkalikiselreaktion, 27</i>	
- Betingelser for skadelig reaktion, 27	
- Alkalireaktive bjergarter, 28	
- Betons alkaliindhold, 30	
- Fugtighed, 34	
- Betydende parametre, 35	
- Indhold af alkalireaktive partikler, 38	
- Flints kornstørrelse, 39	
- Betons alkaliindhold, 40	
- Puzzolantilsætning, 40	
- Stenfraktionens indflydelse, 41	
- Målemetoder, 42	
- Forholdsregler imod alkalikiselreaktion, 43	
<i>Alkalicarbonatreaktion, 48</i>	
- Betingelser for reaktion, 49	
- Reaktion, 49	
- Betydende parametre, 49	
- Skadebillede, 50	
- Målemetoder, 50	
- Forholdsregler imod alkalicarbonatreaktion, 51	
- Litteratur, 51	

■ Carbonatisering .....	54
- Carbonatiseringsproces, 54	
- Målemetoder for carbonatiseringsdybder, 62	
- Forholdsregler imod carbonatisering, 64	
- Målemetoder for overfladebehandlinger, 74	
- Litteratur, 76	
■ Chloridindtrængning .....	77
- Chloridkilder, 77	
- Chloridoptagelse, 79	
- Mål for chloridindhold, 81	
- Kritisk chloridindhold, 82	
- Chloridindtrængning, 84	
- Skadekriterier, 89	
- Målemetoder, 91	
- Forholdsregler imod chloridoptagelse, 92	
- Litteratur, 94	
■ Frost/tø-angreb .....	95
- Frostskaademekanisme, 95	
- Fordeling af luftbobler, 98	
- Frostskaadekriterier, 104	
- Målemetoder, 106	
- Forholdsregler imod frost/tø-angreb, 109	
- Litteratur, 112	
■ Hærdevarme .....	113
- Modenhed, 113	
- Termoskader, 113	
- Forholdsregler imod termorevner, 115	
- Litteratur, 120	
■ Instabilitet hos frisk beton .....	121
- Stenseparation, 121	
- Vandseparation, 123	
■ Krybning .....	126
- Krybningens parametre, 126	
- Bygningsmæssige problemer, 131	
- Litteratur, 132	
■ Nitratangreb .....	133
- Forholdsregler imod nitratangreb, 133	
■ Organisk nedbrydning .....	134

■ Rustdannelse .....	138
- Carboniseret beton, 138	
- Chloridholdig beton, 144	
- Revnet beton, 146	
- Litteratur, 148	
■ Sulfatangreb.....	149
- Sulfatangrebets kemi, 149	
- Forholdsregler imod sulfatangreb, 153	
- Litteratur, 154	
■ Svind.....	156
<i>Plastisk svind, 156</i>	
- Betydende parametre, 156	
- Forholdsregler imod plastisk svind, 158	
<i>Udtørringssvind, 160</i>	
- Forholdsregler imod udtørringssvind, 167	
- Litteratur, 168	
■ Syreangreb .....	169
- Syreangrebets kemi, 169	
- Forholdsregler imod syreangreb, 172	
- Litteratur, 173	
Bilag. Diffusionsteori.....	174
- Fick's første lov, 174	
- Fick's anden lov, 176	
- Randbetingelser, 177	
- Diffusion i beton, 177	
- Litteratur, 178	
Bilag. Sikkerhed mod nedbrydning.....	179
- Proportioneringsproblem, 180	
- Involverede parters risici, 182	
- Proportioneringsprocedure, 185	
- Fra krav til blandingsforhold, 191	
- Litteratur, 192	

## Forord

Holdbarheden af udendørs beton i Danmark har i mange tilfælde ikke svaret til de forventninger, som bygherrer, entreprenører, betonproducenter og projekterende arkitekter/ingeniører har haft.

I maj 1982 er der derfor under Akademiet for de tekniske Videnskaber, ATV, nedsat et udvalg vedrørende betonbygværkers holdbarhed. Udvalgets overordnede målsætning er at etablere et blivende indsatsmønster mellem alle betonsektorens parter inden for følgende områder:

- Eftersyn, vedligeholdelse og reparation af eksisterende bygværker i beton (afværgende indsats),
- Kvalitetsstyring med henblik på fremtidige betonbygværkers holdbarhedsegenskaber (forebyggende indsats),

således at man i et samarbejde kan *sikre vedligeholdelsen* af eksisterende bygværker i beton, *højne kvaliteten* af udførte betonbygværker og *fremme udviklingen* af konkurrencedygtige produkter og ydelser på betonområdet.

Udvalget ønsker med Beton 4 dels at give en teknisk begrundet oversigt over de forhold, der er medvirkende til nedbrydningen af beton, dels at belyse de kriterier, der kan forbedre holdbarheden af den udendørs beton. Med en sådan viden er det muligt at forsinke nedbrydningen tilstrækkelig længe til at undgå kritiske skader i betonbygningens stipulerede funktionstid. Publikationen giver læseren mulighed for selv at formulere skærpede krav til beton og betons delmaterialer, hvor det skønnes påkrævet.

Bogen henvender sig til projekterende, producerende, udførende og tilsynsførende inden for betonområdet. Der er tilstræbt samme informationsniveau som i (den nu udsolgte) SBI-anvisning 27 fra 1956: *Vejledning i betonkontrol* og i Alkaliudvalgets vejledning 1: *Foreløbig vejledning i forebyggelse af skadelige alkalikiselreaktioner i beton* fra 1961.

Publikationen er udarbejdet af civilingeniør *Bent Andersen*, AEC; civilingeniør, lic.techn. *Finn Bach*, Kunstakademiets Arkitektskole, geolog, mag.scient. *Jørn Bredal-Jørgensen*, AEC; civilingeniør *Henrik Mørup*, AEC, og ingeniørdocent *Ervin Poulsen*, DIA-B, med bistand af en støttegruppe bestående af overingeniør *Hans-Henrik Gotfredsen*; civilingeniør *Frits Otto Grønvold*; civilingeniør *Chr. F. Justesen*; direktør, arkitekt *Marius Kjeldsen*; direktør, civilingeniør *Poul Nerenst* og akademiingeniør *Niels Thaulow*.

Civilingeniør *Peter Mogensen* har forestået redaktionen i samarbejde med civilingeniør *H. H. Knutsson* og afdelingsleder *Jørgen Nielsen*.

Fra Christiani & Nielsen A/S er der modtaget information om boremuslingers angreb på beton. Civilingeniør *Gunnar Mohr*, DIA-B, har opstillet grundlaget for proportionering af beton, hvor der er stillet andre krav til betonegenskaber end til styrken. Kapitlet om carbonatisering er et ekstrakt af en rapport, udarbejdet af Ervin Poulsen til Larsen & Nielsen Fondet.

SBI, anvisningens forfattere og støttegruppen håber, at BETON 4 opfylder behovet for en teknisk begrundet oversigt over de forhold, der er medvirkende til nedbrydning af beton. Ved at sikre imod overskridelse af nedbrydningskriterierne for beton, sådan som det er beskrevet i publikationen, kan man forbedre holdbarheden af udendørs beton i Danmark.

Udarbejdelsen af publikationen er finansieret af Teknologirådet og SBI.

*Gunnar P. Rosendahl*  
Formand for ATV-udvalget

*Hans Jørgen Larsen*  
Statens Byggeforskningsinstitut

Juni 1985



# Indledning

Hvis man vil opnå en sikker og hensigtsmæssig sammensætning, udstøbning og efterbehandling af beton, der skal modstå den nedbrydende påvirkning i udendørs miljøer i Danmark, må man dels kende de kriterier, der skal være opfyldt, for at beton er holdbar, dels sikre sig at disse kriterier opfyldes med en passende sikkerhedsmargin, idet såvel betonens modstandsevne som miljøets nedbrydende påvirkning beskrives ved usikre størrelser. Undersøgelser af nedbrudt beton viser, at skader *kunne have været undgået* ved at udnytte eksisterende viden om miljøpåvirkning, betonsammensætning, arbejdsudførelse og efterbehandling.

## Styrke sikrer ikke holdbarhed

Der har altid været behov for at kunne beskrive betons kvalitet. Kvalitetsbegrebet har i tidens løb undergået forandringer, men betonstyrken har været en af de parametre, der altid har været anvendt, blandt andet fordi den er let at måle.

Betonstyrken er blandt andet afhængig af betonens  $v/c$ -forhold, komprimering og hærdningsgrad. Det er tre parametre, der også har indflydelse på betons holdbarhedsmæssige kvalitet. Medfører ændringer i disse parametre, at betonen får større trykstyrke, vil de samme ændringer også medføre større holdbarhed – alt andet lige.

Betontrykstyrken er imidlertid også afhængig af betonens luftindhold. Her kan en øgning af luftindholdet bevirke mindre trykstyrke samtidig med at betonen bliver frostfast, hvis den ikke var det i forvejen – alt andet lige.

Selv om en beton, der er holdbar i et aggressivt miljø, ofte har en høj trykstyrke, er det omvendte ikke nødvendigvis tilfældet. En beton med høj trykstyrke kan meget vel være sammensat af uforlidelige materialer (se senere), være diffusionsåben og mangelfuldt komprimeret med kolde støbeskel og grovporositeter. Dette er ikke egenskaber, der kendetegner en holdbar beton.

Betonstyrken må derfor ikke optræde som eneste talmæssige mål for betons kvalitet – heller ikke i forbindelse med kontrol af hærdnet beton. Man ved – og har altid vidst – at betons styrke ikke er et entydigt mål for armerede betonkonstruktioners holdbarhedsmæssige kvalitet.

Betonstyrken har altså ikke altid sammenhæng med nedbrydningsårsager, der skyldes:

■ *Frost/tø-skader.* Indholdet og fordelingen af luftbobler i betonens cementpasta og stenenes vandsugningsevne er afgørende for betons nedbrydning (smuldring og springerdannelse).

■ *Carbonatisering.* Cementpastaens kapillarporøsitet, betonens grovporøsitet (komprimeringssvigt) og dens overfladerevner bestemmer carbonatiseringshastigheden.

■ *Alkalikiselreaktioner.* Sandets indhold af alkalireaktive partikler, disses type og cementpastaens alkaliindhold styrer skadeforløbet (gel- og revnedannelse).

■ *Chloridindtrængning.* Betons diffusionstæthed, revneintensitet og cementtype samt chloridlast bestemmer indtrængningshastigheden og chloridophobningen.

Betons modstandsevne mod nedbrydning bestemmes således af følgende to hovedparametre:

■ *Betons tæthed over for indtrængning af skadelige gasser og væsker.*

■ *Delmaterialernes forligelighed,* fx evne til at eksistere sammen uden skadelig volumenændring.

Ved forligelighed mellem betonens delmaterialer, tilsætninger, tilsætningsstoffer og armering forstås, at de enkelte komponenter er så »stabile«, at de ikke, på grund af de andre komponenters tilstedeværelse, omdannes således at betonen får mindre styrke og holdbarhed end krævet eller ændrer volumen med opbygning af skadelige spændinger (revnedannelse) som resultat. Omdannelsen kan være af kemisk eller fysisk karakter. Nogle eksempler vil illustrere dette:

■ Alkalireaktive partikler i beton i vådt miljø er ikke forligelige med en cement med et højt alkaliindhold. Som beskrevet i kapitlet om alkalikiselreaktioner, vil der ved en kemisk reaktion dannes en gel. Denne gel kan ved en fysisk proces (kvelning) medføre revnedannelser i betonen. Derved nedsættes betonens styrke og tæthed.

■ Vandsugende stenpartikler, der kan fryse i vandmættet tilstand, er i beton ikke forligelige med betons fugtighed. Som beskrevet i kapitlet om frost/tøangreb, kan der dannes frostspringere, og betonen vil kunne revne. Der er tale om en fysisk proces (ekspansion), idet vand udvider sig ca. 9 pct. ved frysning.

■ Humusholdigt vand/sand i beton er ikke forligeligt med cement. Som beskrevet i kapitlet om syreangreb, hindres cementens hydratisering og betonen opnår ikke de ønskede egenskaber.

■ Armering i fugtig beton er ikke forligelig med tilsætningsstoffer, der er stærkt chloridholdige. Som omtalt i kapitlet om rust, vil der ved en kemisk

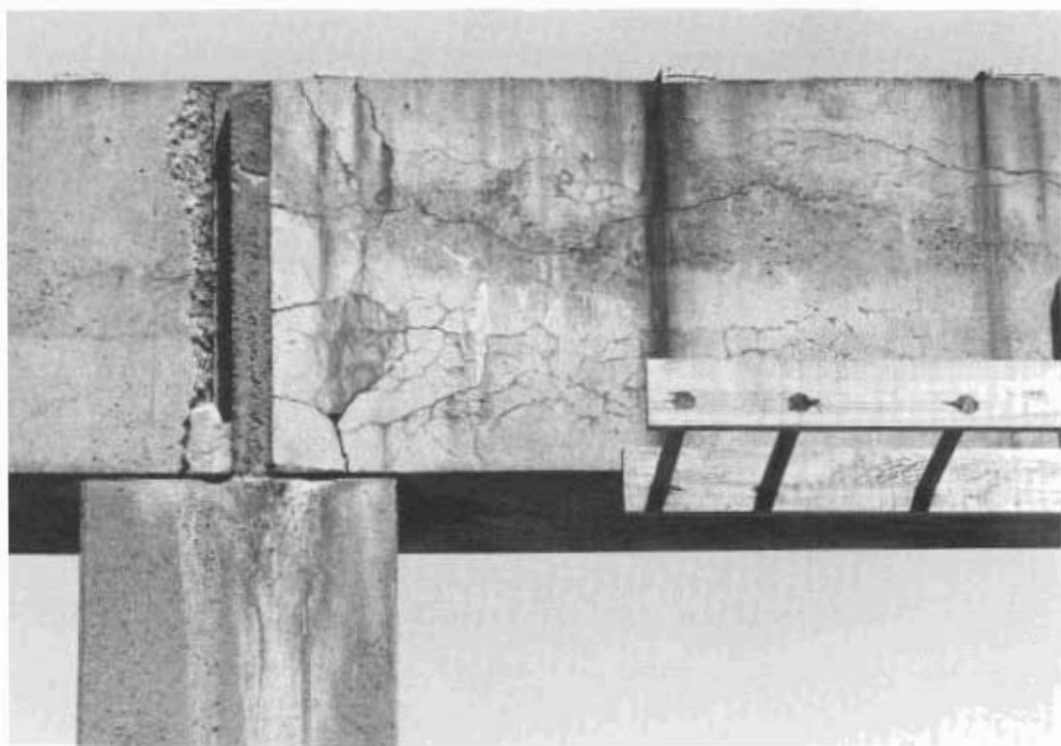
proces ske en rustdannelse (armeringsnedbrydning). Betonen nedbrydes ved en fysisk proces (ekspansion), idet rust fylder mere end den mængde armering, der er medgået til rustdannelsen. Derved bortsprænges dæklaget over armeringen.

Tæthed og forlidelighed styres ikke af betonstyrken, men derimod af beto-  
nens sammensætning, luftindhold, porøsitet, revneintensitet, cementtype, til-  
sætningsstoffer, af tilslaget bjergarter og af overfladebehandlingen.

### **Betonkvalitet, hvad er det?**

Ved et betonbygværks projektering fastlægges den bærende konstruktions geometriske udformning, den statiske anordning, konstruktionsdelenes dimensionering og betonens proportionering. Konstruktionsdelenes bæreevne og betonens holdbarhed fastlægges på basis af en analyse af de laster og de miljøpåvirkninger, bygværket udsættes for eller skal modstå med en fastlagt (normeret) sikkerhed.

*Figur 1. »Styrke sikrer ikke betons holdbarhed« står der i denne publikation; men manglende holdbarhed kan derimod nedsætte en betonkonstruktions bæreevne. Nedbrydning, som fx skadelige alkalikiselreaktioner, der kan medføre omfattende revnedannelse, kan resultere i, at betons trykstyrke nedsættes og at trækstyrken (næsten) kan blive nul. Dette kan få betydning for betonbjælkers forskydningsstyrke og armeringens fastgørelse i betonen.*



Det er klart, at betonen skal have et vist, nødvendigt styrkeniveau for at kunne bidrage tilstrækkeligt til de forskellige konstruktionsdeles bæreevne. Det er endvidere klart, at betonen skal have en vis, nødvendig tæthed, og at betonens delmaterialer skal være forligelige, således at betonens styrke og struktur bevares med en rimelig sikkerhed i den stipulerede funktionstid.

For at opnå tilstrækkelig *tæthed*, må der stilles krav til:

- Betonens komprimering.
- Delmaterialernes partikelfordeling.
- v/c-forholdet.
- Maksimal revnedannelse.

For at opnå *forligelighed*, må der stilles krav til:

- Cementens type.
- Støbevandets renhed.
- Tilslagets bjergartsfordeling og renhed.
- Tilsætningsstoffernes bestanddele.
- Luftindholdets boblefordeling.

For at opnå tilstrækkelig *bæreevne*, må der stilles krav til:

- Trykstyrken.
- Trækstyrken (eventuelt).

Styrkerne skal være opnået til visse, nærmere fastlagte terminer, afhængigt af behovet.

Samlingen af disse kravs opfyldelse repræsenterer betonens kvalitet ved afleveringen. Der er altså tale om et kompliceret begreb, hvor styrken kun indgår med et enkelt, men naturligvis nødvendigt element.

### **Miljøpåvirkning**

Det er ikke altid lige nødvendigt at anvende beton med høj holdbarhedsmæssig kvalitet, idet beton kan befinde sig i miljøer med varierende aggressivitet. DIFs norm for betonkonstruktioner, DS 411, 3. udgave, opererer med tre (fire) miljøklasser:

- *Passivt miljø*, dvs. uden mulighed for skadelig nedbrydning af beton og armering.
- *Moderat miljø*, dvs. fugtig-ferske omgivelser.
- *Aggressivt miljø*, dvs. fugtig-salte og/eller røgholdige omgivelser.
- *Særlig aggressive miljøer*, dvs. fugtige omgivelser med høj saltkoncentration og/eller stærkt cementpastaopløsende væsker og gasser.

I figur 2 er det illustreret, hvorledes valg af miljøklasse foregår efter DS 411.



Figur 2. Beslutningsdiagram for fastsættelse af en betonoverflades miljøpåvirkning efter DS 411, 3. udgave.

1. Et miljø benævnes fugtigt, såfremt blankt stål vil ruste.
2. Ved surt vand forstås her vand, der er surere end regnvand, hvor man kan komme ned på  $\text{pH} = 3,5$ . Surt vand forekommer oftest som industrispildevand. Svovlsure eller blot svovlholdige omgivelser tilhører samme kategori.
3. Et salt miljø findes i Danmark i forbindelse med hav- og brakvandskonstruktioner, svømmebade, tørsaltede konstruktioner, saltbeholdere mv.
4. Koncentreret saltpåvirkning kendes især fra tørsalting og saltbeholdere.
5. Røgs indhold af svovlsyre, kulsyre og salpetersyre gør stærk røgholdig atmosfære aggressiv. Aggressiv røg findes fortrinsvis i industrikvarterer.
6. Tør og ikke-aggressiv påvirkning betegnes passiv miljøklasse. Ingen skadelige påvirkninger er aktuelle.
7. Fersk-fugtig og ikke-aggressiv påvirkning betegnes moderat miljøklasse. Carbonatisering, alkalireaktioner og frost/tø-skader kan være aktuelle.
8. Salt, dog ikke koncentreret, og røg er de påvirkninger, der karakteriserer aggressiv miljøklasse. Chlorid- og sulfatangreb samt alkalireaktioner og frost/tø-angreb kan være aktuelle. Er der sikret imod chloridindtrængning, vil skadelig carbonatisering normalt være mindre risikobetonet.
9. Aggressiv påvirkning ud over det normale, som fx finder sted, når beton påvirkes af stærke syrer, koncentreret tørsaltholdigt smeltevand eller grundvand med højt sulfatindhold, betegnes som særlig aggressive miljøer. For at modstå en sådan påvirkning, kræves ofte specialcementer, særlige tilsætningsstoffer og meget tæt beton, eventuelt anvendelse af diffusionstæt membran.

## Udførelse og kontrol

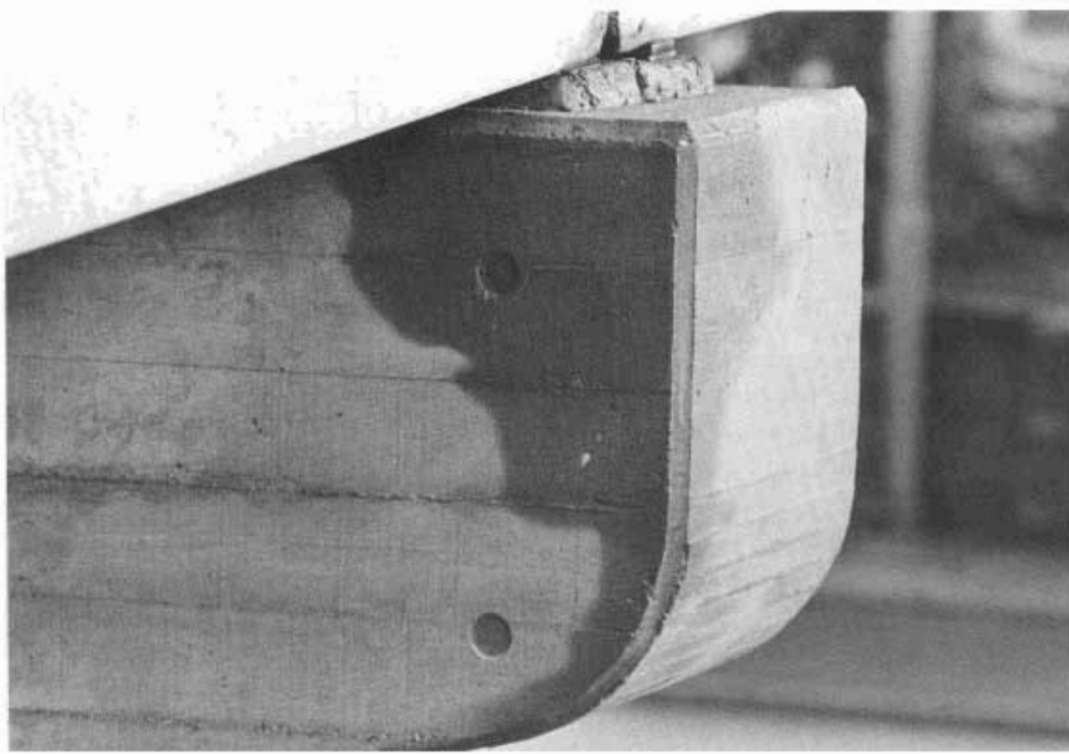
Det er normalt muligt at fremstille beton, der har en sådan holdbarhedsmæssig kvalitet, at betonens styrke og udseende ikke forringes under en acceptabel grænse i bygværkets stipulerede levetid. Det kræver følgende:

- Betonen skal proportioneres således, at kriterierne for holdbarhed er overholdt, idet der ved en passende sikkerhedsmargin tages hensyn til de betydende parametres usikkerhed.
- Betonens sammensætning og arbejdets udførelse skal kontrolleres således, at der er dokumentation for, at de stillede krav er blevet opfyldt med passende stor sikkerhed.

Denne fremgangsmåde er ikke forskellig fra det princip, der anvendes ved dimensionering af bærende konstruktioner. Der er i princippet ikke forskel på, hvorledes man skal opnå den nødvendige bæreevne og den nødvendige holdbarhed.

For at opnå en bæredygtig betonkonstruktion, må man på projekteringsstadiet, ud fra konstruktionens anvendelse og den ønskede udformning, først

*Figur 3. En konstruktionsdel kan lokalt få en øget miljøpåvirkning, hvis konstruktionsudformningen medfører, at betonen kan mættes med vand. Ved valg af beton skal der også tages hensyn til, at betonen lokalt kan vandmættes, eller også skal konstruktionsudformningen ændres således, at vandmætning undgås.*





fastlægge de laster, der vil påvirke bygværket. Disse laster fastlægges med passende sikkerhed ved at forudsætte de farligst tænkelige kombinationer af passende sjældent forekommende laster. Proceduren er beskrevet i DS 409.

Denne regningsmæssige lastpåvirkning medfører forskellige snitkræfter i de bærende konstruktionsdele, afhængig af bygværkets udformning.

Betonens styrke må vælges således, at der er passende stor sikkerhed for, at bæreevnen af de enkelte konstruktionsdele er tilstrækkelig i bygværkets stipulerede funktionstid. Beslutningsgrundlaget, herunder den normerede mindstesikkerhed, er beskrevet i DS 411. Endelig sikres med kontrol, at konstruktionen opføres svarende til forudsætningerne.

For at opnå en *holdbar betonkonstruktion*, må man på projekteringsstadiet, ud fra konstruktionens anvendelse og den ønskede udformning, først fastlægge det miljø, der vil påvirke bygværket. Dette miljø fastlægges med passende sikkerhed ved at forudsætte den farligst tænkelige situation. Denne procedure er beskrevet i DS 411.

Denne regningsmæssige miljøpåvirkning medfører forskellige miljøklasser for bygværkets beton, afhængig af udformningen.

Betonens delmaterialer og deres forlidelighed samt betonens tæthed må vælges således, at der er passende stor sikkerhed for, at holdbarheden af de enkelte bygningsdele er tilstrækkelig i bygværkets stipulerede funktionstid. Beslutningsgrundlaget, herunder den tilhørende nødvendige sikkerhed, er ikke normsat. Det er derfor op til den enkelte bygherre eller projekterende selv at fastlægge denne sikkerhedsmargin, afhængig af:

- Usikkerhedernes størrelse.
- Konsekvenserne ved holdbarhedssvigt.
- Holdbarhedskriteriernes relevans.
- Mulighederne for ændringer i miljøpåvirkning.

Det er naturligvis nødvendigt ved kontrol at overbevise sig om, at den udstøbte beton opfylder de stillede krav.

## Prøvningsmetoder

Der findes prøvningsmetoder, hvorved man kan finde et mål for betonens styrkemæssige egenskaber. Betonprøvers styrke kan bestemmes på såvel støbte som på udborede prøver. Betonens styrke kan beskrives ved anvendelse af følgende prøvningsmetoder:

- Cylindertrykstyrke, DS 423.23.
- Spaltetrækstyrke, DS 423.34.
- Bøjningstrækstyrke, ISO 1920/1970.
- Udtræksstyrke, DS 423.31.

Tilsvarende findes der prøvningsmetoder, hvorved man kan finde et mål for betonens holdbarhedsmæssige egenskaber under givne (standardiserede) omstændigheder.

Betonprøvers tæthed kan fx beskrives ved anvendelse af følgende prøvningsmetoder:

- Indtrængningsdybde for vand under tryk, ISO 7031.
- Omvendt cup-metoden (Schou, 1983).
- Absorption, BS 1881: part 5:1970.

Stenpartiklers frostfarlighed og sandpartiklers alkalireaktivitet kan beskrives ved fx følgende prøvningsmetoder:

- Frostprøvning med saltopløsning, DS 423.29.
- Sands alkalikiselreaktivitet, TI-B 51.

De forsøgmæssige omstændigheder, hvorunder betons holdbarhedsmæssige egenskaber måles ved disse prøvningsmetoder er med føje valgt således, at det er muligt at opnå en erfaringsmæssig tilstrækkelig stor sikkerhed, der ved kravformuleringen kan gradueres efter de aktuelle miljøklasser.

Der findes et stort antal prøvningsmetoder, både danske, udenlandske og internationale (ISO). For at kontrol ved prøvning kan blive entydig og operationel, må der imidlertid altid forud for prøvningen redegøres for følgende forhold:

- Egenskab.
- Krav.
- Prøveemne.
- Udtagning.
- Prøvningsmetode.
- Vurderingsgrundlag.

Vurderingsgrundlaget i Danmark er DS 411 for styrker, DS 1050 for geometriske størrelser, DS 405.0 for sand-, grus- og stenmaterialer samt DS 423.1 for andre egenskaber hos beton.

### **Hvorfor denne publikation?**

Er der behov for en bog som denne, når man har betonnormen DS 411, en publikation om »detailkrav til beton« (Teknologisk Institut, 1984) og en publikation om »basisbetonbeskrivelse« (BPS, 1985)? De nævnte udgivelser har ét til fælles – de angiver hvilke krav, der kan stilles, og hvordan disse krav kan formuleres, svarende til en række standardbetoner. Den her foreliggende Beton 4 søger derimod at sammenfatte den viden om nedbrydningskriterier for

beton, der er tilgængelig, og som er relevant for den, der selv vil proportionere beton til fremstilling af holdbare betonkonstruktioner.

Man kan naturligvis komme langt med anvendelse af standardbetoner. Specialbetoner vil dog altid være aktuelle, navnlig når der er tale om særligt aggressive miljøer, hvor betonnormens krav ikke nødvendigvis sikrer tilstrækkelig holdbarhed. Skærpede krav er desuden nødvendige, hvis man med minimalt vedligehold ønsker længere funktionstid end det, der er regnet med i betonnormen og andre forslag til detailkrav. Disse skærpede krav, svarende til kendte miljøpåvirkninger, kan kun stilles, hvis kravstilleren kender nedbrydningsbetingelserne og de parametre, der har størst indflydelse på betonens holdbarhed. Desuden skal man naturligvis kende de begrænsninger, som skyldes praktisk betonproportionering, betons udstøbning og efterbehandling.

### **Hvad står der i publikationen?**

Publikationen omtaler hvorfor og hvordan beton nedbrydes, når betonen udsættes for veldefinerede miljøpåvirkninger. Disse miljøpåvirkninger og deraf følgende nedbrydnings typer er nævnt i en række alfabetisk ordnede kapitler. Rækkefølgen har derfor intet med skadelighed eller hyppighed at gøre.

Det er valgt at beskrive 13 typiske betonsygdomme. Der er tale om skader, der kan forekomme i Danmark, men som kan forebygges ved passende foranstaltninger. I den udstrækning det har været muligt, er disse typiske betonskader beskrevet efter samme mønster. Der redegøres således for årsager til nedbrydningen (hvorfor), nedbrydningsmekanismen (hvordan) og nedbrydningsbetingelserne (hvornår). Desuden er der givet en kommenteret beskrivelse af de målemetoder, der kan anvendes i forbindelse med den pågældende betonskade. Hvor der er tale om en standardiseret prøvningsmetode, er metoden dog ikke beskrevet i detaljer, blot kommenteret. Endelig gives der for hver betonskade forslag til hvilke krav, der må stilles til betons sammensætning, udstøbning og lagring mv., for at få en rimelig sikkerhed imod nedbrydning.

I bilaget findes et kapitel om sikkerhed mod nedbrydning. Indholdet af dette kapitel kan bruges i de tilfælde, hvor kravstilleren ønsker større sikkerhed, eller hvor producenten ønsker mindre påtalerisiko end normalt. Med hensyn til kontrol af beton (styrker, geometri etc.), henvises til de relevante standarder (DS 411, 1050 og 423.1), der er både entydige og operationelle.

I bilaget er der desuden medtaget et kapitel om stoftransport ved diffusion. Den nødvendige matematiske formulering er givet her til brug for løsning i de tilfælde, hvor de færdige formler i Beton 4 ikke er dækkende.

Publikationen forudsætter kendskab til elementær betonteknologi, fx således som det er præsenteret i Beton-Teknik og Beton-Bogen, udgivet af CtO.

*Figur 4. Vegetation, der vokser tæt op af beton, kan ændre lokalmiljøet, således at betonen kan blive vandmættet. Er betonen ikke proportioneret således, at den kan tåle at fryse i vandmættet tilstand, vil betonen nedbrydes som følge af frost/tø-påvirkning.*



### **Hvad ved vi ikke?**

Selv om der er udført en omfattende betonforskning i tidens løb, og der stadig forskes på betonområdet, er den eksisterende viden ikke fuldkommen. Den store spredning i forsøgsresultater viser, at der må være faktorer, hvis betydning ikke er medtaget i nedbrydningskriterierne. Det tager man indtil videre hensyn til ved at indregne en ekstra stor sikkerhed. Et matematisk formuleret nedbrydningskriterium er en model af virkeligheden. Den skal være simpel og vil aldrig kunne medtage alle parametre. Det er heller ikke nødvendigt, blot man kender nedbrydningsbetingelsernes gyldighedsområde og begrænsninger.

Når der er flere forskellige miljøpåvirkninger samtidig, kender vi kun lidt til deres samspil. Er der fx mulighed for alkaliskelreaktioner, frost/tø-angreb og chloridindtrængning samtidig, er den eneste løsning, som kan anbefales med vor nuværende viden, at betonen sikres mod hver påvirkning for sig. Vi ved dog ikke, om de forskellige påvirkninger er farligere ved samvirken og derfor alligevel kan nedbryde betonen selv om betonen er proportioneret til at modstå hver påvirkning for sig.

### **Litteratur**

- BPS. 1985. Basisbetonbeskrivelse. København. Under udarbejdelse.
- J. Schou. 1983. Måling af betons vandtæthed. Dansk Betonforening. Publikation nr. 19. København.
- Teknologisk Institut. 1984. Betonbygværkers holdbarhed, detailkrav til holdbar beton. Tåstrup.

# Nedbrydningens fysik og kemi

Beton er udsat for påvirkninger, forårsaget dels af naturkræfter dels af menneskelige handlinger. Beton vil derved, hurtigt eller langsomt, undergå forandringer, ligesom de »rigtige« bjergarter. Når disse forandringer bevirker, at betons etablerede og ved afleveringen accepterede styrke ikke kan bevares i bygværkets stipulerede funktionstid og/eller der i samme periode sker sådanne overfladeændringer, at bygværkets æstetik lider derved, taler man om nedbrydning.

Som følge heraf må en holdbar, *uarmet* beton defineres som en beton, hvor nedbrydningen er så langsom, at bygværkets funktion, sikkerhed og æstetik ikke forringes under en vis grænse, givet ved gældende norm og den ydelsesspecifikation, efter hvilket byggeriet blev leveret. I praksis vil en sådan holdbar, uarmet beton kunne opnås, når den består af et velfordelt system af rene tilslagsmaterialer, der er forligelige med cementpastaen, som skal være tæt, revnefri og velhydratiseret med et indblandet luftporesystem, men uden grovporositeter. Det forudsættes desuden, at betonen er proportioneret således, at den har opfyldt nødvendige og tilstrækkelige brud- og nedbrydningsbetingelser med en passende stor (mindst som normeret eller specificeret) sikkerhedsmargin på byggetidspunktet.

For at *armeret* beton skal være holdbar, skal betonen ikke alene være holdbar som uarmet beton, men også kunne beskytte armeringen imod korrosion i bygværkets stipulerede funktionstid. Det kræver dels, at armeret beton ikke er iblandet sådanne stoffer, der er uforligelige med armeringen, dels, at betonen er så tæt, at det beskyttende miljø i armeringens dæklag ikke nedbrydes ved, at skadelige stoffer trænger ind i betonen ved diffusion.

Det er således væsentligt at skelne mellem nedbrydning af armeret beton og uarmet beton. Visse påvirkninger, der kan være skadelige for armeret beton (chloridindtrængning, carbonatisering), behøver ikke at være skadelige for uarmet beton.

## Nedbrydningstyper

Betingelserne for, at betonen ikke nedbrydes, dvs. taber styrke, sammenhæng og/eller rustbeskyttende virkning, er, at betonen enten ikke angribes eller at betonen kan modstå den skadelige påvirkning. Ved en skadelig påvirkning forstås her et stof, der under specielle betingelser kan nedbryde beton. Beton kan derfor kun modstå en sådan skadelig påvirkning, såfremt betingelserne



for nedbrydning ikke er til stede. Begrebet skadelig påvirkning skal her forstås meget bredt. Ikke alene stoffer som salte, syrer og gasser, men også begreber som temperatur og fugt er indbefattet. For at være farlige for betonmassen må disse skadelige påvirkninger på en eller anden måde være ført ind i betonen.

Det kan være sket allerede ved *blandingsprocessen*, idet delmaterialer og/eller tilsætningsstoffer og tilsætninger har indeholdt skadelige elementer, som fx alkalireaktive partikler, humus, alkaliforbindelse, chlorider eller sulfater.

Det kan imidlertid også ske ved omgivelsernes indvirkning på betonen i den følgende funktionsperiode. Der er her to muligheder. Der kan for det første være tale om en ren *overfladevirkning*, idet betonen nedbrydes udefra og indad lag for lag, som fx ved slid, syreangreb og frost/tø-skader. For det andet kan der være tale om en ren *volumenvirkning*, idet visse stoffer fra omgivelserne vil kunne bane sig vej ved diffusion gennem betonen uden egentlig at skade cementpastaen, for derefter at virke skadeligt på tilslag og/eller armering. Her kan følgende eksempler nævnes:

■ *Chlorider* kan trænge ind i beton fra omgivelserne (tøsaltning, havvand, svømmebadsvand) og angribe armeringen, medens chloridioner i sig selv ikke er mærkbart skadelige for betonens cementpasta og tilslag i de koncentrationer, der her kan komme på tale.

■ *Alkaliforbindelser* kan trænge ind i beton fra omgivelserne (tøsaltning, havvand, svømmebadsvand) og angribe alkalireaktive partikler i tilslaget, medens alkaliioner ikke er skadelige for armeringen, betonens cementpasta og alkaliinaktive gruspartikler.

■ *Kuldioxyd* indeholdt i den atmosfæriske luft vil trænge ind i beton og vil indgå forbindelse med cementpastaens calciumhydroxid  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Derved dannes calciumcarbonat  $\text{CaCO}_3$ . På den måde udvikles en vejrhud (kalkholdig skorpe), som kan tætnes betonoverfladen. Kuldioxyd er således ikke skadelig for betonen, nærmere tværtimod. Den kalkholdige skorpe har imidlertid ingen rustbeskyttende effekt. Bliver den kalkholdige skorpe derfor tykkere end armeringens beskyttende betondæklag og er der tilstrækkelig fugt- og ilttilgang til armeringen, vil der ske rustdannelse med efterfølgende revnedannelser og afsprængninger.

■ *Vand* kan trænge ind i beton og kan have en så stor koncentration af salte i sig, at disse, eller deres produkter efter reaktion med cementpastaen, udfælder sig i porer og revner i betonen, når vandet fordamper. Den vækst i saltkrystaller, der kan ske på denne måde, kan medføre, at cementpastaen ekspanderer som følge af krystaltrykket, revner og smuldrer hen. Dette fænomen kaldes saltsprængning.

### Vands betydning for betons nedbrydning

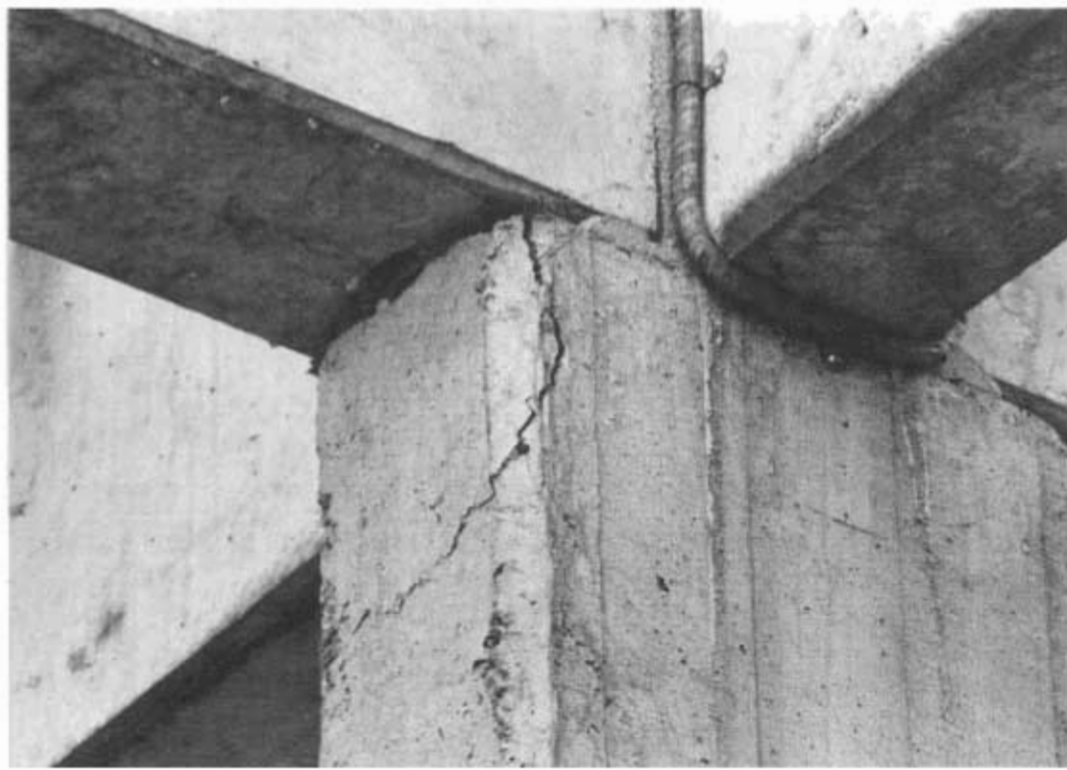
Der er, som det fremgår af ovenstående, mange forskellige former for nedbrydning af beton og dennes armering. Det er typisk, at fugt stort set altid på en eller anden måde er indblandet i nedbrydningsprocessen. Vand er nødvendig ved de kemiske omdannelsesprocesser, vand kan virke opløsende (udludning) og vand kan virke sprængende (frost/tø). Desuden sker der kvelning/svind og saltvandringer ved fugtsvingninger. De eneste former for nedbrydning, hvor vand ikke er en nødvendig betingelse, er rene temperatursprængninger samt vandalisme og hærværk!

### Samspil mellem flere nedbrydningsårsager

Man skal være klar over, at et skadeligt stof i et betonbygværks omgivelser kan bevirke flere nedbrydningsformer, dvs. at det kan henføres til flere af ovennævnte grupper.

Fx vil svovlsurt vand ( $H_2SO_4$ ) nedbryde beton både ved syre- og sulfatangreb. Cementpastaen nedbrydes og reaktionsprodukterne medfører saltsprængning (sulfatangreb).

*Figur 5. Konstruktiv udformning må altid respektere naturlovene. Bevægelser fra svind og krybning af beton samt fra temperaturændringer kan medføre revnedannelse, hvis disse bevægelser hindres af den konstruktive udformning.*



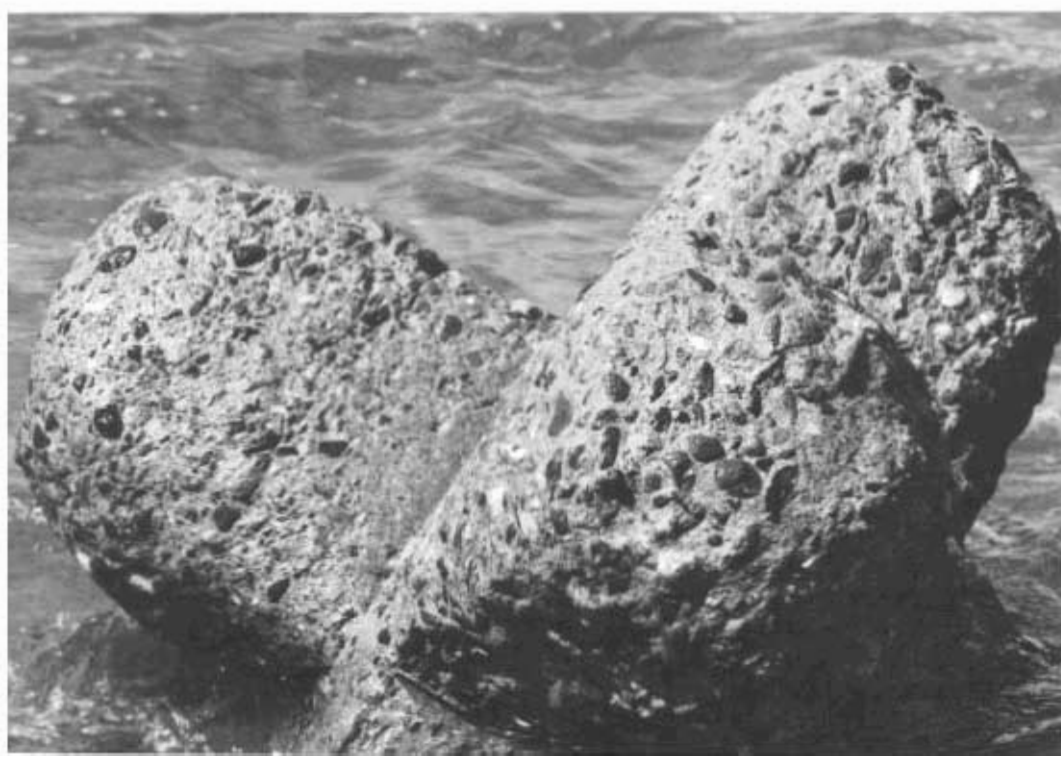
Tilsvarende vil saltsyre (HCl) nedbryde beton ved syreangreb og armering ved chloridangreb. Når tøsalt (NaCl) trænger ind i beton, vil natriumionerne (alkali) kunne nedbryde alkalireaktive partikler og chloridionerne vil angribe armeringen.

Væsker kan indeholde mange skadelige stoffer (industrispildevand) og kan derfor medføre meget forskellige nedbrydningstyper, der overlejrer hinanden.

### **Betons gennemtrængelighed**

Ser man bort fra de tilfælde, hvor de skadelige stoffer er bragt ind i betonen ved blandingprocessen (har været indeholdt i delmaterialer, tilsætninger eller tilsætningsstoffer), er betonens tæthed en nødvendig betingelse for holdbar beton i aggressivt miljø. Betonens tæthed er dog ikke tilstrækkelig. De forskellige cementtypers og bjergarters egen modstand mod fx syre-, sulfat- og chloridangreb spiller også en væsentlig rolle. Under ellers ens betingelser vil en beton dog være mindre udsat for nedbrydning jo mere tæt betonen er.

*Figur 6. Nedbrydning af beton i havvand har flere årsager. Her kan nævnes frost/tøangreb, mekanisk slid, alkalireaktioner, sulfatangreb og chloridangreb, hvis der er tale om armeret beton. Havvandsangreb dækker derfor ofte over et samspil mellem flere nedbrydningsårsager.*



Betons tæthed øges med voksende tæthed af cementpasta og tilslag og mindskes med øget  $v/c$ -forhold, revneintensitet og grovporøsitet hos betonen.

Her er begrebet tæthed anvendt i mere almindelig betydning. Da tæthed, som det er anført, er et af de vigtige begreber i forbindelse med holdbarhed skal denne egenskab uddybes og omtales nærmere.

*Faststofkoncentration* er forholdet mellem rumfanget af fast masse og stoffets ydre rumfang.

*Porøsitet* er forholdet mellem det totale porevolumen og stoffets ydre rumfang. Begrebet porøsitet, bestemt som *totalporøsitet*, bruges ikke meget for beton og delmaterialer i forbindelse med nedbrydning. Det, der har interesse for holdbarheden er derimod mængden af de åbne porer, dvs. porer, der er tilgængelige for vand og gasser. Medregnes kun de åbne porer, taler man om *åben porøsitet*. I daglig tale taler man ofte blot om et stofs porøsitet, idet det som regel fremgår af sammenhængen, om der er tale om totalporøsitet eller om åben porøsitet. Det skal bemærkes, at summen af totalporøsitet og faststofkoncentration er lig med 1.

*Permeabilitet* er et begreb, der angiver hvor let en væske eller luftart kan presses igennem et stof, fx en beton. Et porøst stof kan dog godt være meget luft- og vandtæt, hvis porerne har ringe indbyrdes forbindelse eller er så snævre, at det, der skal transporteres, møder stor modstand. I almindelighed vil permeabiliteten dog vokse med såvel porøsiteten som med porevidden.

*Hydraulisk ledningsevne.* Til talmæssig angivelse af fx betons permeabilitet over for vand, anvendes permeabilitetskoefficienten eller den hydrauliske ledningsevne givet ved Darcy's lov. Den hydrauliske ledningsevne måles i enhed  $m/s$ . Den kan siges at være det vandvolumen i  $m^3$ , der i løbet af 1 s strømmer igennem pr.  $m^2$  af en 1 m tyk betonvæg, når vandtrykket er 1 m (vandsøjle) højere på den ene side af væggen end på den anden. Beton kan teoretisk set aldrig være vandtæt i ordets egentlige betydning. I praksis regnes beton »vandtæt«, når den hydrauliske ledningsevne er mindre end ca.  $10^{-14}$   $m/s$ , men det afhænger naturligvis af omstændighederne.

*Kapillaritet* er et begreb, der angiver, hvor let en væske, som oftest vand, kan suges ind i et stof under indflydelse af poreernes hårrørskraft. Ved hårrørsvirkning kan der kun suges væske *ind* i et stof; væsken kan ikke presses ud. Så snart porerne er fyldt, standser væskebevægelsen.

Når to fugtige materialer er i kontakt, vil fugt bevæge sig fra dét med de groveste porer til dét, der har de fineste porer. Derfor kan fugt suges fra jorden ind i beton, når denne er i kontakt med fugtig jord.

Er beton udsat for stærk fordampning, vil salte, som er opløst i det indsugede vand koncentrere sig og udskilles ved fordampningsfronten. Dette fænomen er kendt fra havvandskonstruktioner og fra svømmebassiner, der er

omgivet af ingeniørgang med tør, varm luft. Mest udpræget ses fænomenet dog i ørkenområder. Saltudskillelsen kan der give anledning til kraftige saltsprængninger.

*Diffusion.* Beregning af stoftransport i beton kan beregnes med passende nøjagtighed i praksis efter Fick's love. En nærmere redegørelse findes i bilaget »Diffusionsteori«, side 174.

# Alkalireaktioner

Det er en nødvendig forudsætning for fremstilling af holdbar beton, at betonens delmaterialer er forlidelige i det miljø, som betonen kommer til at befinde sig i. Der findes bjergarter, som anvendt i beton i fugtigt miljø, kan reagere med cementpastaens porevæske, ekspandere og gennemrevne betonen. Reaktive på denne måde er de gruspartikler, som enten indeholder kisel i en amorf/mikrokrystallin tilstand eller består af bjergarten dolomit. Disse gruspartikler angribes og nedbrydes i beton af hydroxider og alkalier. Derfor benævnes denne nedbrydningsform alkalireaktion.

I dette kapitel omtales først alkalikiselreaktion og dernæst, på side 48, alkalicarbonatreaktion.

## *Alkalikiselreaktion*

Alkalikiselreaktion er en kompliceret fysisk-kemisk proces. Den foregår mellem på den ene side alkalireaktive, kiselholdige bjergarter og mineraler i betonens tilslag (grusmateriale) og på den anden side alkaliforbindelser i porevæsken i betonens cementpasta.

### **Betingelser for skadelig reaktion**

De nødvendige betingelser for alkalikiselreaktion er altså tilstedeværelse af:

- *Reaktive partikler i tilslaget.*
- *Alkali i cementpastaen.*
- *Vand i beton og omgivelser.*

Hvis blot én af disse betingelser i »RAV-trekanten« ikke er til stede, kan alkalikiselreaktion ikke forekomme. Betingelserne er imidlertid ikke tilstrækkelige til, at der sker *skader* som følge af alkalikiselreaktioner. De reaktive partikler i tilslaget vil altid reagere mere eller mindre med cementpastaens porevæske. Det, der i praksis er skadeligt, er, at reaktionen medfører nedsat styrke og/eller øget permeabilitet. Det kan ske ved:

- *Opløsning eller nedbrydning af tilslagets partikler.*
- *Dannelse af reaktionsprodukter, der har eller får større volumen end de reagerende stoffer – med revnedannelser i betonen til følge.*

Kun i de tilfælde, hvor der er tale om en markant (betydningsfuld) svækkelse af betonen, taler man om skadelig alkalikiselreaktion. Skadelig og uskadelig alkalikiselreaktion benævnes under ét blot alkalikiselreaktion.



Der er ikke en skarp grænse mellem skadelig og uskadelig alkalikiselreaktion. Hvilken reel betydning alkalikiselreaktion har, fx for frostangreb på en ellers frostfast beton eller for chloridangreb på en ellers chloridtæt beton, er ikke undersøgt tilstrækkeligt.

Beton vil altid have en vis (indre) revneintensitet, fordelt som pastarevner og vedhæftningsrevner (mellem gruspartikler og cementpasta). De nævnte revner vil være af såvel mikro- som makrostørrelse. Revneintensiteten tiltager omkring alkalireaktive gruspartikler. I de situationer, hvor lokalrevnerne omkring de reagerende gruspartikler går sammen og danner et mønster af gennemgående revner, er betonen blevet markant svækket, både med hensyn til styrke og tæthed. I dette stadium vil revnerne også være synlige på betonoverfladen.

Revner i beton som følge af alkalikiselreaktioner kan ikke vurderes på samme måde som lastfremkaldt revnedannelse vurderes i betonnormen. Revner fremkaldt af alkalikiselreaktioner har altid større intensitet end lastfremkaldte revner. Det betyder, at betonens gennemtrængelighed for vand og gasser kan øges meget selv i de tilfælde, hvor revner fremkaldt af alkalikiselreaktioner er ganske fine. Mere væsentligt er dog, at revnerne er tegn på, at der i betonen foregår en omdannelse og nedbrydning, som kun kan standses ved at reaktionsmiljøet ændres gennem en passende udtørring af betonen. Uden en udtørring af betonen vil revnerne være »levende«, og revnevidden vil øges i en betragtelig årrække.

### **Alkalireaktive bjergarter**

De alkalireaktive partikler, der kan findes i dansk grus til betonstøbning er følgende:

- Porøs, kalkholdig flint.
- Porøs, kalkfri flint.
- Tæt, kalkholdig flint.
- Tæt, kalkfri flint.
- Kiselimpregnerede bjergarter.
- Kunstige og vulkanske glasser.

Flint dominerer blandt de alkalireaktive partikler i dansk grus. Flintens porøsitet er en afgørende parameter for alkalikiselreaktionernes forløb. Derfor måler man ved analyse af grusmaterialer til beton alene følgende kategorier:

- Porøs flint.
- Tæt flint.
- Andre alkalireaktive partikler.
- Alkaliinaktive partikler.

På Færøerne og i Grønland er der konstateret sorte, finkornede eruptiver med indhold af alkalireaktivt glas.

I udlandet findes alkalireaktive bjergarter og mineraler, der i udseende afviger fra de alkalireaktive partikler i dansk grus. Den her givne beskrivelse dækker ikke udenlandske forhold.

Sand, såvel af dansk som af udenlandsk oprindelse, bør altid undersøges på et speciallaboratorium for alkalireaktivitet, hvis der anvendes cement med højt alkaliindhold, eller hvis bygværket vil blive udsat for et alkaliholdigt miljø.

Til brug for identifikation af de alkalireaktive bjergarter i danske grusmaterialer kan følgende oversigt gives:

■ *Porøs flint* er vandsugende, dvs. den klæber til tungen ved berøring og en vandfilm på overfladen suges straks ind. Ringe densitet, dvs. ca. 2200 kg/m<sup>3</sup>. Undertiden hård og fast, undertiden sprød og smuldrende. Farven er over-

*Figur 7. En kraftig revnedannelse af beton som følge af alkalikiselreaktioner vil ned sætte betonens styrke. Trækstyrken kan tabes helt, og trykstyrken kan halveres. Det betyder, at skadelige alkalikiselreaktioner, foruden at være et æstetisk problem for en bærende konstruktionsdel, kan ned sætte den aktuelle sikkerhed mod brud.*



vejende hvid, sjældnere lys grå. Indholdet er hovedsagelig opal, men kan omfatte små mængder kalcedon samt vekslende, undertiden store mængder kalk. Sprød, smuldrende flint er som regel kalkfri. Forekommer overvejende som kappe eller skorpe, dvs. overfladelag på flintknolde og flintlag. Undertiden også som indeslutninger i tæt flint.

Hvid flint bliver af usagkyndige ofte forvekslet med hvid kalksten (kalkspringer!). De kan imidlertid let adskilles, fx ved tyndslibsundersøgelse. En anden måde at adskille porøs flint fra kalk kan foregå ved en behandling med methylenblåt (saltsyre med methylenblåt). Porøs flint farves blå, kalkstenene farves ikke.

Porøs flint forekommer i kvartære grusforekomster over hele landet.

■ *Tæt flint* er ikke vandsugende, dvs. forbliver våd ved fugtning. Normal densitet, dvs. ca. 2600 kg/m<sup>3</sup>. Hård og fast med muslet brud, rides ikke med kniv. Farven kan være sort, grå eller brun. Brunfarvningen skyldes undertiden rustafsætning på overfladen. Forekommer overvejende som centrale dele af flintkorn og flintlag.

Tæt flint forekommer i kvartære grusforekomster over hele landet.

■ *Andre alkalireaktive bjergarter*. Disse afviger fra flint både i udseende og i sammensætning. Der er tale om forkislede substanser. En kort beskrivelse er givet i det følgende.

Kiseller er forholdsvis hårde bjergarter, faste og lagdelte. Farven er grålig til sort, undertiden med rustbrune skorper. De består overvejende af opal og lersubstans. Findes især i Nordjylland.

Kiselmergel er porøse bjergarter, finporet og lette. Farven er lys blåliggrå til lys gulliggrå. De består overvejende af opal samt mindre mængder af ler og kalk. Findes især i Sydøstjylland og i Nordsjælland.

Opalsandsten er en sandsten, hvis kitmasse består af amorf kiseltsyre (opal). Findes i Syddanmark og især i Nordtyskland.

## Betons alkaliindhold

Alkaliforbindelserne i betonen kan stamme fra cementen, grusmaterialerne, støbevand, tilsætningsstofferne og fra omgivelserne. Disse tilskud har ikke lige stor betydning i alle situationer. De enkelte bidrag omtales nærmere i det følgende.

I forbindelse hermed må begrebet »alkali« defineres nærmere, idet det blandt ingeniører dækker over flere begreber.

*Alkali*. I det periodiske system findes stoffer, der benævnes alkalimetallerne. Disse omfatter flere stoffer. For beton er de vigtigste:

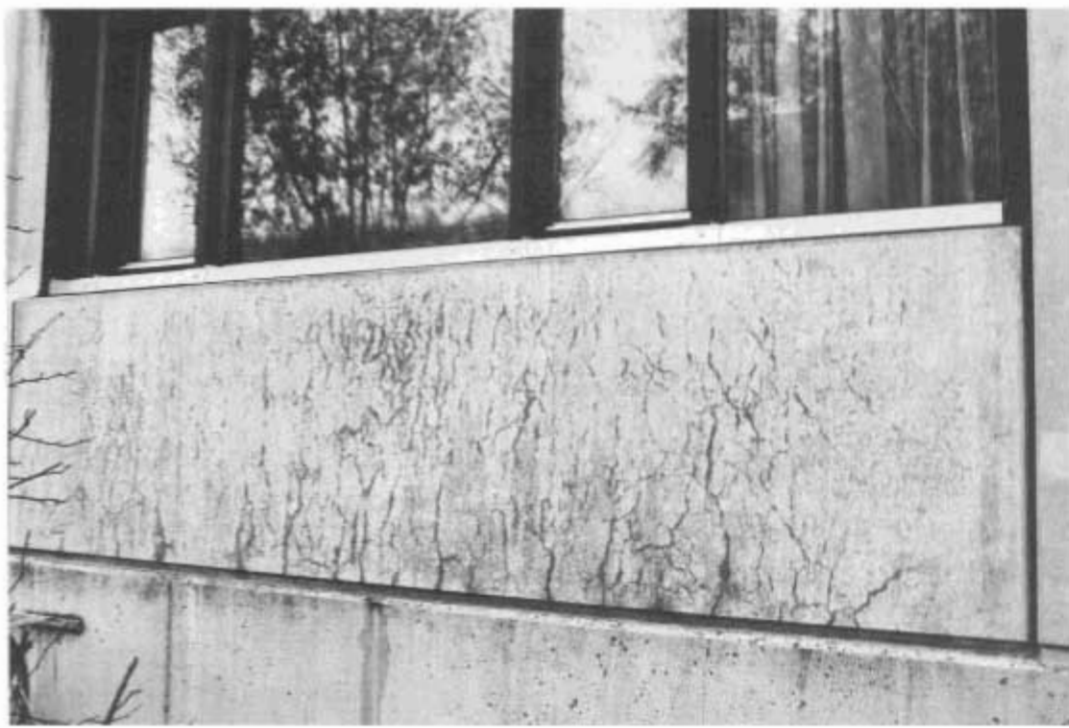
- Natrium (Na, atomvægt 23,99).
- Kalium (K, atomvægt 39,10).

Ved en alkaliforbindelse forstås et salt, der indeholder ioner fra et alkalimetal.

De metalioner, der har betydning for alkalikiselreaktioner, er samtidig de mest almindelige, nemlig  $\text{Na}^+$  og  $\text{K}^+$ . Når indholdet af alkaliforbindelser i et stof eller en opløsning skal beskrives, anvender man begrebet *ækvivalent alkaliindhold*. Derved forstås ækv.  $\text{Na}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$ . I dette udtryk skal  $\text{Na}_2\text{O}$  og  $\text{K}_2\text{O}$  indsættes i vægtprocent. Alkaliindholdet i en cement regnes normalt i vægtprocent, medens alkaliindholdet i en beton normalt regnes i enheden  $\text{kg/m}^3$ .

Begrebet »alkali« anvendes også i en anden betydning, nemlig den, at en opløsning har en *alkalisk reaktion* eller, at man har et *alkalisk (basisk) miljø*. Dermed menes, at der er en høj pH-værdi, dvs. en stor koncentration af hy-

*Figur 8. Skadelige alkalikiselreaktioner i ikke-bærende betonelementer er primært et æstetisk problem. Revnerne er særlig synlige på grund af de mørke rande, der skyldes udsivende alkalikiselgel. Gelen imprægnerer betonens porer, så revnerne synes »våde«. Desuden kan sodpartikler opfanges fra luften og medvirke til at gøre revnernes rande endnu mørkere. Kun hvor alkalikiselreageret beton er udsat for kraftig vandlast (slagregn), kan man observere revner uden mørke randzoner. Er alkalikiselreageret beton beskyttet mod regn, vil geludsivningen ikke bortvaskes. Gelen optræder da som klare dråber lige når de dannes. Senere bliver de hvide. Geldråber kan være farvede af rust fra armeringen og kan optræde med farver fra svagt gul til mørk brun, næsten sort.*



droxylioner  $\text{OH}^-$ . Man siger også, at opløsningen reagerer basisk (farver rødt lakmuspapir blå).

Det kan for mange måske lyde som et paradoks, at porevæsken i beton, der er støbt med lavalkalificement, har lavt alkaliindhold (ækv.  $\text{Na}_2\text{O}$ ) og reagerer stærkt alkalisk (høj pH-værdi pga.  $\text{OH}^-$  fra calciumhydroxid).

*Cement.* Efter certificeringen for cement iht. DS 427 opdeles cementer med hensyn til deres ækvivalente alkaliindhold på følgende måde:

- *Ekstra lavt alkaliindhold.* Indholdet af syreopløselig alkali er under 0,4 vægtprocent. Betegnelse: EA.
- *Lavt alkaliindhold.* Indholdet af syreopløselig alkali ligger mellem 0,4 og 0,6 vægtprocent. Betegnelse: LA.
- *Moderat alkaliindhold.* Indholdet af syreopløselig alkali ligger mellem 0,6 og 0,8 vægtprocent. Betegnelse: MA.
- *Højt alkaliindhold.* Indholdet af syreopløselig alkali er over 0,8 vægtprocent. Betegnelse: HA.

Af danske cementer har hvid portlandcement og lavalkali sulfatbestandig cement et ekstra lavt alkaliindhold. Rapidcement har et moderat alkaliindhold.

I *moderat miljøklasse*, hvor der ifølge definitionerne ikke kommer tilførsel af alkaliforbindelser fra omgivelserne, vil det altså være muligt at vælge en cementtype med et alkaliindhold under den kritiske værdi, se figur 11, svarende til grusets flintindhold, flinttype og flintkornkurve. Det vil kunne sikre imod skadelige alkalikiselreaktioner, men kun i moderat miljøklasse.

Det ækvivalente alkaliindhold i cement er en usikker størrelse. Derfor føres der fra cementfabrikkerne til stadighed kontrol med alkaliindholdet, og der udsendes jævnligt informationsblade om de forskellige cementtypers ækvivalente alkaliindhold.

Det, der har betydning for, om de alkalireaktive partikler i tilslagets sandfraktion angribes, er alkalikoncentrationen i cementpastaens porevæske. Den afhænger af cementens alkaliindhold, betonens cementindhold og v/c-forhold samt af betonens fugtighed.

I *aggressiv miljøklasse* og i *særlig aggressive miljøer*, hvor der er tale om alkalitilførsel fra omgivelserne, vil denne dog dominere i forhold til det tilskud af alkali, der kan komme fra cementen. Derfor er det ikke påkrævet med en lavalkalificement i aggressivt miljø og i særligt aggressive miljøer. Der skal derimod tages andre forholdsregler for at undgå skadelige alkalikiselreaktioner, se figur 12.

*Puzzolan.* Både mikrosilica og flyveaske kan indeholde alkaliforbindelser. Puzzolan består af højreaktiv kisel med meget stor specifik overflade. Derfor har disse alkaliforbindelser ingen reel betydning. Betonnormen DS 411, 3. ud-

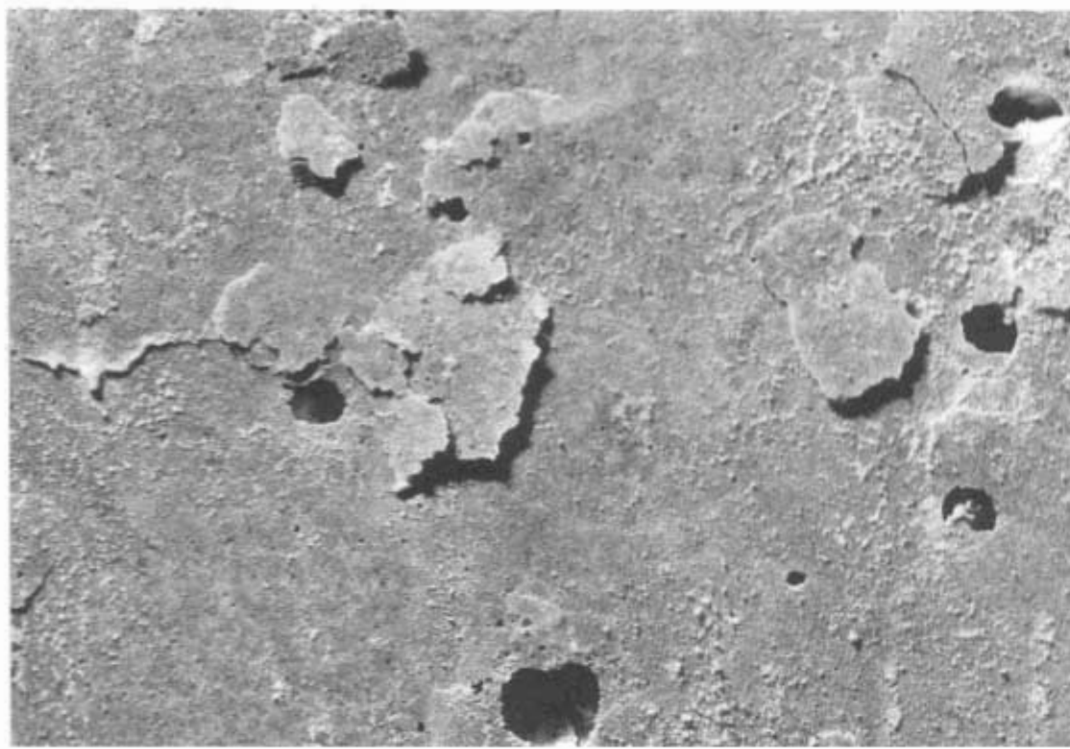
gave, sætter den maksimale grænse for opløselig, ækv.  $\text{Na}_2\text{O}$  til 1,5 vægtprocent i både mikrosilica og flyveaske.

*Tilslagsmaterialer.* Grus, der ikke vaskes med ferskvand, kan indeholde alkaliforbindelser. Sømateriale indeholder således små mængder natriumchlorid,  $\text{NaCl}$ . Sømateriale, der er vasket i havvand, indeholder fortsat natriumchlorid.

*Støbevand.* Andet vand end vandværksvand kan indeholde alkaliforbindelser. Grundvandet har således visse steder i Danmark et højt indhold af natriumioner; så højt, at det ikke kan negligeres i beregningen af betonens ækvivalente alkaliindhold, se Beton-Teknik 10/04/1976.

I dag anvender man ikke havvand eller brakvand som støbevand. Det blev imidlertid accepteret tidligere. Man kunne på den måde få et ganske betydeligt og også skadeligt alkaliindhold i beton. Mørtelprismeforsøg efter ASTM C 227 har vist, at alkalireaktive sandmaterialer, der er uskadelige med lavalcalicement og destilleret vand som støbevand kan blive skadelige, hvis der i stedet for destilleret vand anvendes havvand.

*Figur 9. Alkalikiselgel, der produceres af alkalireaktive partikler umiddelbart under en betonoverflade, kan give anledning til minispringere. Medens frostspringere over porøse artikler, der er større end ca. 4 mm, er hyppigt forekommende, ses minispringere som følge af alkalikiselreaktioner kun over alkalireaktive partikler, der er mindre end ca. 4 mm.*



*Tilsætningsstoffer.* Der findes mange tilsætningsstoffer på det danske marked. En del indeholder alkaliforbindelser. Derfor må man kende alkaliindholdet i de tilsætningsstoffer, der anvendes til betonen, specielt når de anvendes i store mængder. Oplysning om tilsætningsstoffers alkaliindhold kan som regel fås hos leverandøren - hvis ikke, må man skifte leverandør.

*Reaktionsmiljø.* Omgivelserne spiller den væsentligste rolle. I aggressiv miljøklasse og særlig aggressive miljøer kommer der direkte tilskud af alkaliforbindelser fra omgivelserne. Det kan være fra havvandet omkring en havvandskonstruktion, fra badevandet i et svømmebassin eller fra tørsaltning på brobanekonstruktioner, altangange og trapper. Desuden findes der beholdere for salt, fx saltkar på slagterier og saltsiloer.

Normalt regnes en betonfacade til moderat miljøklasse, dvs. fersk/fugtig-tilstand. På Jyllands vestkyst og et godt stykke ind i landet kan storme imidlertid føre så store mængder havsalt med sig, at der kan komme saltbelægnin-ger på betonfacader. Sådanne facader må naturligvis henregnes til aggressiv miljøklasse. I områder, hvor betonfacaden ikke renses af slagregn, kan betonen få et betragteligt alkalitilskud ved diffusion - selv om betonen synes nok så tæt.

I visse konstruktioner kan der blive tale om saltkoncentrationer på grund af fordampning (fx svømmebadsvægge) eller manglende rengøring (fx altangange). Sådanne tilfælde henfører betonnormen til særlig aggressive miljøer. Her er betonnormens almindelige krav normalt ikke tilstrækkelige til at sikre, at man får langtidsholdbar beton.

Ved høj temperatur og stor alkalikoncentration vil selv de mere stabile bjergarter som kvarts, kvartsit og tæt flint ikke være upåvirkede.

## **Fugtighed**

Fugt indgår som en nødvendig betingelse for, at en række nedbrydningsmekanismer kan foregå, herunder også alkalikiselreaktioner. I betonnormens opdeling af miljøets aggressivitet indgår betonomgivelsernes fugtighed derfor som en betydningsfuld parameter. Der er imidlertid ikke nogen klar definition af, hvad der, rent normmæssigt, forstås ved tørt og fugtigt miljø.

Udenlandske forsøg med mørtelprismer lagret i luft med forskellige fugtighedsgrader har vist, at under ca. 80 pct. RF kommer alkalikiselreaktionerne ikke til skadelig udvikling. Disse forsøg er udført med udenlandske, alkalireaktive bjergarter. Der er ikke udført tilsvarende forsøg med danske flinttyper, og det vides derfor ikke om de udenlandske resultater kan overføres direkte til danske forhold, men det er højst sandsynligt.

Selv om disse forsøgsresultater gælder for danske mørtelprismer, skal man dog være varsom med en ukritisk anvendelse. Udendørs beton vil nemlig al-



drig i praksis blive udsat for en konstant fugtighed fra omgivelserne. Fugtigheden vil undergå periodiske svingninger. Typisk vil en betonfacade, en kantdrager på en betonbro og en betonbelægning skiftevis blive udsat for slagregn og udtørring. Dette betyder, at betonens fugtindhold også varierer. Dermed vil porevandets koncentration af alkalihydroxid også variere. Vi ved det ikke, men noget tyder på, at det er ugunstigt med sådanne skiftende fugtforhold, når der er tale om risiko for skadelige alkalikiselreaktioner. Det bedste man kan gøre er derfor at klassificere betons omgivende miljø som betonnormen, dvs. regne med, at al udendørs beton er fugtig.

Der er dog eksempler fra Island på, at en vandafvisende overfladebehandling (impregnering) kan medføre en selvudtørring, idet betonen ikke fugtes af slagregn. Denne udtørring af betonen har medført mindsket hæftighed i alkalikiselreaktionerne.

### **Betydende parametre**

Man hører ofte udtalt, at visse bjergarter er meget reaktive eller mere reaktive end andre. Der findes imidlertid ikke noget veldefineret mål for en bjergarts alkalireaktivitet. Derimod har de pågældende bjergarters mineralogiske sammensætning og kornstørrelsefordeling samt betonens alkaliindhold og fugtighed stor indflydelse på, om der udvikles skadelige alkalikiselreaktioner i betonen. Det, man kan være interesseret i at kende, er:

- *Kritisk indhold af alkalireaktive partikler*, dvs. det mindste indhold af alkalireaktive partikler, der, under de ellers givne omstændigheder, netop er skadeligt.
- *Pessimalt forhold*, dvs. det indhold af alkalireaktive partikler, der medfører størst skade under de givne omstændigheder.
- *Kritisk alkaliindhold*, dvs. det mindste alkaliindhold, der netop er skadeligt under de ellers givne omstændigheder.

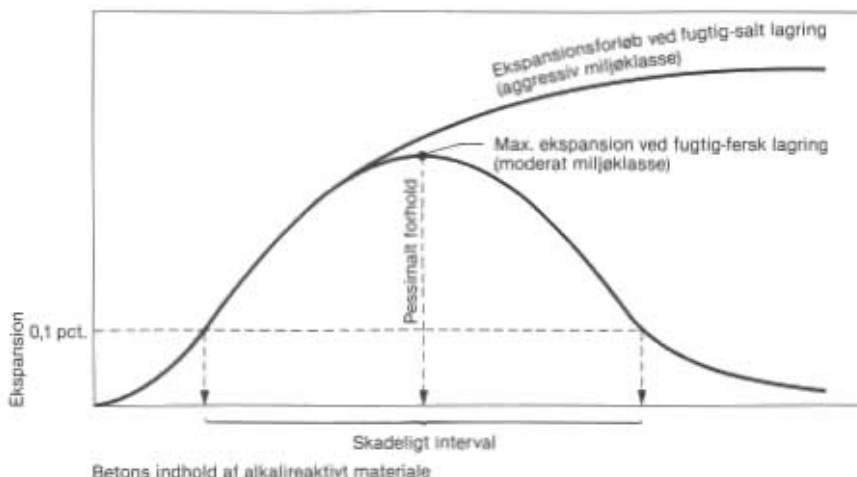
Man er endvidere interesseret i at kende de nævnte tre størrelser i afhængighed af:

- Typen af de alkalireaktive partikler.
- De alkalireaktive partiklers kornstørrelse.
- Betonens (cementens) alkaliindhold.

Disse begreber er illustreret i figur 10 og 11.

De mange mørtelprismeforsøg, som i tidens løb er udført, kan give visse svar på disse sammenhænge, men langt fra helt udtømmende. Den viden, som eksisterer i dag, både fra mørtelprismeforsøg og fra bygværker i praksis, er dog tilstrækkelig til at få et nogenlunde klart billede af skadekriterierne.





Figur 10. Mørtelprismers ekspansion efter en passende lang lagringsperiode ved konstant miljø, således at prismene er kommet i ro, afhænger af sandets indhold af alkalireaktivt materiale.

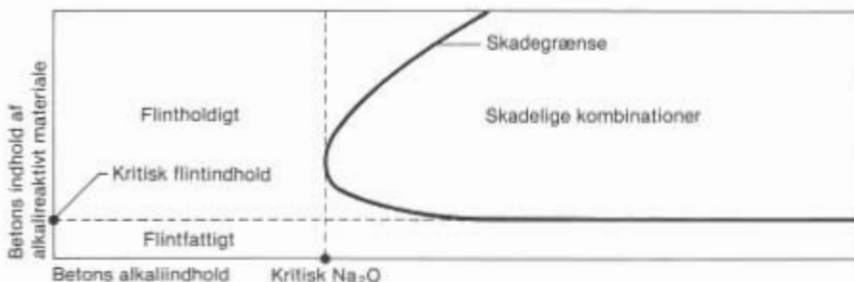
Er sandet inaktivt, er der ingen ekspansion. Med stigende indhold af alkalireaktivt materiale øges ekspansionen. Når ekspansionen bliver større end 0,1 pct., vil revnedannelsen i mørtlen være synlig for det blotte øje. Ekspansionen på 0,1 pct., dvs. synlig revnedannelse, nås normalt ved et alkalireaktivt indhold på ca. 2 pct. i sandet, stort set uafhængigt af de reaktive partiklers kornstørrelse og bjergartstype. Dette er konstateret for sand med kornstørrelser over 1/32 mm. Øges indholdet af reaktive partikler i sandet, vil mørtlens ekspansion også vokse.

Stammer mørtlens alkali alene fra cementen, dvs. at der er en begrænset mængde til rådighed for ekspansionen (moderat miljø), vil ekspansionerne nå et maksimum og derefter aftage med voksende indhold af alkalikiselreaktivt materiale. Det indhold af alkalireaktive partikler, der medfører maksimal ekspansion, benævnes det pessimale forhold. Det interval for alkalireaktivt materiale, der medfører ekspansioner større end 0,1 pct., benævnes det skadelige interval.

Lagres mørtelprismene således, at der kan tilføres ubegrænset alkali fra omgivelserne (aggressivt miljø), vil der ikke eksistere et pessimalt forhold. Ekspansionerne er aldrig aftagende med voksende indhold af alkalireaktivt materiale i sandet.

Lagres mørtelprismene i et miljø med koncentreret alkali (særlig aggressive miljøer) nedsvættes den førnævnte grænse på de 2 pct. noget.

Ret tidligt havde Stanton ad eksperimentel vej fundet de mest betydningsfulde parametre for alkalikiselreaktioners adfærd. Denne viden kan, for beton uden alkalitilskud fra omgivelserne (moderat miljøklasse), sammenfattes på følgende måde:



Figur 11. Risikoen for skadelig alkalikiselreaktion, dvs. reaktioner med revnedannelse til følge, vurderes i denne SBI-anvisning som tilnærmelse ud fra sandets indhold af alkalireaktive partikler og betonens alkaliindhold. For visse kombinationer, som vist i figuren, er risikoen for revnedannelse stor, og man taler om skadelige kombinationer af flint og alkali. Uden for området er risikoen derimod meget lille.

Ved at definere et kritisk flintindhold i sandet og et kritisk alkaliindhold i betonen, kan de farlige kombinationer afgrænses henholdsvis nedadtil og til venstre i figuren. Derved opdeles hele området i fire delområder.

I moderat miljøklasse, hvor der ikke tilføres alkali fra omgivelserne, skal man for ikke at have stor risiko for skadelige alkalikiselreaktioner anvende en betonblending, der kan beskrives som: Alkaliindhold under den kritiske værdi og/eller flintindhold under den kritiske værdi.

I aggressiv miljøklasse og særlig aggressive miljøer, hvor betonen tilføres alkali, vil betonens alkaliindhold før eller senere blive større end den kritiske værdi. For ikke at have stor risiko for skadelige alkalikiselreaktioner, må der anvendes en betonblending, der kan beskrives som: Flintindhold under den kritiske værdi.

- En nødvendig betingelse for, at der kunne opstå skadelige alkalikiselreaktioner var, at sandet indeholdt kiselholdige bjergarter samtidig med, at betonen var støbt med højalkalicement, og at betonen havde en passende fugtighed.
- Sands alkalikiselreaktivitet kunne vurderes ved måling af mørtelprismers ekspansion efter 1 års lagring i 100 °F, dvs. ca. 38 °C, ved mindst 90 pct. RF. Ekspansioner under 0,04 pct. blev betragtet som uskadelige, medens ekspansioner over 0,10 pct. blev betragtet som skadelige (synlige revner). Området ind imellem blev betragtet som tvivlsomt.
- Ved mørtelprismeforsøg blev det påvist, at ekspansionerne voksede med stigende mængde alkalireaktivt materiale indtil en vis værdi (det pessimale forhold) for derefter at aftage. Der skulle være mindst 2 pct. alkalireaktive bjergarter i sandet for at få skadelig ekspansion.
- Ved undersøgelse af betonbygværker og ved mørtelprismemetoden blev det fastslået, at der var en kritisk grænse for cements alkaliindhold. Under denne grænse skete der ingen skadelige alkalikiselreaktioner. Denne kritiske

grænse afhæng af typen af alkalireaktiv bjergart og dennes kornstørrelse. I gennemsnit kunne man regne med et kritisk, ækvivalent alkaliindhold i cementen på ca. 0,60 vægtprocent. Sandet fra Oro Fino, der førte til erkendelsen af alkalikiselreaktioner, havde dog et kritisk, ækvivalent alkaliindhold på 0,45 vægtprocent.

■ Skadelige alkalikiselreaktioner kunne gøres uskadelige ved tilsætning af fintformalede alkalireaktive bjergarter (puzzolan). Alle puzzolaner var dog ikke lige effektive, men deres effektivitet kunne måles med mørtelprismemetoden.

Indvirkningen på alkalikiselreaktioner som følge af ændringer i en af de betydende parametre kan ikke forklares uafhængigt af de andre parametre, da der er tale om et »flerdimensionalt« problem. De betydende parametre er de alkalireaktive partiklers koncentration i betonen, deres kornstørrelse, kornfordeling og type.

Virkningen af disse parametre influeres på væsentlig måde af betonens alkaliindhold, fugttilstand og temperatur.

Når disse parametre omtales enkeltvis eller parvis i det følgende forudsættes det, at de andre parametre er holdt konstante på værdier, der ikke hindrer alkalikiselreaktionernes forløb.

### Indhold af alkalireaktive partikler

Ved alkalikiselreaktion vil hver reaktiv partikel omdannes til et ekspansionscenter i betonen. Jo flere reaktive partikler, der er i betonen og jo mere kvelende gel, der dannes, des mere vil betonen udvide sig, alt andet lige.

*Kritisk indhold af alkalireaktive partikler.* Der kræves en vis mængde alkalireaktive partikler, erfaringsvis 2 vægtprocent af sandet i en mørtel med sammensætningen:

Cement:Sand:Vand = 1:2:0,5 efter vægt

for at ekspansionen bliver så stor, ca. 0,1 pct., at mørtlen revner. Gel kan der ved flyde ud, og man har en øjensynlig ødelæggelse af mørtlen (betonen). De 2 procent benævnes derfor sands kritiske flintindhold.

Som ved alle betonforsøg er der også ved mørtelprismeforsøg tale om stor spredning. Det kritiske indhold af alkalireaktive partikler er imidlertid bestemt ved måling på flere tusinde mørtelprismer. Det viser sig da, at det ikke er muligt at påvise signifikant afvigelse fra Stanton's postulat om, at det kritiske indhold af alkalireaktive partikler er 2 procent af sandet i mørtel 1:2. Det kritiske flintindhold er stort set uafhængig af de alkalireaktive bjergarters type, kornstørrelse og betonens alkaliindhold, når alkaliindholdet blot er over den kritiske værdi.

*Pessimalt forhold.* Med voksende indhold af reaktivt materiale i beton vil antallet af produktionscentre i betonen for kvellende alkalikiselgel øges. Det betyder, alt andet lige, at betonens ekspansion vil vokse. Til reaktionsproduktet, dvs. til alkalikiselgelen, medgår såvel sandets reaktive kisel som betonens alkaliindhold. Er indholdet af reaktivt materiale i betonen derfor meget stort, er der mulighed for, at alkalikiselreaktionen går i stå eller slet ikke kommer i gang, medmindre der er alkalitilførsel fra omgivelserne.

Er der tilførsel af alkali fra omgivelserne, vil reaktionen først standse, når alle alkalireaktive partikler i betonen har reageret. Denne situation har man i aggressiv miljøklasse og særlig aggressive miljøer, hvor alkalitilførsel fx kan komme fra havvand, svømmebadsvand eller tørsaltning.

Når betingelserne er til stede, for at der kan foregå alkalikiselreaktion i beton, og der ikke tilføres alkali fra omgivelserne, vil betons slutekspansion som funktion af betonens indhold af alkalireaktive partikler have et maksimum. Det indhold, der svarer til maksimal slutekspansion benævnes det pessimale forhold, se figur 10.

Som nævnt tidligere, vil der ikke eksistere et pessimalt forhold, hvis der er tilførsel af alkali til betonen.

Værdien af det pessimale forhold afhænger af de alkalireaktive bjergarters type, kornstørrelse og kornfordeling samt af cementens alkaliindhold.

*Skadeligt interval.* I figur 10 er der vist typiske forløb for cementmørtels ekspansion i relation til sandets indhold af alkalireaktive partikler.

De flintindhold, for hvilke der sker ekspansion over 0,1 pct., danner et interval. Dette benævnes det skadelige interval. Som det fremgår af ovenstående, ligger den nederste grænse fast ved 2 pct., medens den øverste grænse afhænger af de alkalireaktive partiklers type og af reaktionsmiljøet, dvs. om der er alkalitilskud fra omgivelserne eller ej.

## **Flints kornstørrelse**

En given mængde alkalireaktivt materiale i beton med passende højt alkaliindhold vil reagere forskelligt alt efter det reaktive materiales kornkurve. Specielt har det betydning, om det reaktive materiale findes i sandfraktionen eller i stenfraktionen.

*Flintfordeling i sand.* Flintets kornfordeling i dansk sand fra kvartære aflejringer varierer naturligvis fra aflejringer til aflejringer. Der er dog tale om en vis systematik i fordelingen af flint i sandet.

Stort set dominerer flint i den mellemfine fraktion, og bidraget til sandets flintindhold fra den fine fraktion er normalt meget lille.

Der er naturligvis afvigelser fra denne tendens. Der findes således enkelte sandforekomster, hvor sandets flintindhold i alt væsentligt hidrører fra den

groveste fraktion (2–4 mm). Det er ofte i de tilfælde, hvor den grove fraktion dominerer sandets kornkurve.

*Kornstørrelsens indflydelse.* Jo mindre flints kornstørrelse er, des flere gel-producerende punkter vil der være i betonen for et givet flintindhold. Alkaliudvalgets mørtelprismeforsøg viste, at hvis sandets flintindhold var skadeligt, så ville den maksimale ekspansion stige med faldende kornstørrelse for flinten, alt andet lige.

Nu repræsenterer den maksimale ekspansion af mørtelprismer ikke et direkte omsætteligt mål for alkalikiselreaktioners skadelighed. Blot alkalikiselreaktioner medfører revnedannelse, er der tale om en skadelig reaktion. Helt uden betydning for revnedannelserne er den maksimale ekspansion dog ikke, men man har aldrig defineret mere nuancerede grader af skadelighed end blot »skadelig« og »uskadelig« alkalikiselreaktion.

### Betons alkaliindhold

For de flinttyper, der blev undersøgt ved Alkaliudvalgets mørtelprismeforsøg, dvs. uden alkalitilskud fra omgivelserne, har man observeret følgende:

- Der findes en nedre grænse for alkaliindholdet, under hvilken alkalikiselreaktionerne er uskadelige. Denne grænse benævnes den kritiske grænse, og er afhængig af de reaktive partiklers type.
- Det kritiske flintindhold er ca. 2 pct. flint uafhængig af alkaliindholdet, blot det er begrænset. Er der tale om ubegrænset alkalitilførsel synes det kritiske flintindhold at nærme sig 1 pct.
- Det pessimale indhold af alkalireaktive partikler er stigende med stigende alkaliindhold.
- Det skadelige intervals øvre grænse er stigende med stigende alkaliindhold.
- Mørtelprismer uden flint, men med kvarts alene som tilslagsmateriale viste stigende ekspansion med stigende alkaliindhold. For et ækv.  $\text{Na}_2\text{O} = 4,62$  pct. viste halvdelen af de undersøgte mørtelprismer ekspansion over 0,1 pct.

Det synes at fremgå af disse og andre tilsvarende forsøg, at ethvert indhold af alkalireaktive partikler over 1 pct. i sandet vil være skadeligt, når der sker uhæmmet tilførsel af alkaliforbindelser fra omgivelserne. Denne hypotese er senere blevet bekræftet af nyere mørtelprismeforsøg ved lagring i koncentreret opløsning af NaCl.

### Puzzolantilsætning

Ved puzzolaner forstås kiselmaterialer, der ikke i sig selv har bindemiddelkarakter, men som tilsat beton i findelt form vil reagere med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ved nor-

male temperaturer og danne tungt opløselige produkter med bindemiddelegenskaber. Puzzolan består af findelt, alkalireaktivt materiale med stor specifik overflade. Derfor vil der foregå en alkalikiselreaktion. Tilsættes en passende stor mængde puzzolan til beton, vil betonens alkalikiselreaktion få et uskadeligt forløb også selv om der er større flintpartikler i sandet. Der vil normalt være tale om puzzolantilsætning svarende til det maksimalt tilladelige indhold iht. DS 411.

Der findes mange, såvel naturlige som kunstige materialer, der har puzzolanegenskaber. I Danmark er der mulighed for at anvende mikrosilica og flyveaske som puzzolan. Begge disse puzzolaner har en vis positiv effekt over for skadelige alkalikiselreaktioner, når der anvendes en passende stor tilsætning, og når betonen ikke får alkalitilskud fra omgivelserne. Puzzolantilsætning kan medføre, at beton får så stor tæthed imod diffusion af alkaliforbindelser, at beton med puzzolan og reaktiv flint kan forblive uskadt selv i omgivelser med høj alkalikoncentration. Det kræver dog en revnefri beton, der er velkomprimeret uden grovporøsiteter og med et meget lavt  $v/c$ -forhold. Derfor er anvendelse af flintfrit eller flintfattigt sand ofte en billigere og mere sikker løsning i aggressivt miljø.

Puzzolaneffekten (her tæthed og styrke) er størst, når der til betonen anvendes en højalkalicerment. Er betonens sandfraktion flintfri, og anvendes puzzolan for at opnå styrke og tæthed, er det altså ikke nogen fordel at anvende en lavalkalicerment, men der kan være andre grunde (sulfatbestandighed) til at bruge den.

### Stenfraktionens indflydelse

Betons stenfraktion har betydning for alkalikiselreaktionens ekspansion og skadelighed på to forskellige måder.

*Alkaliinaktive sten* nedsætter betons ekspansion i forhold til en tilsvarende mørtel, idet kun mørtlen bidrager til ekspansionen. Selv om betonens ekspansion som følge af alkalikiselreaktion derfor kan være lille, kan revnedannelsen alligevel godt være stor i mørtelfractionen og derfor skade betonen.

*Alkalireaktive sten*, fx porøs flint eller tæt flint med porøs skorpe, vil altid reagere med betonens alkaliforbindelser. Er der en passende mængde puzzolan i betonen, vil alkalikiselreaktionen være uskadelig. Er sandet alkalireaktivt, vil alkalikiselreaktionen med sandet dominere. Er sandet alkaliinaktivt, kan porøs flint i stenfraktionen reagere skadeligt ved revnedannelse i og omkring stenene, men ekspansion vil normalt ikke være målelig.

Porøse sten er også skadelige for betonen, når denne kan fryse i vandmættet tilstand. Der er derfor flere grunde til at undgå porøse partikler i stenfraktionen.

## Målemetoder

Den første målemetode, der blev udviklet til vurdering af en bjergarts alkaliaktivitet, var mørtelprismemetoden. Da man på den måde havde fået registreret alle alkalireaktive bjergarter, var det muligt at foretage en bjergartsbestemmelse af en sandprøve og på den måde afgøre, om sandet var alkalireaktivt. Det krævede imidlertid, at det var en geolog, som foretog vurderingen. Derfor søgte mange laboratorier at udvikle metoder, der ad kemisk vej kunne adskille reaktive og inaktive sandforekomster. Ingen af disse metoder har dog vist sig pålidelige nok for danske sandforekomster.

Herefter står mørtelprismemetoden og bestemmelse af sands bjergartsfordeling (petrografering) tilbage som de bedst egnede metoder til danske forhold.

### *Mørtelprismemetoden*

Skadelige alkalikiselreaktioner viser sig i praksis ofte først efter ca. 5 år. Derfor er det nødvendigt med en accelereret prøvningsmetode. Det nærmeste man er kommet »naturen« er mørtelprismeforsøg. Her søger man, alene ud fra betonens mørtel (dvs. med alle korn over 4 mm frasorteret), ved hjælp af små prøvelegemer, vådlagret ved høj temperatur, at få et kvalificeret skøn over den tilsvarende betons egenskaber i det samme miljø.

Teknologisk Institut har introduceret en mørtelprismemetode TI-B51, hvor lagringstemperaturen er 50 °C og hvor mørtelprismerne lagres i en koncentreret opløsning af NaCl.

På grund af den høje temperatur og alkalitilskuddet har det vist sig, at lagringstiden kan begrænses til 8–20 uger.

Denne form for mørtelprismemetode egner sig udmærket til vurdering af sand til beton i aggressiv miljøklasse eller særlig aggressivt miljø. Derimod er den ikke egnet til at vurdere sand til beton i moderat miljøklasse. Det vil være mere hensigtsmæssigt at anvende en lavalkalicement eller puzzolantilsætning, hvis der er tale om flintholdigt sand.

For mørtelprismemetoden gælder det, at hvis mørtelprismerne ikke viser skadelig ekspansion, vil den tilsvarende beton ikke få en skadelig alkalikiselreaktion. Modsat gælder det, at hvis mørtelprismerne får skadelig ekspansion, behøver den tilsvarende beton ikke nødvendigvis få skadelig alkalikiselreaktion; det afhænger af så mange andre forhold i betonens reaktionsmiljø i praksis (fugt, alkalitilførsel, tæthed).

### *Bjergartsanalyse af sand*

Det er muligt at undersøge, om en sandprøve indeholder under eller over 2 pct. af en veldefineret bjergart, fx flint. Kornene sorteres enkeltvis efter type og struktur. Undersøgelsen kan ske fraktionsvis, og med kendskab til sandets kornkurve kan sandets samlede flintindhold beregnes.

Bjergartsanalyse er den hurtigste og sikreste vurderingsmetode for sand til beton. Metoden giver desuden mange andre værdifulde oplysninger om sandet end blot alkalireaktiviteten. Metoden kræver dog, at observatøren er geologisk kyndig og at undersøgelsen foregår på et speciallaboratorium.

### Forholdsregler imod alkalikiselreaktion

*Materialer.* Det er ikke realistisk at foreskrive, at al beton i vådt miljø skal støbes med flintfri tilslagsmaterialer. Ser man på materialerne, er situationen som beskrevet i det følgende.

Sand til betonstøbning kan deles i tre grupper:

- Flintfrit sand, dvs. flintindhold = 0 pct.
- Flintfattigt sand, dvs. flintindhold < 2 pct.
- Flintholdigt sand, dvs. flintindhold > 2 pct.

Enkelte grusleverandører og dermed betonproducenter kan tilbyde flintfrit og flintfattigt sand.

Der er cementtyper med lavt alkaliindhold på det danske marked.

Desuden markedsføres portlandflyveaskecement, der indeholder flyveaske (puzzolan). Der er også mulighed for at få leveret flyveaske og mikrosilika til indblanding i betonen som puzzolantilsætning.

Det princip, der anvendes ved forebyggelse er, at man søger at bryde »RAV-trekanten«, dvs. Reaktivt sand – Alkali – Vand.

I figur 12 er der givet et beslutningsdiagram til vurdering af sand. Hertil knytter der sig efterfølgende kommentarer.

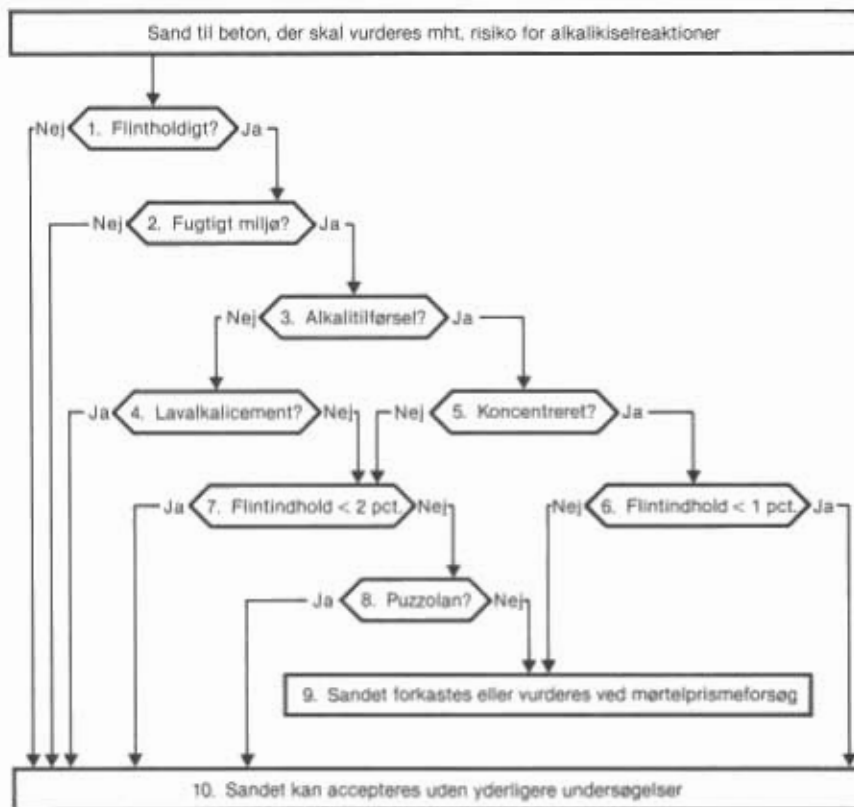
*Passiv miljøklasse.* RAV-trekanten er automatisk afbrudt i et tørt miljø. Der er derfor ikke risiko for skadelige alkalireaktioner i passiv miljøklasse. Det betyder, at man ikke behøver at stille krav til betonens råmaterialer i passiv miljøklasse for at undgå skadelige alkalikiselreaktioner.

Man skal dog være opmærksom på, at al beton, der er placeret indendørs, ikke altid skal henregnes til passiv miljøklasse. Beton i våde rum som fx baderum og svømmebassiner er gode eksempler.

Desuden skal man erindre, at betonelementer, der opholder sig i længere tid på udendørs lagerplads, i den periode skal henregnes til moderat miljøklasse. Får betonelementer alkalikiselreaktioner ved længere ophold på en lagerplads, vil reaktionerne dog standse, når betonelementerne tørrer ud ved anbringelse indendørs, men der kan komme skæmmende revnedannelser.

*Moderat miljøklasse.* Når beton holdes fugtig, og der ikke er alkalitilskud fra omgivelserne, er alkalikiselreaktionernes skadelighed alene styret af spillet mellem sandets indhold af alkalireaktive partikler og cementens alkaliindhold.





Der er da tre muligheder for at bryde RAV-trekanten (fugt er altid til stede). Det kan ske ved at anvende én af følgende muligheder:

- Flintfrit eller flintfattigt sand uden krav til cementens alkaliindhold (se figur 13).
- Lavalkalificement uden krav til sandets indhold af alkalireaktive partikler (se figur 14).
- Puzzolantilsætning (passende høj) uden krav til sandets indhold af alkalireaktive partikler og cementens alkaliindhold.

Til alkalireaktive partikler i moderat miljøklasse regnes i dag kun porøs flint og opalkalk. Hvis cement i Danmark fremover får over 0,8 pct. ækv.  $\text{Na}_2\text{O}$  bør også de tættere flintsorter regnes alkalireaktive.

Figur 12, modstående side. Beslutningsdiagram til vurdering af risiko for alkalikiselreaktion.

1. Sandets flintindhold kan oplyses af grusproducenten eller bestemmes på et speciallaboratorium. Der markedsføres både flintfrit sand og flintfattigt sand med dokumentation.

2. Til fugtigt miljø henregnes moderat og aggressiv miljøklasse samt særlig aggressive miljøer efter DS 411, 3. udgave.

4. Ved en lavalkalicement forstås her en cement med ekstra lavt alkaliindhold, dvs. med ækv.  $\text{Na}_2\text{O} \leq 0,4$  pct. Af danske cementer har hvid cement og lavalkali sulfatbestandig cement ekstra lavt alkaliindhold. Andre danske cementer er ikke lavalkalicement.

5. Ved tørsaltning kan smeltevandet blive koncentret. Ved kapillaropsugning af saltvand (havvand og svømmebadsvand) og fordampning kan alkalikoncentrationen i betonen blive så stor, at der er tale om særlig aggressivt miljø. Samme forhold er gældende i havvandskonstruktioners tidevandszone.

6. Ved alkalitilførsel fra kilder med høj alkalikoncentration (tørsaltning) regnes både tæt og porøs flint for alkalireaktive.

7. Når der anvendes cement med ækv.  $\text{Na}_2\text{O} \leq 0,8$  pct. eller hvis alkalitilførsel sker fra havvand uden opkoncentrering, regnes kun porøs flint at være alkalireaktiv.

8. Til puzzolaner henregnes fx mikrosilica og flyveaske. Puzzolaners effektivitet kan måles ved mørtelprismeforsøg. Den nødvendige mængde puzzolan afhænger af sandets flintindhold og cementens alkaliindhold. En tilsætning af mikrosilica på ca. 10 pct. af betonens cementindhold vil som regel være tilstrækkelig.

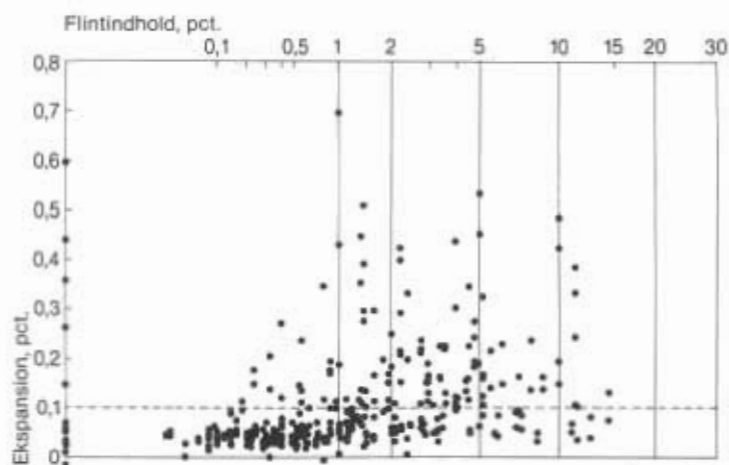
9. På basis af ovenstående vurdering må sandet forkastes, medmindre det undersøges ved mørtelprismemetoden TI-B51. Ved ekspansion under 0,1 pct. efter 8 uger, kan sandet anvendes til moderat og aggressivt miljø. Ved ekspansion under 0,1 pct. efter 20 uger, kan sandet anvendes til særlig aggressive miljøer (tørsaltning).

10. Der stilles normalt andre krav til sandet end alkaliaktivitet, fx med hensyn til kornkurve, humusindhold, lerindhold og vandbehov.

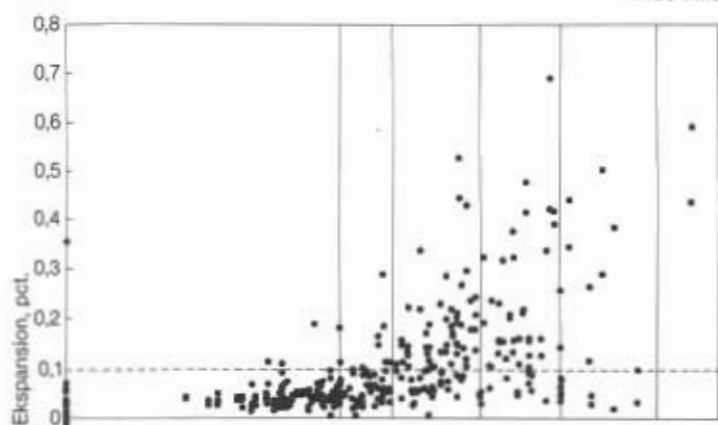
**Aggressiv miljøklasse.** Når beton holdes fugtig, og der er alkalitilskud fra omgivelserne, er alkalikiselreaktionernes skadelighed alene styret af sandets indhold af alkalireaktive partikler, eventuelt af porøse skorper på tæt flint i stenfraktionen.

Der er da kun én mulighed for at bryde RAV-trekanten (fugt og alkali er altid til stede). Det må ske ved at anvende flintfrit eller flintfattigt sand (max. 2 pct. alkalireaktive partikler) uden nødvendigvis at stille krav til cementens alkaliindhold.

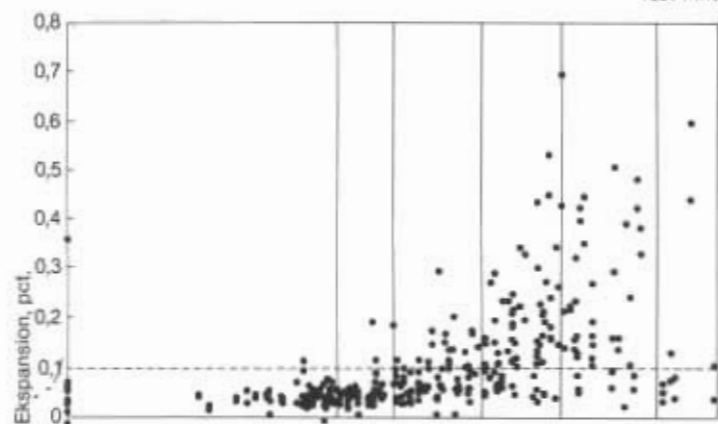
Man hører ofte det synspunkt, at man kan anvende puzzolan til at hæmme alkalikiselreaktionernes skadelighed, selv om der er alkalitilførsel fra omgivelserne. En puzzolans virkemåde er at »opbruge« betonens alkaliindhold ved at være mere reaktiv end sandets flintpartikler. Da der er alkalitilskud fra



Porøs flint

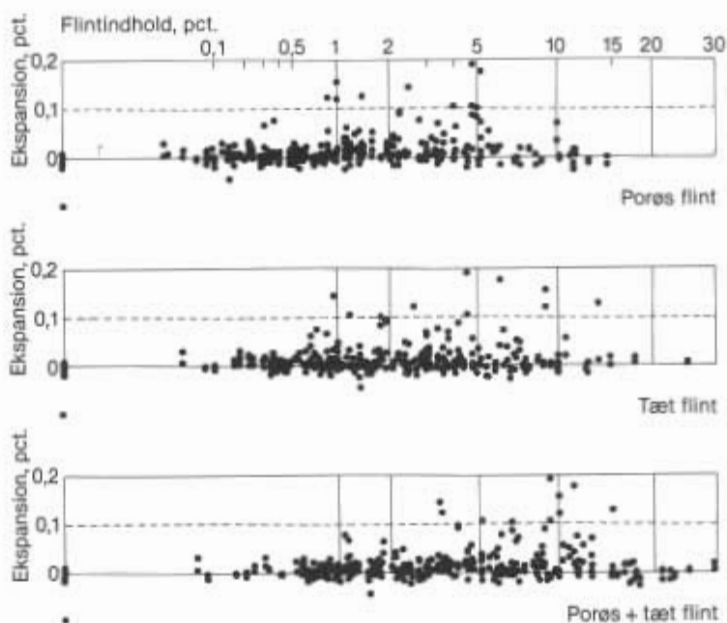


Tæt flint



Porøs + tæt flint

Figur 13, modstående side. Alkaliudvalget undersøgte sandprøver fra danske grusgrave ved mørtelprismeforsøg (Plum 1961). Mørtelprismernes ekspansion ved anvendelse af højalkalificement (ækv.  $\text{Na}_2\text{O} = 1,15$  pct.) er i figurerne sat i relation til sandets flintindhold, øverst den porøse flint, i midten den tætte flint og nederst hele flintindholdet, dvs. summen af tæt og porøs flint. Det ses, at en begrænsning af sandets indhold af porøs flint til max. 2 pct. ikke sikrer imod ekspansion over 0,1 pct. (skadelig). En begrænsning af sandets totale flintindhold (tæt og porøs) til max. 2 pct. mindsker risikoen for skadelig ekspansion. Er flintindholdet over 2 pct., er risikoen for skadelig ekspansion meget stor, men dog ikke sikker. Det kan også udtrykkes: En nødvendig betingelse for at få skadelig alkalikisereaktion er, at sandets flintindhold er over 2 pct., men denne betingelse er ikke tilstrækkelig. (Bredsdorff, Poulsen & Spøhr, 1967a).



Figur 14. Alkaliudvalget undersøgte sandprøver fra danske grusgrave ved mørtelprismeforsøg (Plum 1961). Mørtelprismernes ekspansion ved anvendelse af lavalkalificement (ækv.  $\text{Na}_2\text{O} = 0,40$  pct.) er i figurerne sat i relation til sandets flintindhold, øverst den porøse flint, i midten den tætte flint og nederst hele flintindholdet, dvs. summen af tæt og porøs flint. Det ses, at risikoen for ekspansion over 0,1 pct. (skadelig) er meget begrænset, uafhængigt af sandets flintindhold. (Bredsdorff, Poulsen & Spøhr, 1967a).

betonens omgivelser i aggressiv miljøklasse, kan man frygte, at puzzolanefekten før eller siden bliver »nedslidt«.

Vandtæt beton, som DS 411 kræver for beton i aggressiv miljøklasse, vil ikke hindre, at betonen vil få et alkalitilskud ved diffusion. Forebyggelse af skadelige alkalikiselreaktioner i aggressiv miljøklasse kan kun ske ved at sikre, at sandets indhold af alkalireaktive partikler er under den kritiske værdi. Anvendes der ikke flintfrit sand eller flintfattigt sand (max. 2 pct. alkalireaktive partikler), regnes sandet kun anvendeligt, såfremt det har en mørtelprismekspansion under 0,1 pct. efter 8 ugers lagring.

*Særlig aggressivt miljø.* Når der anvendes tørsalte, eller der på anden måde bliver tale om saltkoncentration i betonen, er ikke alene betonen, men også armeringen udsat. Betonnormens krav er da ikke tilstrækkelige til at sikre en holdbar beton. Kravene skal derfor skærpes i forhold til kravene i aggressiv miljøklasse.

Det skal erindres, at betonnormen indirekte skriver, at det nøje bør overvejes, om armerede betonkonstruktioner i særlig aggressive miljøer kan anvendes med rimelig holdbarhed. Det stiller store krav til projekterende, udførende, tilsyn og bygherre at bygge i et særlig aggressivt miljø – men det kan lade sig gøre, og betonen kan udmærket få en tilfredsstillende lang funktions-tid.

Der er forskel mellem beton i aggressiv miljøklasse og beton i særlig aggressivt miljø med hensyn til alkalitilskud fra omgivelserne. I særlig aggressive miljøer har beton mulighed for at få et så højt alkaliindhold, at det ville svare til, at der var blevet anvendt en højalkalicerment. Det betyder, at de tættere flinttyper skal regnes alkalireaktive. Anvendes der ikke flintfrit sand (i praksis her max. 1 pct. alkalireaktive partikler, dvs. tæt og porøs flint), regnes sandet kun anvendeligt såfremt det har en mørtelprismekspansion under 0,1 pct. efter 20 ugers lagring.

### *Alkalicarbonatreaktion*

Dolomitreaktioner eller alkalicarbonatreaktioner er reaktioner mellem betonens alkalimetaller (K og Na) og visse carbonatbjergarter i tilslagsmateriale-erne.

Alkali findes i cementen i klinkerminerale eller som alkalisulfater i små mængder (sædvanligvis under 1 vægtprocent). Dertil kan der komme alkali fra støbevandet og fra tilslaget, når der anvendes uvaskede sømaterialer. Endelig kan der komme et betragteligt tilskud fra tørsaltning.

Den reaktive carbonatbjergart er en lerholdig dolomitisk kalksten. Makroskopisk viser bjergarten ofte mørke, brune eller grå farver og muslet brud (som i flint). Under mikroskopet ses det, at bjergarten består af rhombefor-

mede krystaller af dolomit,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Krystallernes gennemsnitlige diameter er under 0,025 mm. De ligger i en grundmasse af calcit,  $\text{CaCO}_3$  (med korntørrelser mellem 0,002 og 0,006 mm), og fint fordelt ler. Denne mikrostruktur er typisk for de ekspansive carbonatbjergarter.

Dolomit kan forekomme i danske istidsaflejringer. Desuden importerer Danmark hvid dolomit (blandt andet fra Sverige) til specielle betontechniske formål (terrazzogulve, hvid beton mv.). Der er dog ikke i litteraturen omtalt skadelige dolomitreaktioner i beton, hverken i Sverige eller i Danmark. Ved betonbyggeri i udlandet, fx i Mellemøsten, er dolomitreaktioner derimod en risiko, som danske ingeniørfirmaer skal være opmærksomme på.

### Betingelser for reaktion

Der kræves altid fugt, for at reaktionen kan foregå, men det er ikke alle bjergarter med de ovennævnte mineraler, der reagerer ekspansivt ved kontakt med alkali. De reaktive bjergarter har en ret specifik sammensætning. Den ovennævnte mikrostruktur er en nødvendig forudsætning, men forholdet mellem dolomit og calcit skal også være nær 1:1 (Hadley, 1960) og lermineraller skal være til stede i mængder mellem ca. 7 og 25 volumenprocent (Hadley, 1961 og 1964). Til gengæld har det vist sig, at selv små områder med den kritiske sammensætning og mikrostruktur er nok til at gøre bjergarten alkalireaktiv (Dolar-Mantuani, 1964).

### Reaktion

Røntgendiffraktionsstudier af ekspansive bjergarter, der har reageret med opløsninger af alkalimetallhydroxider, viser:

- Aftagende indhold af dolomit,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ .
- Stigning i calcitindhold,  $\text{CaCO}_3$ .
- Dannelse af brucit,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ .

Reaktionen er en nedbrydning af dolomitten. Det angives (Hadley, 1964), at dolomitten ved nedbrydningen omdannes til brucit  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , calcit og alkalicarbonat.

I beton vil alkalicarbonaten endvidere reagere med portlandcementens hydratiseringsprodukter under dannelse af alkalihydroxid.

Da alkalihydroxidet gendannes, vil reaktionen kunne fortsættes med stadig nedbrydning af dolomitten.

### Betydende parametre

På basis af laboratorieforsøg har det vist sig, at følgende parametre har betydning for reaktionsforløbet:

- Bjergartstypen.
- Mineralernes kornstørrelse.
- Tilslagets indhold af reaktive partikler.
- Betonens alkaliindhold.
- Betonens fugtighed.

### Skadebillede

Ekspansionen sker under fugtige forhold og i reaktionszoner om de aktive aggregater. Revnerne udvikler sig inden for disse zoner og fører til netværk af revner meget lig skadebilledet ved alkalikiselreaktioner.

På trods af detaljeret arbejde er det endnu ikke fastslået hvilken mekanisme, der ligger bag ekspansionen. Det kan ikke udelukkes, at der er tale om flere samvirkende reaktioner.

Det kan dog anføres, at nedbrydning af dolomitten i sig selv ikke giver anledning til ekspansion, da summen af de kendte faste produkters volumen er mindre end dolomittens initialvolumen (Swenson og Gillott, 1974). Ved reaktionen nedbrydes bjergartens mikrostruktur, og det giver leret mulighed for at ekspandere ved vandoptagelse (Swenson og Gillott, 1974). Vandoptagelse er konstateret, ligesom der er fundet snæver sammenhæng mellem lerindhold og ekspansion (Hadley, 1964). Ydermere er der indikationer for, at der dannes vandabsorberende mineraler ved dolomitreaktionen (Walker, 1974. Buck, 1975).

Inden for visse carbonatbjergarter opstår der reaktionsrande ved bjergartens reaktion med den omgivende cementpasta. Randene ses som mørke misfarvninger i carbonatkornenes rand eller lige umiddelbart inden for randen.

Randene kaldes henholdsvis positive eller negative, alt efter det relief de viser, når en poleret overflade ætzes med svag saltsyre.

### Målemetoder

Der er udviklet forskellige prøvningsmetoder til at afsløre de ekspansive carbonatbjergarter, fx CSA A 23.2.24 »Test for Alkali Aggregate Reaction«, og ASTM C 586. Begge prøvningsmetoder giver pålidelige resultater, men kun ved lang tids prøvning.

Den hurtigste metode er at undersøge udvalgte prøver under mikroskop. Den reaktive mikrostruktur kan genkendes af en petrograf ved undersøgelse af polerede overflader af bjergarten efter ætsning med svag syre (Walker, 1978).

## Forholdsregler imod alkalicarbonatreaktion

Hvis det ikke er muligt at undgå de reaktive korn i tilslaget foreslås det at tage en eller flere af følgende forholdsregler (Walker, 1978):

- Fortynding af reaktivt tilslag med inaktive grusmaterialer.
- Undgå store, reaktive partikler.
- Anvendelse af lavalkalicement.
- Fugtbeskyttelse, fx med membran.

Ved fortynding menes, at de grove fraktioner (partikler over ca. 16 mm) i tilslaget skal tilsættes inaktivt materiale, således at det reaktive materiale udgør mindre end 20 vægtprocent, eller at det reaktive materiale udgør mindre end 15 vægtprocent af det totale (grove og fine) tilslag.

Da ekspansionen har vist sig at være ligefrem proportional med korndiameteren, bør reaktivt materiale specielt i de store kornstørrelser altid undgås.

De reaktive bjergarters ekspansion har vist sig at øges med cementens alkaliindhold. Da de mest reaktive bjergarter ekspanderer skadeligt allerede ved 0,4 vægtprocent alkali i cementen, er det ikke tilstrækkeligt at nøjes med lavalkalicement som eneste forholdsregel, specielt ikke, hvor der er mulighed for alkalitilskud fra omgivelserne. Hvor det er muligt, vil en nedsættelse af cementindholdet i betonen være en indlysende forholdsregel, men det må ikke derved gå ud over betonens tæthed.

Da reaktionen kun foregår i fugtigt miljø, vil en effektiv fugtbarriere altid være en effektiv forholdsregel.

## Litteratur

- 6th International Conference, 1983. Alkalis in Concrete, Research and Practice, DBF, København.
- R. E. Bisque and John Lemish. 1960 a. Effect of Illitic Clay on Chemical Stability of Carbonate Aggregates. Concrete Quality Control. Aggregate Characteristics and the Cement Aggregate Reaction. Bulletin No. 275. Highway Research Board. pp. 32-38.
- R. E. Bisque and John Lemish. 1960 b. Silification of Carbonate Aggregates in Concrete. Physical and Chemical Properties of Cement and Aggregates in Concrete. Bulletin No. 239. Highway Research Board. pp. 41-55.
- P. Bredsdorff, Ervin Poulsen, Hanne Spøhr, 1967. Experiments on Mortar Bars Prepared with Selected Danish Aggregates. Alkaliudvalgets Progress Report I 2, SBI/ATV.
- P. Bredsdorff, Ervin Poulsen and H. Spøhr. 1967. Experiments on Mortar Bars Prepared with Representative Sample of Danish Aggregates. Alkaliudvalgets Progress Report I 3. SBI/ATV. København.



- A. D. Buck, 1975. Control of Reactive Carbonate Rocks in Concrete. Technical Report C-75-3, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Corps of Engineers.
- S. Chatterji, 1978. An accelerated method for the detection of alkali-silica reactivities of aggregates. C & CR vol. 8, London.
- S. Chatterji, 1979. The role of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in the breakdown of Portland cement concrete due to alkali-silica reaction. C & CR vol. 9, London.
- S. Chatterji, N. Thaulow, P. Christensen, 1982. Puzzolanic Activity of Byproduct Silica-Fume from Ferro-Silicon Production. C & CR vol. 12, London.
- A. Damgaard Jensen, P. Christensen, 1980. Undersøgelse og klassifikation af danske sandforekomster. Byggeteknik TI, København.
- A. Damgaard Jensen, S. Chatterji, P. Christensen, N. Thaulow, H. Gudmundsson, 1982. Studies of Alkali-Silica Reaction part I, A Comparison of two Accelerated Test Methods. C & CR vol. 12, London.
- L. M. M. Dolar-Mantuani. 1964. Expansion of Gull River Carbonate Rocks in Sodium Hydroxide. Symposium on Alkali-Carbonate Rock Reactions. Record No. 45. Highway Research Board. pp. 178-195.
- D. W. Hadley. 1961. Alkali Reactivity of Carbonate Rocks-Expansion and Dedolomitization. Proceedings. Highway Research Board. Vol 40. pp. 462-474.
- D. W. Hadley. 1964. Alkali Reactivity of Dolomitic Carbonate Rocks. Symposium on Alkali-Carbonate Rock Reactions. Record No. 45. Highway Research Board. pp. 1-19.
- G. M. Idorn, 1967. Durability of Concrete Structures in Denmark, DABI, Holte.
- Y. Kondo, 1953. Research on Alkali-Aggregate Reaction of Japanese Rocks, Tokio.
- Gunnar Larsen, 1959. Petrografisk undersøgelse af betongrus - hvorfor og hvordan. Beton-Teknik nr. 3.
- John Lemish, F. E. Rush, and C. L. Hiltrop. 1958. Relationship of Physical Properties of Some Iowa Aggregates to Durability of Concrete. Air Voids in Concrete and Characteristics of Aggregate. Bulletin No. 196. Highway Research Board. pp. 1-16.
- John Lemish, R. J. Harwood, C. L. Hiltrop, and M. A. Werner. 1963. Compositional Variations Associated with Carbonate Aggregate Reactions. Properties of Concrete. Record No. 3, Highway Research Board. pp. 1-8.
- B. Mather, 1948. Petrographic Identification of Reactive Constituents in Concrete Aggregate. ASTM vol. 48. Philadelphia.
- K. Mather, 1952. Applications of Light Microscopy in Concrete Research. Proc. Symposium on Light Microscopy. ASTM STP 143.

- H. G. Midgley, 1951. Chalcedony and Flint. *Geol. Mag.*
- R. C. Mielenz, 1946. Petrographic Examination of Concrete Aggregates. *Geo. Soc. America. Bull., USA.*
- Poul Nerenst, 1952. *Betonteknologiske studier i USA. SBI studie nr. 7, København.*
- H. Olafsson, N. Thaulow, 1981. Alkali-Silica Reactivity of Sands. Nord-test, Byggeteknik TI, København.
- N. M. Plum, Ervin Poulsen, G. M. Idorn, 1957. Foreløbig oversigt over alkalireaktioner i beton i Danmark. *Ingeniøren nr. 27/28.*
- N. M. Plum, 1961. Alkaliudvalgets vejledning 1. Foreløbig vejledning i forebyggelse af skadelige alkalikiselreaktioner i beton. Alkaliudvalget, SBI.
- T. C. Powers, H. H. Steinour, 1955. An Interpretation of Some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction, part 1 and 2. *ACI Journal proc. vol. 51. USA.*
- C. H. Scholer, G. M. Smith, 1952. Use of Chicago Fly Ash in Reducing Cement-Aggregate Reaction. *Proc. AIC vol. 48. Detroit.*
- T. E. Stanton, 1940. Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate. *Proc. ASCE, New York.*
- E. G. Swenson and J. E. Gillott. 1974. Alkali-Carbonate Rock Reaction. *Cement Aggregate Reactions. Record No. 525, Transportation Research Board. pp. 21-40.*
- H. E. Vivian, 1947. *Studies in Cement-Aggregate Reaction. CSIR Australia Bull. 229.*
- H. N. Walker. 1974. Reaction Products in Expansion Test Specimens of Carbonate Aggregates. *Cement-Aggregate Reactions. Record No. 525. Transportation Research Board. pp. 28-37.*
- H. N. Walker. 1978. Chemical Reactions of Carbonate Aggregates in Cement Paste. *ASTM spec. tech. publ. 169B. pp. 722-43.*
- D. O. Woolf, 1952. Reaction of Aggregate with Low-Alkali Cement. *Public Roads vol. 27.*

# Carbonatisering

Når nystøbt beton efter vådlagring udsættes for atmosfærisk luft, vil der først ske en vis udtørring. Når betonoverfladen derefter har fået en passende fugtighedsgrad, vil luftens kuldioxid,  $\text{CO}_2$ , dernæst kunne trænge ind i betonens overladelag ved diffusion. Her vil det reagere kemisk med cementpa-staen og forkalke denne. Denne carboniseringsproces kan kaldes kemisk ældning af betonoverfladen. Man kan også sige, at der dannes en vejrhud i betonen.

Denne vejrhud er normalt tættere end den oprindelige, ucarboniserede beton. For *uarmet beton* er vejr huden derfor en ekstra beskyttelse imod andre påvirkninger udefra; en slags overfladeimprægnering. Den forkalkede betonoverflade har imidlertid ikke en rustbeskyttende virkning på indstøbt armering, sådan som ucarboniseret beton har det. Derfor må det sikres, at carboniseringsdybden i *armeret beton* i fugtigt miljø er mindre end armeringens dæklag i bygværkets stipulerede funktionstid.

På grund af disse forhold er det kun interessant at se nærmere på carbonatiseringen af armeret beton. Ved proportionering af beton til armeret beton, der ikke befinder sig i passivt miljø, skal man sikre sig, at carbonatiseringen ikke når dybere end armeringens dæklagstykkelse i bygværkets stipulerede funktionstid. For eksisterende betonbygværker, hvor det ved eftersyn er konstateret, at carboniserings hastigheden er større end forventet, skal man sikre sig, at carbonatiseringen kan bremses.

Disse emner behandles i det følgende.

## Carboniseringsproces

Betons carbonatisering er ikke en enkelt kemisk proces. Det er et samspil af forskellige processer. Det kan derfor være praktisk at opdele vejr hudens dannelse og nedbrydning i fire stadier, nemlig:

- Diffusion af kuldioxid ind i betonen, stadium 1.
- Optagelse af kuldioxid i porevæsken, stadium 2.
- Neutralisering af betonen, stadium 3.
- Udludning af calcit fra betonoverfladen, stadium 4.

### *Diffusion*

Beton er porøs og hygroskopisk, dvs. at beton tillader både dampdiffusion og kapillarsugning. Når beton tørrer ud efter en hærtningsperiode, hvor den har været vandlagret, vil vandfyldte porer i betonen delvis tømmes, så der til sidst

sker en brydning af porevæskens sammenhæng. Der vil dog altid være et porevæskelag tilbage på porevæggene. Det er i de største porer, at denne brydning sker først. Det skyldes, at porevæsken er bundet til porernes overflade med kræfter, der er større jo mindre porernes rørdiameter er.

Derefter er der adgang for atmosfærisk luft, med dens indhold af kuldioxid og vanddamp, til at trænge ind i betonen ved diffusion.

### *Optagelse*

Kuldioxid, der således trænger ind i betonens porer, vil opløses i porevæsken (vandfilmen på porevæggene). Denne optagelse vil foregå, indtil der har indstillet sig en ligevægt mellem kuldioxidindholdet i poreluften og i porevæsken.

Det meste kuldioxid, der optages i porevæsken, vil være fri  $\text{CO}_2$ . En lille mængde kuldioxid vil dog opløses i porevæsken og søge at gøre den sur.

### *Neutralisering*

Oprindelig er porevæsken alkalisk med en pH-værdi på over 12,5. Ved hydratisering af cement er der dannet både calciumhydroxid  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  og alkalihydroxiderne  $\text{NaOH}$  og  $\text{KOH}$ . Calciumhydroxid er tungtopløseligt og udfældes som krystaller, der benævnes portlandit. Alkalihydroxiderne er derimod letopløselige.

På grund af porevandets høje alkalitet vil der udskilles calciumforbindelser, herunder calciumcarbonat  $\text{CaCO}_3$  som krystaller. Disse benævnes calcit.

Calciumforbindelserne er i ligevægt med den (lille) mængde  $\text{Ca}^{++}$ , der findes i porevæsken. Når  $\text{CaCO}_3$  udfældes, forskydes denne balance, men genoprettes ved at nye calciumforbindelser opløses. Denne proces vil fortsætte og porevæskens pH-værdi vil stort set være uforandret. Først når al portlandit (calciumhydroxid) er opløst, har reageret og er udfældet som calcit, vil porevæskens pH-værdi falde. Derefter er betonlaget blevet neutraliseret.

Denne neutraliseringsproces, dvs. omdannelse af al  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , kræver en vis mængde  $\text{CO}_2$  pr.  $\text{m}^3$  beton. Denne mængde er afhængig af den dannede portlandit, dvs. afhængig af cementens type, betonens cementindhold og eventuel anvendelse af puzzolan (fx flyveaske eller mikrosilica).

### *Udludning*

Det store årlige forbrug af fossile brændstoffer producerer ikke alene kuldioxid. Det store indhold af svovl og kvælstof frigøres også ved forbrænding, iltes og opløses i regn og sne på samme måde som kuldioxid. Derved dannes den sure regn, som foruden kuldioxid også indeholder svovlsyre og salpetersyre.

Ved påvirkning fra den sure regn vil pH-værdien i betonoverfladens pore-

væske falde yderligere end svarende til neutralisation ( $\text{pH} = 7$ ). Der er målinger af regnvands pH-værdi på ca. 3,5. Det betyder, at porevæsken bliver calciumcarbonatopløsende. Der er altså tale om et syreangreb fra den sure regn. Dette syreangrebs styrke afhænger af den sure regns syrekonzentration, og om de dannede salte af syren er let eller tungt opløselige. De let opløselige vil føres bort af regnen og åbne plads for nye angreb og dermed en løbende udludning; se kapitlet om syreangreb. Stærkt udludede betonoverflader ses fx på betonskorstene og betonoverflader, der er belastet med rindende regnvand (dårlig vandafledning), og i betonrør udsat for blødt, kulsurt vand. Betongulve i bryggerier kan ligeledes skades kraftigt af udludning.

### *Imperfektioner*

Carbonatiseringsprocessen eller neutralisationen følger betonoverfladens imperfektioner. Fx kan carbonatiseringen lokalt trænge dybt ned i betonen via en revne eller en sammenhængende grovporøsitet.

Overgangen mellem de forskellige zoner er ikke skarp. Der sker nemlig såvel stofvandring som fugtvandring i beton. Det påvirker carbonatiseringsprocessen.

### *Carbonatiseringshastigheden*

Carbonatiseringsprocessen kan regnes at følge Fick's første lov, se bilaget »Diffusionsteori«. Efterhånden som carbonatiseringsfronten skrider frem, forbruges der en vis masse  $\text{CO}_2$  pr. volumenenhed beton. Dette forbrug betegnes  $m_0$ . Er luftfugtigheden  $RF$ , temperaturen  $T$  og luftens kuldioxidkoncentration  $C_0$  konstant, fås af Fick's første lov den kendte kvadratrodsformel for carbonatiseringsdybden

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

I dette udtryk er  $t$  betonens alder, dvs. den tid, hvor betonen har været udsat for carbonatisering. Størrelsen  $K$  benævnes førstårscarbonatiseringen og denne størrelse afhænger af  $C_0$ ,  $m_0$ ,  $T$ , diffusionskoefficienten  $D$  og luftens relative fugtighed  $RF$ .

### *Temperatur*

Det var i det foregående forudsat, at temperaturen var holdt konstant. Det er en kendt regel, at en kemisk reaktionshastighed øges til det dobbelte, når temperaturen øges med ca.  $10^\circ\text{C}$ . Denne regel kan anvendes, vel at mærke, når fugtigheden holdes konstant. En øgning af temperaturen, fra fx en nordvendt betonfacade til en sydvendt facade, medfører dog ofte også en betydningsfuld ændring i fugtforholdene.

I tropiske og subtropiske klimaer kan carbonatiseringshastigheden være 4

til 5 gange så stor som i Danmark, hvis ellers fugtighed, kuldioxidkoncentration og betonrecept samt arbejdsudførelse er ens.

### *Fugtighed*

Neutraliseringen af betonen og den efterfølgende forkalkning kræver tilstedeværelse af vand. Der er to ekstreme tilfælde for porerne, nemlig helt vandfyldte kapillarporer (dvs. stadium 1 findes ikke) og helt tørre (dvs. stadium 2 findes ikke). I ingen af disse tilfælde sker der carbonatisering.

Nu er fuldstændig udtørring ikke mulig i hverken inden- eller udendørs miljø. Selv ved 20 pct. RF vil der være en vandfilm på porevæggene, men den er meget tynd. Med en fugtighed omkring 60 pct. RF vil der være gunstige forhold for både stadium 1, 2 og 3 af carbonatiseringsprocessen. Under og over denne værdi er der et mærkbart fald i carbonatiseringshastigheden. I figur 15 og 16 vises eksempler på carbonatisering af henholdsvis cementmørtel og beton. Det ses, at der er maksimal carbonatisering ved en fugtighed på 60 pct. RF for beton.

I figur 17 er carbonatiseringsforløbet gennem 16 år vist for beton under forskellige miljøbetingelser. Det ses, at beton, der udsættes for slagregn, viser mindre carbonatiseringsdybder end tilsvarende beton, der nok befinder sig udendørs, men som er beskyttet imod regn.

Man kan forledes til at tro, at beton ikke carbonatiseres indendørs (passiv miljøklasse), fordi man aldrig ser rustskader. Fugtigheden indendørs vil ofte ligge mellem 50 pct. RF og 60 pct. RF. Det betyder, at betonen vil carbonatisere. Der kræves imidlertid en væsentlig højere fugtighed for at armering kan ruste. Derfor må et indendørs miljø, hvor fugtigheden er under 60 pct. RF karakteriseret som passiv miljøklasse efter betonnormen DS 411, 3. udgave.

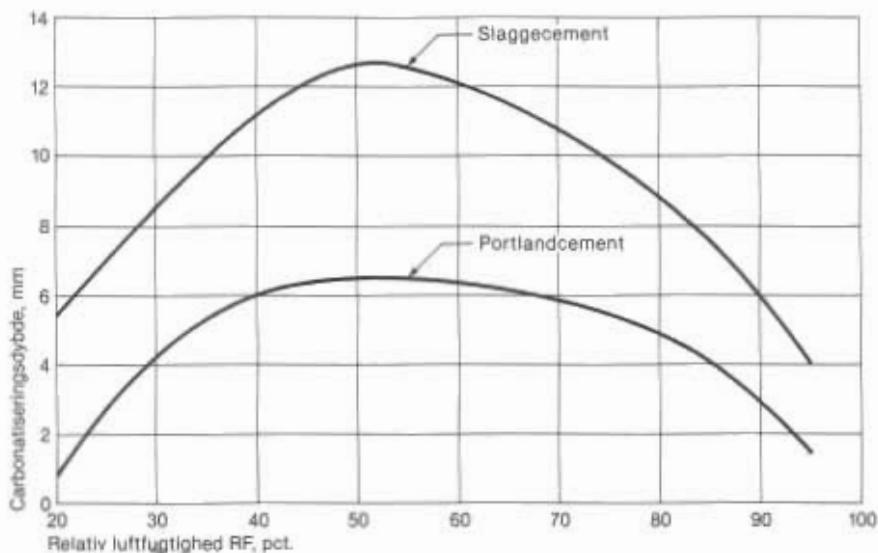
### *Kuldioxidkoncentration*

Carbonatiseringshastigheden vokser med luftens kuldioxidkoncentration. Dette gælder imidlertid ikke ved meget høje kuldioxidkoncentrationer, idet den producerede vandmængde kan fylde kapillarporerne og hindrer videre carbonatisering.

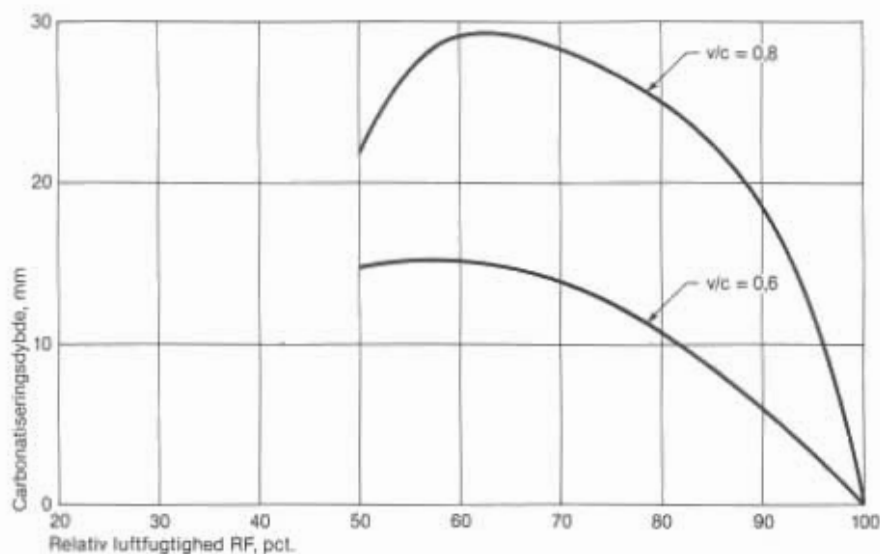
Høj kuldioxidkoncentration, fx i fabriksområder, kan øge carbonatiseringshastigheden mærkbart. Beholdere med foderstoffer kan have en stærkt øget kuldioxidkoncentration, der ligeledes øger carbonatiseringshastigheden.

### *Vand/cement-forhold*

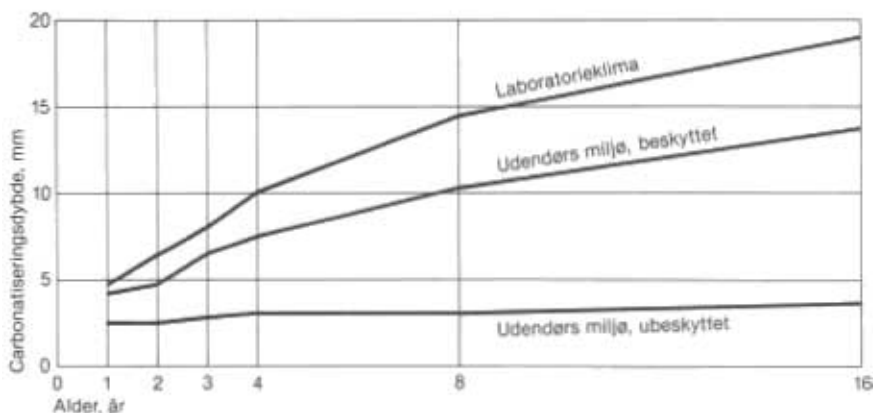
Porøsiteten hos betons cementpasta kan opdeles i to bidrag, nemlig fra kapillarporer og fra gelporer. Porøsitet fra gelporer og kapillarporer har ikke lige stor betydning for diffusion af kuldioxid i beton. Kapillarporerne er grovere (130–500 Å) end gelporerne (15–20 Å) og betyder derfor mest. Cementgelen er



Figur 15. Carbonatiseringsdybde hos cementmørtel med  $v/c = 0,6$  og to forskellige cementtyper (portlandcement og slaggecement) efter 2 års ophold i luft med naturligt indhold af kuldioxid, temperatur  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  og varierende fugtighed. Prøvelegemerne blev lagret 7 døgn under vand før eksponering. (Wierig, 1984).



Figur 16. Carbonatiseringsdybde hos beton med  $v/c = 0,6$  og  $v/c = 0,8$  efter 16 års ophold i luft med naturligt indhold af kuldioxid, temperatur  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  og med varierende fugtighed. (Wierig, 1984).



Figur 17. Carbonatiseringsdybde hos beton i afhængighed af miljøforhold. Der er tale om gennemsnitsværdier for 27 betoner, hvor der blev anvendt 9 forskellige cementtyper og cementindhold fra 230 kg/m<sup>3</sup> til 390 kg/m<sup>3</sup> samt  $v/c = 0,6$ . (Wierig, 1984). Det udendørs miljø havde følgende årsgennemsnit: Temperatur ca. 9 °C, fugtighed ca. 78 pct. RF, regnperiode ca. 160 døgn/år, sneperiode ca. 30 døgn/år. I laboratoriet var der 20 °C og 65 pct. RF (øverste kurve).

porøs med en meget høj specifik overflade. I udendørs miljø, hvor betons carbonatisering har interesse, kan gelporerne regnes vandfyldte, dvs. at kuldioxiddiffusion gennem gelporer kan negligeres.

Det vides, at variation i  $v/c$ -forholdet, uafhængigt af hydratiseringsgraden, har en markant indflydelse på kapillarporøsiteten og dermed på kuldioxiddiffusionen og betonens carbonatisering. Med voksende  $v/c$ -forhold stiger kapillarporøsiteten og dermed carbonatiseringhastigheden, alt andet lige.

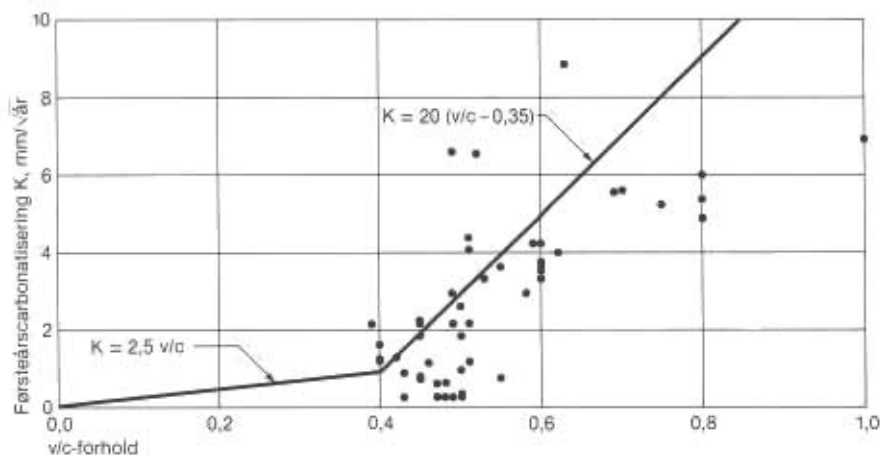
For beton, vådlagret i mindst 28 døgn ved en temperatur på ca. 20 °C og  $v/c > 0,4$  kan man regne med, at hydratiseringsgraden er over 75 vægtprocent. Ved 100 pct. hydratisering kan beton kun carbonatisere, når  $v/c > 0,4$ . Laboratorieundersøgelser og carbonatiseringsmålinger på betonbygværker i udendørs miljø viser da også, at faktoren  $K$  i formelen  $x = K\sqrt{t}$  vokser markant for  $v/c > 0,4$ . I figur 18 er målinger af sammenhørende værdier af  $K$  og  $v/c$  vist. Der er stor spredning, og det viser, at andre forhold end  $v/c$ -forholdet har indflydelse. Til praktisk brug vil man dog, når  $v/c > 0,40$ , kunne regne med en (øvre) karakteristisk carbonatiseringsdybde, der med tilnærmelse er givet ved

$$K = 20 (v/c - 0,35)$$

som er indtegnet på figur 18. Er  $v/c < 0,40$  er carbonatiseringsdybden meget lille. Som tilnærmelse kan man, på den sikre side, regne med, at

$$K = 2,5 v/c$$





Figur 18. Observationer for førsteårscarbonatisering  $K$  i afhængighed af  $v/c$ -forhold i udendørs miljø for beton. (Vejdirektoratet, 1980. Meyer, Wierig & Hausmann, 1967).

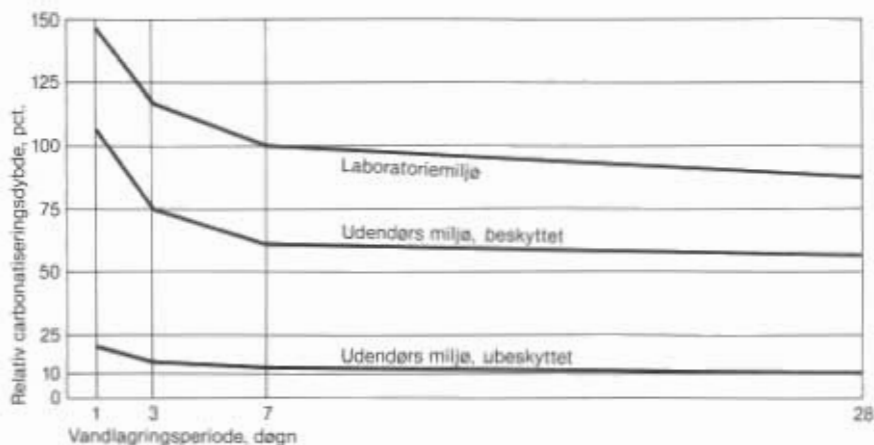
De observationer, som er afbildet i figur 18, stammer dels fra undersøgelse af betonbygværker, dels fra betonprismer, der er støbt og lagret under realistiske betingelser.

Anvendelsen af ovenstående formler kræver, at betonen er vellagret med stor hydratiseringsgrad og fri for grovporøsiteter som følge af mangelfuld komprimering samt fri for termorevner og svindrevner (plastisk svind og udtøringsvind).

### Lagring

Betons carboniseringshastighed for en given værdi af  $v/c$ -forholdet vokser med aftagende hydratiseringsgrad, alt andet lige. Fuld hydratisering opnås aldrig i betons overfladelag (armeringens dæklag), hvis der tidligt sker en hel eller delvis udtørring. Det betyder, at betonen begynder at carbonisere medens den er porøs på grund af ringe hydratiseringsgrad. Er betonen derimod vandmættet de første 28 døgn, vil betonen ikke kunne carbonisere i den periode. Sker der en udtørring efter 28 døgn og er  $v/c > 0,40$ , vil hydratiseringsgraden være større end 75 pct.

I figur 19 er vist indflydelsen af betonens lagringsbetingelser på betonens carbonisering. Ud ad absicseaksen er betonens vandlagringsperiode (under vand) angivet. Ud ad ordinataksen er den relative carboniseringsdybde efter 16 år angivet, idet 100 pct. svarer til en vandlagring på 7 døgn ved 20 °C og derefter lagring ved 20 °C og 65 pct. RF. Det ses, at øget vandlagringsperiode nedsætter betons carboniseringshastighed.



Figur 19. Den relative carbonatiseringsdybde efter 16 år for forskellige vandlagringsperioder efter udstøbningen gældende for forskellige miljøforhold. Carbonatiseringsbetingelser: Betonene har haft  $v/c = 0,60$  og cementindhold  $310 \text{ kg/m}^3$ . Carbonatiseringsdybden er sat i relation til carbonatiseringsdybden hos beton, der er vandlagret i 7 døgn i laboratoriemiljø med  $20^\circ\text{C}$  og 65 pct. RF. (Wierig, 1984).

Udsættes beton for meget tidlig udtørring og carbonatisering, og er betonen derefter i fugtlige vægt med omgivelser, der har en relativ fugtighed på 50–70 pct. RF, vil det forøge carbonatiseringsdybden væsentligt. Det kan ændre carboniseringsformlen til

$$x = x_0 + K \sqrt{t}$$

hvor  $x_0$  afhænger af, hvornår betonen udsættes for carbonatisering (momentancarbonatisering). Starter carbonatiseringen straks efter en meget tidlig af-formning af betonen, vil  $x_0$  typisk være 1–3 mm. Der er eksempler på, at let frysning af den friske beton (isnåle i betonen) har medført  $x_0 = 10 \text{ mm}$ .

Varmehærdning af beton kan give en noget større kapillarporøsitet end hærdning ved  $20^\circ\text{C}$  eller lavere (Higginson, 1961). Det skulle betyde, at førsteårscarbonatiseringen  $K$  kan være større for varme- og damphærdnede betonelementer end beton støbt på stedet, alt andet lige.

#### Cementindhold

Ved udledning af carboniseringsformlen  $x = K \sqrt{t}$ , se bilaget »Diffusions-teori«, findes udtrykket for førsteårscarbonatiseringen at være

$$K = \sqrt{2 DC_0/m_0}$$

Heri er  $m_0$  masseforbruget af  $\text{CO}_2$  pr. volumenenhed beton for at omdanne portlandit  $\text{Ca(OH)}_2$  til calcit  $\text{CaCO}_3$ .  $C_0$  er luftens koncentration af  $\text{CO}_2$  og

$D$  er diffusionskoefficienten for kuldioxidtransport. Denne opbygning af  $K$  viser, at betons cementindhold må have indflydelse på  $K$ , idet cementpastaens portlanditmængde vokser med betonens cementindhold. For en given værdi af  $v/c$ -forholdet, kan betonens cementindhold imidlertid kun variere inden for snævre grænser. Det er derfor ikke muligt at se indflydelsen fra cementindholdet på  $K$ , fx i figur 18, når man tager hensyn til spredningen pga. andre parametres indflydelse.

Det er påvist (Meyer, 1968), at betonens cementindhold og cementtypen kan have en mærkbar indflydelse på førsteårscarbonatiseringen  $K$ .

### *Cementtype*

De fleste carbonatiseringsmålinger er udført i udlandet. I figur 18 er der plottet data fra såvel udenlandske som danske observationer, og der er ikke skellet mellem, om der har været anvendt dansk eller udenlandsk portlandcement, idet det ikke ved denne undersøgelse har været muligt at påvise forskel med hensyn til værdien af  $K = x/\sqrt{t}$ .

### *Tilslagstype*

Tilslaget har kun indflydelse på carbonatiseringshastigheden, når det medfører større åben porøsitet. Visse typer let tilslag har vist sig at kunne øge carbonatiseringshastigheden (Hobbs, 1964).

## **Målemetoder for carbonatiseringsdybder**

Der foretages normalt periodiske eftersyn af betonbygværker for at kunne vurdere behov for vedligehold og reparation. Derfor må man have målemetoder, således at carbonatiseringsdybder kan måles, såvel på bygværker som på udtagne prøver. Da det neutraliserede (carbonatiserede) betonoverfladelag er karakteriseret ved ændring i mineralogisk sammensætning, kemisk reaktion (alkalitet) og permeabilitet, bygger de kendte metoder på en måling af ændringsgraden af disse parametre. Anvendte metoder i praksis har fortrinsvis været:

- Måling af alkalitet ved indikatorvæske.
- Bestemmelse af calcit i tyndslib ved observation i gennemfaldende, polariseret lys.

### *Indikatorvæske*

Der findes flere stoffer, der i opløsning har den egenskab, at de får forskellig farve, afhængig af opløsningens pH-værdi. Disse stoffer kan bruges som indikatorvæsker, når en væskes eller opløsnings pH-værdi skal bestemmes.

Carbonatiseringsprocessen i betons overfladelag bevirker blandt andet, at betonens porevæske ændrer pH-værdi. Der er ikke tale om en brat ændring, men om et forløb, der afspejler forskellige omdannelseszoner i betonens overfladelag (vejrhud).

Det, der har interesse ved eftersyn af bygværker, er at bestemme den dybde, fra hvilken porevandets pH-værdi er større end 9,5-10. Der findes flere indikatorer til dette formål. Phenolphtalein er mest udbredt som indikator i Danmark, jævnfør figur 20 og 21. Den giver en registrering af neutralisationszonen, der dog ikke medtager hele omdannelseszonen.

Der findes blandingsindikatorer, der giver en farveskala således, at overfladelagets pH-profil kan optegnes.

### *Tyndslib*

Anvendelse af indikatorvæske kan angive, om der er sket en ændring i pH-værdien og ikke mere. Ønsker man derimod viden om ændringer i vejrhudens mineralogiske sammensætning og morfologi, specielt revnedannelser og op-

*Figur 20. Carbonatisering af beton, der er 114 år gammel. Carbonatiseringsdybden er tydeliggjort ved påsprøjtning af indikatorvæsken phenolphtalein. I litteraturen postuleres, at carbonatiseringsdybden har en øvre grænse (Schiessl, 1976). Denne konklusion har dog ingen praktisk betydning, da grænseværdien, hvis den eksisterer, er større end krævet betondæklag over armering i beton i moderat miljøklasse.*



løsningsprocesser, får man den bedste information ved undersøgelse af tyndslib af betonens vejrhud.

Undersøgelse af betons neutralisationszone har ofte relation til påtænkt vedligehold eller reparation. Det kan i den forbindelse blive afgørende for holdbarheden af efterfølgende vedligehold/reparation, at man også kender kvaliteten af den ucarboniserede beton (er sandet alkalireaktivt, er betonen frostfast?). En kvalitetsvurdering af vejrhuden og den bagved liggende beton kan kun bedømmes af en betonpetrograf på basis af tyndslib.

### Forholdsregler imod carbonatisering

Armeret beton kan i moderat og aggressiv miljøklasse beskyttes imod dybtgående carbonatisering (større end armeringens dæklag) i bygværkets stipulerede funktionstid på to principielt forskellige måder:

- Valg af betonsammensætning, lagringsbetingelser og udstøbningsteknik, der ved tæthed sikrer en passende lav carboniseringshastighed.
- Valg af en carboniseringsbremsende overfladebehandling, uden krav til betonsammensætning.

Ved nybyggeri er begge metoder, eller kombinationer heraf, mulige. I forbindelse med vedligehold er kun den sidste metode brugbar. Vælges overfladebehandling, skal der regnes med vedligehold og eventuel fornyelse fra tid til anden.

### Betonproportionering

Den carboniseringsformel, der er opstillet i det foregående, kan anvendes til beregning af det nødvendige  $v/c$ -forhold for en urevnet og velkomprimeret beton i moderat eller aggressiv miljøklasse. Derved forstås en værdi af  $v/c$ -forholdet under hvilken armeringens dæklag ikke gennemcarboniserer i bygværkets stipulerede funktionstid. Der er principielt mulighed for at beregne sammenhørende værdier af nødvendige  $v/c$ -forhold og nødvendige armeringsdæklag  $c_s$ . Som regel anvendes dog ved projekteringen minimalkravene til dæklagene, sådanne som de er angivet i DS 411, 3. udgave. Derfor er det i praksis det nødvendige  $v/c$ -forhold, der skal bestemmes.

Den carboniseringsformel, der er opstillet, giver en øvre karakteristisk værdi for carboniseringsdybden

$$x_k = K \sqrt{t}$$

Her kan førsteårscarbonatiseringen  $K$  regnes at være

$$K = \begin{cases} 20 (v/c - 0,35) & \text{for } v/c \geq 0,4 \\ 2,5 v/c & \text{for } v/c \leq 0,4 \end{cases}$$

Sættes  $x_k < c_s$ , findes

$$v/c < \begin{cases} 0,35 + 0,05 c_p/\sqrt{t} & \text{for } c_p/\sqrt{t} \geq 1 \\ 0,4 c_p/\sqrt{t} & \text{for } c_p/\sqrt{t} \leq 1 \end{cases}$$

Formlen er behæftet med usikkerhed, jævnfør figur 22. Desuden er de involverede parametre usikre størrelser. Det betyder, at der må tages hensyn til disse usikkerheder, fx ved at der anvendes regningsmæssige værdier (som i statikken). Der findes ikke en normeret praksis herfor. Derfor er det op til den enkelte projekterende, hvor stor sikkerhedsmargin der skal regnes med. Jo større økonomisk konsekvens, der er ved reparation i bygværkets stipulerede funktionstid, des større sikkerhedsmargin bør der regnes med.

Når den nødvendige værdi af  $v/c$ -forholdet således er fastlagt som en maksimalværdi, skal den tilstræbte middelværdi (proportioneringsværdi) for be-

*Figur 21. Hvis ellers beton er velkomprimeret og revnefri, har  $v/c$ -forholdet en afgørende indflydelse på carboniseringshastigheden. Disse to betoncylindre er ca. 9 måneder gamle og har været udsat for samme (indendørs) miljø. Betonen til venstre har  $v/c < 0,4$ , og betonen til højre har  $v/c > 1,0$ . Carboniseringsdybden er tydeliggjort ved påsprøjtning med indikatorvæsken phenolphthalein.*



210 liters - litres (e)

tonen fastlægges. Det sker ud fra kendskabet til kontrolafsnittets og stikprøvens størrelse samt en estimering af eller kendskab til spredningen på betonens  $v/c$ -forhold, se bilaget »Sikkerhed mod nedbrydning«, side 179.

Denne procedure har kun interesse i moderat miljøklasse. I passiv miljøklasse har carbonatisering ingen betydning. I aggressiv miljøklasse og i særlig aggressive miljøer er den nødvendige værdi af  $v/c$ -forholdet bestemt af andre mere krævende forhold (fx chloridangreb).

Foruden krav til  $v/c$ -forholdet er det vigtigt at sikre god vådlagring af betonen for at nedsætte carboniseringshastigheden mest muligt.

### *Carboniseringsbremser*

For at kunne nedsætte carboniseringshastigheden i en betons overfladelag, må man søge at fjerne en eller flere af de nødvendige betingelser for, at carboniseringsprocessen kan finde sted. Disse nødvendige betingelser er permeabel beton, kuldioxid  $\text{CO}_2$  og fugtig, men ikke vandmættet beton.

Carboniseringsbremsende overfladebehandling kan i princippet være opbygget således, at den

- tætner betonoverfladen og derved hindrer kuldioxid i at trænge ind i betonens poresystem,
- medfører en passende udtørring af betonen.

En tætning af overfladen med en membran eller en malingsfilm vil kunne hindre både  $\text{CO}_2$  og  $\text{H}_2\text{O}$  i at trænge ind i betonen. Samtidig hæmmes dog også fordampningen af vand fra betonen. Hvis der er tilførsel af fugt fra bagveje, kan der opstå kritisk mætning af betonen. Det kan medføre frostskafer i vinterperioder. Malinger, der er diffusionsåbne over for vanddamp, vil som regel også være åbne over for kuldioxid.

En overfladebehandling, der gør porevæggene i betonens cementpasta vandskyende uden at tætte porerne ville være idealet. Regnvandet ville da ikke blive suget ind, hvorimod betonens fugtighed ville kunne fordampe.

Ved imprægnering med silikone kan man imidlertid *ikke* hindre kuldioxid-diffusion. Silikoneimprægnering må derfor suppleres med en behandling, der nedsætter kuldioxiddiffusionen. Denne overfladebehandling behøver dog ikke at være diffusionstæt over for  $\text{CO}_2$ , fordi der samtidig anvendes en vandafvisende silikoneimprægnering. De ugunstige fugtbetingelser for carboniseringsprocessen sammen med mindre tilgang af  $\text{CO}_2$  vil som regel være fuldt tilstrækkelige til, at der kan opnås en rimelig funktionstid for bygværket, uden at armeringens dæklag carboniserer igennem.

Der må stilles nogle krav til en vandafvisende og kuldioxiddiffusionshæmmende overfladebehandling, for at de kan være egnede i praksis. Disse krav er:

- Indtrængningen skal være dyb for at give en langvarig beskyttelse.
- Der må ikke ske misfarvning af betonoverfladen.
- Overflademidlet skal være alkalibestandigt og tørre hurtigt, således at det ikke samler snavs.
- Nedbrydningen skal ske meget langsomt (bestandig over for vejr, vind, vand og ultraviolet lys).

Opdelt i hovedtyper har man midler, der

- reagerer kemisk med cementpastaen,
- imprægnerer cementpastaen pga. kapillarsugning, og medfører tætning eller udtørring af cementpastaen,
- danner film uden at reagere med eller indsuges af cementpastaen.

*Figur 22. Facader af armeret beton er udsat for carbonatisering i tørre perioder. I perioder hvor facaden bliver vandmættet som følge af slagregn standser carbonatiseringen, jvf. figur 17. Faktoren  $K$  i carbonatiseringsformlen gælder for ensartet klimapåvirkning (fugt og temperatur). Derfor vil konstanten  $K$  i carbonatiseringsformlen  $x = K\sqrt{t}$  være en usikker størrelse. Dæklagene  $c_s$  over armeringen i en facade er ligeledes en usikker størrelse. Det betyder, at carbonatiseringstidspunktet bestemt ved  $x = c_s$  også bliver en usikker størrelse. Det kan observeres på store ensartede betonfacader.*





De bedste vandafvisende midler er silaner og siloxaner. Disse imprægneringsmidler kan påføres helt friske (våde) betonoverflader. De er så letflydende, at de trænger dybt ind i betonens porestruktur. De har derfor en lang holdbarhed. Silaner og siloxaner omdannes i beton til silikone.

Behandlingen skal altid ske på en ren betonoverflade og bør påføres to gange, vådt i vådt for at undgå helligdage.

I forbindelse med en vandafvisende siloxan imprægnering kan der anvendes en overfladebehandling af siloxanlasur. Det er en opløst akrylharpix, fx methylmethakrylat eller butylmethakrylat (stigende tæthed). Denne overfladebehandling vil hæmme kuldioxid diffusionen, men ikke være helt tæt, og det er specielt vigtigt over for dampdiffusion. Siloxanlasur bør påføres i to omgange for at undgå helligdage med et behandlingsinterval på 24 timer.

### *Carbonatiseringsbremsers parametre*

For at kunne udregne carbonatiseringshastigheden i beton, der er overfladebehandlet med en carbonatiseringsbremse, må man definere et brugbart mål for den carbonatiseringsbremsende effekt. Det mål, der har vundet indpas, er overfladebehandlingens ækvivalente betontykkelse  $R_b$ .

Både beton og overfladebehandling (film eller imprægnering) virker carbonatiseringsbremsende, dvs. giver modstand imod diffusion af  $\text{CO}_2$  ind i materialet. Denne diffusion kan regnes at følge Fick's første lov, se bilaget »Diffusionsteori«. Ved en stationær tilstand vil diffusionen (flux) gennem et materiale, der har diffusionskoefficienten  $D$ , lagtykkelse  $d$  og koncentrationsforskel  $C_0$  være givet ved

$$q = DC_0/d$$

Specielt for en overfladebehandling, der har en lagtykkelse  $d_f$  og en diffusionskoefficient  $D_f$  findes følgende flux:

$$q_f = D_f C_0 / d_f$$

For at kunne sammenligne forskellige overfladebehandlinger indbyrdes med en dimensionsløs parameter indføres kuldioxidfri, stillestående atmosfære ved normalbetingelserne som reference. Denne »normalluft« har en diffusionskoefficient på

$$D_a = 14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

En overfladebehandlings diffusionsmodstandsfaktor defineres som

$$\mu_f = D_a / D_f$$

dvs. det antal gange luftens diffusionskoefficient er større end overfladebe-

handlingens. På tilsvarende måde defineres et betonlags diffusionsmodstandsfaktor som

$$\mu_b = D_a/D_b$$

Diffusionsteoretikere har defineret begrebet »ækvivalent lufttykkelse«. Derved forstås tykkelsen af det luftlag, der med samme koncentrationsforskel har samme flux som den betragtede carbonatiseringsbremse. For en overfladebehandling fås således

$$q = D_f C_0/d_f = D_a C_0/d_{fa}$$

Heraf findes overfladebehandlingens ækvivalente lufttykkelse til

$$\text{ækv. } d_{fa} = d_f D_a/D_f = \mu_f d_f$$

For beton fås tilsvarende den ækvivalente lufttykkelse som

$$\text{ækv. } d_{ba} = \mu_b d_b$$

Betonteknologer har defineret begrebet *en overfladebehandlings ækvivalente betontykkelse*. Derved forstås tykkelsen af et betonlag, der med samme koncentrationsforskel har samme flux som overfladebehandlingens. Den ækvivalente betontykkelse benævnes  $R_b$  og findes af følgende udtryk:

$$q = \frac{D_a C_0}{\mu_f d_f} = \frac{D_a C_0}{\mu_b R_b}$$

Heraf findes den ækvivalente betontykkelse som

$$R_b = d_f \mu_f / \mu_b$$

#### *Stabile carbonatiseringsbremser*

Carbonatiseringsdybden  $x$  for beton med en carbonatiseringsbremsende overfladebehandling (med ækvivalent betontykkelse  $R_b$ ) kan findes som

$$x = -R_b + \sqrt{R_b^2 + 2tC_0 D_b/m_0}$$

Havde betonen ikke været overfladebehandlet, ville carbonatiseringsdybden i samme tid  $t$  have været

$$x_u = \sqrt{2tC_0 D_b/m_0} = K \sqrt{t}$$

Indsættes dette i ovenstående fås

$$x = -R_b + \sqrt{R_b^2 + x_u^2}$$

Dette kan også skrives som

$$\text{nødv. } (R_b/x_u) = 0,5 (x_u/x - x/x_u)$$

Ønskes  $x \ll x_u$  er  $x/x_u \cong 0$  og man finder da, at

$$\text{nødv. } (R_b/x_u) \cong 0,5 x_u/x$$

Ønskes fx, at den overfladebehandlede beton skal have en carbonatiseringsdybde, der er 10 pct. af den ubehandlede i samme tidsrum, er  $x_u/x = 10$ . Det betyder, at overfladebehandlingens ækvivalente betontykkelse mindst skal være  $R_b = 5x_u$ , dvs. 5 gange carbonatiseringsdybden i den ubehandlede beton i samme tidsrum.

Den tid  $t_c$ , det tager at gennemcarbonatisere armeringens dæklag  $c_s$ , når betonen er overfladebehandlet er åbenbart bestemt af ligningen

$$c_s^2 + 2c_s R_b - 2t_c D_b/m_0 = 0$$

Havde betonen været ubehandlet, ville gennemcarbonatiseringstiden have været  $t_u$ , bestemt ved

$$c_s^2 - 2t_{cu} D_b/m_0 = 0$$

eller

$$t_{cu} = (c_s/K)^2$$

Heraf findes

$$t_c = (1 + 2R_b/c_s)t_{cu}$$

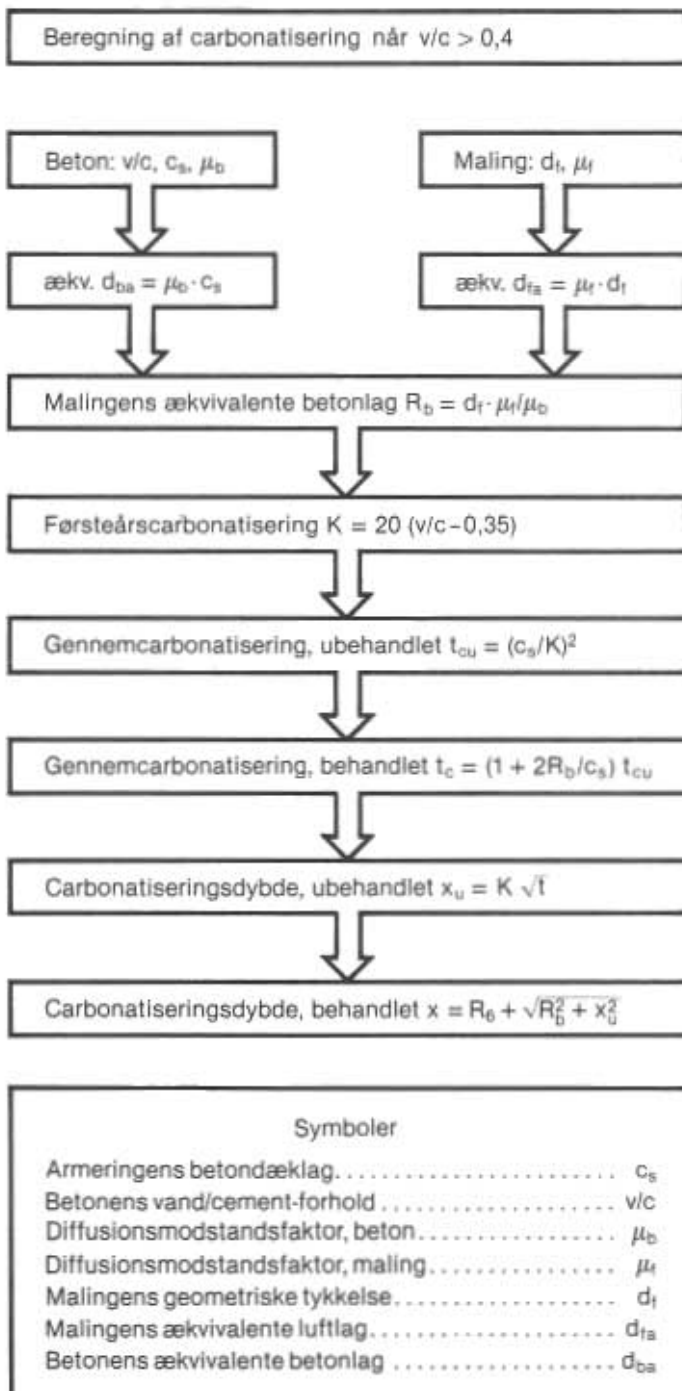
Ønskes fx, at gennemcarbonatiseringstiden for overfladebehandlet beton skal tage 10 gange så lang tid som for ubehandlet beton findes overfladebehandlingens ækvivalente betontykkelse af følgende udtryk

$$\text{nødv. } R_b \geq 0,5 c_s (-1 + t_c/t_{cu})$$

mindst at skulle være  $R_b = 4,5 c_s$ .

Et rutediagram for beregninger i henhold til ovenstående er vist i figur 23.

Figur 23, modstående side. Formeloversigt og rutediagram for beregning af carbonatisering, såvel for ubehandlet beton som for beton, der er overfladebehandlet med en stabil carbonatiseringsbremse.



### Eksempel 1

En udendørs konstruktionsdel skal støbes af beton. Denne beton har et vand/cement-forhold, der er  $v/c = 0,8$  i middel. Denne beton forudsættes at have en diffusionsmodstandsfaktor på  $\mu_b = 200$ . Armeringens dæklag er  $c_s = 20$  mm.

Betonen kan imprægneres med en carbonatiseringsbremse, der har en tykkelse på  $d_f = 0,15$  mm og en diffusionsmodstandsfaktor på  $\mu_f = 40000$ .

Betonen skal vurderes såvel i ubehandlet som i overfladebehandlet tilstand. Ifølge rutediagrammet er betondæklagets ækvivalente lufttykkelse

$$\text{ækv. } d_a = 200 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 4 \text{ m.}$$

Carbonatiseringsbremsens ækvivalente lufttykkelse er

$$\text{ækv. } d_a = 40000 \cdot 0,15 \cdot 10^{-3} = 6 \text{ m.}$$

Carbonatiseringsbremsens ækvivalente betontykkelse er

$$R_b = 0,15 \cdot 40000/200 = 30 \text{ mm.}$$

Den ubehandlede betons førsteårscarbonatisering er

$$K = 20 (0,8 - 0,35) = 9 \text{ mm}/\sqrt{\text{år.}}$$

Det ubehandlede betondæklag vil derfor gennemcarbonatisere på

$$t_{ca} = (20/9)^2 = \text{ca. } 5 \text{ år.}$$

Det overfladebehandlede betondæklag vil gennemcarbonatisere på

$$t_c = (1 + 2 \cdot 30/20) 5 = \text{ca. } 20 \text{ år.}$$

Efter  $t = 10$  år, vil den ubehandlede beton få en carbonatiseringsdybde på

$$x_w = 9 \sqrt{10} = 28 \text{ mm}$$

Efter  $t = 10$  år, vil den overfladebehandlede beton få en carbonatiseringsdybde på

$$x = \sqrt{30^2 + 28^2} - 30 = 11 \text{ mm.}$$

### Nedbrydelige carbonatiseringsbremsere

Ikke alle carbonatiseringsbremsere er lige stabile. Nogle kan nedbrydes af ultraviolet lys; andre nedbrydes ved iltning eller ved lang tids påvirkning af sur regn. Det forudsættes som en tilnærmelse i det følgende, at nedbrydningshastigheden er konstant. Den betegnes  $k$  og måles fx i mm ækv. betontykkelse pr. år. Det betyder, at nedbrydningstiden for en overfladebehandling er  $R_{b0}/k$ , når den ækvivalente betontykkelse på behandlingstidspunktet er  $R_{b0}$ .

Afformes betonen til tiden  $t = 0$  og overfladebehandles betonen straks med en nedbrydelig carbonatiseringsbremse, skal man regne med følgende ækvivalente betontykkelse for overfladebehandlingen:

$$R_b = R_{b0} - kt$$

Carbonatiseringsdybden  $x$  kan herefter findes som

$$t = (x + (1 - \exp(-x/A)) (R_{b0} - A))/k$$

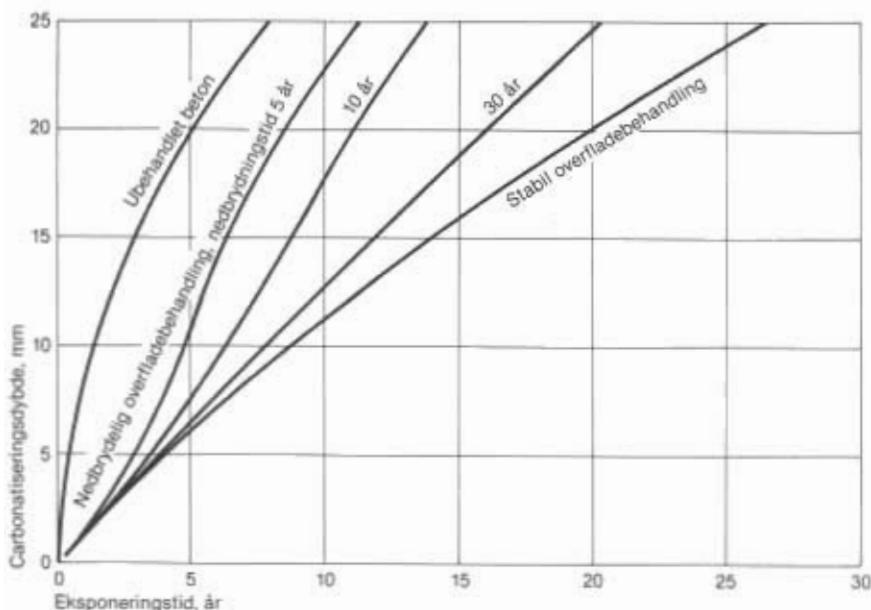
hvor

$$A = 0,5K^2/k = 200 (v/c - 0,35)^2/k$$

Ovenstående løsning kræver, at  $t < R_{b0}/k$ . Efter denne tid fortsætter carbonatiseringen som for ubehandlet beton.

### Eksempel 2

Den overfladebehandlede beton i eksempel 1 forudsættes nu at have en nedbrydelig overfladeimprægnering og en nedbrydningstid på 30 år. Da overfla-



Figur 24. Carbonatiseringsdybde for betonen beskrevet i eksempel 2. Betonen har  $v/c = 0,8$ . Der er vist 5 tænkte muligheder, nemlig ubehandlet beton og overfladebehandlede beton med mere eller mindre nedbrydelige carbonatiseringsbremsere. Det er i beregningerne forudsat, at nedbrydningshastigheden er konstant.

debehandlings ækvivalente betontykkelse er  $R_{b0} = 30$  mm ved påførslen, er nedbrydningshastigheden

$$k = 30/30 = 1 \text{ mm/år.}$$

Heraf findes

$$A = 0,5 \cdot 9^2/1 = 40,5 \text{ mm.}$$

I figur 24 findes carbonatiseringsdybden afbildet i relation til tiden for de første 30 år. Det ses, at efter ca. 16 år er dæklaget gennemcarbonatiseret mod ca. 20 år for en tilsvarende stabil carbonatiseringsbremse. For den ubehandlede beton bliver dæklaget gennemcarbonatiseret på ca. 5 år. I figuren er til sammenligning vist carbonatiseringens indtrængning, hvis nedbrydnings-tiden i stedet er 10 år og 5 år.

### Målemetoder for overfladebehandlinger

For at kunne klassificere de forskellige overfladebehandlings carbonatiseringsbremsende effekt, må diffusionsmodstandsfaktorerne kunne måles. Der er udviklet flere forskellige målemetoder, hvoraf nogle skal omtales i det følgende.

Data viser, at der er en sammenhæng mellem en overfladebehandlings diffusionsmodstandsfaktor for kuldioxid og diffusionsmodstandsfaktoren for vanddamp. Stigende tæthed over for kuldioxid medfører også stigende tæthed over for vanddamp. Det er derfor ikke alene den carbonatiseringsbremsende effekt, der er afgørende for valget af overfladebehandling.

Som nævnt tidligere, se side 67, findes der flere forskellige typer overfladebehandlingsmidler. De forskellige målemetoder kan være mere eller mindre relevante, afhængig af hvilken type den pågældende overfladebehandling tilhører.

#### *PRA-metoden*

Målemetoden er udviklet af Paint Research Association i England. Som navnet angiver, er målemetoden udviklet af en institution med speciel interesse i malingsfilm. Metoden går i hovedtrækkene ud på at måle transporten af  $\text{CO}_2$  og  $\text{H}_2\text{O}$  under givne betingelser gennem et opstrøg på specialpapir. På basis af observationerne, herunder tykkelsen af den påstrøgne malingsfilm (bestemmes i målemikroskop), beregnes diffusionsmodstandsfaktorerne for  $\text{CO}_2$  og  $\text{H}_2\text{O}$ .

PRA-metoden kan ikke anvendes for sådanne målingstyper, der reagerer med eller induges af og tætnet cementpastaen. Reaktions- og indsnings-

forholdene vil nemlig i de tilfælde altid være forskellige for papir og cementpasta. Derfor vil PRA-metoden her give upålidelige resultater.

I de tilfælde, hvor en væsentlig del af den carbonatiseringsbremsende effekt skyldes en udtørring af betonen (selvudtørring), kan PRA-metoden heller ikke anvendes. Denne virkning genskabes nemlig ikke med specialpapiret.

#### *Cup-metoden*

Denne målemetode er udviklet af Engelfried og Klopfer. Den bygger i princippet på diffusion af  $\text{CO}_2$  gennem en malingsfilm, der er spændt hen over en målekop. Den ene side af malingsfilmen (den ydre) eksponeres for tør, kuldioxidholdig luft. Inde i koppen anbringes kuldioxidabsorberende materiale. Ved vejning af koppen kan den mængde  $\text{CO}_2$ , der passerer malingsfilmen, bestemmes. Da fugt også absorberes, må forsøget udføres i et helt tørt laboratoriemiljø. Der anvendes en testgas med et  $\text{CO}_2$ -indhold på 20 pct.

Cup-metoden har stort set de samme mangler som PRA-metoden, der er beskrevet ovenfor.

#### *Måling på beton*

For at få en realistisk vurdering af en overfladebehandlings carbonatiseringsbremsende effekt, skal overfladebehandlingen ske på prøvelegemer af beton og efter de forskrifter, der gælder for overfladebehandlings praktiske udførelse.

Carbonatiseringshastigheden er imidlertid meget lav i velkomprimeret, urevnet beton med lavt  $v/c$ -forhold. For at få en brugbar prøvningsmetode, må carbonatiseringshastigheden øges. En sådan øgning kan ske ved

- højere lagringstemperatur,
- højere  $\text{CO}_2$ -koncentration, og/eller
- højere  $v/c$ -forhold

end i praksis.

Foretages under sådanne betingelser sammenhørende målinger af carbonatiseringsdybden  $x_u$  for en ubehandlet beton og carbonatiseringsdybden  $x$  for en overfladebehandlet, men ellers identisk beton, kan overfladebehandlings ækvivalente betontykkelse  $R_b$  under disse betingelser bestemmes af ligningen

$$x^2 + 2xR_b - x_u^2 = 0$$

Heraf findes

$$R_b = 0,5(1 + x_u/x)(x_u - x).$$



Kendes betonens diffusionsmodstandsfaktor  $\mu_b$ , bliver overfladebehandlings diffusionsmodstandsfaktor

$$\mu_f = \mu_b R_b/d_f.$$

Filmtykkelsen  $d_f$  må bestemmes ved mikroskopering. Målingerne bør foretages for 2-3 passende valgte  $v/c$ -forhold og til forskellige tider, således at resultatet kan findes ved regressionsanalyse.

### Litteratur

- E. C. Higgenson. 1961. Effect of steam curing on the important properties of concrete. J. Amer. Concr. Inst., 58, pp. 281-98.
- C. Hobbs. 1964. Physical properties of lightweight aggregates and concretes. Chemistry and Industry, 1, no. 14, pp. 594-600. London.
- A. Meyer, H. J. Wierig und K. Hausmann. 1967. Karbonatisierung von Schwerbeton. Deutsche Ausschuss für Stahlbeton, heft 1982.
- A. Meyer. 1968. Investigations on the carbonation of concrete Proc. 5th Int. Symp. on the Chemistry of Cement, Part III, pp. 394-401. Tokyo.
- P. Schiessl. 1976. Zur frage der zulässigen Rissbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 255. Berlin.
- Vejdirektoratet, 1980. Betons holdbarhed. Rapport nr. 2. Undersøgelse af udvalgte betonbroer.
- H. J. Wierig. 1984. Longtime Studies on the Carbonation of Concrete under normal outdoor Exposure. RILEM-seminar on the Durability of Concrete Structures under normal outdoor Exposure.

# Chloridindtrængning

Chloridindhold i betons støbevand eller i hærdnet betons omgivelser er ikke skadeligt for selve betonen (cementpasta og tilslag) i de koncentrationer, der er aktuelle i praksis. Derimod kan tilstedeværelse af chloridioner i betonens porevæske ophæve armeringens passivfilm (se kapitlet »Rustdannelse«) og derved medvirke til at forårsage korrosion. Derfor må chloridindholdet i armeret beton ikke nå op over en vis kritisk grænse i bygværkets stipulerede funktionstid. Det kan ske ved at stille følgende krav til beton i aggressiv miljøklasse eller i særlig aggressive miljøer:

- Frisk beton må kun indeholde en begrænset mængde chlorid, afhængigt af hvor store chloridmængder, der senere kan blive tilført den hærdnede beton. Der må ikke med føje tilsættes chlorid til frisk beton, der er armeret.
- Hærdnet beton skal være så tæt, at den ikke modtager chloridioner fra omgivelserne ved diffusion i så store mængder, at armeringens passivitet nedbrydes.
- Omgivelsernes saltindhold skal mindskes, hvis det er muligt.
- Betonen skal beskyttes (membran) mod omgivelsernes saltpåvirkning, hvis ovenstående forholdsregler ikke sikrer tilstrækkelig lang funktionstid for bygværket.

Også for uarmeret beton må chloridindholdet begrænses. Det har imidlertid andre årsager. Indeholder den friske beton således betydelige mængder hygroskopiske salte, vil den hærdnede beton holdes fugtig, og der kan da forekomme udblomstringer. Optager den hærdnede beton betydelige mængder salte, kan der også forekomme saltsprængninger.

I det følgende omtales kun forholdene for armeret beton.

## Chloridkilder

Beton kan, som omtalt, få tilført chloridioner enten ved

- *blandeprocessen*, dvs. fra delmaterialer, tilsætninger, tilsætningsstoffer og urenheder, eller ved
- *indtrængning*, dvs. fra chloridholdige omgivelser.

En speciel tilførsel af chlorid til beton kan komme fra armeringsstænger, der er forurenede med chlorider fra chloridholdig jord (Mellemøsten) under oplagringen.

### *Frisk beton*

Som omtalt senere kan chloridindhold i frisk beton identificeres ved analyse af vand, der har samlet sig på overfladen ved vandseparation. En sådan analyse siger dog intet om, hvorfra chloridindholdet i den friske beton stammer.

*Tilslag.* Anvendelse af uvaskede sømaterialer, sten- og især sandmaterialer, kan tilføre betonen chlorid. Der er dog normalt tale om små mængder chlorider. Betegnelsen »vaskede materialer« kan godt omfatte sten- og sandmaterialer, vasket med havvand.

I udlandet (ørkenområder) vil naturlige grusforekomster ofte indeholde store mængder salte, blandt andet chlorider. Her er vaskning med fersk vand en afgørende betingelse for anvendelse til såvel armeret som uarmeret beton.

*Støbevand.* Vand fra danske vandværker indeholder ikke chloridioner i en sådan mængde, at det har betydning for anvendelse til beton. Det skal i den forbindelse nævnes, at chlorholdigt vandværksvand ikke er identisk med chloridionholdigt vand.

Derimod kan grundvand visse steder indeholde betydelige mængder chloridioner.

Havvand og brakvand indeholder så store mængder chloridioner, at det ikke kan anvendes som støbevand, hvis kravene i DS 411, 3. udgave til maksimalt indhold af chlorider i beton skal overholdes. Det har i tidligere danske betonnormer ikke været forbudt at anvende havvand som støbevand.

*Tilsætningsstoffer.* Accelererende tilsætningsstoffer til beton vil ofte indeholde betydelige mængder calciumchlorid  $\text{CaCl}_2$  og andre chlorider. Det er nemlig den billigste og mest effektive accelerator. Der findes dog andre accelerators i handelen, som ikke indeholder chlorider. Ved anvendelse af et accelererende tilsætningsstof er det nødvendigt at kende dets chloridindhold for at kunne beregne betonens samlede tilførsel af chlorid.

En del kommercielle tilsætningsstoffer (L-TSS og P-TSS) kan være tilsat calciumchlorid for at undgå retarderende virkning eller bivirkninger i form af styrkenedsættelse. Dette chloridindhold må tages i regning ved beregning af den friske betons chloridindhold.

*Tilsætninger.* Puzzolaner (flyveaske og mikrosilica) kan indeholde chlorid. Anvendelse af puzzolaner efter DS 411, 3. udgave kræver dog, at indholdet af chlorid er under 0,1 pct.

### *Hærdnet beton*

I visse miljøer vil beton være belastet med chloridholdigt vand. Det gælder for beton i aggressiv miljøklasse og særligt aggressive miljøer i henhold til DS 411, 3. udgave.

*Havvand.* En betonkonstruktion i havvand kan modtage ret store chloridtilskud fra omgivelserne. Man må skelne mellem tre former for modtagelse.

Under vandlinien vil betonen modtage chloridioner ved diffusion. Indtrængningshastigheden vil være afhængig af havvandets saltindhold og betonens permeabilitet.

Over vandlinien kan betonen udefra modtage chlorider fra bølgesprøjt og saltholdig slagregn. Da tilførslen sker periodevis med mellemliggende udtøringsperioder, kan betonens chloridtilførsel blive ganske betydelig.

Betonen kan også modtage chlorider gennem kapillarsugning fra betonen under vandlinien. Ved fordampning (udtørring) over vandlinien kan der ske en koncentration af chlorider i betonen.

*Svømmebade.* Svømmebadsvand tilsættes natriumchlorid NaCl og natriumhypochlorit NaClO. Svømmebadsvand er mindre salt end havvand. Ellers er forholdene for en svømmebadskonstruktion som ved en havvandskonstruktion. Den højere temperatur i en svømmehal og specielt i ingeniørgangene rundt om svømmebassinet, medfører større tendens til udtørring af betonen. Det betyder, at chloridkoncentrationen i betonen kan blive ganske stor, hvis betonen ikke er særlig tæt. Også utætte fuger og revner kan være medvirkende årsag til, at betonen får tilført chlorid.

*Tøsaltning.* Vejbroer, betonkørebaner, altangange og betontrapper renses ofte for islag, sne og slud ved tøsaltning. Tøsaltet kan være natrium- eller calciumchlorid. Chloridkoncentrationen i smeltevandet er ofte meget høj, så høj, at DS 411, 3. udgave henregner tøsaltning til særlig aggressive miljøer. Chloridoptagelsen i betonen sker efter de samme principper som ved havvandskonstruktioner. På grund af den store chloridkoncentration kan der være tale om meget store chloridindtrængningshastigheder.

*Afsyring.* Betonfacadeelementer renses undertiden ved afsyring. Anvendes saltsyre HCl, kan betonen få tilført betydelige mængder chlorid, især hvis betonens kapillaritet (sugeevne) er stor, eller hvis betonens komprimering har været utilstrækkelig.

Betonen bør være vandmættet før afsyring finder sted, og betonen skal spules kraftigt bagefter. Bedst og sikrest er det at untlade afsyring. Der findes andre og bedre metoder til rensning af betonoverflader.

## **Chloridoptagelse**

Chloridioner, der tilføres beton enten ved iblanding eller ved indtrængning, vil kunne

- danne chloridholdige forbindelser med flere af cementens hydratiseringsprodukter,
- adsorberes på cementgelens overflader og/eller
- opløses i betonens porevæske.

Kun den mængde chloridioner, der findes opløst i porevæsken, regnes at være aktiv ved nedbrydning af armeringens passivitet, se kapitlet »Rustdannelse«. Der vil være en ligevægt mellem opløst chlorid og adsorberet/kompleksbundet chlorid. Denne ligevægt vil kunne forstyrres, fx ved at den opløste chlorid forbruges. Derved kan adsorberet og bundet chlorid gå over i opløselig form. Forholdet mellem de forskellige chloridformer i chloridholdig beton afhænger i øvrigt af hydratiseringsgrad, cementtype og chloridkoncentration.

*Hydratiseringsgrad.* Når chlorid tilføres frisk beton ved iblanding, vil chloridionerne have mulighed for at deltage i hydratiseringsprocessen og fælde ud med hydratiseringsprodukterne. Det antages, at der dannes forholdsvis mere kompleksbundet chlorid ved iblanding, end når en tilsvarende mængde chloridioner tilføres hærdnet beton ved indtrængning. Her er det nemlig de stabile hydratiseringsprodukter, der skal reagere med chloridionerne. Derfor bør man ikke regne calciumchlorid, der tilsættes frisk beton, for at være lige så skadelig som chlorid, der trænger ind i hærdnet beton med en høj hydratiseringsgrad. Disse forhold er dog ikke nok opklaret til, at der kan skelnes mellem chloridindhold i beton fra tilsætning og fra indtrængning.

*Cementtype.* De cementminerale, hvormed chloridionerne kan danne komplekser er såvel aluminatfasen  $C_3A$  som ferritfasen  $C_4AF$ . I beton af cement med lavt indhold af disse stoffer, vil der derfor dannes færre chloridholdige forbindelser, end hvis betonen var fremstillet af cement med større indhold, alt andet lige. Som en bivirkning har sulfatbestandige cementer et lavt indhold af disse stoffer; det kan der bødes på ved at anvende et større cementindhold i betonen og gøre betonen tættere (lavere  $v/c$ -forhold). Efter den engelske betonnorm er det ikke tilladt at sætte chlorid til beton, der støbes med sulfatbestandig cement.

*Chloridkoncentration.* De chloridholdige komplekser, der dannes med aluminatfasen,  $C_3A$ , har ved lave chloridkoncentrationer en anden sammensætning, end hvis der er tale om høj chloridkoncentration. Ved høje chloridkoncentrationer bindes der forholdsvis mere chlorid i de dannede forbindelser. Tilsvarende forhold gør sig gældende ved reaktion med ferritfasen  $C_4AF$ . Desuden findes der flere uidentificerede forbindelser, fx med portlandit  $Ca(OH)_2$ .

Der er grænser for, hvor meget chlorid, der kan optages. Derfor vil cementminerale og deres hydratiseringsprodukter kunne mættes, når betonen tilføres chlorid i stor mængde enten ved iblanding eller ved indtrængning. Det betyder, at tilført chlorid alene vil optages i porevæsken, når der ikke længere kan bindes chlorid ved adsorption eller kompleksdannelse.

Det er porevæskens koncentration af chloridioner, der er den aktive del af betonens chloridindhold ved nedbrydning af armeringens passivitet, se kapit-

let »Rustdannelse«. Derfor har betonens fugtforhold og fugttransport også betydning for korrosionsfaren.

### Mål for chloridindhold

Man ser i litteraturen betons chloridindhold angivet som indhold af chloridion  $\text{Cl}^-$ , som indhold af natriumchlorid  $\text{NaCl}$ , eller som indhold af vandfrit calciumchlorid  $\text{CaCl}_2$ , med følgende enheder:

- $\text{kg Cl}^-/\text{m}^3$  beton.
- $\text{Cl}^-$  som vægtprocent af beton.
- $\text{mg Cl}^-/\text{kg}$  beton.
- $\text{Cl}^-$  som vægtprocent af betonens cementindhold.
- $\text{CaCl}_2$  som vægtprocent af betonens cementindhold.
- $\text{NaCl}$  som vægtprocent af beton.

I betons støbevand angives chloridindholdet ofte som  $\text{Cl}^-$  med følgende enheder:

- ppm (parts per million).
- $\text{mg/liter}$ .
- $\text{mol/liter}$ .
- vægtprocent.

### Eksempel 3

Betonnormens krav om et max. indhold af  $\text{CaCl}_2$  på 0,5 vægtprocent af betonens cementindhold, når der er tale om slapt armeret beton i aggressivt miljø, skal omsættes til de andre enheder under den forudsætning, at cementindholdet er  $300 \text{ kg/m}^3$  beton. Betonen indeholder da

$$0,5 \text{ pct. af } 300 \text{ kg/m}^3 = 1,5 \text{ kg CaCl}_2/\text{m}^3 \text{ beton.}$$

Med atomvægte 35,45 for  $\text{Cl}^-$  og 40,08 for  $\text{Ca}^{++}$  svarer dette til

$$\frac{1,5 \cdot 2 \cdot 35,45}{40,08 + 2 \cdot 35,45} = 0,96 \text{ kg Cl}^-/\text{m}^3 \text{ beton.}$$

Med en betondensitet på  $2400 \text{ kg/m}^3$  svarer dette igen til

$$0,96 \cdot 10^6/2400 = 399 \text{ mg Cl}^-/\text{kg beton}$$

eller et indhold af  $\text{Cl}^-$  på

$$0,96 \cdot 100/2400 = 0,04 \text{ vægtprocent af betonen}$$

eller

$$0,96 \cdot 100/300 = 0,32 \text{ vægtprocent af cementindholdet.}$$

#### Eksempel 4

Vesterhavet har et chloridindhold på ca. 17 g Cl<sup>-</sup>/kg havvand. Det er det samme som 17000 ppm eller

$$17 \cdot 100/1000 = 1,7 \text{ vægtprocent.}$$

Blev der til en beton med cementindhold 300 kg/m<sup>3</sup> anvendt havvand som støbevand, og var vandbehovet 150 liter/m<sup>3</sup>, ville betonnormens krav være overskredet. De 150 liter havvand indeholder 17 g Cl<sup>-</sup>/liter, og derfor vil betonen komme til at indeholde

$$150 \cdot 17/1000 = 2,55 \text{ kg Cl}^{-}/\text{m}^3 \text{ beton.}$$

Støbt med havvand vil denne beton altså indeholde 2,55/0,96 = 2,7 gange så meget chlorid som den maksimalt tilladte værdi i betonnormen for beton i aggressivt miljø, jævnfør eksempel 3.

#### Eksempel 5

En betonprøve er blevet undersøgt for chloridindhold ved kemisk analyse. Det vides at betonen indeholder 300 kg cement/m<sup>3</sup>. Som resultat af undersøgelsen får man oplyst, at chloridindholdet svarer til 1,5 kg NaCl/m<sup>3</sup> beton. Det skal vurderes, om normens krav med hensyn til maksimalt chloridindhold er opfyldt, når betonen er placeret i moderat miljø.

Det kræver en omregning til ækv. CaCl<sub>2</sub>. Molvægtene for NaCl og CaCl<sub>2</sub> er henholdsvis 58,45 og 110,99. Derfor svarer 1,5 kg NaCl/m<sup>3</sup> beton til

$$\frac{1,5 \cdot 110,99}{2 \cdot 58,45} \text{ kg CaCl}_2/\text{m}^3 \text{ beton.}$$

I relation til betonens cementindhold findes, at indholdet af CaCl<sub>2</sub> svarer til

$$1,42 \cdot 100/300 = 0,47 \text{ vægtprocent af cementen.}$$

Betonen kan altså accepteres til brug i både moderat og aggressivt miljø.

### Kritisk chloridindhold

Når der i det følgende tales om betons chloridindhold, er det betonens totale, syreopløselige indhold, bestemt som beskrevet i DS 423.28.

Den laveste chloridkoncentration i beton som, når der i øvrigt er tilstrækkelig ilt- og fugttilgang, medfører begyndende armeringskorrosion, betegnes det kritiske chloridindhold. Såvel laboratorie- som markundersøgelser viser, at det kritiske chloridindhold afhænger af mange forhold, fx cementens type, porevæskens pH-værdi og tilstedeværelse af andre aggressive ioner, fx SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

Selv under tilsyneladende ens betingelser er der stor spredning på bestemmelsen af det kritiske chloridindhold. Det kan skyldes, at kriteriet for, om en betons chloridindhold er over den kritiske værdi er, at armeringen har rustdannelse. Selve rustdannelsen styres imidlertid også af andre parametre, fx passende ilttilgang og fugtighed.

På basis af observationer beskrevet i litteraturen (von Daveer, 1975) synes det bedste skøn for betons kritiske chloridindhold at være ca.  $1,4 \text{ kg Cl}^-/\text{m}^3$  beton ved  $\text{pH} = \text{ca. } 12,5$  som findes for ucarbonatiseret beton. Det kritiske chloridindhold varierer med betonens pH-værdi (Mindess & Young, 1981) og går mod nul for  $\text{pH} = 11$ .

Som nævnt er der stor spredning på værdien af det kritiske chloridindhold. I Norge anvender man en noget større differentiering ved vurdering af betons kritiske chloridindhold forud for en eventuel reparation. Disse vurderingskriterier er baseret på engelske undersøgelser (Browne, 1980) og gælder for fugtig, men ikke neddykket beton fremstillet med almindelig portlandcement.

Chloridindhold $\text{Cl}^-$ , vægtprocent af cement	Sandsynlighed for korrosion
under 0,4 .....	kan negligeres
0,4–1,0 .....	er mulig
1,0–2,0 .....	er sandsynlig
over 2,0 .....	er sikker

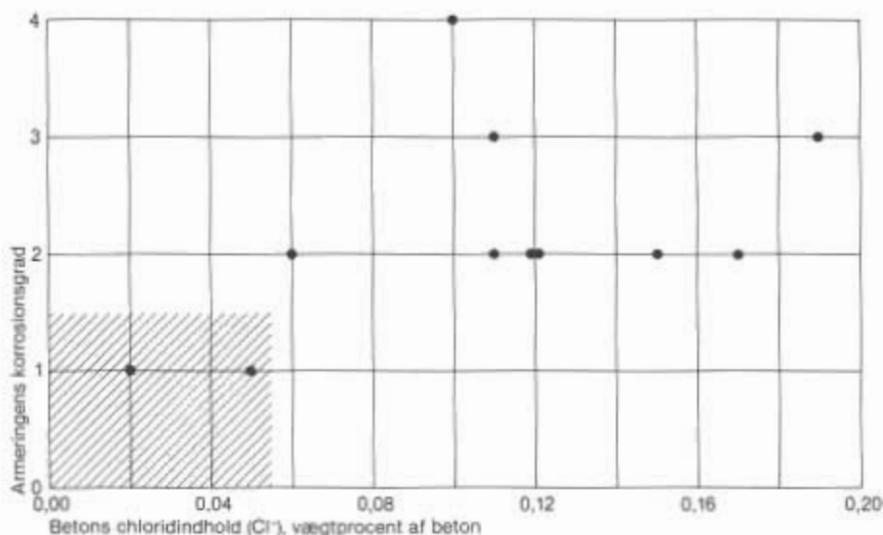
Et chloridionindhold på 0,4 vægtprocent af cementindholdet svarer til  $1,4 \text{ kg Cl}^-/\text{m}^3$  beton, hvis betonens cementindhold er  $350 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

Ved en undersøgelse af chloridindtrængning i danske betonkonstruktioner i marint miljø, se (Sørensen & Maahn, 1982), har man observeret armeringens korrosionsgrad og målt betonens chloridindhold ved armeringen. Armeringens korrosionsgrad blev bedømt efter følgende skala:

- Tilstand 1: Ingen spor af rust.
- Tilstand 2: Misfarvet overflade.
- Tilstand 3: Mindre, overfladiske angreb.
- Tilstand 4: Kraftig korrosion.

I figur 25 er armeringens korrosionstilstand sat i relation til det målte chloridindhold. Bygværkernes aldre varierede fra 11 til 20 år. Det ovenfor anførte kritiske chloridindhold på  $1,4 \text{ kg Cl}^-/\text{m}^3$  beton svarer til et chloridindhold på 0,06 vægtprocent af betonen, hvis betonens densitet har været ca.  $2350 \text{ kg}/\text{m}^3$ .





Figur 25. Armerings korrosionsgrad i relation til chloridindholdet i betonen omkring armeringen, målt ved analyse på udborede kerner. Armeringens korrosionsgrad er bedømt efter følgende skala: 1 = ingen spor af rust; 2 = misfarvet overflade; 3 = mindre, overfladiske angreb; 4 = kraftig korrosion (Sørensen & Maahn, 1982). Bygværkernes eksponeringstid (alder) varierer mellem 11 og 20 år. Det ses, at under et chloridindhold på 0,055 vægtprocent af betonen, svarende til ca. 1,3 kg Cl<sup>-</sup> / m<sup>3</sup> beton, er der ikke konstateret skadelig korrosion, jvf. skraveret område.

## Chloridindtrængning

Chloridindtrængning i urevnet, vandmættet beton kan regnes at følge Fick's anden lov:

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2}$$

hvor

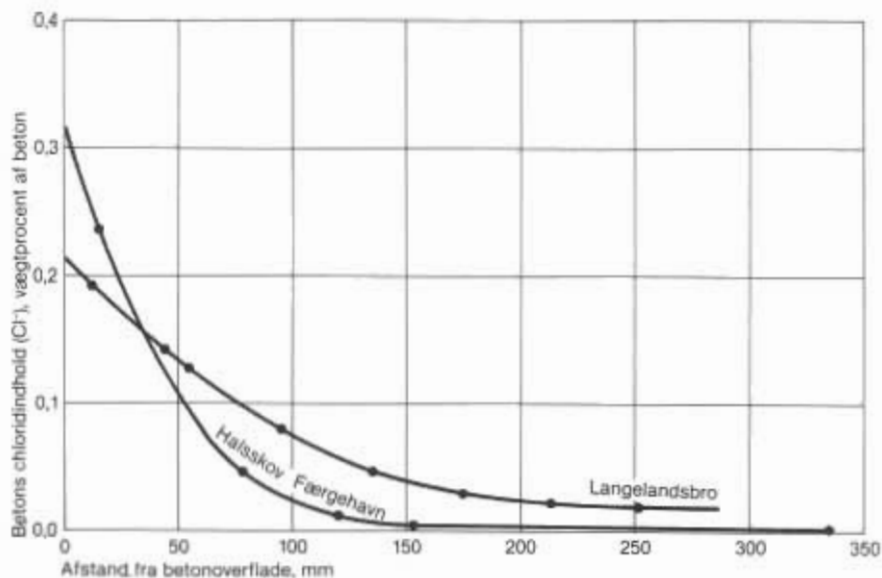
$C$  er betonens chloridkoncentration til tiden  $t$  på stedet  $x$ ,

$D$  er diffusionskoefficienten for chloridtransport.

Hvis beton er udsat for chloridpåvirkning, kan betonen normalt forudsættes at være konstant chloridbelastet. Under denne betingelse kan ovenstående differentiaalligning løses, jvf. bilaget om diffusionsteori.

I figur 26 er der vist to chloridprofiler bestemt ved analyser af udborede betonkerner fra Langelandsbroen og Halsskov færgehavn, (Sørensen & Maahn, 1982). Kurverne er det beregnede chloridprofil på basis af Fick's anden lov som angivet ovenfor.

Foretages en omhyggelig bestemmelse af chloridprofiler, dvs. med mange målepunkter i betonens overfladelag, vil man konstatere, at chloridkoncen-



Figur 26. Chloridprofiler bestemt ved analyser af udborede betonkerner fra Langelandsbroen og fra Halsskov færgehavn. Punkterne er observerede værdier. De indtegnede kurver er beregnet af Fick's anden lov, jvf. kapitlet »Diffusionsteori« i bilaget. Chloridprofilen for Langelandsbroen svarer til 16 års eksponering, og chloridprofilen for Halsskov færgehavn svarer til 20 års eksponering. Boreprøverne er udtaget hhv. 1,8 m og 1,5 m over daglig vande. (Sørensen & Maahn, 1982).

trationen er størst et lille stykke inde i betonen. Det kan tolkes som et udludningsfænomen, men kan ikke siges at være fuldt opklaret.

Efter at chloridbelastningen har været en vis tid  $t$ , vil den kritiske chloridkoncentration være nået et vist stykke  $x_{cr}$  ind i betonen. Det kan vises, at der gælder følgende relation, jvf. bilaget »Diffusionsteori«:

$$x_{cr} = K \sqrt{t}$$

Her er  $K$  en faktor, hvis værdi afhænger af betonens initialchloridindhold (iblandet den friske beton), chloridkoncentrationen i betonens overflade (chloridbelastningen), den kritiske chloridkoncentration og diffusionskoefficienten for chloridtransport.

Der er altså tale om, at betonen mister sin rustbeskyttende effekt i et overfladelag, hvis tykkelse vokser proportionalt med kvadratroden af tiden.

Værdien af  $K$  kan beregnes under de ovenfor givne forudsætninger, når betonens chloridbelastning  $C_u$ , og det kritiske chloridindhold, samt betonens initialchloridindhold  $C_i$  og diffusionskoefficienten kendes, jvf. bilaget »Diffusionsteori«.

### Førsteårsindtrængning

Faktoren  $K$  kan benævnes den kritiske førsteårsindtrængning. Kender man de størrelser, der indgår i  $K$ , jvf. bilaget om diffusionsteori, kan  $K$  beregnes. Det er imidlertid sjældent, at man har denne information. Har man derimod målt et chloridprofil i et bygværk, fx af hensyn til planlagt vedligehold/reparation, kan  $K$  beregnes, hvis bygværkets alder er kendt, og man fx sætter  $C_{cr} = 1,4 \text{ kg Cl}^-/\text{m}^3 \text{ beton}$ .

### Eksempel 6

I figur 26 er der vist to chloridprofiler. For Halskov Færgehavn ses, at  $x_{cr} = 70 \text{ mm}$  for  $t = 20 \text{ år}$  svarende til  $C_{cr} = 0,06$  vægtprocent af betonen eller  $C_{cr} = 1,4 \text{ kg Cl}^-/\text{m}^3 \text{ beton}$ . Førsteårsindtrængningen er i dette tilfælde

$$K = x_{cr}/\sqrt{t} = 70/\sqrt{20} = 15,7 \text{ mm}/\sqrt{\text{år}}$$

Det betyder, at med et betondæklag på armeringen på  $c_s = 50 \text{ mm}$ , må armeringen regnes ubeskyttet mod korrosion efter

$$t = (c_s/K)^2 = (50/15,7)^2 = \text{ca. } 10 \text{ år}$$

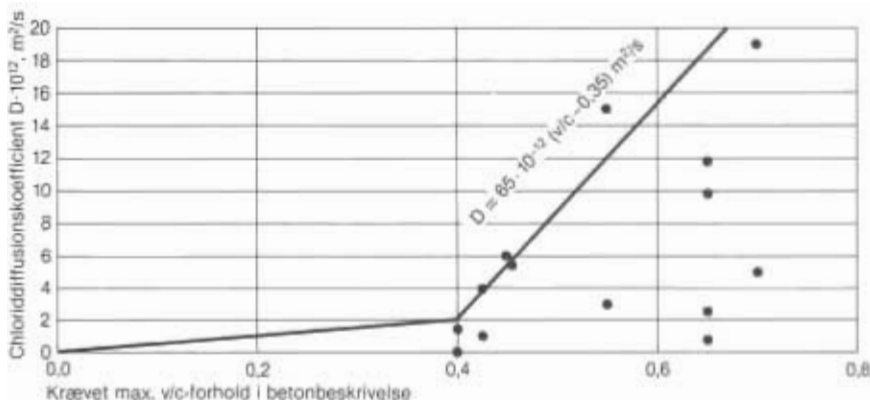
### Diffusionskoefficienten

Den kritiske førsteårsindtrængning  $K$  vokser med chloridkoncentrationen på betonens overflade (chloridbelastningen), med betonens initialchloridindhold og med diffusionskoefficienten  $D$ .

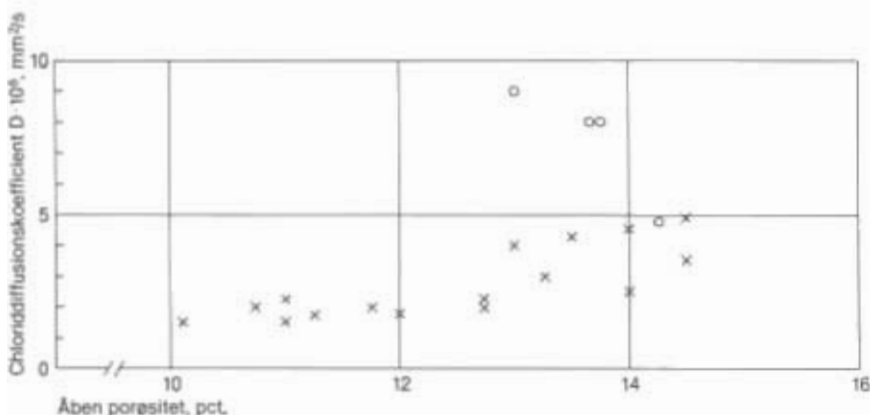
Diffusionskoefficienten  $D$  afhænger af betonens  $v/c$ -forhold, hydratiseringsgrad, revneintensitet og grovporøsiteter (fra utilstrækkelig komprimeringsgrad). Desuden er diffusionskoefficienten temperaturafhængig. Man er henvist til at bestemme  $D$  ved måling på ældre chloridbelastede betonkonstruktioner, og ikke på laboratorieprøver, hvis naturlige defekter skal medregnes. Ved at måle disse betonkonstruktioners chloridprofiler kan man bestemme diffusionskoefficienten ved regressionsanalyse. Foretages dette for beton af forskellig kvalitet vil det være muligt at få bestemt, hvorledes  $D$  afhænger af  $v/c$ -forholdet og/eller andre af betonens kvalitetsparametre. I figur 27 og 28 er sådanne relationer gengivet (Browne, 1982. Sørensen & Maahn, 1982). Den åbne porøsitet i figur 28 er bestemt efter ASTM C 642-69T. Til brug for beregning af chloridindtrængning i udendørs konstruktioner her i landet kan man for  $v/c > 0,4$  anvende udtrykket

$$D = 2000 (v/c - 0,35) \text{ mm}^2/\text{år}$$

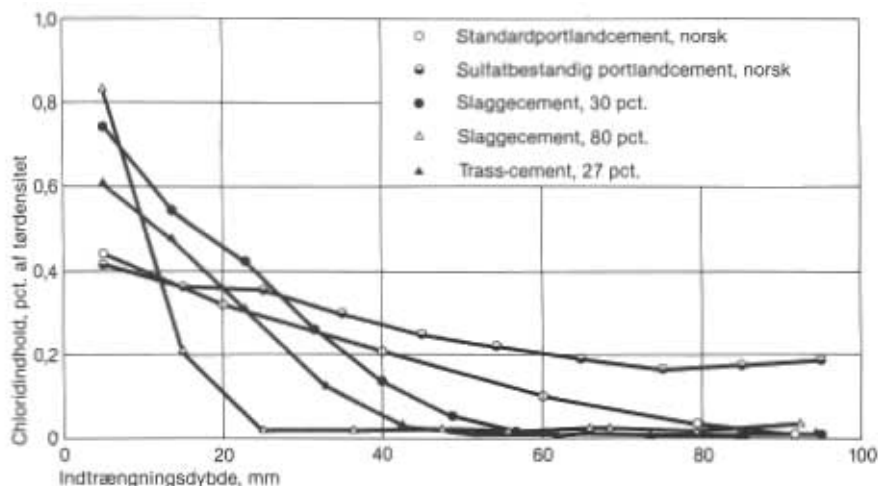
der synes at være passende på den sikre side. Svarende til  $v/c = 0,50$ , har man altså  $D = 300 \text{ mm}^2/\text{år}$ .



Figur 27. Chloriddiffusionskoefficient for beton i afhængighed af betonens specificerede v/c-forhold. De angivne målepunkter repræsenterer målte værdier af diffusionskoefficienten og den specificerede værdi af v/c-forholdet (Browne, 1982). Der må, ud over afhængigheden af v/c, påregnes afhængighed af cementtype, vandmætningsgrad, temperatur og revneintensitet.



Figur 28. Diffusionskoefficient for chloridindtrængning i afhængighed af betons åbne porøsitet, bestemt efter ASTM C 642-69T. Til de med kryds mærkede betoner er der anvendt sømaterialer (afrundede), medens der til de med o mærkede betoner er anvendt granit (nedknust). Det ses, at diffusionskoefficienten vokser retlinet med den åbne porøsitet for beton med sømaterialer, og at beton med nedknust granit synes at have større diffusionskoefficient end rundstensbeton med samme åbne porøsitet. (Sørensen & Maahn, 1982).



Figur 29. Målte chloridprofiler i cementmørtel neddykket i havvand i 54 måneder under ens betingelser. Den cementtype, der yder størst modstand mod chloridindtrængning er en blandingscement med 80 pct. slagge, medens den sulfatbestandige portlandcement yder mindst modstand. Forsøgene er udført med norske materialer. (Vennesland, Page & Gjørsv).

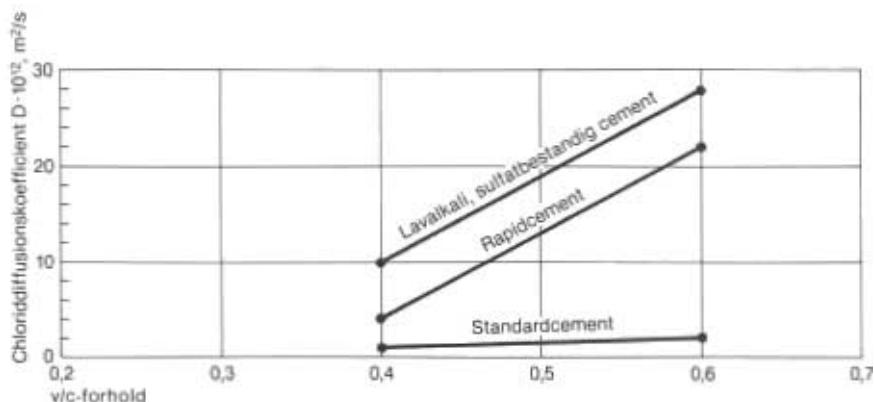
For  $v/c < 0,4$  vil man tilsvarende kunne anvende følgende udtryk

$$D = 250 \cdot v/c \text{ mm}^2/\text{år}$$

der vil være på den sikre side. For  $v/c = 0,3$  vil man således få  $D = 75 \text{ mm}^2/\text{år}$ .

Der er andre parametre end blot betonens kapillar- og grovporøsitet, der bestemmer diffusionskoefficientens størrelse. Cementens og tilslagets type har også indflydelse. I figur 29 vises chloridprofiler i mørtel efter 54 måneder i havvand under ellers ens betingelser (Vennesland, Page & Gjørsv). Det mest markante er, at mørtel af blandingscementer med 80 pct. slagge viser betydeligt mindre chloridindtrængning end i de øvrige mørtler. Specielt viser mørtlen med sulfatbestandig portlandcement større chloridindtrængningshastighed end for de andre mørtler. Forsøgene er udført med norske materialer. Tilsvarende forhold genfindes med danske cementtyper, jævnfør figur 30.

Imperfektioner i betonen som fx revner og grovporøsiteter har stor indflydelse på betonens gennemtrængelighed for chlorider og dermed på værdien af den tilsyneladende diffusionskoefficient.



Figur 30. Chloridiffusionskoefficient for cementpasta efter 90 døgns vandlagring i afhængighed af cementpastaens v/c-forhold. Det ses, at cementtypen har indflydelse på diffusionskoefficienten. Den her viste relation kan ikke anvendes på beton uden en omregning, der tager hensyn til indflydelsen fra betontilslaget. (Hjorth, 1984). Der er anvendt danske cementer.

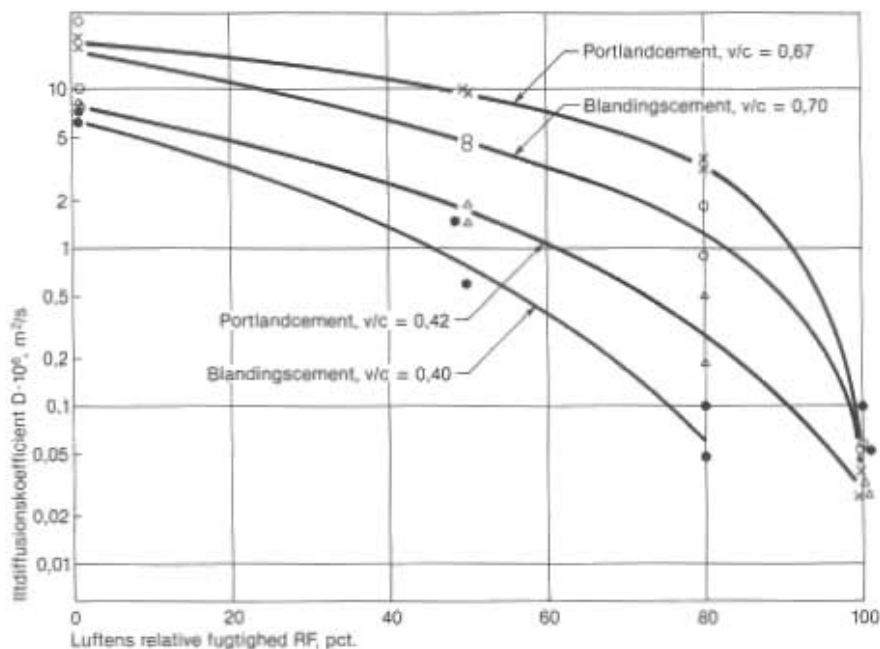
### Skadekriterier

Tilstedeværelsen af et chloridindhold, der er større end det kritiske omkring armeringen, er som nævnt en nødvendig betingelse for at armeringens passivitet kan nedbrydes. Der skal imidlertid også være mulighed for ilttilgang; der skal være fugtigt, og betonens elektriske modstand skal være lille.

### Iltindtrængning

Ilt trænger ind i beton ved diffusion. Ved gasdiffusion er diffusionskoefficienten meget afhængig af betonens fugtighed. I vandmættet tilstand er iltindtrængningen så godt som forhindret, og armeringen er derfor forhindret i at ruste. I figur 31 er ilt diffusionskoefficienten vist i afhængighed af fugtigheden for betoner støbt med forskellige cementtyper og v/c-forhold (Gjørøv, Vennesland & El-Busaidy, 1976).

Heraf fremgår, at iltindtrængning over vandlinien og i vandlinien vil være tilstrækkelig. Det er derfor andre parametre, der styrer rustdannelsen. Passende langt under vandlinien, hvor betonen er vandmættet, vil ilttilgangen være hæmmet således, at korrosion normalt ikke frembyder problemer, medmindre katodearealet er stort i forhold til anoden, fx hvis en lokalskade afdækker armeringen i en ellers tæt betonkonstruktion. Her kan den lokale korrosionshastighed blive stor.

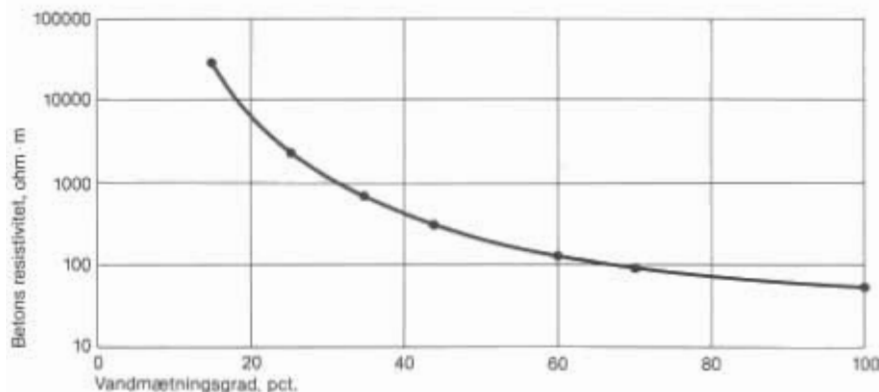


Figur 31. Ildiffusionskoefficient for beton i afhængighed af cementtype, v/c-forhold og luftens relative fugtighed. Det ses, at fugtighed hæmmer ildiffusion. Tilførsel af ilt til beton, der er konstant neddykket i vand er meget lille. Dels er ildiffusionskoefficienten lille for vandmættet beton, dels er vands iltkoncentration normalt lille. Det betyder, at korrosionsrisikoen er lille for armeret beton under vandlinien, men stor over. (Gjørsv, Vennesland & El-Busaidy, 1976).

### Elektrisk modstand

Ved korrosionsprocessen virker betonen, via porevæsken og dens salte, som en elektrolyt. Derfor er den elektriske modstand af beton en afgørende parameter ved rustdannelsen. Den elektriske modstand afhænger hovedsageligt af betonens vandindhold. Andre parametre som v/c-forhold, stenindhold mv. har også en vis, men langt mindre betydning. I figur 32 er der vist et eksempel på en betontypes elektriske modstand i afhængighed af vandmætningsgraden.

Tilsætning af mikrosilica til beton kan medføre ekstrem stor tæthed. Det har en meget gunstig indflydelse på betonens elektriske modstand (Vennesland, 1981).



Figur 32. Betons resistivitet (specifik resistans) i afhængighed af betons fugtighed. Med øget fugtighed og chloridindhold falder betons resistivitet, men fugtigheden har størst indflydelse. Det samme er tilfældet med øget v/c-forhold. Tilsætning af mikrosilica kan medføre ekstrem stor tæthed og dermed stor resistivitet. (Vennesland, 1981).

## Målemetoder

Der foretages normalt periodisk eftersyn af betonbygværker for at kunne vurdere behov for vedligehold eller reparation. Derfor må man have identifikations- og målemetoder, således at chloridindhold i beton kan påvises og måles.

### Frisk beton

For at sikre, at den friske beton ikke får for stort chloridindhold iht. kravene i DS 411, 3. udgave, kan chloridindholdet i betonens delmaterialer (sand, sten, vand, tilsætningsstoffer og puzzolan) bestemmes hver for sig. Det simpleste er dog at foretage en prøvestøbning med den valgte beton. Ved at indsamle lidt af det vand, der udskilles på overfladen (vandseparation), kan man få en analyseprøve.

Ønsker man blot at påvise, at der ikke er chlorid i den indsamlede vandprøve, kan man anvende en simpel indikator. Man kan fx tilsætte lidt lapisvand, dvs. en salpetersur opløsning af sølvnitrat  $\text{AgNO}_3$ . Udskilles der ikke  $\text{AgCl}$ , er der ingen grund til yderligere analyser. Man kan også anvende en indikatorstrimmel, Quantab, til registrering af chloridindhold. Det er herved muligt at bestemme væskens chloridindhold i ppm og derved omregne til betonens chloridindhold.

Er der tale om et chloridindhold, der ligger betænkeligt nær betonnormens grænser, bør den friske betons chloridindhold bestemmes efter DS 423.19: Chloridindhold.



### *Hærdnet beton*

Bestemmelse af hærdnet betons chloridindhold er aktuel ved eftersyn af beton, hvor der er begrundet formodning om, at betonen har været chloridbelastet. Det simpleste er at udtage en betonprøve af armeringens dæklag og foretage en chloridbestemmelse på denne. Der opnås imidlertid et højere informationsniveau ved at bestemme et chloridprofil. Til dette formål kan der udbores en passende lang betonkerne, og betonens chloridindhold kan bestemmes i forskellige afstande fra kernens (chloridbelastede) overflade.

Den hærdnede betons chloridindhold bestemmes efter DS 423.28: Kloridindhold.

### **Forholdsregler imod chloridoptagelse**

Armeret beton kan beskyttes imod skader fra chloridoptagelse på principielt forskellige måder:

- Valg af betonsammensætning, der ved tæthed sikrer en passende lav chloridindtrængningshastighed i bygværkets stipulerede funktionstid.
- Anvendelse af korrosionshæmmende tilsætningsstoffer (inhibitorer).
- Valg af korrosionsbestandig armering.
- Valg af en »chloridbremsende« overfladebehandling uden de helt strenge krav til betonsammensætning af hensyn til begrænsning af chloridindtrængning.

Ved nybyggeri er alle metoder, eller kombinationer heraf, mulige. I forbindelse med vedligehold er selvsagt kun den sidste metode brugbar. Overfladebehandling og membraner skal vedligeholdes og evt. fornyes fra tid til anden.

### *Betonproportionering*

Den chloridindtrængningsformel, der er opstillet i det foregående, kan i princippet anvendes til beregning af det nødvendige  $v/c$ -forhold. Derved forstås en værdi af  $v/c$ -forholdet, under hvilken armeringens dæklag er i stand til at beskytte armeringen mod chloridophobning til den kritiske værdi i den omliggende beton i bygværkets stipulerede funktionstid.

Med en rimelig stipuleret funktionstid på 70 år, et dæklag på 40 mm og en chloridbelastning på  $5 \text{ kg Cl}^-/\text{m}^3$  beton samt urevnet beton uden initialchloridindhold bliver  $v/c < 0,36$ . Disse forudsætninger er ikke urealistiske. Konklusionen er, at skal en chloridbelastet, armeret betonkonstruktion have en rimelig funktionstid, er det en nødvendig betingelse for at være på den sikre side, at betonens  $v/c$ -forhold er mindre end ca. 0,35.

Betingelsen er dog ikke tilstrækkelig. Betonens komprimering skal desuden være effektiv, og betonens revneintensitet lille. Desuden skal der anvendes

alkaliinaktive tilslagsmaterialer, da chloridionerne ofte stammer fra alkaliske. Stammer chloridionerne fra havvand, må der desuden anvendes sulfatbestandig cement.

#### *Korrosionshæmmende tilsætningsstoffer*

Det er muligt at beskytte armering mod korrosion, selv i et chloridholdigt miljø, hvis det er muligt at hindre atmosfærens ilt i at nå frem til armeringen. Der findes tilsætningsstoffer, inhibitorer, der nedsætter risikoen for armeringskorrosion. Inhibitorer virker ved, at den ilt, der trænger ind i betonen, forbruges ved kemisk reaktion. Eksempler på inhibitorer er natriumnitrit  $\text{NaNO}_2$ , natriumsulfit  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  og natriumchromat  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$  (Arbejdstilsynet!).

Der savnes dog dokumentation for, at inhibitorer er tilstrækkeligt effektive ved højt chloridindhold, og at de har en passende lang funktionsperiode.

#### *Overfladebehandling*

Tidligere, jvf. DIF's norm for vandbygningskonstruktioner 1926, var det kulturet at overfladebehandle beton, der var i berøring med havvand. Den hyppigst anvendte overfladebehandling dengang var overstrykning med kultjære eller asfalt. Sådanne behandlinger blev anvendt på såvel kajkonstruktioner som på pontoner og skibe af armeret beton. I dag findes der mere bestandige membraner end kultjære og asfalt.

I svømmebassiner af armeret beton ser man alle former for beskyttelse. Der er eksempler på, at der anvendes beton med meget lave  $v/c$ -forhold, og der er eksempler på mange forskellige membrantyper (asfaltpap, rustfri (syrefast) stålbelægning, plast mv.). Membranerne skal være chloridbestandige. I selve svømmehallen er der overalt en stor chloridbelastning fra vandsprøjt. Armeret beton i fx springtårne og gangarealer skal også beskyttes imod chloridindtrængning.

Når der anvendes membraner, skal der være en passende sikkerhed for, at membranen kan spænde over bevægelige, lastfremkaldte revner. Dette er ofte det afgørende og kritiske krav.

I særlig aggressive miljøer, fx altangange (tøsalt) og saltkar i industrien (slagterier) ses membraner ofte anvendt.

I stedet for at beskytte selve betonens overflade, kan man behandle armeringen. Der findes mange forskellige måder, hvorpå armeringen kan overfladebeskyttes (epoxy, galvanisering), men fælles for dem alle er, at beskadigelser og »helligdage« kan medføre kraftig grubetæring. Det kan være vanskeligt at kontrollere kvaliteten af en armerings overfladebehandling. Rustfri (syrefast) armering kan anvendes, men det kan være en bekostelig foranstaltning.

## Litteratur

- R. D. Browne et al. 1980. Marine Durability Survey of the Tongue Sands Tower. Concrete in the Ocean Program. Technical Report nr. 5. C&CA Wexham Springs. UK.
- R. D. Browne. 1982. Design Prediction of the Life for Reinforced Concrete in Marine and other Chloride Environments. Durability of Building Materials. pp 113-125. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam.
- J. R. von Daveer. 1975. ACI Journal pp 697-704. USA.
- O. E. Gjrv, Ø. Vennesland, A. H. S. El-Busaidy. 1976. Diffusion of Dissolved Oxygen through Concrete. NACE Corrosion 76. Houston.
- Lars Hjort. 1984. Chloridindtrngning i beton. CtO's informationsdag. CtO. Aalborg.
- Von H. Klopfer. 1974. Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. Bauverlag GmbH, Wiesbaden.
- Sidney Mindess, J. Francis Young. 1981. Concrete. Prentice-Hall Inc. USA.
- Birgit Srensen, Ernst Maahn. 1982. Penetration Rate of Chloride in Marine Concrete Structures. Nordic Concrete Research no. 1.
- Kysti Tuutti. 1982. Corrosion of Steel in Concrete. CMI fo 4. Stockholm.
- Ø. Vennesland, C. L. Page, O. E. Gjrv. SINTEF-rapport.
- Ø. Vennesland. 1981. Silika i Betong, Korosjonsegenskaber. SINTEF rapport nr. STF 65 A 81031. Trondheim.

# Frost/tø-angreb

Beton vil have en større eller mindre porøsitet afhængig af sammensætningen. De forhold, som navnlig har indflydelse herpå er

- v/c-forhold.
- Hydratiseringsgrad.
- Komprimering.
- Tilslagstype.

Beton vil i praksis altid være vandsugende. Det betyder, at beton i vådt miljø kan blive vandmættet. Udsættes beton for frysning i vandmættet tilstand, er der risiko for frostskeer, dvs. frostsprængninger, idet vand ved frysning udvider sig ca. 9 volumenprocent. Det er dog ikke alene betonens sammensætning og miljø, der bestemmer cementpastaens fugtindhold. Hydratiseringsgraden er også medbestemmende for cementpastaens kapillarporøsitet og dermed for betonens sugeevne. Umiddelbart efter betonens udstøbning, dvs. endnu medens betonen er frisk og hydratiseringsgraden er meget lille, er betonen vandmættet. Derfor må man også skelne mellem frostangreb på frisk og på hærdnet beton.

## Frostskademekanisme

Ved frostskeer forstås her en nedbrydning af betonens struktur, fx ved dannelse af revner, afskalninger og springdannelser. En betonkonstruktion, der udsættes for vekslende frost/tø-påvirkninger siges at være frostfast (eller frostbestandig), såfremt der inden for den stipulerede funktionstid ikke fremkommer frostskeer. Om beton er frostfast i et givet miljø afhænger ikke alene af betonen, men også af miljøet og i høj grad af betonkonstruktionens udformning (vandlunker).

### *Frisk og hærdende beton*

Frisk beton er at sammenligne med frostfarlig jord. Det frie vand i den friske beton vil fryse til is, hvis betonens temperatur falder under 0 °C. På grund af vandets udvidelse ved overgang til fast form, vil de faste stoffer i beton derfor blive tvunget fra hinanden. Er afbindingen ikke startet, vil der ikke være dannet en fast struktur i betonen, der kan ødelægges. Ved optøning kan betonen fortsætte den afbrudte afbinding, eventuelt ved en genvibrering, og have mulighed for at opnå fuld styrke.

Den hærdende beton danner overgang til hærdnet beton. Frysning af hærdende beton kan ligeledes sammenlignes med frysning af frostfarlig jord. Ved optøning af frossen beton, hvor afbindingen allerede er startet, men endnu ikke afsluttet, vil betonen bevare den struktur, der er opnået ved frysningen. Man får derfor en porøs beton med ringe sammenhæng og lav styrke. De dannede iskrystaller (isnåle) kan være så store, at de er synlige for det blotte øje. Sporene efter disse isnåle har et meget karakteristisk udseende og omtales ofte som påfuglespor. Frossen beton, hvor afbindingen er startet, kan ikke med godt resultat genvibreres efter optøning.

En hærdende beton, der udsættes for frost således, at kun et overfladelag fryser (utilstrækkelig vinterdækning), medens resten af betonen hærdner, vil senere vise sig at få en meget porøs overflade. Det betyder, at carboniseringshastigheden i en sådan beton vil blive meget større end svarende til betonens  $v/c$ -forhold. Der er i sådanne tilfælde konstateret carboniseringsdybder på ca. 10 mm på mindre end en måned.

### *Hærdnet beton*

Hærdnet beton må, i forbindelse med frysning, betragtes som et materiale bestående af to komponenter, hærdnet cementpasta og tilslag, der hver for sig kan være frostfarlige.

*Cementpasta.* I hærdnet cementpasta er der opbygget en struktur, der kan opfattes som en gelsubstans med et netværk af kapillarporer og en fordeling af luftbobler. Derfor kan vandet i (fugtig) hærdnet cementpasta findes som:

- Frit vand i store kapillarporer.
- Adsorberet vand på gelsubstanser.
- Kemisk bundet vand i hydratiseringsprodukterne.

Vandet i cementpastaen eller porevæsken indeholder salte, der sænker vandets fryse/smeltepunkt med ca. 2 °C. Desuden er porevæsken bundet til kapillarporer og gelsubstans. Det betyder, at porevæsken ikke begynder at fryse ved 0 °C, men lidt under.

Poresystemet indeholder, selv ved lave temperaturer, vand, der ikke er frosset. Det er vand, der er adsorberet til gelsubstanser og befinder sig i de snævrreste gelporer.

Powers og Helmuth har i 1953 formuleret isdannelsesteorien på følgende måde. Når beton udsættes for frysning, trænger frosten ind i betonen fra betonens overflade. Den primære isdannelse starter ved en iskimdannelse et tilfældigt sted i de største kapillarporer. Ved isdannelsen søger omgivelserne, dvs. væggene i kapillarporerne, at hindre ekspansionen. Da kapillarporerne danner et gennemgående »rørnet« i gelsubstansen, opstår der et hydraulisk

tryk i foranliggende ufrosset vand. Dette tryk kan udlignes, hvis der er mulighed for, at det ufrosne vand kan presses ind i betonen foran frysezone. Hvis betonen er vandmættet og cementpastaen ikke kan optage det opståede træk, vil der opstå revner (mikrofine), således at trykket udlignes. Hvis der er ikke-vandfyldte hulrum i betonen, fx luftbobler, kan der ske en udligning af trykket uden revnedannelse ved at porevæsken, der presses frem foran frysezone, træder ind i disse tomme hulrum (luftbobler).

Risikoen for revnedannelse under frysning af fugtig beton afhænger af betonens vandmætningsgrad, cementpastaens permeabilitet og trækstyrke samt af de tomme luftboblers størrelser og indbyrdes afstand. Den sikreste måde, hvorpå man kan få en tilstrækkelig mængde luftbobler i cementpastaen er at tilsætte betonen et luftindblandende tilsætningsstof. Det er imidlertid nødvendigt, at luftboblerne ligger tilstrækkeligt tæt, for at den indblandede luft har en gavnlig indflydelse på betonens frosthæthed. Det er ligeledes nødvendigt, at betonen har opnået en sådan trækstyrke, at porevæskens hydrauliske tryk, der opstår, selv om betonen er luftindblandet, kan optages af cementpastaen. Det kræver, at betonen har opnået en vis hærkning, inden den første frysning finder sted. Betonens nødvendige modenhed kan beregnes som angivet i SBI-anvisning 125.

*Betontilslag.* Hærdnet beton er ikke nødvendigvis frosthædt selv om cementpastaen gennem passende luftindblanding er det. Indeholder betonen porøse sten, der har suget vand, kan der fremkomme springerdannelse i frostvejr, hvis disse sten ligger nær overfladen. Er de porøse, fugtholdige sten dybereliggende, kan betonen få kraftige revnedannelser.

Porøse sten vil ofte være våde, før de iblandes betonen. Desuden vil porøse sten kunne mættes med vand, hvis der fra en betonkonstruktion er dårligt afløb, eller hvis konstruktionen udsættes for heftig slagregn.

De stentyper, der er frostfarlige, er porøse bjergarter som fx flint, kalk, sandsten, skifer og lerholdige bjergarter. Porøs flint i stenfraktionen er dog den hyppigste årsag til springerdannelse. Det karakteristiske for en frostfarlig bjergart er, at den har en høj absorption (vandsugende). Tæt kalksten er derfor ikke frostfarlig. Det er bjergarternes porer, mindre end 0,005 mm, der er kritiske. Disse porer er nemlig store nok til at suge vand, men ikke store nok til at udligne det hydrauliske tryk, der opstår ved frost.

Man skal være klar over, at porøse sten, der er frosthæde, når de ligger frit, godt kan give anledning til afsprængninger (springere), hvis de anvendes til beton, og denne beton kan fryse i våd tilstand.

Det har været forsøgt at vurdere bjergarters frosthæthed ud fra porøsitet og densitet. Det viser sig, at en porøsitet på blot 1-2 volumenprocent er tilstrækkelig til revnedannelse i beton (Larson, 1969). Et densitetskrav er dog ikke tilstrækkeligt. Porefordelingen og stenpartiklernes kornstørrelse er langt

mere betydningsfulde. Af pkt. 3.1.2.2 i DS 411, 3. udgave fremgår det, at porøse korn med partikelstørrelse under 4 mm ikke regnes at være frostfarlige. Dette fremgår også af forsøg (MacInnis & Lau, 1971).

**Tøsaltning.** På gang- og kørearealer af beton, fx altangange og vejbelægninger, anvendes ofte tøsaltning. Det kan være NaCl, CaCl<sub>2</sub> eller Urea. Det viser sig, at frostskafer på beton bliver meget mere omfattende ved tøsaltning end uden tøsaltning, alt andet lige (Verbeck, 1957). Der er foreslået mange forklaringer på dette fænomen, men der er kun tale om formodninger, for hvilke der endnu ikke er ført eksperimentel dokumentation. Blandt de hypoteser, der er opstillet, kan følgende nævnes:

- Tøsaltningen frembringer et osmotisk tryk, der driver betonens fugt mod frysefronten i overfladen. Den således opståede større vandmætningsgrad i betonbelægningens overflade kan gøre betonen frostfarlig (Powers, 1956).

- Tøsaltning skaber indledningsvis en stærk saltopløsning med en stor frysepunktssænkning. Det efterfølgende smeltevand medfører en fortynding af porevæsken, som ved tilstrækkelig fortynding kan fryse. Medens is og sne smelter, opnår beton en så høj vandmætningsgrad, at betonen kan skades ved frysning (Mather, 1979).

- Tøsaltning øger porevæskens saltindhold således, at der sker en frysepunktssænkning. Antallet af frysepunktpassager ændres derved, afhængig af det spektrum, der er for betontemperaturen i tidsmæssig afhængighed. Antallet af frysepunktpassager vil normalt øges, og det giver en hårdere påvirkning af betonen.

- Tøsaltning medfører et så kraftigt temperaturfald (temperaturchock), at der kan dannes termorevner i betonoverfladen. Disse termorevner giver mulighed for hurtigere vandmætning af betonen. Desuden kan vandfyldte termorevner selv være udgangszoner for frostskafer.

Laboratorieforsøg og markundersøgelser tyder på, at betons defekter i overfladen har betydning for frostbestandigheden. Når beton tøsaltes er indflydelsen fra disse defekter mere markant, alt andet lige. Betons overfladedefekter stammer som regel fra utilstrækkelige lagringsbetingelser og uhenigtsmæssig komprimering.

Andre forhold, som den anvendte cementtype, betonens cementindhold (pulverindhold) og v/c-forhold, har også betydning.

### **Fordeling af luftbobler**

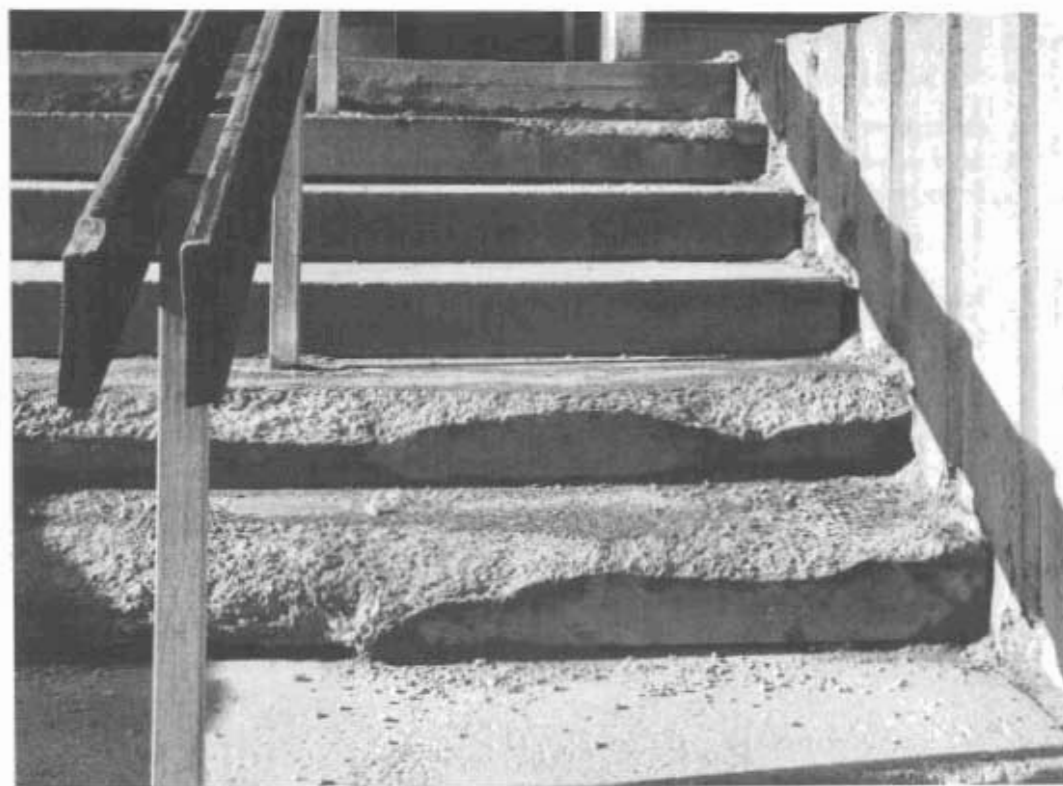
Som tidligere omtalt har fordelingen af luftbobler i betonens cementpasta en afgørende indflydelse på betonens frostfasthed. Luftboblernes diameterfor-

deling kan beskrives ved deres »kornkurve«. Det kræver imidlertid en langt mere detaljeret beskrivelse, end det er muligt at udnytte med vor nuværende viden. Derfor har man i stedet valgt at beskrive luftboblestrukturen i den hærdnede beton ved nogle simple parametre, nemlig luftboblernes

- samlede volumen  $A$ ,
- specifikke overflade  $\alpha$ , og en heraf afledt størrelse,
- afstandsfaktor  $\bar{L}$ .

Der skal i det følgende knyttes nogle bemærkninger til disse størrelses definitioner og anvendelse.

*Figur 33. Trapper, der udsættes for tøsøltning, er særlig udsatte for frost/tø-skader i form af smuldrning af cementpastaen. Hvis en beton, der kan mættes med ferskvand, netop kan modstå en frost/tø-påvirkning, vil en tøsøltning ofte resultere i, at betonen får frost/tø-skader. For at kunne modstå frost/tø-påvirkning, når der samtidigt tøsøltes, må der stilles skærpede krav til betonens indblandede luftboblesystem (indhold og specifik overflade). Tillægskravene afhænger af tøsøltet, fx om der anvendes NaCl, CaCl<sub>2</sub> eller Urea.*





### Luftboblernes diameterfordeling

Størrelsesfordelingen af luftboblernes diametre kan beskrives ved histogram eller sumpolygon for luftboblernes kordefordeling i et plansnit i betonen (Willis, 1949). Disse fordelinger begrænses både opadtil og nedadtil. Nedadtil sættes grænsen til 0,0075 mm af måletekniske grunde. Opadtil anvendes en grænse, således at betonens naturlige luft i form af luncker og grovporøsiteter (indkapslet luft) ikke medtages.

Luftboblernes fordeling, beskrevet ved kordefordelingen, har mest forskningsmæssig betydning. Af den kan man se, hvad der er sket, når der konstateres en ændring i de mere simple parametre som afstandsfaktoren og den specifikke overflade.

### Luftindholdet

Luftboblernes samlede volumen er det simpleste mål for betonens luftindhold. Der skelnes sjældent mellem den (med forsæt) indblandede luft og den naturlige (indkapslede) luft, når der er tale om frisk beton.

I Danmark skelner man undertiden ved angivelse af luftindholdet i hærdnet beton mellem:

- Totalt luftindhold.
- Luftindhold i bobler med diameter over 2 mm.
- Luftindhold i bobler med diameter under 0,35 mm, men over 0,0075 mm.

Betonens luftindhold kan angives i liter/m<sup>3</sup> beton. Hyppigt ser man luftindhold angivet i pct. af betons volumen  $B_r$ . Indeholder beton et luftvolumen  $A$ , er det relative luftindhold i betonen

$$a_b = A/B_r$$

Beton er sammensat af volumenbidrag fra cement  $C_r$ , vand  $V$ , luft  $A$  og tilslag  $G_r$ , dvs.

$$B_r = C_r + V + A + G_r$$

Luften i betonen befinder sig imidlertid alene i pastaen. Derfor er det ikke hensigtsmæssigt at regne tilslagsandelen med, da den kan variere fra beton til beton. Man ser af den grund oftere betons luft angivet som det procentiske luftindhold i pastaen. Da pastaen defineres som betonens indhold af vand, cement og eventuel forekomst af pulver, er pastaens relative luftindhold

$$a_p = \frac{A}{B_r - A - G_r} = \frac{a_b}{1 - a_b - G_r/B_r}$$

Heraf ses, at der hersker følgende relation:

$$a_b = \frac{1 - G_r/B_r}{1 + 1/a_p}$$

*Figur 34. Frost/tø-skader på betonbelægninger og betonfliser viser sig som smuldring i og afskalning af betonoverfladen, når cementpastaen ikke er frostbestandig, men tilslaget er det. Der kan være stor forskel i kvaliteten i en betons overflade og dens indre. Det kan betyde, at overfladelaget skaller af ved frost/tø-påvirkning og at nedbrydningen derefter standser.*



Sættes  $B_r = 1 \text{ m}^3$ , og betegner  $G$  betonens tilslag i  $\text{kg/m}^3$ , fås

$$a_b = \frac{1 - G/\rho_{ssd}}{1 + 1/a_p}$$

hvor  $\rho_{ssd}$  er tilslagsdensitet i enheden  $\text{kg/m}^3$  svarende til våd, overfladetør tilstand.

Man ser undertiden et simplere udtryk angivet for relationen mellem  $a_b$  og  $a_p$ , nemlig

$$a_b = (1 - G/\rho_{ssd}) a_p$$

Dette svarer til, at betons pasta defineres som indholdet af vand, luft, cement og eventuel forekomst af pulver. Det er en anden definition end normalt anvendt i betonteknologien. Derfor bør man for denne substans anvende betegnelsen kitmasse (Suenson, 1931).

#### Eksempel 7

En beton skal luftindblandes således, at den luftfri pasta får et luftindhold mellem 15 og 30 pct. Cementens relative densitet er  $D_c = 3,1$  og tilslags relative densitet er  $D_{st} = 2,6$ . Betonens cementindhold skal være  $C = 350 \text{ kg/m}^3$  og desuden skal  $v/c = 0,4$ . Med et luftindhold i pastaen på  $a_p = 15$  pct. findes følgende sammensætning:

Komponent type	Masse $\text{kg/m}^3$	Relativ densitet	Rumfang $\text{liter/m}^3$
Cement .....	350 .....	3,1 .....	113
Vand.....	140 .....	1,0 .....	140
Luft .....	0 .....	0,0 .....	38
Grus .....	1843 .....	2,6 .....	709
Beton .....	2333 .....	2,3 .....	1000

Med et luftindhold i pastaen på  $a_p = 30$  pct. findes derimod følgende sammensætning:

Komponent type	Masse $\text{kg/m}^3$	Relativ densitet	Rumfang $\text{liter/m}^3$
Cement .....	350 .....	3,1 .....	113
Vand.....	140 .....	1,0 .....	140
Luft .....	0 .....	0,0 .....	76
Grus .....	1745 .....	2,6 .....	671
Beton .....	2235 .....	2,2 .....	1000

Den indblandede luft skal altså udgøre 3,5 til 7,6 pct. af betonen. Havde man fejlagtigt anvendt den simple formel, kunne man være kommet til den konklusion, at betonens luftindhold havde følgende grænser:

$$\min a_b = (1 - 1843/2600) 0,15 = 4,4 \text{ pct.}$$

$$\max a_b = (1 - 1745/2600) 0,30 = 9,9 \text{ pct.}$$

### *Specifik overflade*

Som mål for luftboblernes størrelse kunne man have anvendt middelværdi og spredning for diameterfordelingen. I stedet har man valgt at anvende luftboblernes samlede overflade i forhold til deres rumfang. Dette forhold benævnes den specifikke overflade. Enheden er normalt  $\text{mm}^2/\text{mm}^3$ , altså  $\text{mm}^{-1}$ . For en luftboble med diameter  $d$  er overfladen

$$S = \pi d^2$$

og rumfanget er

$$R = \frac{\pi}{6} d^3$$

Den specifikke overflade af denne luftboble er da

$$\alpha = S/R = 6/d$$

Ved den specifikke overflade af luftindholdet i beton forstår man summen af alle luftboblernes specifikke overflader. For gængse luftindblandinger i beton ligger den specifikke overflade ofte mellem ca. 20 og  $60 \text{ mm}^{-1}$ .

### *Afstandsfaktor*

Som et mål for luftboblernes afstand anvendes et fiktivt mål, afstandsfaktoren  $\bar{L}$ . Afstandsfaktoren er defineret som den største afstand fra et punkt i cementpastaen til den nærmeste luftbobleoverflade under følgende forudsætninger:

- Alle luftbobler har kugleform og er lige store.
- Luftboblerne er fordelt i et kubisk gitter i pastaen (altså *ikke* i betonen).

Afstandsfaktoren er altså en størrelse, der er afledt af luftboblernes rumfang og specifikke overflade under urealistiske forudsætninger. Det er derfor mere rationelt i stedet at anvende de parametre, der måles, nemlig luftindholdet og den specifikke overflade. Tidligere har afstandsfaktoren dog været benyttet ved kravformuleringen for at opnå frostfast beton, men det er nu forladt til fordel for krav til den hærdnede betons luftindhold og luftboblernes specifikke overflade.

## Frostskadekriterier

Frysning af beton i vandmættet tilstand kan og har ofte givet anledning til frostskader, dvs. smuldring af betons cementpasta. For at undgå frostskader af beton med frostfaste grusmaterialer, har man i tidens løb anbefalet forskellige forholdsregler.

Indtil ca. 1940 stræbte man efter at gøre betonen tættest mulig. Derefter kom en periode efter ca. 1950, hvor man stræbte efter at give betonen en luftindblanding på ca. 5 pct. Det viste sig imidlertid i praksis, at den nødvendige luftmængde afhang af luftboblernes størrelser og fordeling samt af betonens sammensætning i øvrigt. Sidst i 1950'erne opstillede T. C. Powers teorien for, hvornår beton er frostfast. På basis heraf stræbte man i den følgende periode at indblende luft i beton, således at afstandsfaktoren højst blev 0,25 mm.

Der er blevet udført mange frostforsøg i laboratoriet, hvor man har sat et mål for betons frostbestandighed i afhængighed af den hærdnede betons målte luftindhold  $A$  og luftboblernes specifikke overflade  $\alpha$ . Det viste sig, at skulde man opnå frostbestandighed ved frysning i vandmættet tilstand skulle afstandsfaktoren være mindre end en vis kritisk værdi, dvs.

$$\bar{L} < \bar{L}_{cr}$$

Denne afstandsfaktor kan opnås for mange forskellige kombinationer af specifik overflade og luftindhold i pastaen. Der er imidlertid forskellige grunde til at foretage visse begrænsninger.

- Ved et stort luftindhold i pastaen,  $a_p > 30$  pct., vil luftboblerne klumpe, og der dannes uønskede porøsiteter.
- Ved små luftindhold i pastaen,  $a_p < 15$  pct., kræves så stor specifik overflade, at luftboblerne bliver så små, at der er fare for, at de helt eller delvis lukkes ved afsætning af krystaller fra betonens porevæske, specielt hvor der er tale om vandbelastet beton.

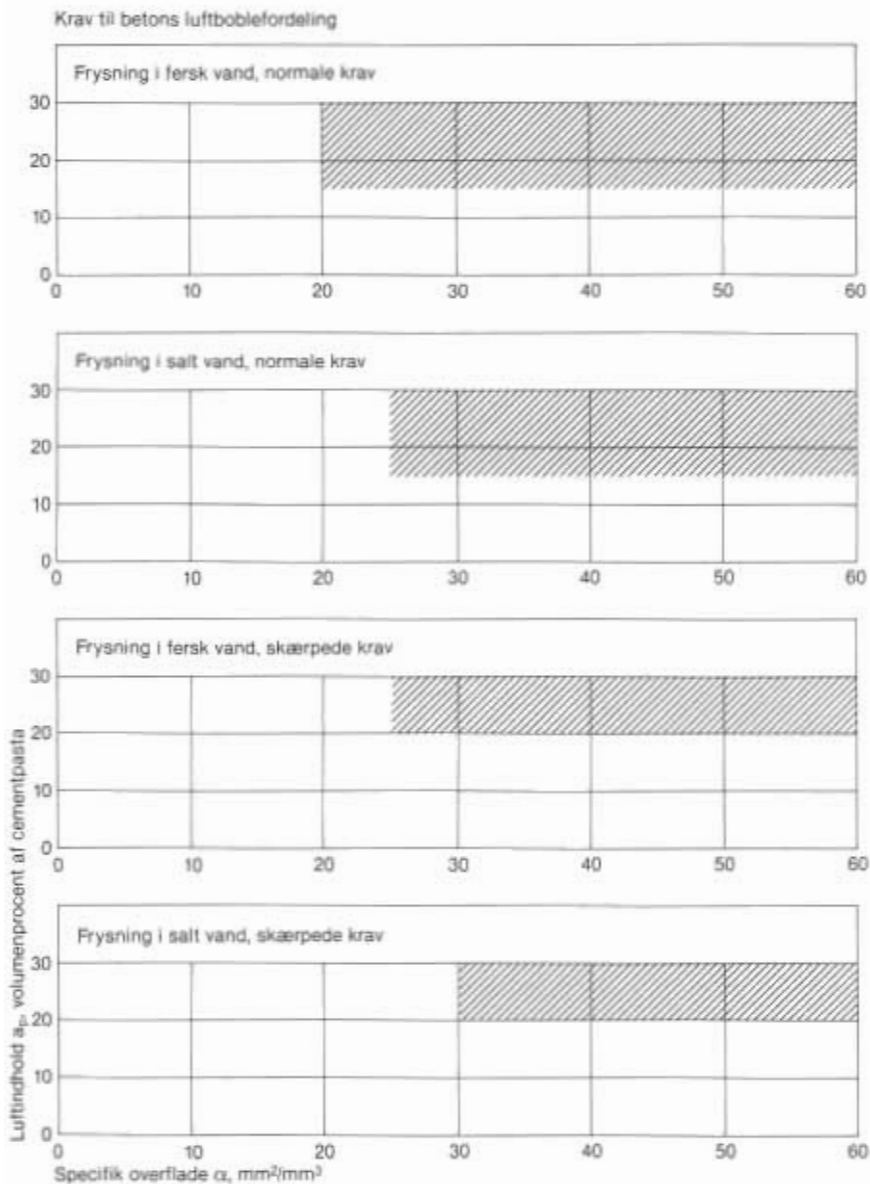
Derfor kan man i dag anbefale følgende normalkrav anvendt:

- Frysning i fersk vand:  $15 < a_p < 30$  pct. og  $20 < \alpha < 60$  mm<sup>-1</sup>.
- Frysning i salt vand:  $15 < a_p < 30$  pct. og  $25 < \alpha < 60$  mm<sup>-1</sup>.

Er de økonomiske konsekvenser ved frostskader betydelige, kan følgende *skærpede krav* anvendes:

- Frysning i fersk vand:  $20 < a_p < 30$  pct. og  $25 < \alpha < 60$  mm<sup>-1</sup>.
- Frysning i salt vand:  $20 < a_p < 30$  pct. og  $30 < \alpha < 60$  mm<sup>-1</sup>.

Disse områder for frostfast beton er vist i figur 35. Det skal bemærkes, at andre krav til sammensætning (fx  $C$  og  $v/c$ ) samt udførelse (fx komprimering og lagring) skal være opfyldt. Desuden skal det erindres, at der skal kompenseres for styrketab som følge af luftindblandingen.



Figur 35. Normale og skærpede krav (angivet ved skraverede arealer) til betons luftbobelfordeling for at opnå frostbestandighed i forskellige miljøklasser ved frysning i vandmættet tilstand. Andre krav skal samtidig være opfyldt. Det gælder stenmateriale (densitet og porøse belægninger), sammensætningen (cementindhold og v/c-forhold) samt udførelse (komprimering og efterbehandling).

Ovenstående betragtninger og anbefalinger er dokumenteret for beton såvel med som uden tilsætning af mikrosilica, men synes at være på den usikre side for beton med tilsætning af flyveaske. Årsagerne hertil er endnu ikke afklarede.

### Målemetoder

Til brug for kontrol af betons frostbestandighed er der behov for simple og hurtige målemetoder. Disse metoder kan opdeles i tre grupper, nemlig:

- Måling af luftindhold i frisk beton ved gravimetrisk metode og press-ur-meter metoden.
- Måling af luftindhold og luftboblernes specifikke overflade i hærdnet beton ved traversmetoden efter ASTM C 457 eller tilsvarende.
- Måling af støbt/udboret betonprøvers frostbestandighed ved standardiseret frost/tø-påvirkning efter DS 423.29. Denne prøvningsmetode er trukket tilbage i 1985 og ny prøvningsmetode forventes.

Ud over disse metoder findes der til forskningsmæssige opgaver et antal andre, dog ofte ret omstændige målemetoder, der ikke skal omtales nærmere her.

#### *Måling på frisk beton*

Kravene til betons luftindhold stilles til den hærdnede beton i konstruktionen. Det er derfor en nødvendig, om end ikke en tilstrækkelig betingelse, at den friske beton har et luftindhold, der er lig med det stillede krav plus et tillæg svarende til sikkerhedsmargin og lufttab under transport, udstøbning og komprimering.

Måling af luftindhold i frisk beton skal kunne foregå på en sådan måde, at betonen kan afvises eller korrigeres for luftindhold før udstøbning, hvis de stillede krav ikke er opfyldt.

*Gravimetrisk metode.* Bestemmes den friske betons relative densitet  $D_b$  ved at veje et veldefineret rumfang beton med den ønskede komprimering, kan betonens luftindhold beregnes ud fra de afvejede mængder af cement  $C$ , vand  $V$  og tilslag  $G$  samt viden om disse stoffers relative densiteter. Den luftfri betons relative densitet bliver

$$D_0 = \frac{C + V + G}{C_r + V + G_r}$$

hvor  $C_r = C/D_c$  og  $G_r = G/D_g$ . Det relative luftindhold i betonen bliver da

$$a_b = 1 - D_b/D_0$$

Det relative luftindhold i pastaen er

$$a_p = \frac{A}{A + V + C/D_c}$$

hvoraf man finder

$$A = \frac{C/D_c + V + G/D_g}{-1 + 1/a_b}$$

Den gravimetriske metode er standardiseret i ASTM C 138 og BS 1881, men der findes ingen Dansk Standard for denne metode.

#### *Eksempel 8*

En beton fremstilles ved at blande  $C = 42$  kg rapidcement med  $V = 17$  liter vand og  $G = 220$  kg grus, dvs. i alt 279 kg blanding. Cementens relative densitet er  $D_c = 3,10$  og grusets relative densitet er  $D_g = 2,60$ . Den friske betons relative densitet er blevet målt til  $D_b = 2,30$ . Blandingens luftfri rumfang er

$$R_0 = 42/3,10 + 17 + 220/2,60 = 115,1 \text{ liter}$$

Den luftfri betons relative densitet er således

$$D_0 = 279/115,1 = 2,42$$

Luftindholdet i den friske beton er da

$$a_b = 1 - 2,30/2,42 = 5,0 \text{ pct.}$$

Blandingens luftmængde er følgelig

$$A = \frac{R_0}{-1 + 1/a_b} = \frac{115,1}{-1 + 1/0,05} = 6,1 \text{ liter}$$

således at luftindholdet i luftfri pasta bliver

$$a_p = \frac{A}{V + C/D_c} = \frac{6,1}{17 + 42/3,10} = 20,0 \text{ pct.}$$

På basis af luftholdig pasta (kitmasse) er luftindholdet

$$a_p = \frac{A}{A + V + C/D_c} = \frac{6,1}{6,1 + 17 + 42/3,10} = 16,6 \text{ pct.}$$

*Press-ur-meter metoden.* Luftindholdet i den friske beton kan bestemmes efter DS 423.15, der bygger på trykmetoden. Der skal anvendes et specielt apparat, et press-ur-meter, og der henvises i øvrigt til DS 423.15. Ved et press-ur-meter bestemmes luftindholdet i betonen, og sammensætningen af betonen må kendes, hvis der skal kunne omregnes til luftindholdet i pastaen.



### Måling på hærdnet beton

*Traversmetoden.* Luftindholdet i hærdnet beton og luftboblernes specifikke overflade kan bestemmes ved måling på et planslib af en støbt eller en udboret betonprøve. Der stilles store krav til planslibets kvalitet, idet overskårne luftboblers kanter skal stå helt skarpe.

Planslibet gennemløbes med et mikroskop i en række parallelle mållinier hen over planslibet. Den samlede mållinies længde skal være mindst 1000 mm. Langs denne mållinie måles:

- Den gennemmålte strækning,  $m$ .
- Antallet af luftbobler, der skærer mållinien,  $n$ .
- Summen af kordelængder, som mållinien afskærer,  $k$ .

Efter Smith og Guttman vil den specifikke overflade kunne beregnes som

$$\alpha = 4n/k$$

uafhængig af boblernes form og fordeling (Willis, 1949). Luftindholdet i den hærdnede beton kan beregnes som

$$a_b = k/m$$

Kendes betonens relative cementpastaindhold  $p$ , enten fra blanderecepten eller fra en punkttælling på planslibet, kan luftindholdet i pastaen beregnes af

$$a_p = \frac{1}{1 + p/a_b}$$

*Frostprøvning.* Det kan ske, at de stillede krav til betonens indblandede luft ikke er blevet opfyldt ved kontrollen. I så tilfælde må betonens frostbestandighed i stedet dokumenteres ved forsøg. En sådan dokumentation kan dog også være krævet i bygværkets betonbeskrivelse. I Danmark er frostprøvning standardiseret som DS 423.29.

Frostprøvning af en støbt eller udboret betoncylinder er for bygværkets frostbestandighed, hvad styrkeprøvning af en støbt eller udboret betoncylinder er for bygværkets bæreevne. Begge metoder beskriver egenskaber ved betonen, men det afhænger af bygværkets påvirkning (miljø og last), om der vil opstå frost/tø-skader i praksis.

For at frostprøvning af beton kan bruges i praksis kræves en entydig frost/tø-påvirkning, der er så mange gange strengere end normal praksis, at der er en passende sikkerhedsmargin til at tage højde for usikkerheden og andre variationer. Det svarer til den sikkerhedsmargin, man opnår for en konstruktions bæreevne ved anvendelse af partialkoefficienter.

DS 423.29 var en ny metode her i landet. Med denne metode blev der skabt

en retsgyldig vurderingsmetodik med hensyn til betons frostbestandighed på samme måde, som man med DS 423.23 kan vurdere betons styrke entydigt.

Som nævnt på side 106 og i figur 36 er DS 423.29 trukket tilbage i 1985 og en ny prøvningsmetode forventes.

### **Forholdsregler imod frost/tø-angreb**

Al beton, der kan fryses i vandmættet tilstand bør sikres imod frost/tø-skader. Det betyder, at såvel betonens tilslag som cementpastaen skal være frost-fast. I henhold til DS 411, 3. udgave skelnes der mellem tre grader af miljøpåvirkninger, hvor frost kan komme på tale, nemlig:

- Moderat miljøklasse, hvor beton er udsat for ferskvand og kan fryse i vandmættet tilstand.
- Aggressiv miljøklasse, hvor beton er udsat for saltvand og kan fryse i vandmættet tilstand.
- Særligt aggressive miljøer, hvor beton kan fryse i vandmættet tilstand og kan blive udsat for tøsaltning.

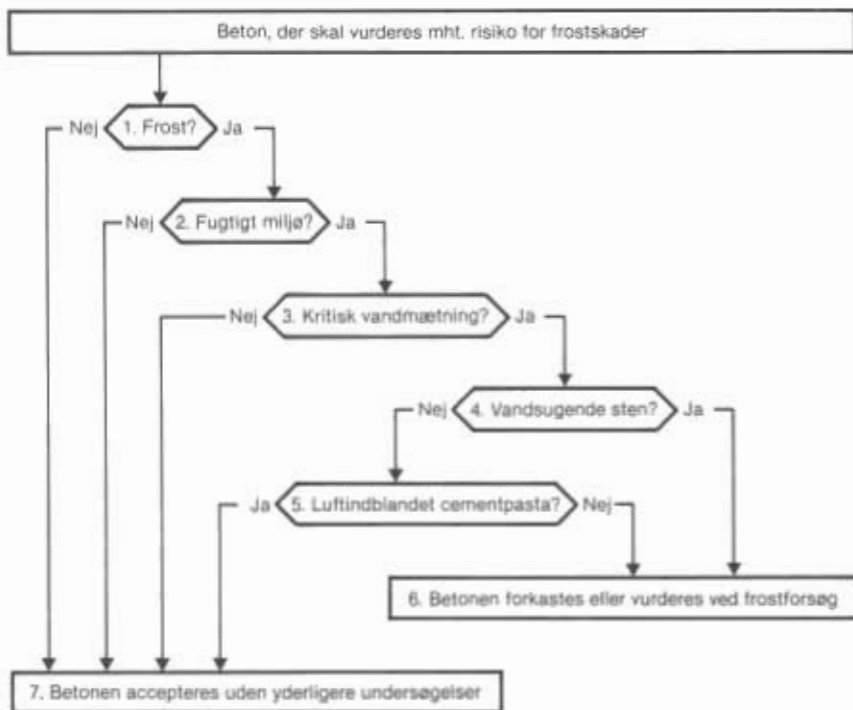
Afhængig af de økonomiske konsekvenser ved frost/tø-skader, kan kravene til betonen stilles som *normalkrav* eller som *skærpede krav*. Vurdering af risiko for frost/tø-skader kan ske som anført i figur 36.

### *Betonproportionering*

Målet med betonproportionering er at finde en sådan betonsammensætning, at de stillede krav til den hærdnede betons indblandede luft opfyldes med en tilpas ringe påtalerisiko for entreprenøren (Poulsen, 1982). De senere års udstrakte anvendelse af vandreducerende og super-vandreducerende tilsætningsstoffer har gjort den friske betons luftporesystemer mere ustabile. Det betyder større lufttab fra den friske beton under transport, pumpning, udstøbning og komprimering. Der er ikke alene tale om et tab i luftvolumen, men der sker også en ændring af luftboblernes specifikke overflade, dvs. at luftboblernes størrelsesfordeling ændres (Poulsen, 1982).

Der må derfor proportioneres en beton med et så stort luftindhold, at betonen efter diverse lufttab under behandlingen har et luftindhold og en specifik overflade mindst som krævet. At opnå dette kræver større praktisk erfaring end egentlig teoretisk viden.

Hvis der er mulighed for det, er den bedste fremgangsmåde, at betonen forplastificeres på fabrikken, og dér gives et passende luftindhold. Efter transport til byggepladsen korrigeres betonens konsistens og luftindhold med behørig hensyntagen til tab ved pumpning og komprimering. Ved en passende prøvestøbning under realistiske vilkår, fx et fundament (i frostfri dybde!),



kan luftporefordelingen i og frostbestandigheden efter DS 423.29 bestemmes for forskellige doseringer af luftindblandende tilsætningsstoffer. På basis heraf kan betonsammensætningen fastlægges således, at der er en passende lille risiko for forkastelse ved den vedtagne kontrol.

Kravet til luftindhold i betonens pasta vil ofte være givet som et tosidet krav, medens kravet til luftboblernes specifikke overflade kan være et ensidigt krav.

Figur 36, modstående side. Beslutningsdiagram til vurdering af risiko for frost/tøskader.

1. Ved vurdering af, om betonen i den pågældende betonkonstruktion vil blive udsat for frost, skal byggeperioden inddrages i vurderingen. Det samme gælder for betonelementers ophold på åben lagerplads forud for anvendelsen.

2. Til fugtigt miljø henregnes moderat og aggressiv miljøklasse samt særlig aggressive miljøer efter DS 411, 3. udgave.

3. Vandmætning af beton opnås kun, når beton bliver vandbelastet i en passende lang periode. Dårlig vandaflledning, fx som følge af vandrette betonoverflader, lunger, ophobning af sne, stoppede vandafløb, fugtholdende materialer (gulvtæpper på altaner, mos på og græs op ad beton), befordrer vandmætning.

4. Om en sten er fugtsugende kan konstateres ved at presse den let mod tungen. Det kan umiddelbart mærkes, hvis stenen er vandsugende. Stenpartiklernes densitet kan anvendes som vikarierende egenskab for frosthæthed. Densiteten måles ved prøvningsmetoden DS 405.4. Ringe risiko for frost/tøskader opnås, hvis indholdet af korn med relativ densitet under 2,5 højst er 5 vægt pct. samtidig med, at indholdet af korn med relativ densitet under 2,4 højst er 1 vægt pct. Det skal erindres, at stenpartiklers frosthæthed kun kan måles ved indstøbning i beton, der frost/tø-belastes.

5. Ved luftindblandet cementpasta forstås, at der i betonens pasta er frembragt et luftbobblesystem under blandedprocessen ved tilsætning af et luftindblandende tilsætningsstof. Skal der være ringe risiko for frost/tø-skade på ferskvandsmættet cementpasta, skal luftindholdet i den hærdnede cementpasta være større end 15 pct., og luftboblernes specifikke overflade skal være større end 20 mm<sup>2</sup>. I tilfælde af saltvandsmættet cementpasta, er de tilsvarende tal henholdsvis 15 pct. og 25 mm<sup>2</sup>. Ved cementpasta forstås alt i betonen på nær luft, sand og sten. For ikke at opnå mærkbare bivirkninger, bør luftindholdet og specifik overflade være mindre end henholdsvis 30 pct. og 60 mm<sup>2</sup>.

6. På basis af ovenstående vurdering må betonen forkastes, medmindre den undersøges ved frostprøvning, DS 423.29. Her vurderes betonen både visuelt og ud fra vægttabsmåling. DS 423.29 er trukket tilbage i 1985 og ny prøvningsmetode forventes.

7. Der stilles normalt andre krav til hærdnet beton end frostsikkerhed, fx tæthed og styrke.

Selv om der stilles et konkret krav til luftindholdet i pastaen og den specifikke overflade af luftboblerne, vil en kontrol af betonens frosthæthed efter DS 423.29 være en overordnet metode. Det betyder, at en entreprenør i princippet kan ignorere de stillede krav til luftporefordelingen og »nøjes« med kontrol efter DS 423.29. Det viser sig, at her tæller stort pulverindhold og lavt v/c-forhold også gunstigt med. Det er ikke altid medtaget i kravene til betonens indblandede luft.

## Litteratur

- T. D. Larson, P. D. Cady. 1969. Identification of frost susceptible particles in concrete aggregates. National Cooperation Highway Research Program. Report 66. Washington D. C.
- C. MacInnis, E. C. Lau. 1971. Maximum aggregate size effect on frost-resistance of concrete. Journal of ACI. Proceedings 68:2. USA.
- B. Mather. 1979. Concrete need not to deteriorate. Concrete International 1. no 9. USA.
- Ervin Poulsen. 1982. Ændringer i luftporesystemet ved transport og pumpning. Anonyme resultater. Beretning fra foredrag i Dansk Betonforening november 1982.
- Ervin Poulsen. 1983. Proportionering af langtidsholbar beton med indbygget sikkerhed. Dansk Betonforening, publikation nr. 19. København.
- T. C. Powers, R. A. Helmuth. 1953. Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste during Freezing. Proceeding of the Highway Research Board. Vol 32. USA.
- T. C. Powers. 1956. Resistance to weathering, freezing and thawing. ASTM Sp. Tech. Publicn. No 169. USA.
- Carl le Sage de Fontenay. 1982. Isdannelse i hærdnet Cementpasta. Laboratoriet for Bygningsmaterialer. Teknisk Rapport 101/82. DTH.
- G. J. Verbeck, P. Klieger. 1957. Studies of salt scaling of concrete. Highway Research Bd. Bul. No 150. Washington D. C.
- T. F. Willis. 1949. Discussion of The Air Requirement of Frost Resistant Concrete by T. C. Powers. Proc. Highway Research Board, 29. USA.

# Hærdevarme

Hærdevarme er den varme, der opstår i beton på grund af kemiske processer under hærdningen. For at få et indtryk af størrelsesordenen af den udviklede energi kan det nævnes, at der i en beton med 350 kg rapidcement pr. m<sup>3</sup> under hydratiseringen udvikles energi, der – såfremt der ikke afgives varme til omgivelserne – vil få temperaturen til at stige godt 50 °C. Under normale forhold vil ca. halvdelen af denne energi blive frigjort inden for det første døgn.

Den i figur 37 viste temperaturafhængighed bruges fx ved fremstilling af betonelementer, hvor man ofte udover den ved hydratiseringen udviklede varme tilfører varme udefra (fx ved damphærdning).

I det følgende gennemgås de vigtigste forhold omkring hærdevarme, og hvorledes termorevner som følge heraf kan undgås. For en mere detaljeret behandling henvises til SBI-anvisning 125.

## Modenhed

Normalt refererer man til beton lagret ved 20 °C. Det ses af figur 37, at man fx ved hærdning ved konstant 55 °C vil opnå 28 døgns egenskaber allerede efter  $28/4 = 7$  døgn. Derimod vil der ved lagring ved 10 °C gå  $28/0,5 = 56$  døgn før disse egenskaber er opnået.

Man taler derfor om betonens modenhedsalder (maturityalder). Den defineres som den tid en beton skal lagres i ved 20 °C for at opnå den samme hærdning, som betonen *har* opnået.

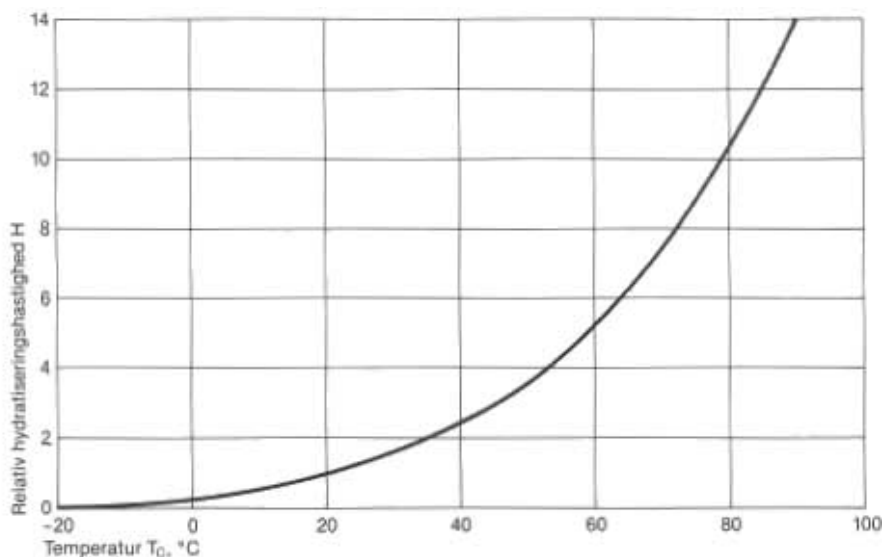
Ifølge det ovenstående fås således ved 55 °C en maturityalder på 28 døgn efter 7 døgn, mens det ved 10 °C vil tage 56 dage at opnå denne modenhed.

## Termoskader

Hærdevarme kan medføre skader, såfremt der ikke tages hensyn til den. Hvis temperaturen under hærdningen når over 70–80 °C, påvirkes hydratiseringsprocessen, så cementpastaens struktur bliver mere porøs. Det kan resultere i tab af styrke og manglende nedbrydningsmodstand over for miljøet.

Når betontemperaturen ændrer sig, giver det anledning til tøjninger svarende til betonens varmeudvidelseskoefficient og temperaturændringen. Hvis disse ændringer sker ensartet over hele betonkonstruktionen, og denne ikke er fastholdt af ydre kræfter, vil betonen kunne bevæge sig frit, og der vil ikke opstå spændinger.

I praksis er disse betingelser sjældent opfyldt. Hærdevarmen giver derfor anledning til trækspændinger og -tøjninger, eventuelt med revnedannelse til



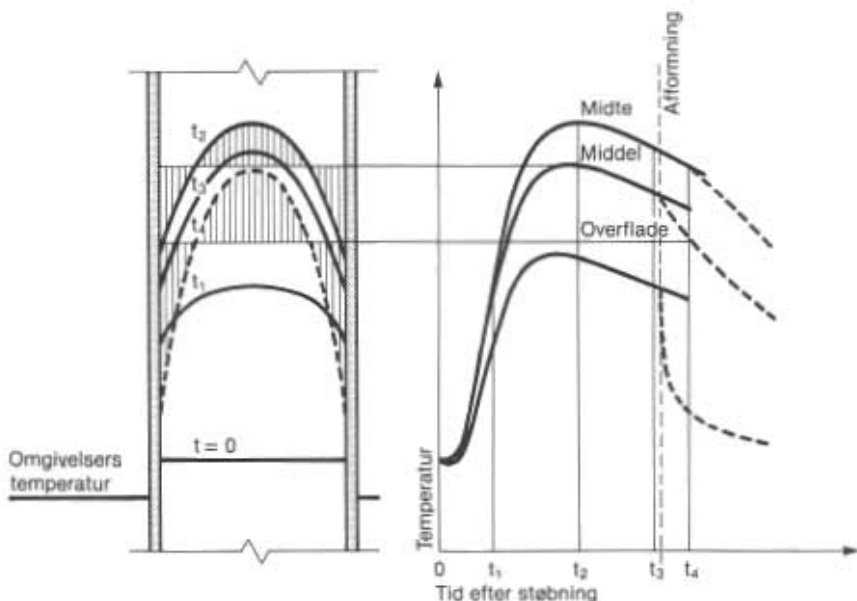
Figur 37. Hydratiseringshastighed ved varierende temperaturer  $T_C$  sat i forhold til hastigheden ved 20 °C. Den relative hastighed  $H = \exp \left\{ \frac{a}{293} - \frac{a}{273 + T_C(t)} \right\}$ , hvor  $a$  er 4000 for  $T_C \geq 20$  °C og  $a = 4000 + 175 (20 - T_C)$  for  $T_C < 20$  °C.

følge. Disse såkaldte termorevner, der ofte er usynlige for det blotte øje i starten, kan danne udgangspunkt for senere nedbrydning af betonen i aggressive miljøer.

Et klassisk eksempel på termorevner ses ofte, hvor en ny konstruktionsdel (fx en væg) støbes sammen med en tidligere hærdnet konstruktionsdel (fx et fundament).

Når temperaturen i væggen efter udstøbningen stiger, vil betonen udvide sig, uden at der opstår særlig store trykspændinger. Dette skyldes, at der foregår en ikke uvæsentlig krybning i betonen i den første fase. Det indebærer, at systemet fundament-væg er spændingsløst i en situation, hvor væggen er væsentlig varmere end fundamentet. Når temperaturen senere udlignes ved, at vægtemperaturen falder, vil der opstå tryk i fundament og træk i væggen. Det kan medføre revnedannelser. Forholdene bliver særligt kritiske, hvis der anvendes varm beton til væggen, og fundamentet og omgivelserne er kolde (vinterstøbning).

Et andet eksempel er vist i figur 38. Her er for en væg skitseret temperaturfordelingen over tværsnittet samt temperaturforløbet for tiden fra støbningen og indtil efter afformningen. Til venstre på figuren er med skravering skitseret de til temperaturtøjningerne hørende spændinger (tryk i midten og træk i overfladen). Tages hensyn til krybningen i den tidlige fase, vil de skitserede



Figur 38. Temperaturfordeling og -forløb i betonevæg under hærdning. De viste temperaturprofiler vil medføre træk i betonen nær overfladen og tryk inde i midten. (RILEM committee 42-CEA, 1981).

spændinger blive reduceret, således at der i sluttetilstanden kommer træk i det indre og tryk i overfladen. På grund heraf vil det ofte være umuligt at observere revnerne, når temperaturerne er udlignet, medmindre fugtforholdene gør dem synlige.

### Forholdsregler imod termorevner

Såfremt man kender udviklingen af alle betonens egenskaber (temperaturudvikling, varmeudvikling, varmeledningstal, varmfylde, styrkeudvikling, stivhedsudvikling, brudtøjningsudvikling, varmeudvidelseskoefficientudvikling mv.) og udviklingen i de ydre forhold (temperatur, isoleringsevne, vindhastighed mv.), er det i princippet muligt ved en simulering at forudsige, om – og i bekræftende fald hvor og hvornår – der vil komme termorevner.

I praksis må man dog normalt opgive at få styr på alle de nævnte parametre, hvorfor man oftest nøjes med at stille krav til selve temperaturudviklingen.

I betonnormen DS 411, 3. udgave er der som noget nyt indført en bestemmelse om, at man skal undgå (skadelige) termorevner.

I normens vejledning anføres, at det for en væg med samme temperatur på begge sider kan antages, at revnedannelser kan undgås, såfremt forskellen mellem væggenes middeltemperatur og overfladetemperatur holdes under ca.



15 °C. Under »normale« hærdeforløb svarer det til, at temperaturdifferensen mellem midte og overflade skal holdes under ca. 20 °C.

Man må her hæfte sig ved ordet »normale«, idet man fx ved hurtig afkøling af overfladen kan få termorevner for temperaturdifferenser væsentligt under 20 °C. I sådanne tilfælde er det mere temperaturgradienten i betonoverfladen, der har betydning, end temperaturdifferensen over tværsnittet.

Termorevner kan ifølge normens vejledning undgås, såfremt forskellen mellem en nystøbt vægs middeltemperatur og et tidligere støbt fundaments temperatur i *nærheden af støbeskellet* på intet tidspunkt under hærdeforløbet overstiger 15 °C. Dette er en uheldig formulering, da vendingen »i nærheden af støbeskellet« kan give anledning til frie fortolkninger, og fordi det snarere er fundamentets middeltemperatur, der er af interesse. For lange vægge kan en beregning efter den tekniske bøjningsteori vejlede om risikoen for dannelse af termorevner.

### *Betonens varmeudvikling*

Betonens varmeudvikling afhænger blandt andet af cementtype, betonens cementindhold, v/c-forhold samt eventuelle tilsætningsstoffer. Man kan som regel med meget god tilnærmelse beskrive varmeudviklingen ved

$$Q = Q_a \exp(-(t_0/M)^n)$$

Her betegner  $Q_a$  varmeudviklingen i enheden kJ/kg cement ved fuld hydratisering, mens  $M$  er betonens modenhedsalder, der afhænger af betonens »temperaturhistorie« i grader Kelvin (K),

$$T_K(t) = T_C(t) + 273$$

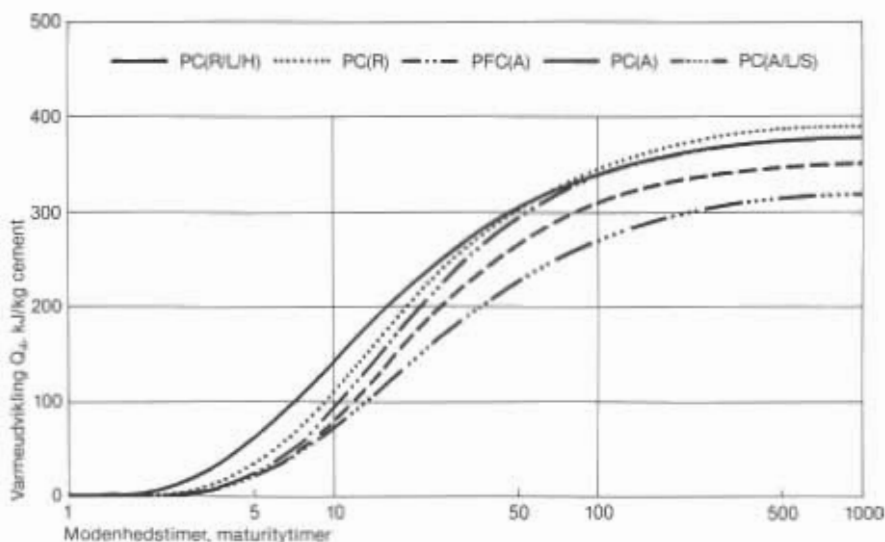
Her er  $t$  betonens alder i klokketimer, og  $T_C(t)$  er betonens temperaturhistorie i °C. Betonens modenhedsalder  $M$  beregnes af

$$M = \int_0^t \exp\left(\frac{a}{293} - \frac{a}{T_K(t)}\right) dt$$

hvor  $a$  repræsenterer aktiveringsenergien, og hvor  $a$  kan sættes til

$$a = \begin{cases} 4000 & \text{når } T_C \geq 20 \text{ °C} \\ 4000 + 175(20 - T_C(t)) & \text{når } T_C < 20 \text{ °C} \end{cases}$$

Det mest sikre er, at man i forbindelse med udførelse af prøvestøbningerne med en beton, samtidig måler varmeudviklingen på den aktuelle beton ved adiabatisk kalorimetri (Sørensen, 1981). Ofte kan man dog klare sig med tidligere erfaringer eller de af CtO publicerede udviklingskurver. CtO publicerer en gang om året middelkurver for varmeudviklingen i de forskellige cementtyper (CtO, 1983).



Figur 39. Varmeudviklingskurver for de 5 mest anvendte cementtyper fra Aalborg Portland. Gennemsnitsværdier for 1982 og første halvdel af 1983. Målt på en betonsammensætning med  $v/c$ -forhold på 0,5. (CtO, 1983).

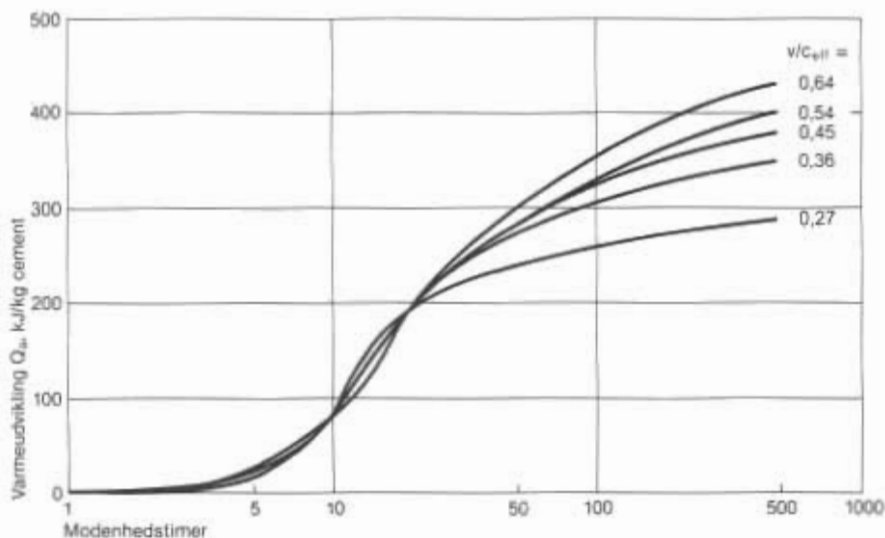
Cementtyper		$Q_0$ kJ/kg	$t_c$ timer	$p$ rent tal
PC (R/L/H)	Hvid portlandcement.....	388	9,9	0,88
PC (R)	Rapidcement .....	399	12,4	0,97
PFC (A)	Standardcement.....	386	14,1	1,01
PC (A)	Almindelig portlandcement.....	357	14,7	1,01
PC (A/L/S)	Lavalkali, sulfatbestandig cement .....	330	15,7	0,90

I figur 39 er gengivet varmeudviklingskurver, der omfatter cement produceret i 1982 og første halvdel af 1983. Varmeudviklingen er målt på en standard betonsammensætning (CtO, 1983), hvor  $v/c$ -forholdet er 0,5. For andre  $v/c$ -forhold skal der foretages omregning.

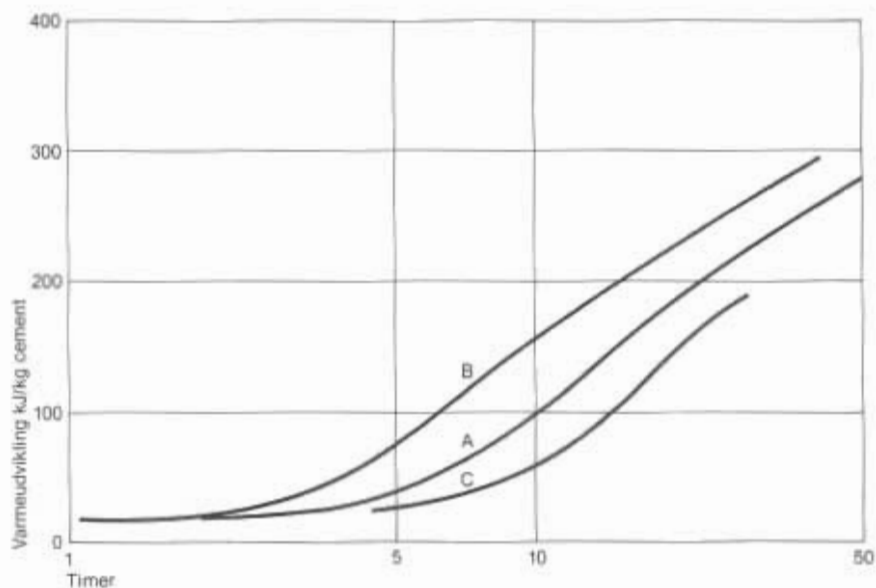
Af formelen for varmeudviklingen fremgår det, at når eksponenten  $p$  er af størrelsesordenen 1, vil betonen udvikle halvdelen af sin varme inden for de første  $1,5t_c$  maturitytimer. Med værdierne fra figur 39 vil det sige inden for de første 15–22 modenhedstimer, afhængig af cementtypen.

Mens varmeudviklingen det første modenhedsdøgn er næsten uafhængig af  $v/c$ -forholdet, vokser den mærkbart med stigende  $v/c$ -forhold i den sidste del af hærdeforløbet, se figur 40.

Dette kan populært forklares med, at hærdeforløbet med lavere  $v/c$ -forhold bliver »bremset« af vandmangel.



Figur 40. Varmeudviklingskurver for betoner af samme cementtype, men med forskellige v/c-forhold. (Sørensen, 1981).



Figur 41. Eksempel på kemisk virkende tilsætningsstoffers indflydelse på de isoterme varmeudviklingsforløb for cementpasta med rapidcement. A uden tilsætningsstoffer. B tilsat accelerator:  $\text{CaCl}_2$ , 1,5 pct. af cementvægten. C tilsat retarder; lignosulfonat, 0,6 pct. af cementvægt. (Freiesleben Hansen, 1978).

### *Tilsætningsstoffer*

Ved anvendelse af tilsætningsstoffer til regulering af betonens hærdeforløb vil varmeudviklingsforløbet i reglen blive ændret i overensstemmelse hermed. Acceleratorer vil fremskynde varmeudviklingen, mens retardere vil nedsætte varmeudviklingshastigheden, se figur 41.

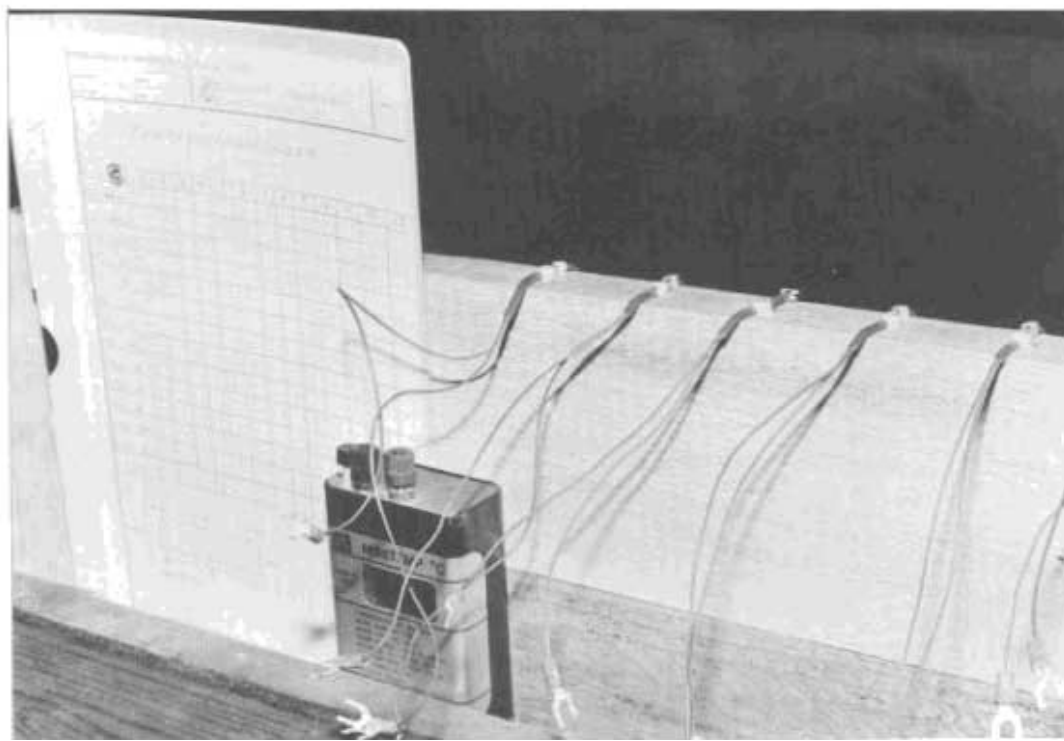
### *Puzzolantilsætning*

Både flyveaske og mikrosilica bidrager til betonens varmeudvikling under hydratiseringen.

Da brugen af disse puzzolaner først for alvor er slået igennem i begyndelsen af 1980'erne, er deres indflydelse på varmeudviklingen endnu ikke fuldt undersøgt i Danmark.

I mangel af måling på den aktuelle beton, kan man dog som en tommelfingerregel regne med, at flyveasken giver et bidrag til varmeudviklingen, der er ca.  $\frac{1}{3}$  af cementens (Sørensen, 1981), mens mikrosilikaen udvikler lidt mere varme end cementen (Vejdirektoratet, 1983).

*Figur 42. Temperaturregistrering til brug for vurdering af temperaturprofilens udvikling over et massivt betontværsnit, er en betydningsfuld kontrolforanstaltning. Derved bliver det muligt at gribe ind i tide, fx ved ændring af isoleringsforholdene, således at stillede krav til temperaturprofilen i hærdeperioden kan overholdes. Ved mindre arbejder kan temperaturregistreringen foregå manuelt.*



## Litteratur

- CtO. 1983. Cements varmeudvikling. CtO's arbejdsmark. Betonteknik 10/20/1983.
- CtO. 1983. Portlandcement. Beton-Teknik 1/01/1983.
- P. Freiesleben Hansen. 1978. Hærdeteknologi 1, Portlandcement. Aalborg Portland og bkf-centralen.
- Lars Hjort. 1982. Mikrosilika og beton. Beton-Teknik 1/06/1982.
- Christian F. Justesen. 1981. Revner i beton. Beton-Teknik 3/09/1981.
- RILEM Committee 42-CEA. 1981. Properties of set concrete at early ages. State-of-the-art Report. Materials and Structures. Vol 14 - no. 84.
- Eigil V. Sørensen. 1981. Betons hærdvarme. Beton-Teknik 3/10/1981.
- Vejdirektoratet. 1983. Ryå-broen. Forsøg med silikabeton. Rapport nr. 4 om betons holdbarhed. Vejdirektoratet.

*Figur 43. Ved større betonarbejder eller hvor de kritiske perioder ligger på ubekvemme arbejdstidspunkter, kan en automatisk registrering af temperaturen ved hjælp af en datalogger blive nødvendig. Derved lettes også databehandlingen. Den kan tilrettelægges således, at alle data kan overføres direkte til behandling på en mikrodata-mat.*



# Instabilitet hos frisk beton

Manglende stabilitet hos en frisk beton ytrer sig ved forskellige former for afblanding, dvs. udskillelse af en eller flere af betonens delmaterialer. Dette fører til en inhomogen beton med varierende egenskaber inden for samme bygningsdel.

De vigtigste former for instabilitet er stenseparation og vandseparation (bleeding).

Stenseparation er en omfordeling og dermed større eller mindre koncentration af stenmaterialet i visse dele af betonen.

Ved vandseparation udskilles vand fra cementpastaen. Vandet ophobes dels på betonoverfladen og dels under armering og grovere sten og skaber lunger. Samtidig hermed sker der en sætning af betonen. Der kan opstå sætningsrevner i betonen, hvis initialsætningen er hindret enten af armeringen eller af formens geometri. Det kan være nødvendigt at tilrettelægge støbetakten således, at der ikke opstår initialrevner i betonen.

Afblanding sker under betonens transport, udstøbning og bearbejdning eller umiddelbart derefter.

## Stenseparation

Stenseparation kan defineres som en adskillelse af bestanddelene i en heterogen blanding med en uensformig fordeling af disse til følge.

Man kan skelne mellem indre og ydre stenseparation. Ved *indre stenseparation* falder stenene til bunds i betonen; betonens mørtelfase kan ikke »bære« stenene. Betonen er typisk mørtelrig i toppen og stenrig i bunden. Ved *ydre stenseparation* kan betonens mørtelfase vanskeligt holde på stenene, hverken ved transport, udstøbning eller komprimering. Dette sker, når betonen enten indeholder for lidt mørtel svarende til stenenes naturlige hulrum, eller mørtelen ikke er tilstrækkelig kohæsiv. Det kan typisk være vanskeligt at vibrere stenene ned i betonen – de triller fra.

De primære årsager til indre stenseparation er forskelle i kornstørrelser og densitetsforskelle mellem tilslagsmaterialer og cementpasta. De grovere partikler har en større tendens til at fortsætte en igangsat bevægelse. I beton med normalt tilslag synker de grovere korn. I beton med lette tilslag sker derimod en hævnning af de større korn.

Brug af groft tilslag, hvis densitet er mærkbart større end det fine tilslag vil altså forøge risikoen for stenseparation, som i øvrigt vil vokse med vibrerings-

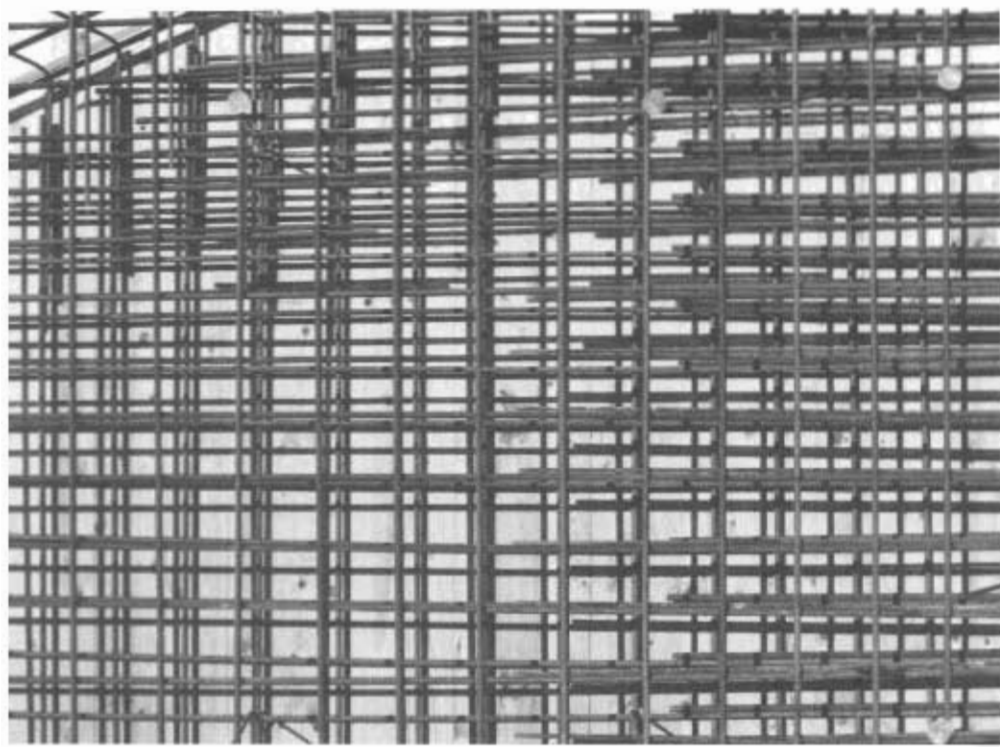
tiden og betonens sætmål. Tendensen kan i nogen grad formindskes ved tilsætning af et luftindblandende tilsætningsstof.

Generelt kan det siges, at man på grund af risikoen for stenseparation altid bør anvende så stiv en konsistens og så kohæsiv en beton som det – under hensyn til andre forhold, fx bearbejdelighed – er praktisk muligt.

Det bør dog i den sammenhæng bemærkes, at meget stive konsistenser kan give ydre stenseparation. Dette forekommer når cementpastaen er så tør, at den ikke er tilstrækkelig kohæsiv til at kunne fastholde stenmaterialet. Under transport og håndtering kan der da ske lokale stenophobninger. Det kan føre til stenreder og støbesår i den hærdnede beton.

Ved en velproportioneret beton er det metoderne for håndtering og udstøbning, der er afgørende for graden af stenseparation. Hvis beton ikke transporteres for langt og overføres direkte til den endelige position i formen, er faren for stenseparation lille.

*Figur 44. En tætliggende armering i en tynd, høj væg kræver en beton med stort sætmål, hvis stenreder og andre grovporøsiteter skal kunne undgås. Skal separation af vand og sten undgås i en flydende beton, skal betonen være indre stabil. Det stiller krav til betonens sammensætning og til grusets kornkurve. En stiv beton kan ikke blot gøres flydende ved tilsætning af plastifiserende tilsætningsstof; betonsammensætningen skal altid justeres, og en prøveblandings stabilitet skal undersøges før udstøbning.*



Hvis man derimod lader betonen falde fra betydelige højder eller passere over lange slidsker, specielt slidsker med retningsændringer, forøges risikoen for stenseparation. I sådanne tilfælde må man altså anvende meget kohæasive blandinger.

Stenseparation fører som nævnt til en inhomogen beton med blandt andet uensartede styrkeegenskaber, krybningsegenskaber og forringet holdbarhed i aggressive miljøer.

### Vandseparation

Når betonen er udstøbt og komprimeret, søger tyngdekraften ved en sætningsproces at trække de tungere partikler (cement og tilslag) nedad. Er de faste bestanddele ikke i stand til at binde alt vandet under sætningen, vil det resterende vand presses opad og udskilles på overfladen, jævnfør figur 46.

*Figur 45. Vibreringsudstyr og betonens konsistens skal være afstemt, hvis betonen efter udstøbning skal være kompakt og homogen. Undervibrering kan skabe stenreder og grovporøsiteter. Overvibrering kan bevirke separation. En beton bør være robust, dvs. kunne tåle visse ændringer i sammensætning, transport, udstøbning og komprimering (over- og/eller undervibrering) uden at det medfører støbefejl.*





Vandseparationen ophører, enten når de faste partikler rører hinanden, hvorved en yderligere sætning bliver umulig, eller når cementen hærdner og herved forhindrer yderligere bevægelse.

Vandseparationen kan udtrykkes kvantitativt som den relative højdeændring af betonen ved sætningsprocessen. Såvel hastighed som kapacitet kan bestemmes eksperimentielt, (ASTM C232 og DS 423.18).

Vandseparationsprocessen kan have en række uheldige virkninger:

- En del af det opstigende vand kan opsamles på undersiden af armering og grovere sten. Dette kan føre til utæthed og forringet betonstyrke, specielt forankringsstyrke. Endvidere kan det føre til armeringskorrosion, fordi armeringen ikke er helt omsluttet af alkalisk miljø.

*Figur 46. Kan betonens pulver ikke fastholde støbevandet, vil der ske en separation, hvor vandet søger opad. Det sker under dannelse af lodrette kanaler i cementpastan. Dette kan fx observeres på en betonoverflade efter en afformning, men kanalerne findes også andre steder i betonen. Disse kanaler øger betonens gennemtrængelighed og kan være udgangszoner for senere nedbrydning. Betonens pulverindhold har betydning for vandseparationen. Specielt kan tilsætning af mikrosilica og/eller flyveaske nedsætte tendensen til vandseparation. I øvrigt har de forskellige cementtyper forskellig tendens til vandseparation. En betons vandseparation kan måles ved prøvingsmetoden DS 423.18.*



■ Ved stærk tendens til vandseparation kan der dannes kanaler fra det indre mod overfladen. Konsekvensen er igen utæthed og dermed forringet holdbarhed i aggressivt miljø.

■ Vandet kan føre cementpartikler og andre finere partikler med sig, hvorved der dannes et slamlag på overfladen. Dette fører til en svag og porøs overflade med ringe slidstyrke, ringe frostbestandighed og stor carbonatiserings-hastighed.

Vandseparation formindskes ved at gøre blandingen mere kohæsiv, fx ved at anvende

- større cementindhold,
- større sandindhold,
- finere sand,
- mineralske tilsætninger (mikrosilica, flyveaske),
- mindre vand,
- luftindblandende tilsætningsstoffer og
- afrundet naturligt sand fremfor skarpkantet, knust, fint tilslag.

Nogle cementtyper giver større tendens til vandseparation end andre. Hvis valget af cementtype er frit, bør man anvende den cementtype, der giver mindst vandseparation.

# Krybning

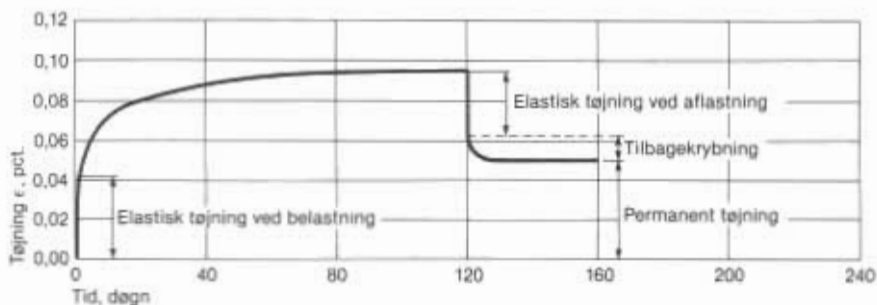
Når beton påvirkes af spændinger optræder der såvel øjeblikkelige som tidsafhængige deformationer, dvs. momentantøjninger og krybning. Krybning indebærer både fordele og ulemper. Fordelene er, at krybningen medfører en aflastning af områder med lokalt høje spændinger. Ulemperne er, at krybning kan give anledning til langtidsdeformationer, der kan give problemer med konstruktionens anvendelse.

## Krybningens parametre

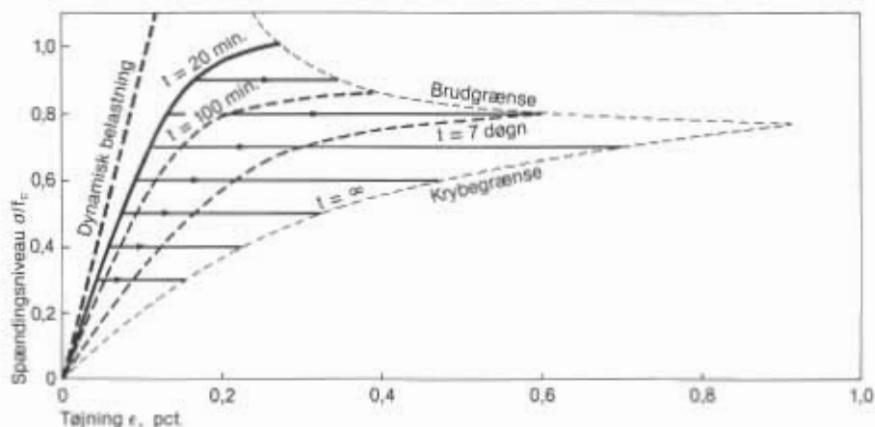
Betonens krybning er en funktion af en række parametre, hvoraf de vigtigste er omtalt i det følgende.

### Belastningens varighed

Figur 47 viser det principielle tøjningsforløb, som funktion af tiden for et betonprøvelegeme, der holdes under konstant belastning i tidsrummet 120 timer og derefter aflastes. Når belastningen fjernes, aftager tøjningen straks med en størrelse, der er lig den elastiske tøjning ved den givne alder. Denne tøjningsændring efterfølges af en gradvis tøjningsændring, den reversible krybning.



Figur 47. Krybningskurve for et mørtelprisme lagret ved 95 pct. relativ fugtighed. Mørtelprismet blev belastet med en spænding på 14,8 MPa og aflastet igen efter 120 døgn. (Neville, 1959).



Figur 48. Spændings-tøjningsdiagram for beton udsat for forskellige trykspændinger. 56 døgns styrke  $f_c$  var  $35 \text{ MN/m}^2$ . Diagrammet er optegnet efter forsøgsresultater. (Rüsch, 1960).

#### Belastningens størrelse

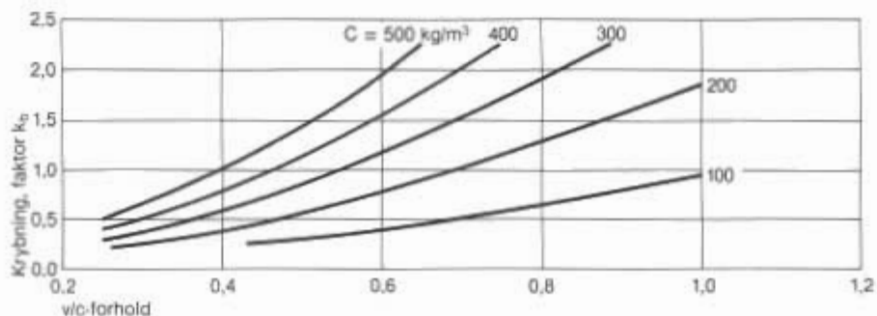
Krybningen er med god tilnærmelse proportional med spændingen. Dette gælder dog kun op til spændinger af størrelsesordenen 50 pct. af brudspændingen, jvf. figur 48.

#### Betonens cementindhold

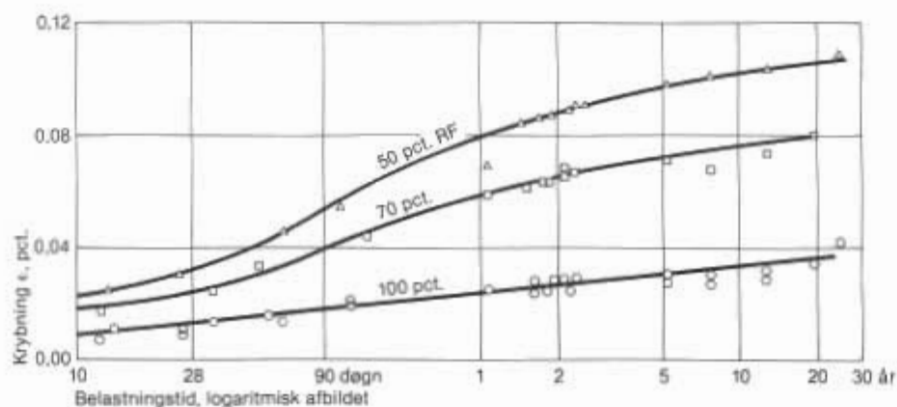
Det er gelstrukturen i betonens cementpasta, der kryber. Tilslagsmaterialerne udviser sædvanligvis ikke krybning, og vil derfor begrænse pastaens krybning, jvf. figur 53. Krybningen vokser med stigende cementindhold (og med stigende  $v/c$ -forhold). På figur 49 er  $v/c$ -forholdets relative indflydelse på krybningen angivet for betoner med forskelligt cementindhold.

Det skal her bemærkes, at såvel betonens cementindhold som betonens  $v/c$ -forhold har betydning for krybningen under i øvrigt ens lastbetingelser. Det fremgår af figur 49, at:

- Krybningen øges med øget vandbehov for betonen, hvis betonens cementindhold fastholdes (stigende  $v/c$ -forhold).
- Krybningen øges med øget cementindhold, hvis betonens  $v/c$ -forhold fastholdes (medfører stigende vandindhold).
- Krybningen mindskes med øget cementindhold, hvis betonens vandbehov fastholdes.



Figur 49. Betonsammensætningens (cementindholdets og v/c-forholdets) indflydelse på krybningen. Det ses, at krybningen vokser med stigende v/c-forhold og med stigende cementindhold. (Beton-Bogen, 1979).

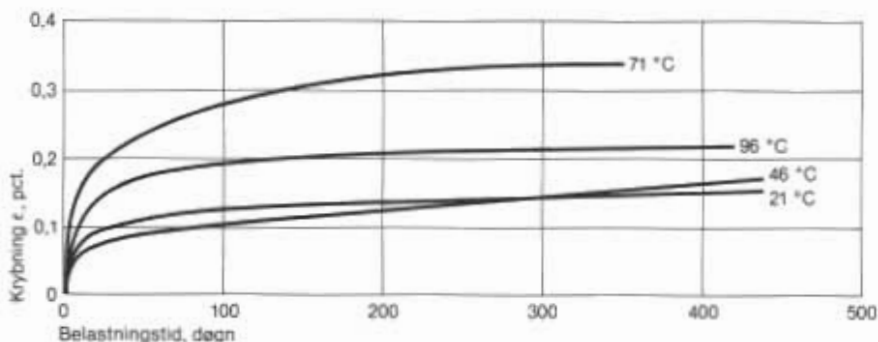


Figur 50. Krybning for beton lagret i mættet vanddamp i 28 døgn, og derefter belastet og opbevaret ved forskellige relative luftfugtigheder. (Troxeil, Raphael & Davis, 1958).

Den afgørende materialeparameter for betonens krybning under ellers givne vilkår er derfor betonens vandbehov, sådan som det fremgår af ovenstående. Derfor har anvendelse af de vandreducerende tilsætningsstoffer interesse, når betonens langtidsdeformationer skal begrænses i praksis.

#### Betonens fugtindhold

Fugtindholdet i betonen afhænger af omgivelsernes relative fugtighed, RF. I almindelighed er krybningen større jo lavere den relative fugtighed er. Forholdet er illustreret på figur 50, hvor krybningen er målt på prøvelegemer udsat for forskellige relative fugtigheder.



Figur 51. Krybning som funktion af tiden for beton opbevaret ved forskellige temperaturer. Belastningen var 70 pct. af trykstyrken. (Neville, 1981).

#### *Betonens modenhed ved lastpåførelse*

Med stigende modenhed stiger styrken. Da krybningen stort set er omvendt proportional med styrken vil krybningen derfor aftage med stigende modenhed ved første lastpåførelse, se figur 49. Hvor det er muligt i praksis, lader man derfor forskallingen stå længst muligt. Når forskallingen tages, kan bjælker og plader i øvrigt ofte med gavnlig effekt understøttes af nogle få stolper i den følgende periode.

#### *Betonens temperatur*

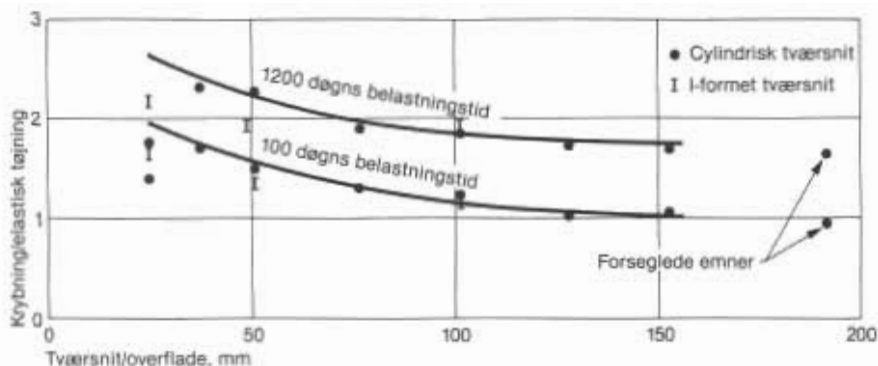
Krybningen ved 70 °C er mellem 2 og 4 gange så stor som krybningen ved 20 °C. Forholdet er illustreret på figur 51.

#### *Betonens dimensioner*

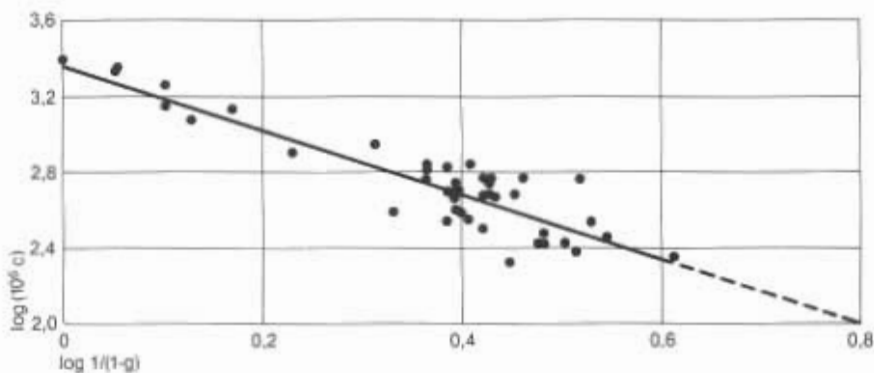
Krybningen aftager, når forholdet mellem betontværsnit og betonoverflade stiger. Det skyldes, at krybningen ved betonoverfladen normalt sker samtidig med udtørring og derfor er større end krybningen inde i tværsnittet. På figur 52 er krybningens størrelse vist som funktion af forholdet mellem betontværsnit og betonoverflade.

#### *Cementtype*

Den valgte cementtype influerer på krybningen. Det hænger formentlig sammen med at betonens styrke, når belastningen påføres, afhænger af cementtypen. I praksis har dette fænomen dog næppe betydning, hvis betonen proportioneres til at opnå en krævet styrke til et givet tidspunkt, uafhængigt af cementtypen.



Figur 52. Krybningens størrelse som funktion af forholdet tværsnit/overflade. Det ses, at emnernes form har mindre betydning for krybningens størrelse end forholdet mellem tværsnitsareal og overflade. (Hansen & Mattock, 1966).

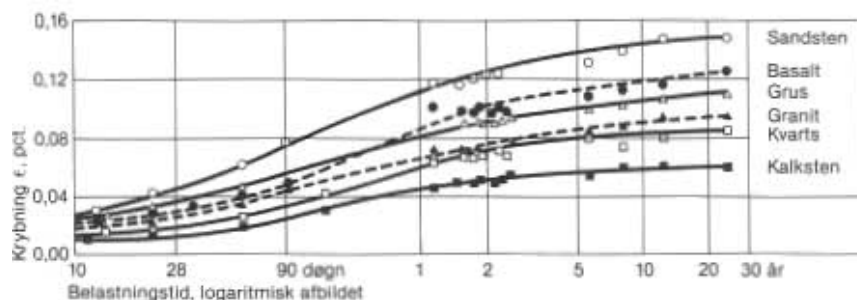


Figur 53. Forholdet mellem krybningen  $c$  efter 28 døgns belastning og det relative indhold af tilslagsmaterialer  $g$ . Prøvelegemerne var vådlagret og belastet i en alder af 14 dage med 50 pct. af brudspændingen. (Neville, 1964).

### Tilslagsmaterialer

Figur 53 viser krybningens størrelse som funktion af betonblandings indhold af tilslagsmaterialer.

Figur 54 illustrerer tilslagsmaterialernes indflydelse på krybningen. Det er ikke muligt at udtrykke noget generelt om krybningens størrelse som funktion af tilslagsmaterialerne. Som det ses af figur 54, udviser beton, udført med sandsten som tilslagsmateriale, en krybning, der er mere end dobbelt så stor som krybningen for en beton udført med kalksten.



Figur 54. Krybning i beton udført med forskellige tilslagsmaterialer. Prøvelegemerne blev belastet i en alder af 28 døgne og opbevaret ved 21 °C og 50 pct. RF. (Troxeil, Raphael & Davis, 1958).

### Bygningsmæssige problemer

I armerede betonsøjler bevirker krybning en gradvis lastoverførsel fra beton til armering. Denne krybning kan være så kraftig, at armeringen begynder at flyde. Derved bliver lasttilvækster optaget alene af betonen. For centralt belastede søjler, der belastes til brud, betyder det, at såvel betonens som armeringens fulde styrke udnyttes inden brud indtræffer. I excentrisk belastede søjler vil betonens krybning medføre øget udbøjning og kan derved reducere bæreevnen.

Differenskrybning i meget høje bygninger vil kunne give anledning til bevægelser og revnedannelser i skillevægge, flise- og facadebeklædninger.

I statisk ubestemte konstruktioner kan krybning mindske spændingskoncentrationer hidrørende fra svind, temperaturbevægelser eller bevægelser i understøtningerne.

I alle betonkonstruktioner nedsætter krybning indre spændingskoncentrationer hidrørende fra uensformigt svind.

Ved udførelse af spændbetonkonstruktioner er tabet af forspænding pga. krybning et velkendt problem. Det var først ved indførelse af stål med meget høje flydespændinger – hvis forlængelse er flere gange større end betonens svind og krybning – at forspændte konstruktioner fik succes.

Betons krybning kan således være skadelig, hvis krybning ikke tages i regning ved projekteringen. I det store og hele er »kontrolleret krybning« en fordel, fordi krybning modvirker spændingskoncentrationer og derfor i væsentligt omfang har medvirket til betonens succes som byggemateriale.

Metoder til beregning af krybningens størrelse er angivet i Model Code for Concrete Structures, 1978 og i CtO's Beton-Bogen, 1979.



## Litteratur

- Beton-Bogen. 1979. CtO, Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor.
- T. C. Hansen and A. H. Mattock. 1966. The influence of size and shape of member on the shrinkage and creep of concrete. *J. Amer. Concr. Inst.*, 63, pp. 267-290.
- Model Code for Concrete Structures. 1978. CEB/FIB 3. ed.
- A. M. Neville. 1959. Creep recovery of mortars made with different cements. *J. Amer. Concr. Inst.*, 56, pp. 167-174.
- A. M. Neville. 1964. Creep of concrete as a function of its cement paste content. *Mag. Concr. Res.* 16, no 46, pp. 21-30.
- A. M. Neville. 1981. *Properties of Concrete*. 3. udgave, Pitman Publishing Ltd, London.
- Ervin Poulsen & L. Fuglsang Nielsen. 1970. On the Rheology of Reinforced Concrete with Particular Reference to Creep Deflection of Beams. *Proc. 5. International Congress on Rheology*. Vol. 2. Tokyo.
- G. E. Troxell, J. M. Raphael and R. E. Davis. 1958. Long-time creep and shrinkage tests of plain and reinforced concrete. *Proc. ASTM*, 58, pp. 1101-1120.

# Nitratangreb

Kvælstof findes som en inaktiv gas,  $N_2$ , i atmosfæren. I jorden og i havet kan  $N_2$  bindes af alger og bakterier til blandt andet nitrat og ammoniak,  $NH_3$ , for til sidst at indgå i fx protein.

Der er kun små koncentrationer af nitrat i betons omgivelser, medmindre det tilføres udefra fx i form af kunstgødning eller spildevand.

Kunstgødning består hovedsagelig af natrium-, calcium- og ammoniumnitrat. På grund af omfattende nedbrydning af mange landbrugsjordes struktur, er det nødvendigt at tilføre store mængder kunstgødning. En del af disse nitrater udvaskes og genfindes således i vandløb og grundvand.

De fleste nitrater kan betragtes som mildt nedbrydende over for beton. Den vigtigste undtagelse er ammoniumnitrat, der gennem kombination af ammoniumioner,  $NH_4^+$ , og nitrationer,  $NO_3^-$ , nedbryder calciumhydroxiden:



$Ca(NO_3)_2$  er letopløselig og udluges med vand, medens  $NH_3$  undslipper som luftart, hvorefter processen kan fortsætte.

## Forholdsregler imod nitratangreb

Beton, der udsættes for nitrater, skal beskyttes. Forholdsreglerne er de samme som for syreangreb, dvs. tæt beton, eventuelt med overfladebehandling. Særlig tæt beton kan opnås ved tilsætning af mikrosilica.

# Organisk nedbrydning

Nedbrydning af beton kan forårsages af levende organismer. Selve nedbrydningen er dog enten af kemisk eller af fysisk natur. Da organismene imidlertid er en nødvendig forudsætning for nedbrydningens start og forløb, taler man om organisk angreb.

Organisk angreb på beton er ofte tegn på manglende vedligehold.

*Duer.* Ekskrementer fra duer kan gøre skade på to måder. Dels indeholder ekskrementerne fosfor- og urinsyre, der medfører syreangreb på betonen, dels kan et stort ekskrementlag holde på betonens fugtighed med de konsekvenser det kan have.

Den bedste forholdsregel er en sådan geometrisk udformning af bygværkerne, at duerne ikke tiltrækkes. Anvendelse af duenet er en mulighed, men kan skæmme bygningens udseende.

*Boremuslinger.* Kalksten kan angribes af boremuslinger. Der er også sjældne eksempler på, at boremuslinger kan angribe hårdere stenarter som granit og flint. Danske boremuslinger kan bore 4 mm tykke kanaler i kalksten. Visse børsteorme kan bore ca. 1 mm tykke kanaler.

I tropiske oceaner kan boremuslingen *Lithophaga* bore ca. 100 mm lange og ca. 12 mm tykke huller i kalksten. *Cliona*, ligeledes i tropiske områder, borer også kanaler og kan bore store mængder kalkklippe væk på den måde, ca. 7 kg blød kalksten pr. 100 døgn. Disse organismer producerer et kemisk sekret, der nedbryder kalksten og koralkalk. Der er altså tale om kemisk angreb. *Lithophaga* og *Cliona* angriber dog kun kalksten og koralkalk. Kalkens hårdhed og tæthed synes ikke at være til hinder for disse organismers (kemiske) angreb.

En anden boremusling *Pholads* angriber kun blød og revnet kalk. Der er her tale om mekanisk nedbrydning.

Havvandskonstruktioner, støbt af beton med groft tilslag af kalksten eller koralkalk, kan angribes af disse organismer. Det kræver imidlertid, at kalkstensindholdet er så stort, at organismerne tiltrækkes og slår sig ned på betonoverfladen (som larver).

Enkelte havvandskonstruktioner af meget ringe beton, støbt med koralkalk som groft tilslag, har fået angreb af *Pholads*. I det Indiske Ocean er en bølgebryder, ligeledes af beton med tilslag af koralkalk, meldt angrebet af *Lithophaga* og *Cliona*. Den anvendte beton var ligeledes her af dårlig kvalitet.

Angreb af *Lithophaga* og *Cliona* er imidlertid også observeret på havvandskonstruktioner af tæt kvalitetsbeton, støbt med groft tilslag af tæt,

klingende kalksten. Det var de områder af betonen (spændbetonpæle), der befandt sig lige under havoverfladen, der blev angrebet. Der er blevet observeret op til ca. 1000 borehuller pr. m<sup>2</sup> betonoverflade.

Den bedste forholdsregel er at undgå betontilslag af kalksten, men i mange lande er kalksten det naturlige tilslagsmateriale for beton. En anden mulighed er anvendelse af en passende overfladebehandling, fx af epoxy, således at organismerne ikke tiltrækkes.

**Bakterier.** Visse bakteriearter kan virke nedbrydende på beton ved at udskille ætsende stoffer, fx salpetersyre eller svovlsyre. Der er altså tale om et kemisk angreb på betonen. Svovlbakterier er meget udbredte i naturen.

I kloakrør og havnebassiner finder der en nedbrydning sted, som blandt andet er forårsaget af svovlbakterier. Svovlbakterier danner svovlbrinte, der igen kan omdannes til svovlsyre. Der kan således blive tale om syreangreb og saltsprængning fra den dannede gips. Betonen kan beskyttes som omtalt under syreangreb.

**Alger.** Rødalger og sortalger ses hyppigt på betonfacader. Der sker kun en lille og betydningsløs nedbrydning af betonen. Misfarvning, som i øvrigt tyder på manglende vedligehold, kan dog misklæde bygninger.

*Figur 55. Lav, alger og mos på betonen gør ingen skader, hvis betonen ellers er modstandsdygtig over for den øgede miljøpåvirkning. Derimod lider bygværkets æstetik ofte alvorlig skade. Vandtætte flader fremmer dannelsen af lav, alger og mos.*



Algevækst kan fjernes effektivt med særlige overfladebehandlingsmidler, der naturligvis selv skal være farveløse. Algevækst kan hindres på nybyggeri ved en vand- og smudsafvisende siloxanimprægning.

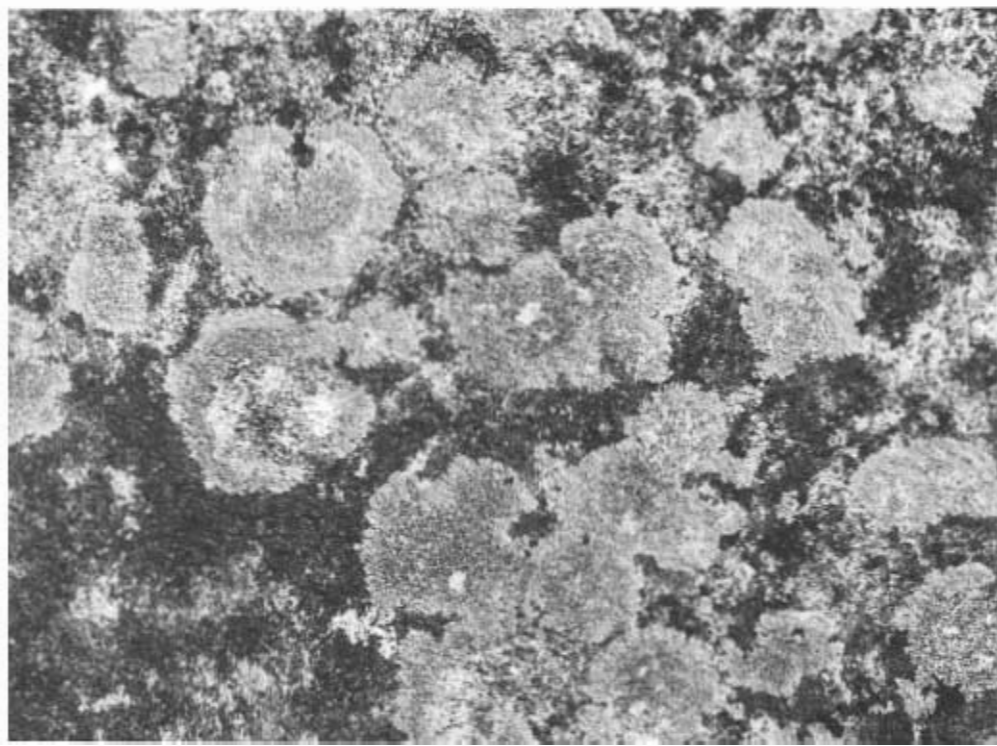
*Lav og mos.* Mos kan på vandrette betonflader danne centimetertykke puder, der holder på fugtigheden. Det er nok mere fugtigheden end mosset, der således kan gøre skade på beton.

Lav, der gror på beton kan danne et slimlag, som ved indtørring kan skabe mikrorevner i betonoverfladen. Lav træffes kun sjældent i storbyer og industrikvarterer, da lav ikke synes at tåle luftens svovlforbindelser.

Lav og mos kan fjernes ved overfladebehandling med en opløsning af 2 pct. zinksiliciumfluorid. I områder, hvor man erfaringsmæssigt ved, at beton kan få belægninger af lav og mos, kan det gavne nybyggeri af beton at foretage en vand- og smudsafvisende siloxanimprægning.

*Planter.* I tilfælde af manglende vedligehold og langvarig nedbrydning, kan beton blive så smuldrende, at bevoksning som græs, buske og selv træer kan finde grobund. Græsbevoksning vil holde på fugtigheden således at betonen får et så stort vandindhold, at den kan nedbrydes af frost.

*Figur 56. Lav og mos på betonen har kun en lille direkte nedbrydende virkning. Indirekte kan der dog være den virkning, at betonen fugtigholdes. Det kan være en medvirkende årsag til nedbrydning af beton. Lav, alger og mos på beton er tegn på manglende vedligehold. Passende overfladebehandling (lav- og mosdræber) kan hindre væksten af lav, alger og mos.*



Vegetation, der vokser tæt op til beton eller i ikke-vedligeholdte fuger, vil også kunne skade beton, og bør derfor fjernes. Bevoksning på eller tæt ved beton og som ikke er planlagt er altid tegn på manglende vedligehold.

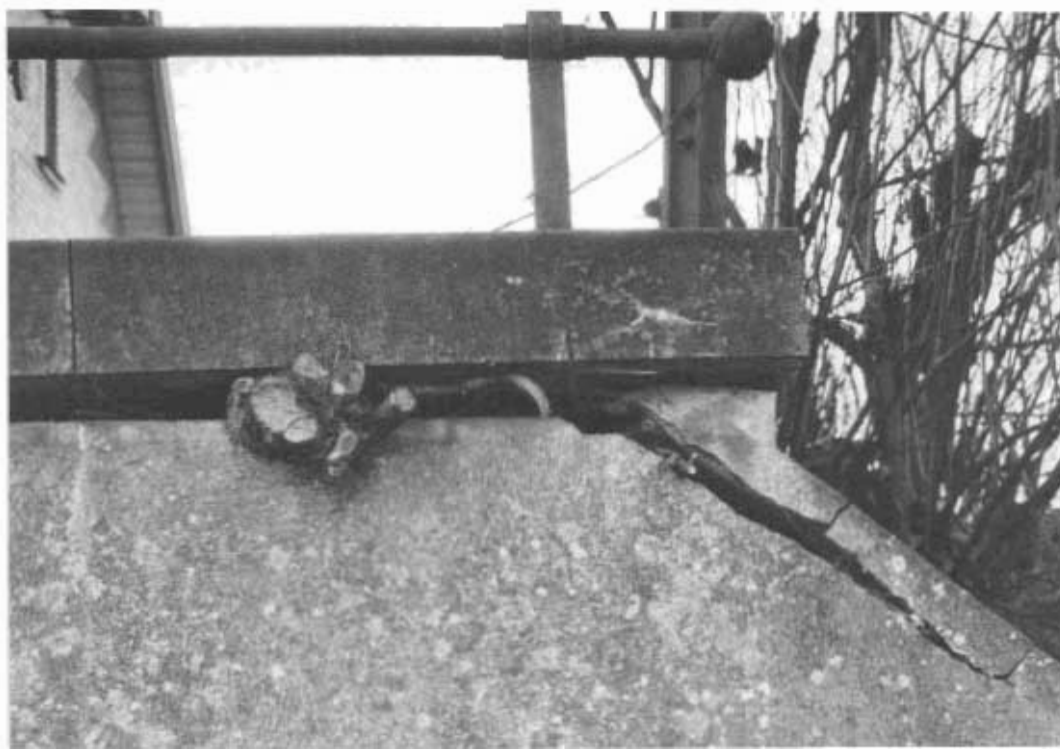
Planter kan, foruden at øge betons fugtighed ved at hindre fordampningen, også virke sprængende, idet rødder kan trænge ind i fuger og revner. Endvidere kan der fra gamle planterester dannes humus. Humussyre er stort set uskadelig for hærdnet beton, da humussyrens salte er meget tungt opløselige. Derimod kan humussyren virke hindrende for en eventuel senere reparation af betonen, hvis ikke humussyreholdig beton fjernes.

**Rotter.** Der findes eksempler på, at rotter har gnavet sig igennem kloakrør af beton.

**Hærværk.** De sidste årtier har givet eksempler på så omfattende hærværk i boligområder, at selv beton ikke har været et tilstrækkeligt holdbart materiale. Hærværk har været årsag til, at store boligområder er blevet saneret før tid.

Den mere beskedne form for hærværk, graffiti, er normalt uskadelig i nedbrydningsmæssig henseende.

*Figur 57. Trærødder kan søge ind i revner og fuger i betonkonstruktioner. Ved deres vækst kan træerødder sprænge betonen. En beskæring af kviste vil ikke standse røddernes vækst. Kun en fuldstændig fjernelse af rødderne kan stoppe den nedbrydende (sprængende) virkning.*



# Rustdannelse

Armering indstøbt i beton, der er ucarboniseret og chloridfri, er beskyttet mod korrosion. Den alkaliske porevæske (pH-værdi: 12,5–13,5) bevirker, at der dannes et mikroskopisk lag af jernoxid på stålets overflade. Det hindrer jernet i at korrodere, se figur 58.

Jernoxiden danner en uopløselig tæt film på armeringsstålet, hvilket nedsetter metaliondiffusionen. Da denne passivfilm samtidig er elektrisk ledende, vil iltreduktionen forløbe let, hvorved potentialet bliver højt. Det er derfor vigtigt, at passivfilmen dækker hele jernoverfladen (passivering). En forudsætning herfor er, at armeringsstængerne inden udstøbningen er rensset for olie, løstsiddende rust, samt at armeringen omstøbes ordentligt.

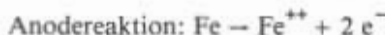
## Carboniseret beton

Falder pH-værdien under ca. 9 på grund af carbonisering i den omgivende beton, vil det beskyttende jernoxidlag opløses (hvis der er fugt nok). Armeringen vil derfor ikke længere være passiveret. Den vil begynde at korrodere, hvis der er tilstrækkelig fugt og ilt til stede. I praksis vil det være tilfældet for udendørs betonkonstruktioner. For armeret beton i helt tørre omgivelser vil korrosionsprocessen således ikke starte.

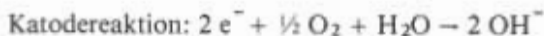
Et korrosionsforløb kan illustreres grafisk som vist i figur 59, hvor konstruktionens levetid er illustreret. Levetiden er i eksemplet den tid, det tager for dæklaget at carbonisere (initieringstiden) plus den tid det tager, før korrosionen har forvoldt sådanne skader, der er kritiske for konstruktionens funktion.

## Korrosionsproces

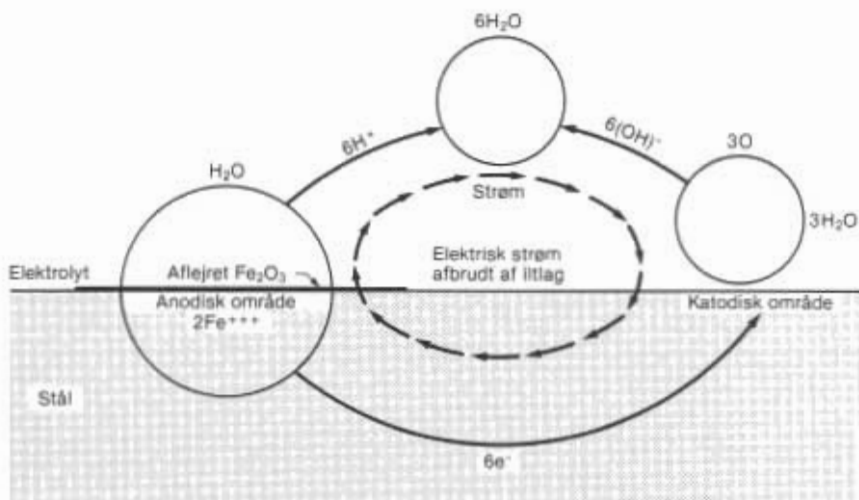
Korrosionen på armering kan opdeles i to reaktioner, den anodiske og den katodiske reaktion. Den anodiske reaktion er den, der nedbryder jernet:



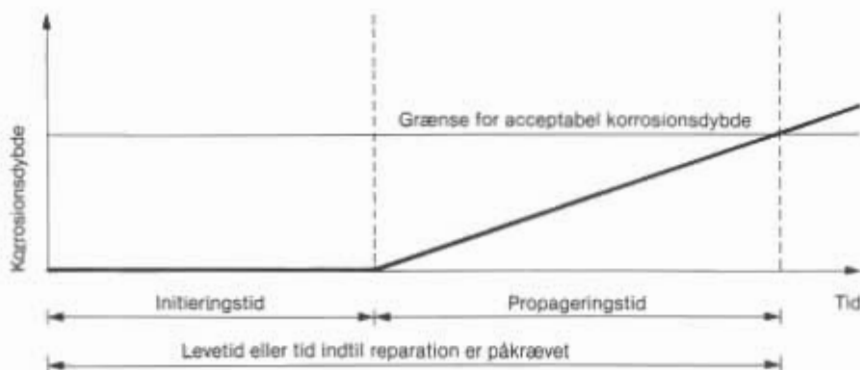
De overskydende elektroner i armeringsjernet går i forbindelse med vand og ilt ved katoden, hvorved der dannes hydroxidioner:



I iltrig beton vil det opløste jern iltes og gennem nogle mellemstadier omdannes til rust,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

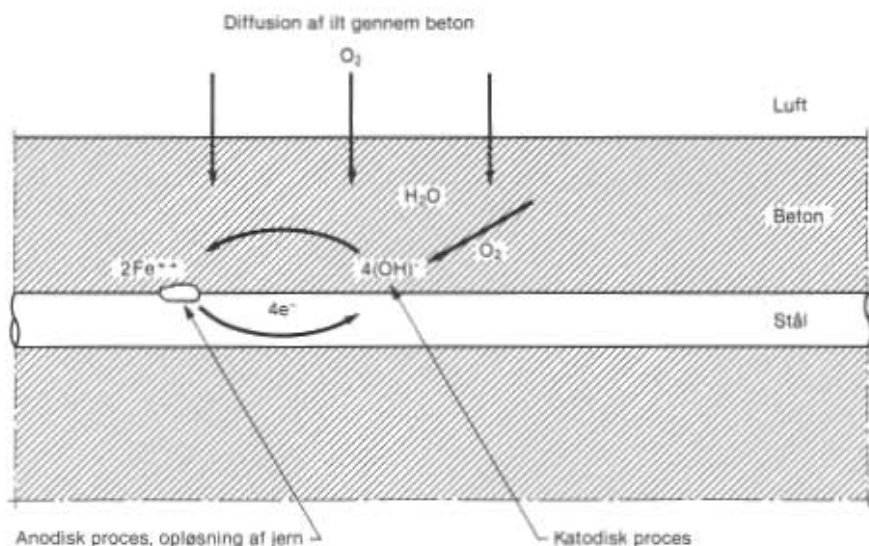


Figur 58. Idealiseret passiveringsreaktion. Armeringen, der ligger i uomdannet miljø, er beskyttet af det basiske miljø, som pastaens calciumhydroxid medfører. Hydroxidionkoncentrationen formindsker dannelsen af jernioner. De jernioner, der dannes vil hurtigt oxideres og danne et tæt lag  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , hvorved den elektriske strøm afbrydes og korrosionsprocessen går i stå.



Figur 59. Korrosionsforløb. I initieringstiden trænger carbonatiseringsfronten, chlorider eller andre skadelige stoffer frem mod armeringen. I propageringstiden rustner armeringen. Grænsen for acceptabel korrosionsdybde nås, når en vis del af armeringen er omdannet til rust. (Tuutti, 1982).





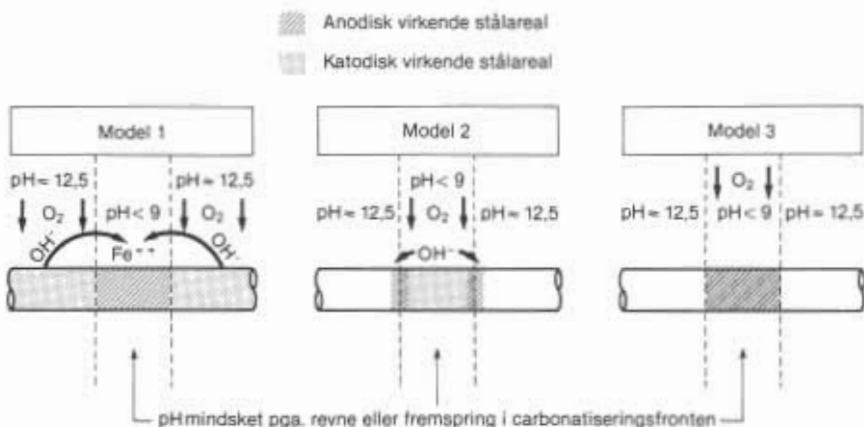
Figur 60. Simplificeret model for korrosion af stål indstøbt i beton. Korrosionsprocessen kan noget forenklet ansues som 2 reaktioner, den katodiske og den anodiske. Ved den katodiske reaktion dannes der hydroxidioner, medens der ved den anodiske reaktion sker en opløsning af stålet i positivt ladede ioner  $Fe^{++}$  og negativt ladede elektroner. Reaktionen kan simplificeret sammenfattes til  $4Fe + 3O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3$ . (CEB-Rilem, 1983).

Ferrioxid er uopløseligt, og er det normalt forekommende korrosionsprodukt for jern, se figur 60. Ved denne rustdannelse sker der en volumenforøgelse, der kan sprænge betonen. Sker korrosionen i et iltfattigt miljø, vil det opløste jern,  $Fe^{++}$ , kun i ringe grad iltes. Der dannes normalt ikke voluminøse korrosionsprodukter, der kan sprænge betonen.

Det følger af foranstående, at den anodiske og den katodiske reaktion indebærer, at armeringen vil virke som elektrisk leder, og betonens porevæske som elektrolyt. Anode og katode dannes på armeringsjernets overflade enten tæt ved hinanden (mikroelement) eller langt fra hinanden (makroelement).

Korrosionsprocessen forbruger ilt, men kræver tilstedeværelse af vand, som også bindes til jernhydroxiden i det omfang, der er vandmolekyler til stede. Hvis passiveringen på armeringsjernets overflade ødelægges på et lille område, fx på grund af revner i betonen eller spidser på karbonatiseringsfronten, som når forbi armeringsjernets overflade, vil armeringen kunne korrodere.

På figur 61 er vist 3 forskellige korrosionsmodeller. I praksis vil der ofte være tale om en kombination af de 3 modeller.



Figur 61. Korrosionsmodeller for armering placeret i beton, der lokalt har fået reduceret pH-værdien. De teoretiske korrosionsmuligheder er illustreret ved de 3 modeller på figuren. (CEB-Rilem, 1983).

### Betydende parametre

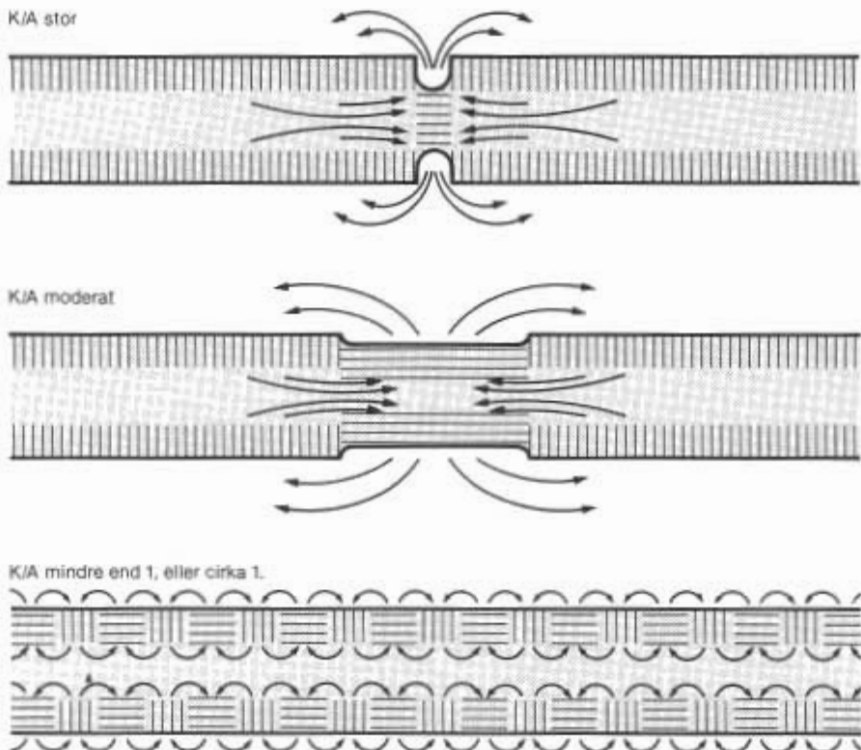
Korrosionshastigheden afhænger af flere faktorer:

- Den elektriske modstand på strækningen mellem anoden og katoden gennem elektrolyten, der findes i den omgivende betons porestruktur.
- Den hastighed hvormed ilten kan diffundere ind til katoden.
- Katode/anode-forholdet.

**Katode/anode-forholdet.** Hvornår der opstår fladetæring, og hvornår der opstår grubetæring, afhænger af, hvor stor en del af jernoverfladen, der er omdannet til anode. Betydningen af forholdet mellem katode og anode er vist principielt på figur 62. Katode/anode-forholdet er også medbestemmende for den hastighed, hvormed angrebet går i dybden. Der er eksempler på, at man under særlige omstændigheder kan få 5 à 10 mm dybe gruber i løbet af ét år.

Grubetæring er særlig typisk på dybtliggende jern, hvor korrosionsprodukter er iltfattige og ikke sprænger betonen, men finder plads i porerne omkring skadestedet. Herved kan skaden ikke ses udefra, men må konstateres ved hugning eller boring. Der er dog nu udviklet målemetoder, potentialemålinger, med hvilke korrosionen i en vis grad kan registreres udvendigt på våd beton.

Korrosionen på ubeskyttede ståldele, som er faststøbt i betonkonstruktioner i fugtige omgivelser, fx havvand og jord, er også afhængig af katode/anode-arealforholdet, se figur 63. Den del af stålet, som stikker uden for konstruktionen, vil være anode og tæres. Katoden i processen vil være den del af

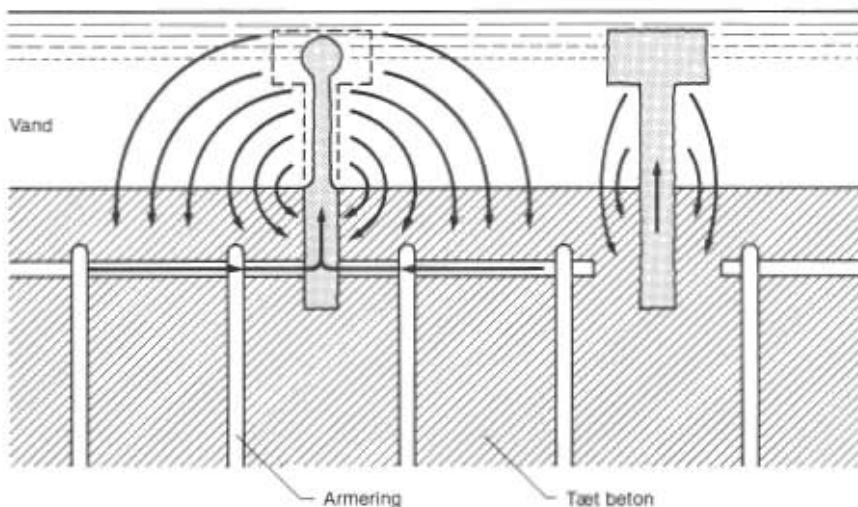


Figur 62. Betydning af forholdet mellem katodisk (K) og anodisk (A) areal på jernoverfladen. Strømtætheden er stor i anoden, når  $K/A$  er stor. Dette giver grubetæring. Fladetæring fås, når  $K/A$  er cirka 1 eller mindre end 1. (Beton-Bogen, 1979).

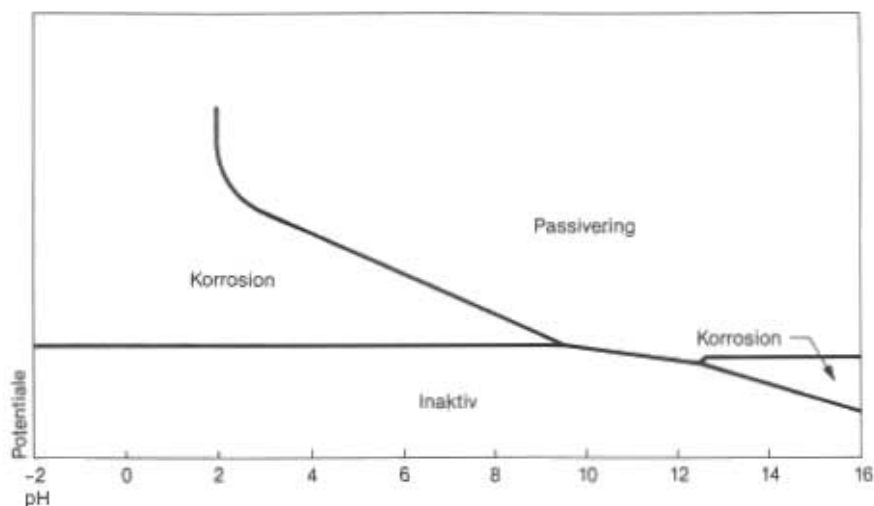
stålemnet, der sidder inde i betonen og er passiveret. Hvis ståldelen er i elektrisk ledende kontakt med armeringsnettet i betonen, vil hele armeringsnettet virke som katode. Herved øges muligheder for korrosionsstrøm, og ståldelen vil hurtigt tæres. »Hurtigt« kan være nogle få måneder.

**Potential.** Udover tilstedeværelsen af ilt og fugt, må også det elektriske potential, der udvikles ved elektroderne, være tilstrækkelig højt. Dette kan illustreres ved et Pourbaix-diagram. På figur 64 er vist et simplificeret Pourbaix-diagram for jern.

Det ses af diagrammet, at korrosionen kan hindres, hvis anodepotentialet reduceres til et niveau, hvor der ikke længere dannes  $Fe^{++}$ . Dette kan opnås ved at påtrykke et ydre elektrisk potential (katodisk beskyttelse).



Figur 63. Korrosionen på faststøbte dele i beton. Boltene til venstre er i elektrisk forbindelse med armeringen og tæres hurtigt på grund af den store værdi af  $K/A$ . Boltene til højre er isoleret fra armeringen og tæres langsomt, idet  $K/A < 1$ . Pilene viser den elektriske strøms retning. (Beton-Bogen, 1979).



Figur 64. Simplificeret Pourbaix-diagram for jern. Figuren illustrerer, at der kan opnås passivering af stålet ved at hæve det elektriske potentiale. Eksempelvis kan armeringen i neutralt miljø ( $\text{pH} = 7$ ) beskyttes ved at påtrykkes et elektrisk potentiale.

## Chloridholdig beton

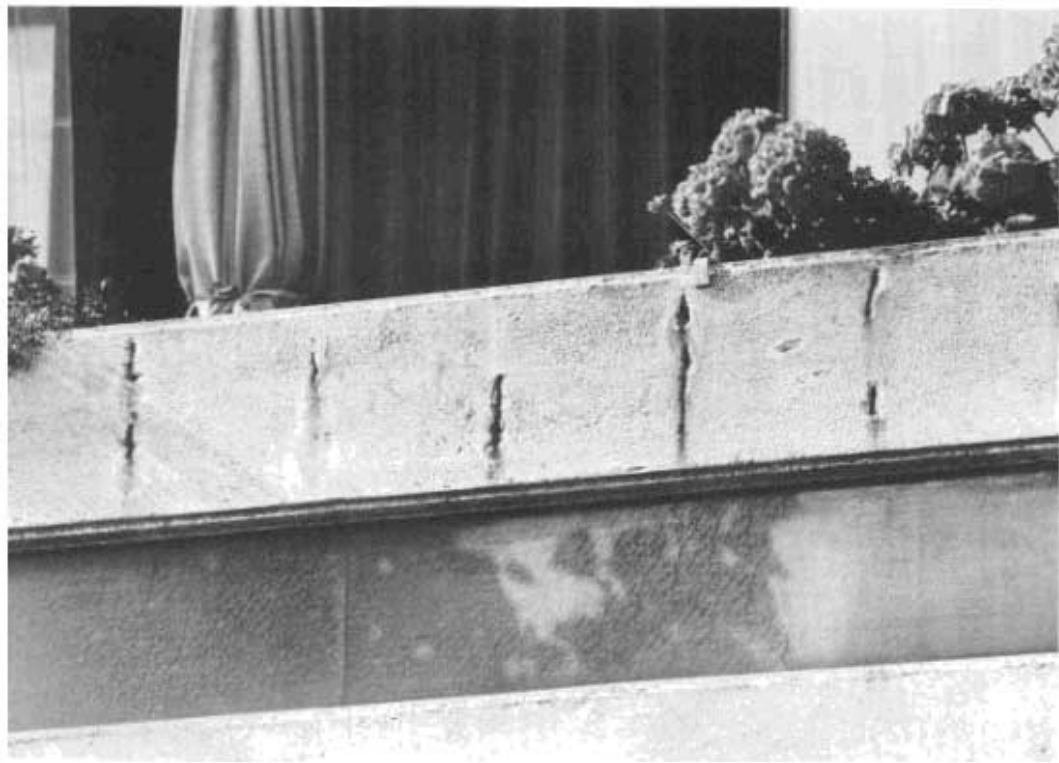
Betonen kan indeholde chlorider, enten fordi tilslagsmaterialerne har været chloridholdige (ikke ualmindeligt i Mellemøsten), eller fordi der er trængt chloridioner ind fra omgivelserne, fx fra tøsalt, havvand eller svømmebassinvand.

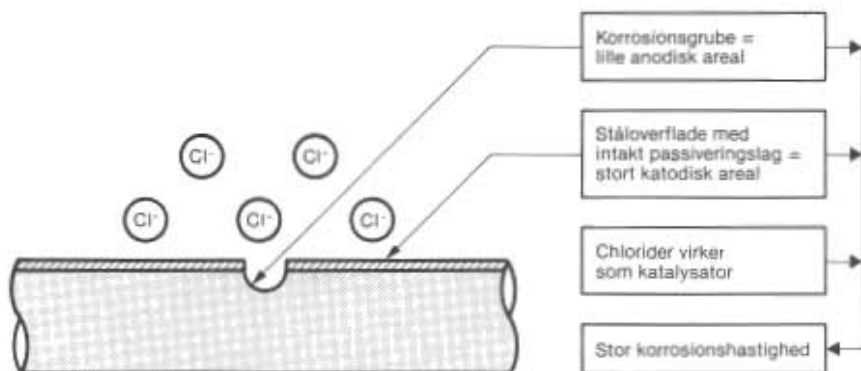
Selv i ucarbonatiseret beton kan chloridionerne nedbryde dele af den passiverende  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -film på armeringens overflade.

Korrosion forårsaget af chlorider er særlig farlig, fordi det passiverende lag kun opløses på et lille område. Derved dannes små anodiske arealer og store katodiske arealer på armeringens overside. Da korrosionsprocessen indebærer, at jernet omdannes til rust ved anoden, sker der her en væsentlig reduktion i armeringens tværsnitsareal (grubetæring).

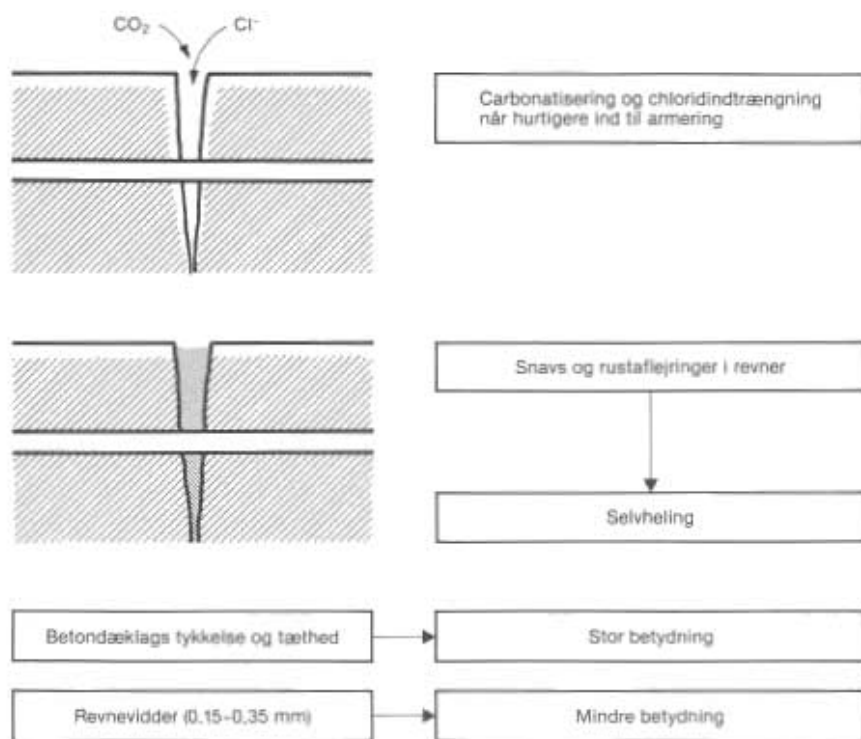
Hertil kommer, at chloridionerne virker som katalysator, og derfor accelererer jernomdannelsen ved anoden.

*Figur 65. Armering i carbonatiseret beton er ikke rustbeskyttet. Hvis der er fugt og ilt til stede, og det er der i moderat miljøklasse, vil armeringen ruste. Derfor skal beton i facader, altanbrystninger mv. være så tæt, at carbonatiseringen bliver mindre end armeringens dæklag i bygværkets stipulerede funktionstid. Krav til armeringens dæklag og betonens v/c-forhold skal derfor overholdes. Det er imidlertid ikke altid nok. Betonen skal desuden være velkomprimeret og uden overfladerevner (krakele-ringer).*





Figur 66. Grubetøring forårsaget af chloridioner (CEB-Rilem, 1983).



Figur 67. Revners indvirkning på korrosion. Som figuren illustrerer vil der ved mindre revner ofte ske en »selvheling« af revnen. Mindre revner har derfor normalt ikke så stor betydning. Derimod har betondæklagets tykkelse og tæthed stor betydning. (CEB-Rilem, 1983).

### Kritisk chloridindhold

Det chloridindhold i beton, der giver risiko for korrosion afhænger af flere forhold, der endnu ikke er fuldt klarlagte.

Det vides, at et fald i hydroxidkoncentrationen, fx på grund af carbonatisering, mindsker den kritiske chloridkoncentration med flere 10'er-potenser, mens et fald i jernets elektrokemiske potential øger den kritiske chloridkoncentration.

I litteraturen kan der findes vidt forskellige værdier for det acceptable chloridindhold i beton. I DS 411, 3. udgave, sættes den kritiske chloridkoncentration i relation til betonens cementindhold. Der er sket en væsentlig skærpelse i forhold til den tidligere udgave fra 1973 for slapt armeret beton i aggressivt miljø. Det maksimale chloridindhold, beregnet som  $\text{CaCl}_2$ , skal nu være mindre end 0,5 vægtprocent af betonens cementindhold, uafhængigt af cementtypen. Dette skyldes, at beton i aggressivt miljø får chloridtilførsel fra omgivelserne, og da et indhold af  $\text{CaCl}_2$  i betonen på 1,5 vægtprocent regnes for kritisk, skal chloridindholdet derfor være væsentligt mindre, for at det kritiske chloridindhold ikke overskrides i bygværkets stipulerede funktionstid.

ACI (1977) anbefaler følgende øvre grænser for chloridionindholdet i beton beregnet som  $\text{Cl}^-$  og i procent af cementvægten:

- Forspændt beton ..... 0,06 pct.
- Slapt armeret beton (fugtigt, chloridholdigt miljø) ..... 0,10 pct.
- Slapt armeret beton (fugtigt, men ikke chloridholdigt miljø) ... 0,15 pct.
- Konstruktioner over jord i tørre omgivelser ..... 1,00 pct.

### Revnet beton

Både carbonatisering og chloridionindtrængning vil hurtigere nå ind til armeringen ved revner, end det er tilfældet i urevnet beton.

For normalt forekommende revnevidder, dvs. revner på 0,15–0,35 mm, vil der ofte ske en »selvheling« pga. calcit-, snavs- og rustaflejringer, der efterhånden udfylder revnen. Armeringskorrosionen kan derfor standse. Betondæklagets tykkelse og tæthed har væsentlig betydning.

Revneviddens størrelse har relativt lille indflydelse på korrosionshastigheden, når der er tale om gængse revneviddestørrelser (0,15–0,35 mm).

*Figur 68, modstående side. Indeholder beton en chloridmængde over den kritiske værdi, vil beton ikke rustbeskytte armeringen i et fugtigt miljø. Er beton samtidig carbonatiseret, er den kritiske chloridmængde nul, dvs. selv meget små mængder chlorid vil være rustfremkaldende i et fugtigt miljø. Beton kan få tilført chlorider fra mange kilder, som beskrevet i teksten.*



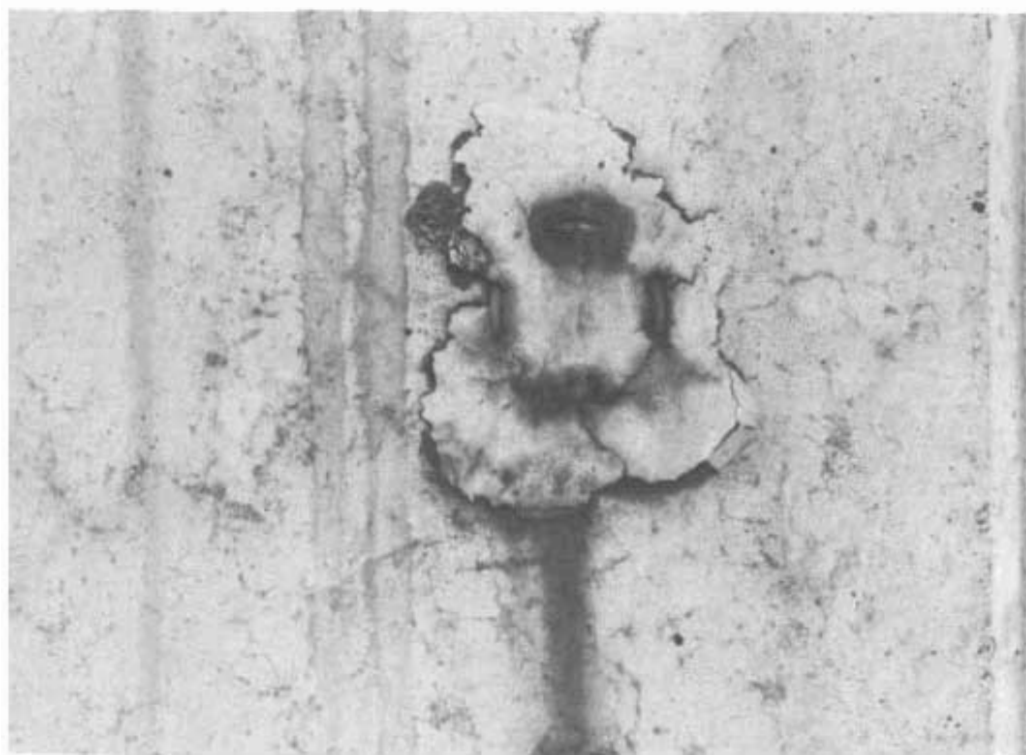


Revner vinkelret på armering vil typisk forårsage grubetæring, mens revner langs armeringen normalt giver anledning til fladetæring og afsprængte dæklag. Det skyldes, at korrosionen ved revner på tværs begrænses til et lille område, så risikoen for afskalning af betondæklaget er mindre.

## Litteratur

- ACI Journal. 1977. Guide to Durable Concrete. December.
- Beton-Bogen. 1979. CtO, Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor.
- CEB-RILEM. 1983. Durability of Concrete Structures. Introductory Report. Technical University of Denmark. Copenhagen.
- K. Tuuti. 1982. Corrosion of steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm.

*Figur 69. Afstandsholdere af blødt plast kan ikke altid yde tilstrækkelig beskyttelse af armeringen, når betonen befinder sig i et chloridholdigt miljø, fx som følge af tø-saltholdigt smeltevand. For det første vil betonen ikke »binde« til den bløde plast. Det betyder, at der er en vedhæftningsrevne mellem beton og afstandsklodsens, og den revne går direkte ind til armeringen. Desuden vil blødgøringsmidlet i afstandsklodsens plast forsvinde med tiden. Afstandsklodsens plast bliver derfor sprød, og vedhæftningsrevnen udvider sig således, at adgangen til armeringen bliver endnu lettere. Efter blot få år i et chloridholdigt miljø kan armeringen blive kraftigt angrebet (grubetæring).*



# Sulfatangreb

Sulfatholdigt vand angriber beton på forskellig måde. Sulfatreaktioner, hvor reaktionsproduktet er calciumaluminatsulfat, medfører den kraftigste nedbrydning af betonen. Dannelsen af calciumaluminatsulfat er pH-afhængig. Ved store pH-værdier modvirkes dannelsen.

Sulfat kan tilføres betonen ved blandingen, hvis delmaterialerne er sulfatholdige. Cement indeholder sulfat i form af gips,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , der er tilsat for at sinke hydratiseringen af cementmineralet  $\text{C}_3\text{A}$ . Der er her tale om en speciel men kontrolleret sulfatreaktion, som er ufarlig for betonen.

Både grundvand og overfladevand kan være sulfatholdigt. Der er derfor mulighed for at betonen tilføres sulfat via støbevandet, hvis det ikke kontrolleres før anvendelsen. Endelig kan grusforekomster være forurenede af sulfat. Det er især hyppigt i visse ørkenområder, fx i de arabiske lande.

Indeholder et betonbygværks omgivelser sulfat, vil miljøet blive betegnet som aggressivt eller særlig aggressivt, afhængig af sulfatkoncentrationen i disse omgivelser. Der er sulfat i havvand, og spildevand kan indeholde sulfat. Atmosfæren indeholder svovldioxid,  $\text{SO}_2$ , fortrinsvis fra skorstensrøg i industriområder. Denne svovldioxid kan omdannes til svovlsyre, hvorved der kan dannes »sur regn«. Betonen kan således angribes af sulfationer fra grundvand, regnvand, havgus og tåge.

## Sulfatangrebets kemi

Ved hydratiseringen af cementminerale  $\text{C}_3\text{S}$  og  $\text{C}_2\text{S}$  dannes blandt andet calciumhydroxid  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Ved hydratiseringen af cementmineralet  $\text{C}_3\text{A}$  dannes ettringit  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$  samt blandt andet en række metastabile calciumaluminatsulfathydrater (Taylor, 1964).

Når vand med sulfationer,  $\text{SO}_4^{--}$ , kommer i kontakt med disse hydratiseringsprodukter, sker der reaktioner, der ofte medfører volumenforøgelse. Der hersker dog ikke fuld enighed om mekanismerne, men følgende er foreslået (ACI, 1977; Betong-handbok, 1980): Ved høje sulfationkoncentrationer reagerer sulfaten med calciumhydroxiden og danner gips:



Ved lavere sulfationkoncentrationer reagerer gips med hydreret calciumaluminat og danner ettringit. Begge disse reaktioner foregår under volumenforøgelse, og det er ofte den sidste reaktion, der får skyld for ekspansionen og

den heraf følgende nedbrydning af betonen. Det fremgår af ovenstående, at nedbrydningen foregår ved opløsning (og eventuel udvaskning) af calciumhydroxid, ved udfældning af gips samt ved udfældning af ettringit. Visse former for ettringit kan absorbere store mængder vand under volumenforøgelse. Nyere undersøgelser tyder på, at sulfationerne også forårsager andre og gennemgribende ændringer i pastaen (Mehta, 1983).

I vandbelastede betonkonstruktioner kan man observere udfældning af ettringit, uden at der har været tale om en skadelig sulfatreaktion. Der er ikke tale om revnedannelser omkring disse udfældninger, som har deres oprindelse i den gips, der er tilsat cementen for at kontrollere hydratiseringsprocessen.

Betingelserne for at sulfatangreb optræder og nedbryder betonen er, at

- betonens omgivelser indeholder sulfat i skadelig koncentration, og at betonen er ubeskyttet, dvs. uden overfladebehandling,
- betonen er våd, da sulfatreaktionerne kræver vand for at kunne foregå,
- cementen har et højt indhold af  $C_3A$ , der nedbrydes ved sulfatangreb,
- betonen er permeabel og/eller har stor kapillarsugning, således at sulfationerne kan trænge ind i betonen og ikke blot angribe betonens overflade.

Sulfatholdigt vand kan angribe beton stærkt. Er beton velkomprimeret, revnefri og er  $v/c$ -forholdet lavt, vil betonen dog kun angribes i overfladen. Derved dannes gips (se ovenfor), der er tungt opløselig, især i et miljø med stort indhold af  $Ca^{++}$ . Derved kan sulfatangrebet standse, eller nedbrydningshastigheden bliver lille.

Svovlbrinte og svovlbrinteholdigt vand angriber betonens cementpasta ligeledes ved at omdanne kalken til gips og andre svovlsure salte, der dels er opløselige og dels fremkalder saltsprængninger. Dette iagttages i skorstene og i kloaker. Åbne ajlebeholdere kan dog godt udføres af ubeskyttet beton. Svovlbrinten vil iltes og danne svovl, der ikke er aggressivt over for beton. I lukkede ajlebeholdere kan betonen derimod godt nedbrydes.

Sulfatholdige omgivelser (vand og jordbund) aggressivitet kan klassificeres på følgende måde:

- *Moderat miljøklasse.* Grundvand med under 300 mg  $SO_3$ /liter, eller jordbund med under 0,2 pct.  $SO_3$ .
- *Aggressiv miljøklasse.* Grundvand med 300–1000 mg  $SO_3$ /liter, eller jordbund med 0,2–0,5 pct.  $SO_3$ .
- *Særlig aggressivt miljø.* Grundvand med over 1000 mg  $SO_3$ /liter, eller jordbund med over 0,5 pct.  $SO_3$ .

Det er ikke muligt på det indtil nu foreliggende grundlag at klassificere atmosfærens aggressivitet som følge af svovldioxidindhold. De første målinger af  $SO_2$  i luften er af ny dato (Biersteker, 1965). Det har vist sig, at  $SO_2$  bin-

*Figur 70-72. Ubeskyttet beton, der kommer i berøring med sulfatholdigt jord, kan blive udsat for kraftig nedbrydning som følge af saltsprængning. Anvendelse af sulfatbestandig cement er ikke i sig selv tilstrækkeligt. Betonens tæthed skal desuden være stor, dvs. lille v/c-forhold (under 0,35) og betonen skal være uden overflade-revner. Beton, der er overfladebehandlet med en sulfatbestandig membran, står sig dog bedst, når jorden er meget sulfatholdigt. Billederne stammer fra en undersøgelse i USA. Nedbrydningen er typisk for saltsprængning.*

*Figur 70.*



des til våd beton og våde kalkholdige bygningsmaterialer under dannelse af gips (Spedding, 1969a & b). De senere års omfattende nedbrydninger af statuer og gesimser vidner om, at luftens indhold af  $\text{SO}_2$  ikke er uden betydning for nedbrydningen.

Sne kan optage store mængder  $\text{SO}_2$ , og smeltevand kan derfor være mere svovlsurt end andet overfladevand.

*Figur 71.*

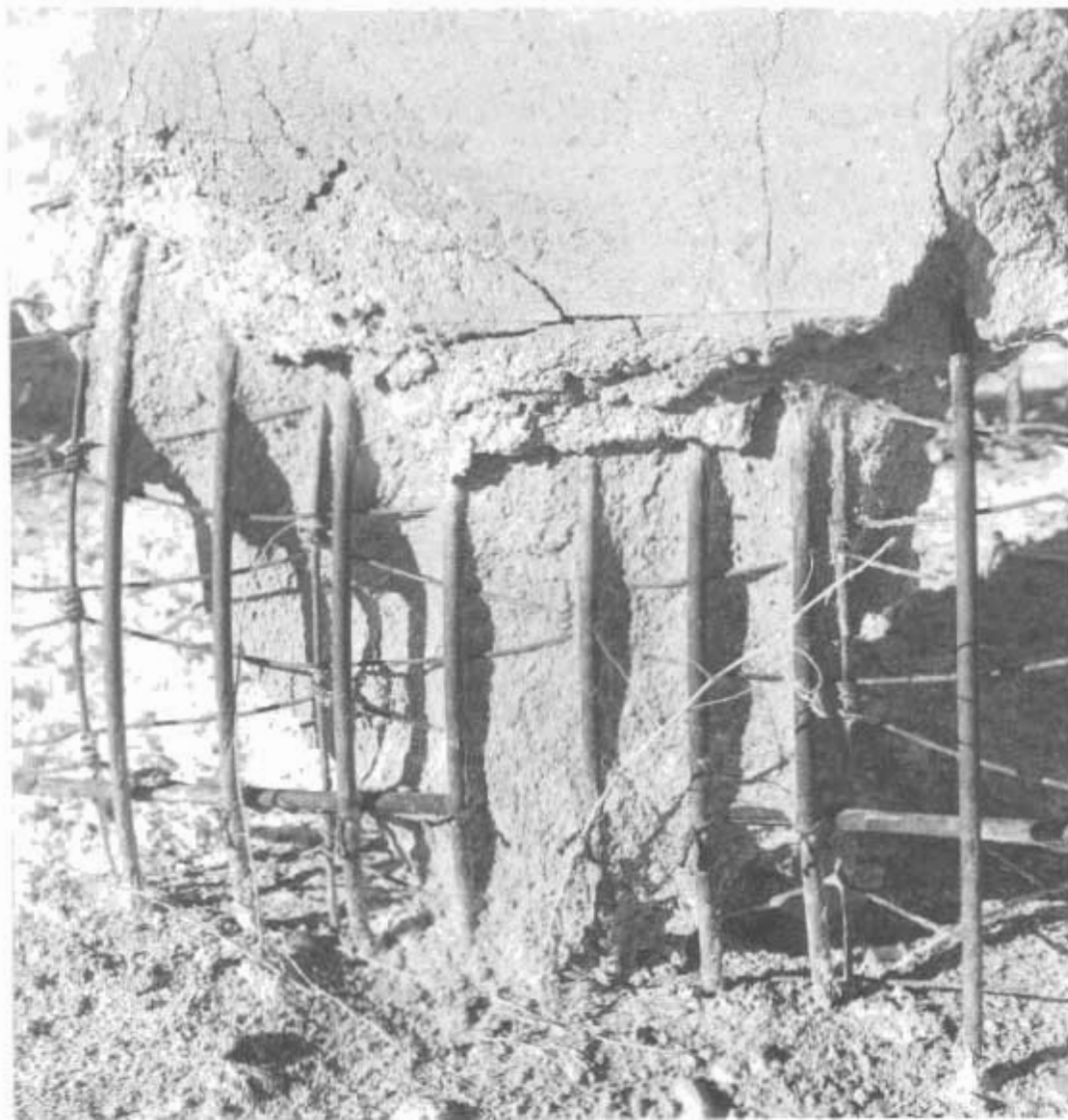


### Forholdsregler imod sulfatangreb

En naturlig forholdsregel mod sulfatangreb er at anvende cement med lavt  $C_3A$ -indhold, stort pulverindhold (cement, mikrosilica) og velkomprimeret beton med lavt  $v/c$ -forhold og god efterbehandling således at betonen bliver meget tæt.

Der er god korrelation imellem sulfatresistens og cementens  $C_3A$ -indhold.

*Figur 72.*



ASTM C 150 definerer en type V cement (sulfatresistent) med højst 5 pct.  $C_3A$  og en Type II cement (moderat sulfatresistent) med højst 8 pct.  $C_3A$ . I tysk sulfatresistent cement kræves ifølge DIN 1164 (1978) mindre end 3 pct.  $C_3A$  og i engelsk sulfatresistent cement kræves ifølge BS 4027 (1972) mindre end 3,5 pct.  $C_3A$ . Efter certificeringsordningen for cement iht. DS 427 opdeles cementser med hensyn til deres sulfatbestandighed på følgende måde:

- *Høj sulfatbestandighed.* Indholdet af  $C_3A$  er under 5 pct. Betegnelse: HS.
- *Moderat sulfatbestandighed.* Indholdet af  $C_3A$  ligger mellem 5 og 8 pct. eller indholdet af flyveaske er over 15 pct. Betegnelse: MS.
- *Ikke sulfatbestandig.* Ingen af ovennævnte krav er opfyldte. Betegnelse: IS.

Af danske cementser har hvid portlandcement og lavalkali sulfatbestandig cement en høj sulfatbestandighed.

Puzzolaner, specielt visse flyveasker, vil kunne nedsætte virkningen af sulfatangreb. Puzzolaner binder calciumhydroxider og forhindrer dermed dannelsen af gips og de ekspansive former for ettringit. I flyveaske er en del af dens aluminater utilgængelige for ettringitdannelse; endvidere vil simpel tilføjelse af flyveaske reducere  $C_3S$ - og  $C_2S$ -mængderne og derved også mængderne af  $Ca(OH)_2$ , der kan reagere og danne gips.

Betonens tæthed har stor betydning for sulfationernes adgang til betonen. ACI (1977) anbefaler således  $v/c$ -forhold på 0,45–0,50, alt efter hvor belastet betonen vil blive. Betong-handbok (1980) supplerer med anbefaling om at øge cementindholdet progressivt med belastningen, fra 330 kg/m<sup>3</sup> ved svag sulfatbelastning til 370 kg/m<sup>3</sup> beton ved stærk sulfatbelastning.

Betonen kan være belastet af både sulfater og chlorider, fx havvandskonstruktioner. Chloriders indtrængning i beton støbt med sulfatbestandig cement er større end i beton støbt med andre cementtyper, alt andet lige. Derfor må der vælges lavere  $v/c$ -forhold eller større dæklag på armeringen end normalt ved anvendelse af sulfatbestandig cement, når betonen er både sulfat- og chloridbelastet.

Til beton, der er belastet af chlorider, men ikke af sulfater, fx tørsaltbelastede altangange, bør der ikke anvendes sulfatbestandig cement.

## Litteratur

- Betong-handbok, Material. 1980. Stockholm.
- Imre Biczók. 1972. Concrete corrosion. Concrete protection. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Biersteker, de Graaf, Nass. 1965. Indoor air pollution in Rotterdam homes. Int. J. Air Wat. Pol. 9, 343–350.



- Guide to Durable Concrete. 1977. Jour. Amer. Concrete Inst. 74 nr. 12.
- W. C. Hansen. 1965. Twenty-Year Report on The Long-Time Study of cement Performance in Concrete. Res. Dev. Lab. P. C. A. Bull. 175.
- F. R. McMillan, T. E. Stanton, I. L. Tyler and W. C. Hansen. 1949. Long-Time Study of Cement Performance in Concrete. Spec. Publ. A. C. I.
- D. J. Spedding. 1969a. The fate of sulphur-35/sulphur dioxide released in a laboratory. Atmospheric Environment. 3, 341-346.
- D. J. Spedding. 1969b. Sulphur dioxide uptake by limestone. Ibid 3, 683.
- H. F. W. Taylor. 1964. The Chemistry of Cements. Academic Press.



# Svind

I perioden fra betonens udstøbning til hærdnet beton i fugtligevægt med omgivelserne, sker der volumenændringer. Der er først og fremmest tale om svind, men kvelning kan også forekomme. Dette svind opdeles efter årsag i følgende typer:

- *Kemisk svind*. Dels hydratiseringssvind, dels carbonatiseringssvind.
- *Fugtbetonet svind*. Dels plastisk svind, dels udtørringssvind.

I praksis har stort set kun det fugtbetonede svind betydning, idet der kan forekomme kraftig revnedannelse. Det kemiske svind kan medføre mindre revnedannelser i form af krakelering.

## *Plastisk svind*

Plastisk svind er en rumfangsformindskelse, der kan forekomme hvis nystøbt beton udsættes for kraftig fordampning, medens betonen endnu er plastisk, dvs. inden cementen er bundet af.

Årsagen til rumfangsformindskelsen er, at der dannes undertryk i vandet under de menisker, som dannes i cementgelens porer under udtørringen. Det plastiske svind kan blive så kraftigt, at der opstår revner i betonoverfladen.

Plastiske svindrevner antager sædvanligvis en af følgende former:

- Diagonale revner under ca.  $45^\circ$  med kanterne med en afstand på 0,5-2 m.
- Netrevnemønster.
- Revner der følger armeringsjernene eller andre revneanvisere.

## **Betydende parametre**

De faktorer, der har betydning for udtørringsintensiteten, er især omgivelsernes miljøpåvirkning:

- Lufttemperatur.
- Luftfugtighed.
- Vindhastighed.
- Forskallingsart.

Hertil kommer en række parametre ved selve betonen, nemlig betonens:

- Temperatur.
- Vandindhold.
- Pulverindhold (cement, flyveaske, mikrosilica).
- Indhold af tilsætningsstoffer (retarder, luftindblandende tilsætningsstoffer).

Hvis fordampningen fra betonens overflade sker hurtigere end der tilføres vand, fx fra betonens vandseparation, vil betonoverfladen udtørre. Der kan da opstå plastisk svind i betonen. Hvis svindet overstiger den friske betons deformationsevne (trækbrudtøjning) opstår der svindrevner. På figur 73 er frisk betons trækbrudtøjning afbildet som funktion af modenhedsalderen.

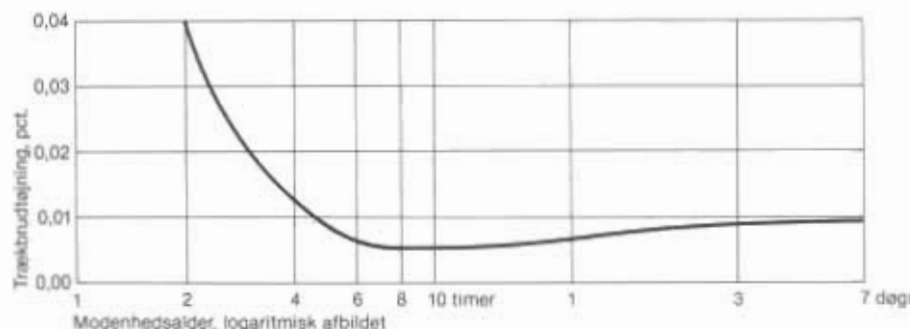
*Lufttemperatur.* Stigende lufttemperatur medfører øget fordampning fra betonoverfladen og dermed øget tendens til eller risiko for plastisk svind.

*Luftfugtighed.* Faldende luftfugtighed medfører øget fordampning og dermed øget tendens til eller risiko for plastisk svind.

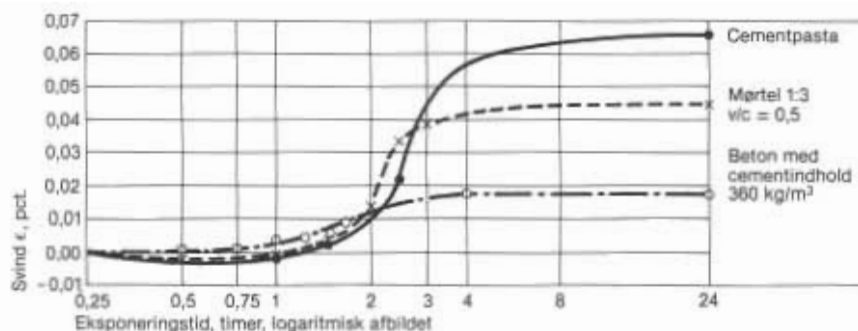
*Vindhastighed.* Stigende vindhastighed medfører øget fordampning og dermed øget tendens til eller risiko for plastisk svind.

*Forskalling.* Hvis formene, som betonen støbes imod, er stærkt vandsugende, kan der optræde plastisk svind. Det gælder også, hvis der støbes mod en afhærdet udtørret beton, som også vil være stærkt vandsugende, hvis den ikke er blevet vandmættet forinden.

*Betonens temperatur.* Hvis betonen ved udstøbningen har en høj temperatur, vil fordampningshastigheden være stor. Det øger risikoen for plastisk svind. En lav temperatur virker tilsvarende retarderende, se nedenstående afsnit om retarding.



Figur 73. Betons trækbrudtøjning. Som det ses falder trækbrudtøjningen for den friske beton, efterhånden som den begynder at binde af. Under hærdningen vokser brudtøjningen derefter langsomt.



Figur 74. Plastisk svind som funktion af cementindholdet. Prøverne blev lagret i fri luft ved 20 °C og 50 pct. RF ved en vindhastighed på 1,0 m/s. Det ses, at plastisk svind er større for betonblandinger med stort cementindhold, end for blandinger med lille cementindhold. (L'Hermitte, 1969).

**Vandindhold.** Jo større betonens vandindhold er, jo større plastisk svind kan der forventes at forekomme, alt andet lige.

**Cementindhold.** Et stort cementindhold vil øge faren for plastisk svind, se figur 74.

**Flyveaske.** Indhold af flyveaske vil nedsætte betonens vandseparation og kan derfor medføre større plastisk svind. Dette forhold har betydning for anvendelse af portlandflyveaskecement. Her er risikoen for plastisk svind større end ved anvendelse af de andre cementtyper.

**Mikrosilica.** Indhold af mikrosilica øger betonens tendens til at udvikle plastiske svindrevner i lighed med anvendelse af flyveaske og stort cementindhold.

**Retardering.** Længere hærdningstid, fx på grund af tilsætning af retarder, vil give større risiko for plastisk svind, fordi betonens plastiske tilstand, og dermed den tid som udtørringen har at virke i, forlænges.

**Luftindblanding.** Luftindblanding vil nedsætte betonens vandseparation, men uden at faren for plastisk svind herved øges. Årsagen hertil er formentlig, at de fleste luftindblandingsmidler består af organiske forbindelser med lange, lige molekyllkæder med en hydrofob gruppe i den ene ende. Disse grupper medfører en sænkning af vandets overfladespænding og dermed af overfladespændingerne i meniskerne, der dannes ved udtørring.

### Forholdsregler imod plastisk svind

Af de ovenfor nævnte parametre, er det den friske betons temperatur og vindhastigheden umiddelbart over betonoverfladen, der er de vigtigste.

Støbning midt om sommeren med høj lufttemperatur, kraftig solopvarm-

ning og kraftig blæst er derfor en ugunstig situation, som kan medføre plastisk svind. Risiko for plastisk svind er imidlertid også til stede ved vintertide, især hvis der anvendes varm beton.

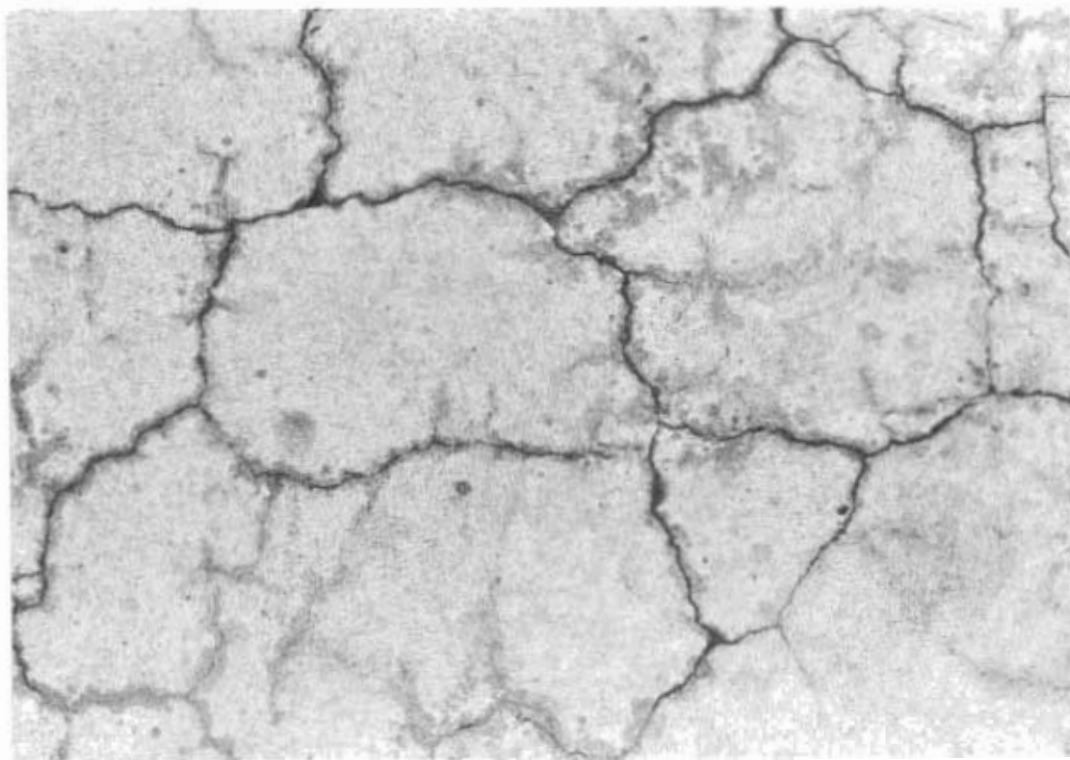
For at kunne vurdere om der er risiko for plastisk svind, kan man anvende følgende empiriske formel (PCA, 1955):

$$w = 80 \cdot 10^{-6} (p_0 - p_a) (1 + 0,85v)$$

hvor

- $w$  er fordampningshastigheden, målt i enheden kg vand pr. m<sup>2</sup> pr. time,  
 $p_0$  er mættede dampes tryk ved betonoverfladen, målt i enheden Pascal (Pa).  
 $p_a$  er den omgivende lufts vanddamptryk i enheden Pascal (Pa).  
 $v$  er vindhastigheden umiddelbart op til betonoverfladen, målt i enheden m/s.

*Figur 75. Ved plastisk svind og udtørningssvind af beton vil der i overfladen, når der er tale om en udstrakt flade (belægning, plade eller væg), fremkomme en plan spændingstilstand, der benævnes hydrostatisk træk. Hovedspændingerne er lige store, og alle forskydningsspændinger nul. Hvis der ikke er revneanvisere, vil revnedannelsen være tilfældig. Det betyder, at der dannes et netrevnemønster, oftest med sekskantede masker.*



Formlen kan bruges til at beregne fordampningshastigheden ved aktuelle klimaforhold. Bliver  $w < 1 \text{ kg/m}^2$  pr. time, er der næppe risiko for plastisk svind for normale betoner. Bliver  $w \geq 1 \text{ kg/m}^2$  pr. time bør man beskytte betonen. Silicabeton og flyveaskebeton skal altid beskyttes.

Opstår der et så kraftigt plastisk svind, at betonen revner, vil armeringsstængerne ofte være revneanvisende. Er betonpladen derimod uarmeret eller har armeringen et stort dæklag, vil der opstå et typisk netrevnemønster.

Plastisk svind og revnedannelse som følge heraf er normalt ikke vanskeligt at forebygge i Danmark. I varmere lande er problemerne derimod langt større. Man kan forebygge ved at anvende følgende forholdsregler (Nepper, 1975):

- Underlag og form fugtes.
- Grusmaterialerne fugtes, hvis de er meget tørre og vandabsorberende.
- Brug ikke mere blandevand end hensyn til effektiv udstøbning og komprimering tilsigter.
- Opstil vindspærre, hvis kraftig blæst kan forekomme.
- Opstil solskærme for at undgå kraftig solopvarmning af betonoverfladen.
- Undgå at betonens temperatur ligger højt over den omgivende lufts temperatur. Ved støbning i varmt vejr bør betontemperaturen helst ligge under lufttemperaturen.
- Umiddelbart efter udstøbning – og det kan ikke gå hurtigt nok – beskyttes betonoverfladen mod udtørring ved tildækning med våde måtter, der holdes konstant fugtige, enten ved hyppig oversprøjtning med varmt vand eller ved yderligere tildækning med fx lys plastfolie. Ved anvendelse af forseglingsmembran bør denne påsprøjtes så hurtigt som muligt (jvf. brugsanvisningen) og være egnet til påsprøjtning af frisk beton.

Det må her fremhæves, at den beskrevne tildækning af den nyudstøbte beton, som er hensigtsmæssig i forbindelse med alt betonarbejde, er særdeles væsentlig og helt uomgængelig, når betingelserne for plastisk svind og ledsagende revnedannelse er til stede.

## *Udtørringssvind*

Fjernes der vand fra hærdnet beton, sker der et udtørringssvind. Udtørringssvindet er derfor primært afhængig af den omgivende lufts relative fugtighed og cementpastaens overskudsvand. En del af udtørringssvindet er irreversibelt. Beton, der til stadighed er under vand, vil ikke svinde.

Beton i en bygningsdel kan ikke uhindret få svindtøjninger som følge af udtørringssvind. Differenssvind, enten over et betontværsnit eller mellem tilstødende bygningsdele, kan udløse svindrevner. Da svindrevner kan være ud-

gangszoner for nedbrydning, må svindrevner vurderes på samme måde som lastfremkaldte revner.

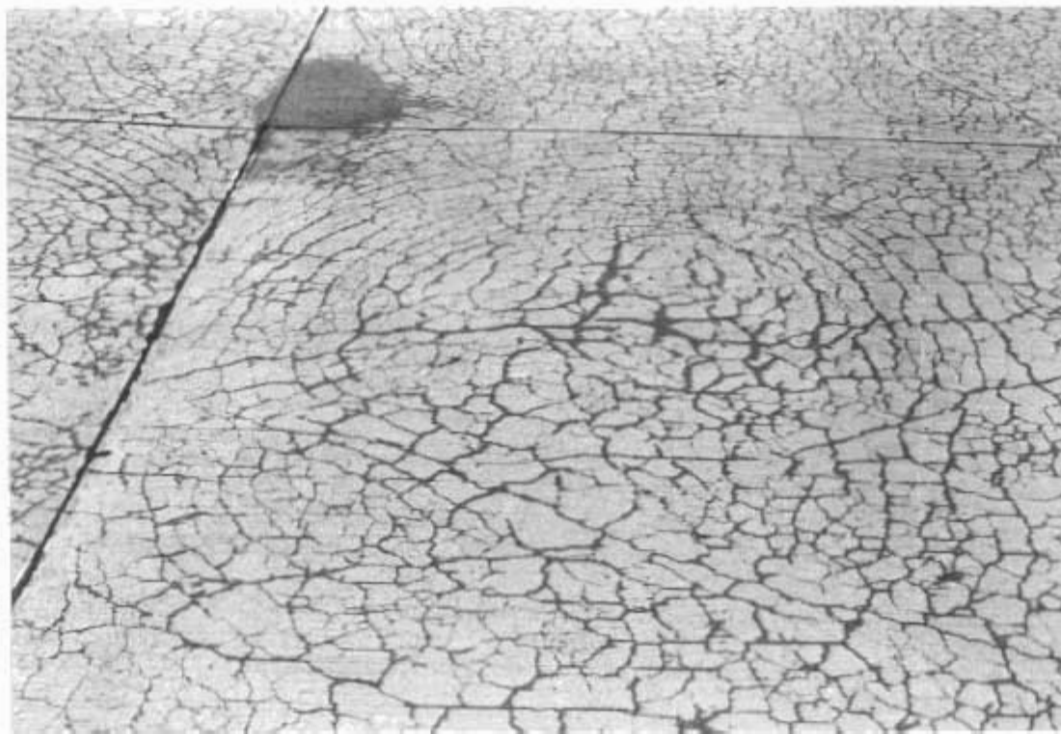
Volumenændringen i beton under udtørring er mindre end det fjernede vands volumen. Når det frie vand i betonens kapillarporer fjernes, sker der ingen eller kun lidt svind. Fortsætter derimod udtørringen, fjernes der absorberet vand ledsaget af volumenændringer i cementpastaen. Forholdet mellem den fjernede vandmængde og svind er vist på figur 77.

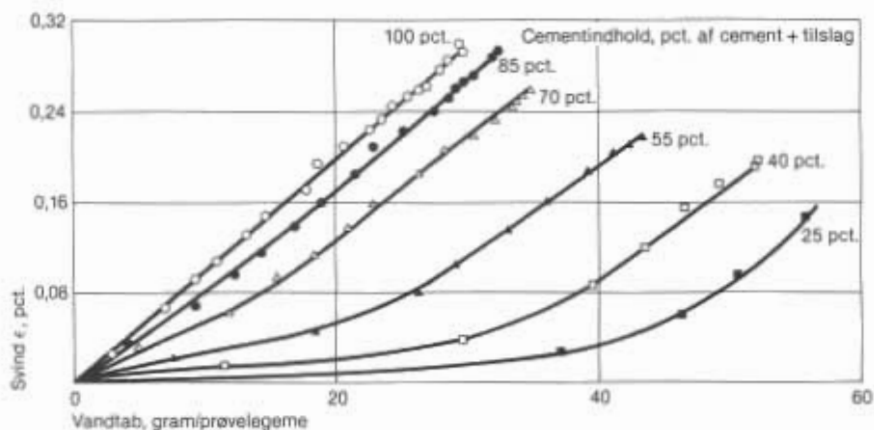
Det ses, at for ren cementpasta er de to størrelser proportionale, idet der ikke er noget kapillarevand til stede, og det derfor kun er absorberet vand, der fjernes.

#### *Tilslag*

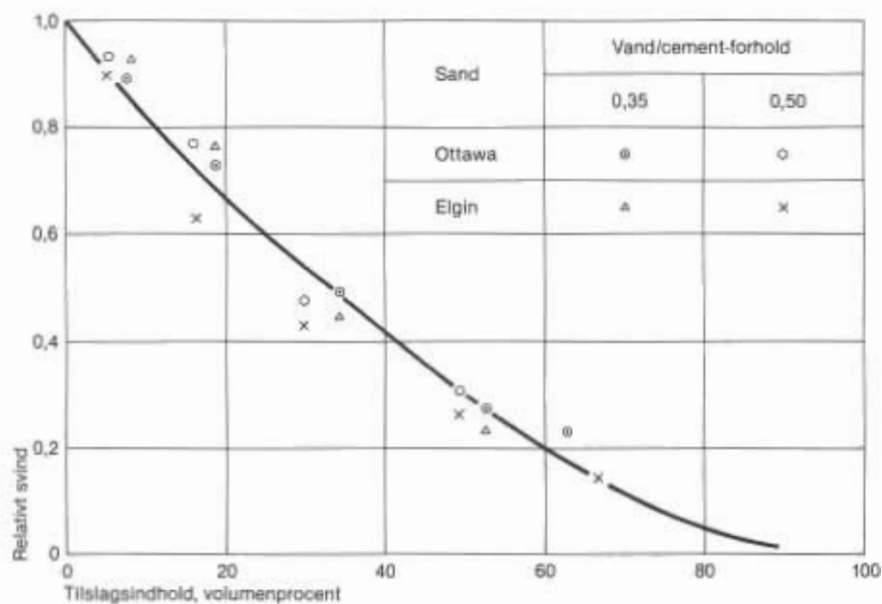
Da det er cementpastaen, der svinder ved udtørring, vil mørtel og beton få mindre udtørringssvind end den tilsvarende rene cementpasta. Det skyldes til-

*Figur 76. En betonbelægning, der får plastisk svind som følge af for sen og utilstrækkelig tildækning i den første periode, vil give adgang for fugt til betonens indre. Er sandet alkalireaktivt, og indeholder betonen tilstrækkelig alkali, vil skadelige alkalikiselreaktioner være resultatet. Revnerne, der er dannet som følge af plastisk svind, vil derefter udvide sig som følge af alkalikiselreaktioner. Alkalikiselreaktionerne ville have været længere tid om at udvikle sig, hvis der ikke havde været revnedannelse som følge af plastisk svind.*





Figur 77. Grafisk afbildning af forholdet mellem svind og vandtab for prøvelegemer udstøbt med cement tilsat pulveriseret kvarts. Prøvelegemerne blev vandlagret i 7 døgn ved 21 °C og derefter udtørret. Det ses af figuren, at stigende cementindhold medfører større svind. (Powers, 1959).



Figur 78. Svind af beton i forhold til svind af ren cementpasta i afhængighed af betonnens indhold af tilslag i volumenprocent. Som det fremgår af figuren falder det relative svind med stigende tilslagsindhold. (Pickett, 1956).

slagets »udtyndende« effekt. På figur 78 er vist sammenhængen mellem betonens procentuelle indhold af tilslag og svindets størrelse.

Tilslagsmaterialernes fraktionsstørrelse og fordeling betyder derimod ikke noget for svindets størrelse. Tilslagsmaterialerne influerer imidlertid på betonens vand- og cementbehov og dermed på betonens svind, alt andet lige.

Tilslagsmaterialernes elasticitetskoefficient indvirker på svindets størrelse. Tilslagsmaterialer med stor elasticitetskoefficient har en større afstivende virkning end tilslag af bløde bjergarter. Granitbeton har således noget mindre svind end beton med blød sandsten, alt andet lige. Der er dog ikke stor forskel på de danske, naturlige tilslagsmaterialer. Man bør dog være opmærksom på, at visse bjergarter, såsom basaltiske bjergarter og lerholdige sandsten, kan have fugtbetingede volumenændringer af samme størrelsesorden som cementpasta. Dette kan forårsage store deformationer og revnedannelser i betonen (CtO, Beton-Bogen).

Beton til pumpning kræver normalt et højere sandindhold end beton til almindelig udlægning på grund af et større vandbehov. Derfor må man i almindelighed forvente større slutsvind hos pumpebeton end hos almindeligt udbragt beton. Anvendelse af vandreducerende tilsætningsstoffer har imidlertid i praksis medført, at pumpebeton nu kan fremstilles med et lille vandindhold. Derfor kan pumpebetons svind nedbringes, stort set efter ønske.

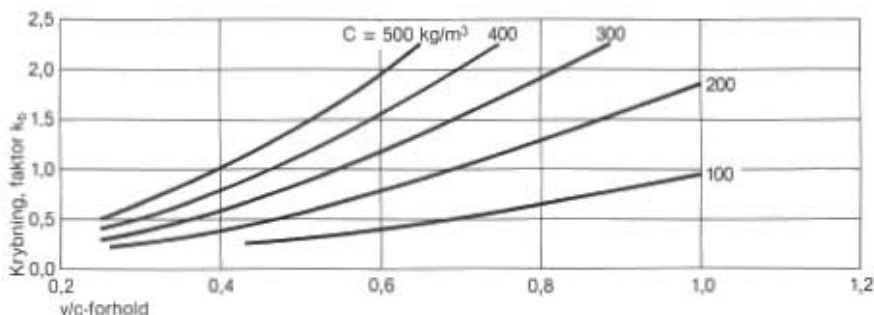
### *Betonsammensætning*

Det er som nævnt cementpastaen, der er den komponent i betonen, som har fugtbetingede volumenændringer. Derfor afhænger betons svind under ellers ens betingelser af cementpastaens sammensætning og volumenandel af betonen. Cementpastaen beskrives ved betonens vand- og cementindhold. På figur 79 er  $v/c$ -forholdets relative indflydelse på svindet angivet for betoner med forskelligt cementindhold. Det skal her bemærkes, at såvel betonens cementindhold som betonens  $v/c$ -forhold har betydning for slutsvindet under ellers ens fugtmæssige og geometriske forhold. Følgende fremgår af figuren:

- Slutsvindet øges med øget vandindhold for beton, hvis betonens cementindhold fastholdes (stigende  $v/c$ ).
- Slutsvindet øges med øget cementindhold, hvis betonens  $v/c$ -forhold fastholdes (medfører stigende vandindhold).
- Slutsvindet mindskes med øget cementindhold, hvis betonens vandindhold fastholdes.

Den afgørende materialeparameter for betonens slutsvind under ellers givne ydre vilkår er derfor betonens vandbehov, sådan som det fremgår af ovenstående. Derfor har de vandreducerende tilsætningsstoffer interesse, når betons slutsvind skal begrænses.





Figur 79. Betonsammensætningens (cementindholdets og v/c-forholdets) indflydelse på svindet. Det ses, at svindet kan stige såvel med voksende cementindhold som med voksende v/c-forhold. (Beton-Bogen, 1979). Se også figur 80.

Figur 80, modstående side. Beregning af betons svindforløb og slutsvind. Forudsætningerne for disse beregninger er, at betonelementet, hvis svind skal estimeres, er prismatisk. Desuden skal omgivelsernes relative fugtighed være tilnærmelsesvis konstant.

1. Betonens cementindhold  $C$  og v/c-forhold skal være kendt. Forventningsværdierne skal benyttes. Betonelementets areal  $A_c$  og fugtafgivende overflade  $s$  skal være kendt. Det omgivende klimas relative fugtighed,  $RF$ , skal være kendt.

2. Betonsammensætningens indflydelse sammenfattes i en faktor  $k_b$ , jvf. figur 79.  $C$  indsættes i enheden  $kg/m^3$ .

3. Det omgivende klimas indflydelse sammenfattes i en faktor  $k_c$ , der ofte betegnes »basissvindet«,  $RF$  indsættes i pct.

4. Fugtafgivelsen styres af en parameter  $r$ , der skal udregnes i enheden meter. For en udstrakt plade, hvor fugtafgivelsen kun sker til én side, er denne parameter  $r$  lig med den dobbelte pladetykkelse. Sker fugtafgivelsen til begge sider, bliver  $r$  lig med pladetykkelsen.

5. Indflydelsen fra betonelementets dimensioner samles i en faktor  $k_d$ . Parameteren  $r$  skal indsættes i enheden meter.

6. Produktet af de tre faktorer er afgørende for slutsvindet.

7. Hvis selve svindforløbet skal estimeres, kræves yderligere beregninger.

8. Slutsvindet er en usikker størrelse. Forventningsværdien skal sættes til  $\epsilon_{\infty}$ , og et bedste skøn for øvre karakteristiske værdi kan sættes ca. 25 pct. højere.

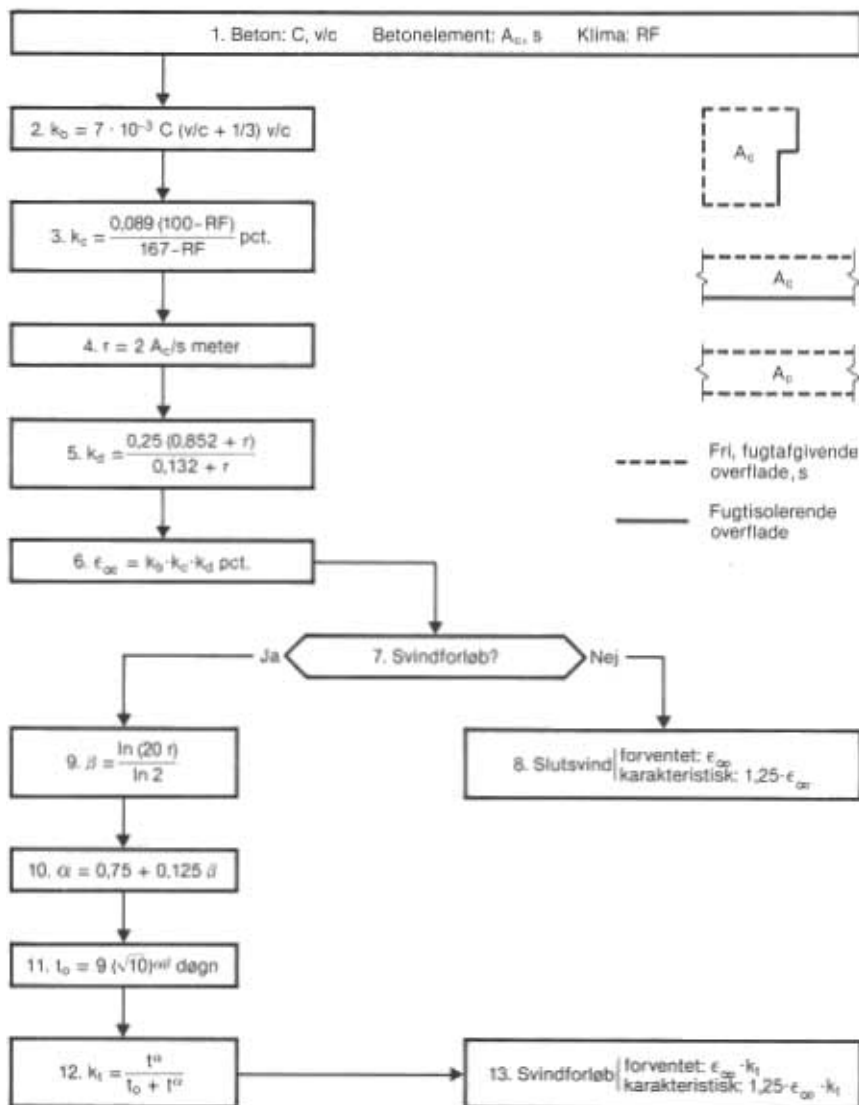
9. Svindforløbet afhænger af fugtafgivelsen fra betonen, dvs. af parameteren  $r$ . Indflydelsen samles i en størrelse  $\beta$ , hvor der i det matematiske udtryk er tilstræbt at opnå en let indtastning på regnemaskine.

10. Det er bekvemt at indføre en parameter  $\alpha$  afledt af størrelsen  $\beta$ .

11. I det matematiske udtryk for  $t_0$  er det tilstræbt at opnå en let indtastning på regnemaskine. Enheden for  $t_0$  er døgn.

12. Tidens indflydelse samles i en faktor  $k_t$ . Den tid, hvor betonen udsættes for fugtafgivelsen, betegnes  $t$ , og den skal indsættes i enheden døgn. Halvdelen af svindet er opnået, når der er gået  $9(\sqrt{10})^2$  døgn.

13. Svindforløbet er en usikker proces. Forventningsværdien kan sættes til  $k_t \cdot \epsilon_{\infty}$ , og et bedste skøn for øvre karakteristiske værdi kan sættes ca. 25 pct. højere.



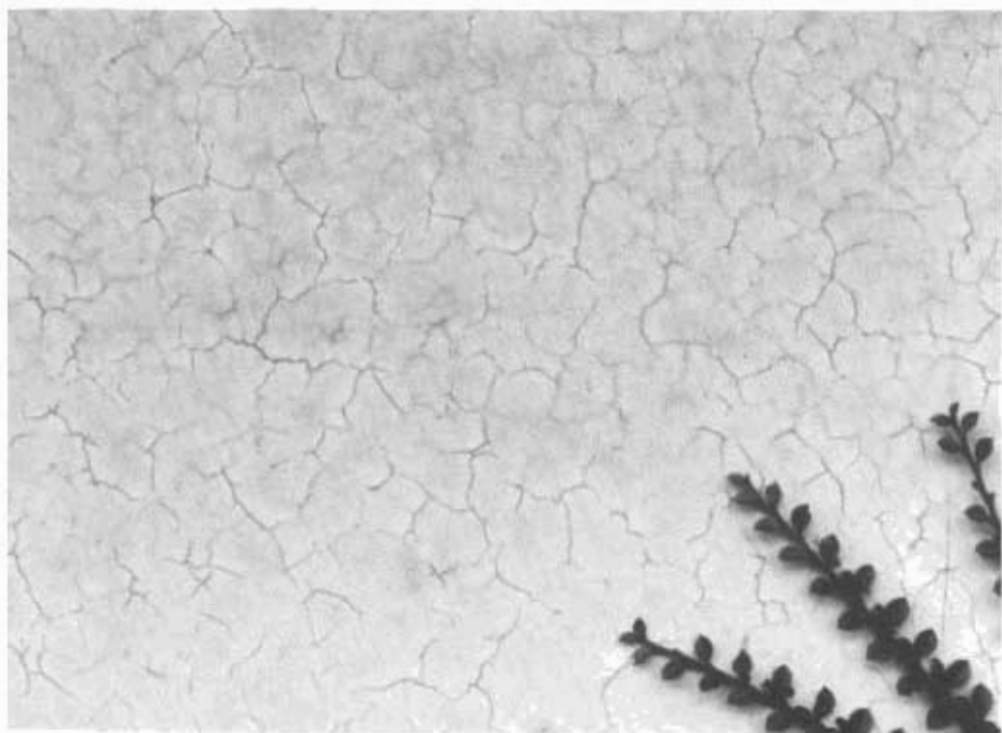
### *Damphærdning*

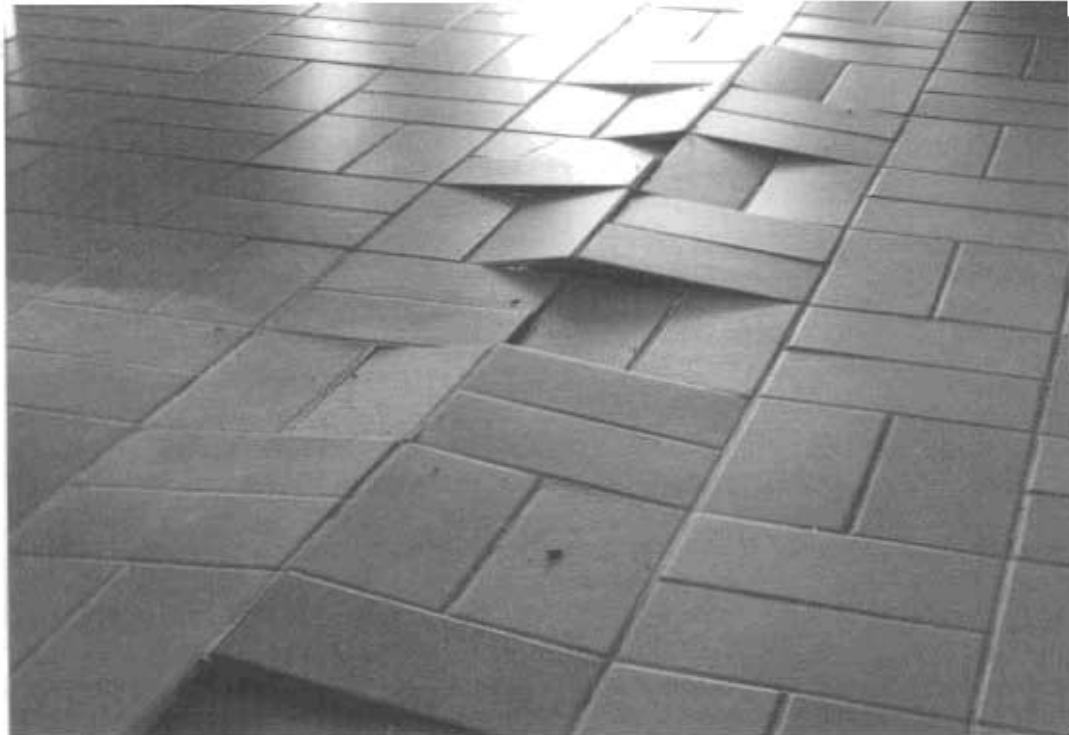
Damphærdning medvirker til at reducere svindet under det første svindforløb til ca.  $\frac{1}{3}$  af normalt hærdnet betons svind.

### *Dimensionsindflydelse*

Den mængde vand, som fordamper fra betonen, afhænger dels af luftens relative fugtighed, dels af den del af betonens fri overflade, som tillader fordamning, i forhold til betonens rumfang.

*Figur 81. Facadeelementer af beton støbt i glat forskalling synes at være særlig udsat for at få en let revnedannelse (krakelering) i overfladens cementslamlag. Revnerne går sjældent særlig dybt og medfører normalt kun æstetiske problemer. Revnerne vil i tidens løb tilbageholde sodpartikler i regnvand og derved blive synlige. Dette kan undgås ved i tide at give betonoverfladen en vandafvisende overfladebehandling. Revnerne kan også fjernes ved sandblæsning. Syrebehandling må frarådes, hvis betonen er armeret.*





*Figur 82. Klinker, der lægges på et betongulv med for stort restsvind, kan skyde op. En beregning af betonens restsvind og svindforløb kan danne grundlag for valg af lægningstidspunkt og valg af udlægningsmetode.*

### **Forholdsregler imod udtørringssvind**

En begrænsning af betons slutsvind under givne omstændigheder (bygningdelens geometri og omgivelsernes relative fugtighed) kan kun ske ved at proportionere betonen ud fra et krav til slutsvindet. En metode til beregning af svindets størrelse er angivet i litteraturen (CEB 1978, CtO, Beton-Bogen).

Et krav til begrænsning af betons slutsvind vil uvægerligt føre til anvendelse af vandreducerende tilsætningsstoffer og stort indhold af tilslag, fortrinsvis glatte, kubiske sten (lille vandbehov). Desuden må betonen ikke udsættes for udtørring før der er opnået en passende stor hærdningsgrad.

Såfremt det stillede krav om begrænsning af betonens slutsvind ikke derved kan tilfredsstilles, findes der svindreducerende tilsætningsstoffer til beton; de er dog dyre i brug!

Betons acceptable slutsvind skal fastsættes således, at der enten er en passende stor sikkerhed over for dannelse af svindrevner, eller at de dannede

svindrevners vidder bliver begrænsede. Hvilket krav, der vælges, er miljøafhængigt. Begrænsning af svindrevnernes vidder foretages med svindarmering, og der kan regnes med de samme afhængigheder af armeringsfordeling, som er gældende for lastfremkaldte revner.

### Litteratur

- Beton-Bogen. CtO. 1979. Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor.
- R. L'Hermite. 1969. Volume changes of concrete. Proc. 4th int. Symp. on the Chemistry of Cement, Washington D. C.
- Model Code for Concrete Structures. 1978. CEB/FIP 3.ed.
- P. Nepper-Christensen. 1970. Betons Elasticitetsmodul. CtO, Betonteknik 3/01/1970.
- P. Nepper-Christensen. 1975. Plastisk Svind. CtO, Betonteknik 3/05/1975.
- A. M. Neville. 1981. Properties of Concrete. 3. udgave, Pitman Publishing Ltd. London.
- G. Pickett. 1956. Effect of aggregate on shrinkage of concrete and hypothesis concerning shrinkage. J. Amer. Concr. Inst., 52, pp 581-590.
- Portland Cement Association. 1955. Prevention of Plastic Cracking in Concrete. PCA, Chicago.
- T. C. Powers. 1959. Causes and control of volume change. J. Portland Cement Assoc. Research and Development Laboratories, 1, No 1, pp 29-39.

# Syreangreb

Hydratiseret cementpasta er stærk basisk med pH-værdi på 12,5–14. De fleste syrer danner derfor salte med cementens hydratiseringsprodukter og omdanner således pastaen. Syreangrebet virker stærkt nedbrydende, hvis de dannede salte er vandopløselige og udludes, eller hvis de dannede salte medfører saltsprængning. I begge tilfælde åbnes plads for nye syreangreb.

Vands pH-værdi alene kan derfor ikke bruges som mål for, hvor hurtigt surt vand nedbryder hærdnet beton. Som mål må man derimod benytte opløseligheden af den pågældende syres calciumsalt samt syrens koncentration.

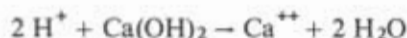
Beton kan som byggemateriale blive udsat for mange forskellige syrer. Saltsyre, salpetersyre og eddikesyre danner let opløselige calciumsalte og virker derfor stærkt nedbrydende. Garvesyre, mælkesyre og surt øl gør også skade. Derimod er most, vin og vineddike ikke skadeligt, idet de tilsvarende syrer calciumsalte er tungt opløselige og ikke medfører saltsprængning.

Svovlsyre danner et tungt opløseligt calciumsalt (gips), der desuden medfører saltsprængning, se kapitlet om sulfatangreb.

Det vil føre for vidt at gennemgå de mange og specielle tilfælde af syreangreb på beton. Det vil ofte dreje sig om specialkonstruktioner som fx kloakrør eller skorstene, hvor syreangreb altid forekommer, og hvor de aggressive stoffer er kendte. Der henvises derfor til oversigtstabeller og artikler i blandt andet *Betong-handbø*k (1980), Kuenning (1966), *Betong-Teknik* (1974) og CEB (1982).

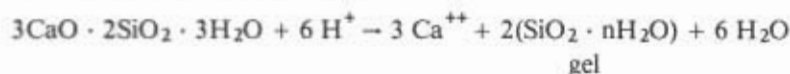
## Syreangrebets kemi

Nedbrydningen af cementpastaen er hovedsagelig en reaktion mellem hydrogenioner og calciumhydroxider i den hydratiserede portlandcement:



Hvis det dannede Ca-salt er letopløseligt i vand – se under kulsyre – vil reaktionen fritlægge stadig nye områder for syreangreb.

Ved stærke syrekoncentrationer vil C-S-H hydratiseringsprodukterne endvidere kunne angribes og danne gel:

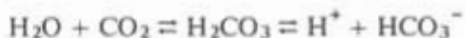


Af de mest almindelig forekommende syrer, der angriber beton, er svovlsyre og salpetersyre behandlet i kapitlerne om henholdsvis sulfatangreb og nitratangreb. I det følgende omtales derfor kun kulsyreangreb og humussyreangreb.

### *Kulsyreangreb*

Den almindeligste form for sure opløsninger, som beton udsættes for, er kulsyreholdigt vand.

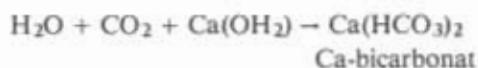
Regn og tåge bliver svagt sure ved absorption af atmosfærisk  $\text{CO}_2$ , mens vand der siver ned i jorden kan opnå høje kulsyreindhold ved biokemiske og mikrobiologiske processer. Det er kun en del (ca. 1 pct.) af den totale mængde  $\text{CO}_2$  i vandet, der findes som kulsyre, resten forbliver som  $\text{CO}_2$ :



Det er ikke kun kulsyre, der har nedbrydende effekt på betonen; indholdet af fri, såkaldt »aggressiv«  $\text{CO}_2$  er væsentlig. En del af den opløste  $\text{CO}_2$  er bundet til at holde bicarbonaten, fx  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , i opløsning – se ovenstående reaktionsligning – mens resten er den aggressive, kalkopløsende  $\text{CO}_2$ . Derfor vil blødt vand virke nedbrydende over for beton, da  $\text{CO}_2$ -indholdet ikke er bundet til at holde Ca- og Mg-bicarbonaterne i opløsning, men er frit og aggressivt. Hårdt vand vil som konsekvens heraf være mindre aggressivt, da store dele af  $\text{CO}_2$ -indholdet er bundet til det store indhold af bicarbonater.

*Nedbrydningsforløbet.* Det i det følgende skitserede forløb er en grov forenkling og skal kun tjene til illustration af hovedprincipperne.

Nedbrydningen foregår ved at kulsyreholdigt vand i og på betonen angriber calciumhydroxiden:



Det dannede bicarbonat er letopløselig og kan udludes. Derved kan nedbrydningen enten fortsætte, eller bicarbonaten kan reagere med dybere liggende calciumhydroxid:



og betonen er derefter carboniseret. Hvis der stadig tilføres  $\text{H}_2\text{O}$  og  $\text{CO}_2$  vil:



Da calciumhydroxiden er brugt, vil der ikke mere være nogen bremse for fortsat nedbrydning.

Som det er skitseret i omtalen af syreangrebets kemi, vil det kulsyreholdige

vand senere kunne angribe pastaens øvrige hydratiseringsprodukter, ligesom kalksten og kalkbelægninger på tilslagskorn vil være sårbare.

### *Humussyre*

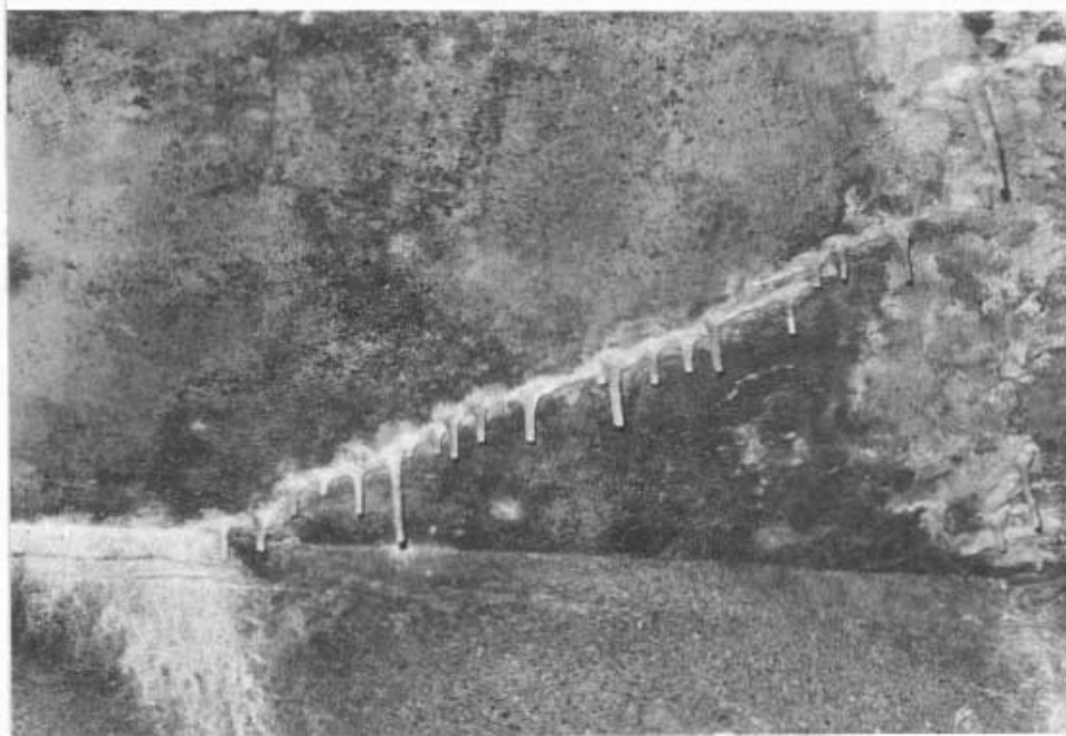
Humussurt vand er ikke særligt aggressivt over for hærdnet beton. At humussyre er en relativ ufarlig syre skyldes, at dens Ca-salt er meget tungt opløseligt.

Derimod er humusholdigt sand eller støbevand meget skadeligt i frisk beton. Sand med blot 0,1 pct. humussyre kan forstyrre cementens hærdning, idet cementens kalk angribes og bindes af humussyren.

Brunligt mosevand, som udfra lugt eller farve umiddelbart bedømmes som uegnet, behøver ikke at have et indhold af organiske forbindelser på mere end 30 mg/liter, hvilket er uden skadelige virkninger. Organiske stoffer (humus etc.) kan altså farve stærkt i forhold til koncentrationen.

Betydelig styrkereduktion fås, når støbevandet har et humusindhold på

*Figur 83. Når surt eller blødt vand, fx regnvand, passerer en revne i beton, vil der ske en opløsning af cementpastaens calciumhydroxid (udludning). Ved udtrædning på betonoverfladen sker der en carbonatisering, således at der dannes calciumcarbonat. Sker udtrædningen i bunden af en vandret plade, vil der dannes drypsten af form som rør, hvorigennem det gennemsivende vand fortsat kan løbe.*





over 750 mg/liter. Afbinding forhindres, når støbevandet har et humusindhold op over 100.000 mg/liter.

Organiske stoffer (humus) måles efter DS 405.3.

### Forholdsregler imod syreangreb

Der findes ingen portlandcement, der kan modstå vedvarende angreb af syreholdigt vand.

En velkomprimeret, revnefri beton med højt pulverindhold og lavt v/c-forhold vil i rimelig grad kunne modstå svage syreangreb. I nogle konstruktioner vil det være muligt at benytte tilslag af kalksten, men for den øvrige betonmasse gælder, at enten må de nedbrydelige komponenter i betonen neutraliseres, eller også må betonen som helhed beskyttes (overfladebehandling, membran).

ACI Committee 515 og Biczók (1972) behandler emnet udførligt.

*Figur 84. Passerer vand gennem en revne i en lodret betonvæg, jævnfør figur 83, vil der dannes calciumcarbonat i form af et »gardin« under revnen ved vandets udtrædning. Både disse gardiner og drypstenene, jævnfør figur 83, består hovedsageligt af porøst calciumcarbonat. Sådanne forekomster er altid tegn på manglende vedligehold. Passerer armeringsstænger revnen, kan der forekomme korrosion, og udfældningerne vil blive svagt rustfarvede. Årsagen (vandets forekomst) bør fjernes og revnen tættes.*



## Litteratur

- ACI Committee 515. 1966. Guide for the Protection of Concrete Against Chemical Attack by Means of Coatings and Other Corrosion-Resistant Materials. Jour. A. C. I. Proceed. V. 63 No. 12. pp 1305-1392.
- Betong-handbok. Material. 1980. Svensk Byggtjänst. pp 483-492.
- Imre Biczók. 1972. Concrete Corrosion - Concrete Protection. Akadémiai Kiadó. Budapest.
- Durability of Concrete Structures. 1982. Comité Euro-International du Béton. Bulletin d'Information No. 148.
- Ulla Kjær. 1974. Beton i aggressivt miljø. Beton-Teknik 3/03/1974. CtO.
- W. H. Kuenning. 1966. Resistance of Portland Cement Mortar to Chemical Attack - A Progress Report. Highway Res. Record 113. pp 43-87.

# Diffusionsteori

Stoftransport ved diffusion foregår i væske- og gasfaser og skyldes, at molekylerne her er i konstant bevægelse (Brownske bevægelser).

I væsker vil fx hvert enkelt molekyle under normale betingelser bevæge sig ca. 1 cm om dagen, såfremt væsken ikke er i bevægelse. Denne ene cm er resultatet af ca.  $10^8$  svingninger pr. sekund.

I homogene stoffer kan denne diffusion ikke makroskopisk registreres, mens den i tilfælde, hvor koncentrationen varierer fra sted til sted, vil prøve at »udligne« koncentrationsforskellene. Denne udligning vil gå med større hastighed jo større forskel, der er i koncentrationerne fra sted til sted (vokser med gradienten).

## Fick's første lov

Betragtes det endimensionale tilfælde for en *stationær tilstand*, se figur 85, kan stoftransporten pr. arealenhed pr. tidsenhed,  $J$ , udtrykkes ved Fick's første lov:

$$J = -D \frac{dc}{dx}$$

hvor  $D$  er diffusionskoefficienten, mens  $c$  er koncentrationen af det diffunderende stof.

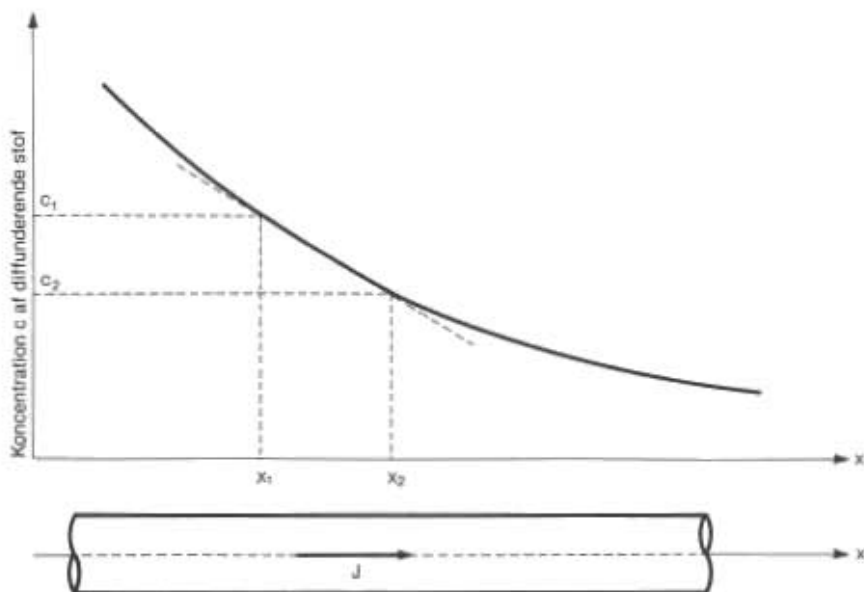
Diffusionskoefficienten, der er et mål for det diffunderende stofs bevægelighed, er meget stærkt afhængig af de diffunderende molekylers størrelse og det medium, hvorigennem der diffunderes.

Figur 86 giver et overblik over størrelsesordenen af forskellige diffusionskoefficienter.

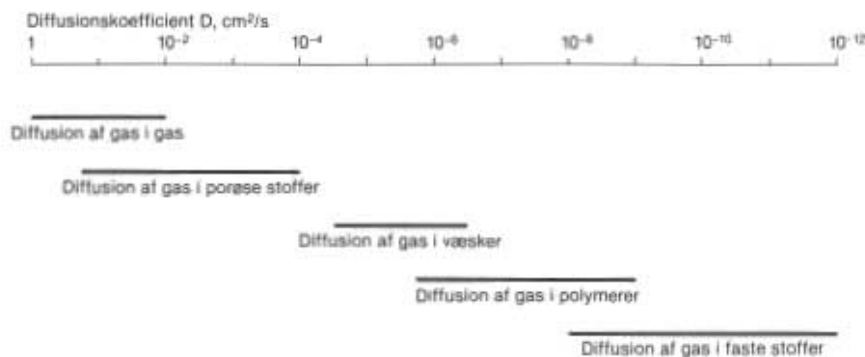
I nogle tilfælde er diffusionskoefficienten stærkt afhængig af koncentrationen, se fx figur 87, der viser diffusionskoefficienter for vanddamp gennem forskellige film med varierende vandindhold. I dette tilfælde bliver Fick's 1. lov til

$$J = -D(c) \frac{dc}{dx}$$

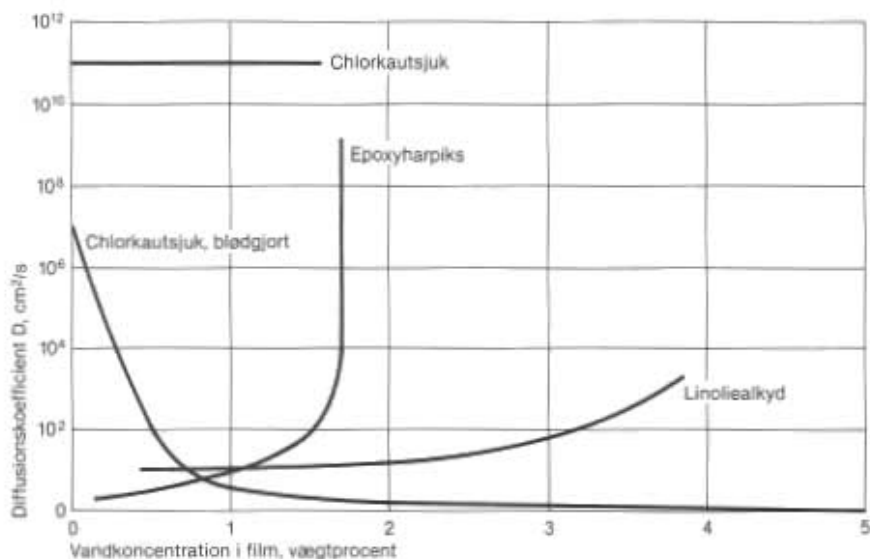
Her symboliserer  $D(c)$ , at diffusionskoefficienten afhænger af stofkoncentrationen  $c$ .



Figur 85. Endimensional diffusion. Mængden af diffunderende stof gennem et enhedsareal pr. tidsenhed,  $J$ , er proportional med koncentrationsforskellen pr. længdeenhed i transportretningen,  $dc/dx$ , det pågældende sted. Proportionalitetsfaktorens numeriske værdi kaldes diffusionskoefficienten. Denne afhængighed benævnes Fick's første lov.



Figur 86. Størrelsesordener for diffusionskoefficient  $D$ . (Klopfer, 1974).



Figur 87. Diffusionskoefficienter for forskellige film i afhængighed af vandkoncentration i filmen. (Klopfer, 1974).

### Fick's anden lov

Sker der en ændring af koncentrationen, således at diffusionen bliver *ikke-stationær*, fås Fick's anden lov, der lyder

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \frac{\partial c}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \frac{\partial c}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ D \frac{\partial c}{\partial z} \right\}$$

Dette kan også kortere skrives som

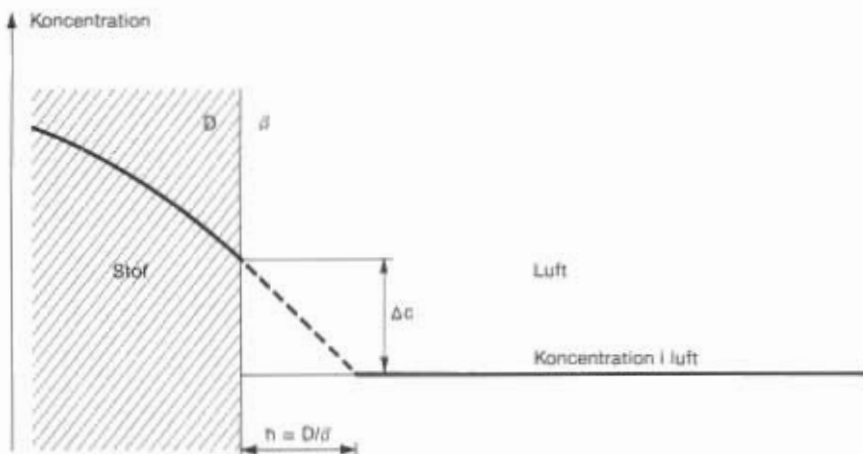
$$\frac{\partial c}{\partial t} = \text{div } J = \text{div} (D \cdot \text{grad } c)$$

I ovenstående er  $t$  tiden og  $D$  kan afhænge af stofkoncentration  $c$ , tid  $t$  og sted  $(x, y, z)$ .

Såfremt diffusionskoefficienten er uafhængig af koncentration, tid og sted, fås

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left\{ \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right\}$$

Det ses, at Fick's love er analoge til varmeledning ligningerne.



Figur 88. Illustration af det fiktive overgangslag med tykkelse  $h$  for diffusion mellem fast stof (med diffusionskoefficient  $D$  og stofovergangstal  $\beta$ ) og luft. Dette fænomen svarer nøje til forholdene ved varmetransport.

### Randbetingelser

Ved overgangen mellem stof og luft gælder også for diffusion en til varmetransportproblemet analog lov; nemlig

$$J = \beta \Delta c$$

hvor  $\beta$  kaldes stofovergangstallet og hvor  $\Delta c$  er koncentrationsforskellen mellem stof og luft, se figur 88. Dette er afhængigt af flere parametre og er stærkt afhængigt af lufthastigheden.

Af ovenstående ligning og Fick's første lov ses, at overgangsproblemet kan løses ved at regne med et fiktivt lag med en tykkelse  $h$ , hvor  $h$  er udregnet som

$$h = D/\beta$$

Dette er illustreret på figur 88.

Da  $\beta$  ifølge (Klopfer, 1974) typisk ligger mellem 5 og 120 mm/s, ses ved at sammenholde dette med figur 86 at tykkelsen af det fiktive lag kan variere fra  $10^{-12}$  mm til 2 mm.

### Diffusion i beton

I beton er diffusionskoefficienten stærkt afhængigt af betonens porøsitet, porestruktur og vandindhold. Som eksempler på transport i beton vha. diffusion kan nævnes:

- Indtrængen af CO<sub>2</sub> (carbonatisering).
- Indtrængen af chlorider.
- Vanddampsdiffusion.

Stofindtrængning i beton fra omgivelserne kan ske såvel fra betonens oprindelige overflade som gennem revner. En ny beton, der støbes mod en gammel beton, er også udsat for stofindtrængning fra den gamle beton. Når fx gammel, chloridholdig beton reparerer med beton, vil chloridioner trænge ind i reparationsbetonen. Indeholder reparationsbetonen armering, skal der altså være et passende tykt dæklag mod den gamle, chloridholdige beton.

### Litteratur

- H. Klopfer. 1974. Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. Bauverlag GmbH Weisbaden und Berlin.

## Sikkerhed mod nedbrydning

I betonbeskrivelser stilles krav om, at den valgte betonstyrke skal kunne opnås og bevares i bygværkets stipulerede funktionstid. Det kan ske ved at stille konkrete funktionskrav (ydelsesspecifikation) til den hærdnede beton. Det er imidlertid mest almindeligt, at der stilles krav til vikarierende egenskaber hos betonens

- delmaterialer,
- sammensætning,
- udstøbning, og
- efterbehandling (hærdning).

De krav der her stilles, skal tage hensyn til

- de krav, der sættes til den hærdnede betons holdbarhed,
- egenskabernes usikkerhed,
- økonomisk konsekvens ved holdbarhedssvigt,
- mulighederne for kontrol, herunder prøvningsmetodernes relevans, og
- ønsket om grad af nødvendig vedligehold og reparation, set i relation til anlægsudgiften.

Kravformuleringen må altid have en bestemt opbygning, nemlig:

- *Definition:* Hvilken egenskab forlanges og hvorledes er den defineret?
- *Prøvningsmetode:* Hvorledes bestemmes egenskaben, og hvilken målemetode, skal der anvendes?
- *Prøvningsfrekvens:* Hvor ofte skal egenskaben bestemmes, fx i relation til produktion og tidsforløb?
- *Talværdi:* Inden for hvilke grænser skal egenskaben befinde sig?
- *Vurdering:* Hvorledes skal prøveudtagning og statistisk vurdering af observationer foretages?
- *Konsekvens:* Hvad skal der foretages ved forkastelse?

Definition, prøvningsmetoder og vurderingsprincip er ofte givet i tekniske standarder – danske, udenlandske eller internationale. Det rækker da med henvisninger. Derimod kan fastsættelsen af talværdier og konsekvens ved forkastelse kræve ret dybtgående overvejelser. Her skal der kun gives en omtale af og en vejledning i, hvorledes man kan gå frem ved fastsættelse af talværdier.



## Proportioneringsproblem

Opgaven går i praksis ud på at vælge en sådan kombination af talværdier for de aktuelle egenskaber, at betonbygværket honorerer de stillede funktionskrav med passende stor sandsynlighed.

### *Usikkerhedsbegrebet*

De fleste størrelser, der indgår i betonteknologiske vurderinger, proportionering mv., er usikre størrelser. Hermed forstås, at disse størrelses værdier må tillægges en vis grad af tilfældighed, fordi værdierne i sig selv er tilfældige, og fordi kendskabet til værdierne er begrænset.

Miljøpåvirkningen på betonbygværk og modstandsevnen mod nedbrydning må således betegnes som usikre størrelser. Fx vil frost/tø-påvirkningen variere fra dag til dag, måned til måned og år til år som følge af foranderlige vejrmæssige forhold. Frost/tø-modstanden vil variere fra sted til sted i bygværkets beton som følge af ukontrollable variationer i cementpastaens luftboblefordeling og  $v/c$ -forhold samt i tilslaget (stenenes) porøsitet (vandsugningsevne). Selv når man betragter et lille konstruktionselement (beton fra én sats), hvis beton har en bestemt frost/tø-modstand, må denne alligevel opfattes som usikker. Det skyldes, at frost/tø-modstanden må fastlægges ved forsøg med udborede betonkerner, og disse forsøg er behæftet med en vis usikkerhed.

Når en egenskab betegnes som usikker, må man søge at beskrive både den værdi, der må antages at være den mest sandsynlige for egenskaben, og et mål for usikkerhedens størrelse.

Dette kan gøres ved henholdsvis middelværdi og standardafvigelse. Man ser undertiden også disse to størrelser kombineret til en karakteristisk værdi. Med Dansk Ingeniørforenings Norm for Betonkonstruktioner, DS 411, 3. udgave har man imidlertid forladt begrebet karakteristisk værdi for alle andre betonegenskaber end styrke- og stivhedstal. Derfor skal begrebet karakteristisk værdi ikke omtales nærmere i forbindelse med betonbygværkers holdbarhed.

### *Usikkerhedstyper*

Det er hensigtsmæssigt i relation til proportioneringsproblemets formulering at klassificere usikkerheden på følgende måde:

*Fysisk usikkerhed* er den usikkerhed, der skyldes variationer på grund af ukontrollable forhold. Hertil regnes fx variation i betonens sammensætning, både fra sats til sats og inden for samme sats, samt variationer i miljøpåvirkningen.

*Statistisk usikkerhed* er den usikkerhed, der skyldes begrænset datamængde. Fx udtages der kun et begrænset antal prøver af betonen til prøvning. Det giver en begrænset viden, og det bidrager til usikkerheden vedrørende fastlæggelsen af betonens nedbrydningsmodstand.

*Modelusikkerhed* er den usikkerhed, der skyldes, at de valgte nedbrydningsbetingelser repræsenterer et stærkt forenklet billede af virkeligheden. Det er vigtigt at medtage modelusikkerheden i beslutningsgrundlaget for betonsammensætningen, da denne usikkerhed ofte bidrager mere til den samlede usikkerhed end den fysiske og statistiske usikkerhed.

### *Modelniveau*

Der kan vælges nedbrydningsmodeller på forskellige niveauer. En model, der beskriver betonens modstand mod nedbrydning i afhængighed af egenskaberne hos den friske beton og dens delmaterialer, egner sig til proportionering under forudsætning af, at man kan forudsætte korrekt arbejdsudførelse og efterbehandling. En model, der beskriver betonens modstand mod nedbrydning i afhængighed af egenskaberne hos den hærdnede beton, udtaget af konstruktionen, egner sig derimod til kontrol. Det er en forudsætning for begge modellers anvendelse, at den nedbrydende miljøpåvirkning er veldefineret og ikke vil ændres til det værre i fremtiden.

Begge modeller anvendes i praksis. Man kan faktisk her tale om henholdsvis entreprenørens og tilsynets nedbrydningsmodeller.

Disse nedbrydningsmodeller beskriver ikke virkeligheden lige godt. For frisk beton kan der kun være tale om nødvendige betingelser, der kun kan blive tilstrækkelige på et højere niveau (ved mere specificerede krav og/eller krav til andre parametre).

Det er dog nødvendigt at arbejde med to sæt nedbrydningsbetingelser. Det skal nemlig være muligt at opstille krav, der sikrer følgende:

- *Frisk beton*, der forlader blanderen, skal være af en sådan kvalitet, at den (når den i øvrigt behandles efter de forskrifter, der er givet ved det pågældende arbejde med hensyn til komprimering og efterbehandling af bygværket) vil kunne opnå den i betonbeskrivelsen forlangte nedbrydningsmodstand.
- *Hærdnet beton* i støbte prøvelegemer, udborede betonkerner fra prøve-støbninger eller fra selve bygværket skal kunne underkastes en prøvning (kontrol), der afgør, om den pågældende beton har opnået den i betonbeskrivelsen forlangte nedbrydningsmodstand.

Som eksempel kan man betragte betons nedbrydningsbetingelser for frost/tø-skader. Til den friske beton, der forlader blanderen, kan der stilles krav til følgende egenskaber:

- Stenpartiklernes densitet.
- Cementpastaens luftindhold.
- Betonens v/c-forhold.

Til den hærdnede beton i prøver, der repræsenterer betonbygværket, kan der stilles krav til

- luftboblefordeling og revneintensitet (pasta- og vedhæftningsrevner) eller
- maksimal skade ved frost/tø-påvirkning efter en standardiseret prøvningsmetode, fx DS 423.29.

Her er der også tale om vurdering af betonens frostbestandighed på to niveauer. De to krav sætter svarer til, at der, for at et bygværk mindst opnår en bestemt bæreevne, stilles krav til enten betonens v/c-forhold eller til udstøbte/udborede betoncylindres trykstyrke.

### **Involverede parters risici**

De involverede hovedparter i et byggeri løber hver deres form for risiko for, at bygværket ikke opnår den krævede kvalitet.

#### *Bygherren*

Bygherren har følgende risici for at få et betonbygværk, hvor betonen ikke er holdbar:

- Betonen er konditionsrædd, men kravene i betonbeskrivelsen er baseret på ukorrekte nedbrydningsbetingelser.
- Betonen er konditionsrædd og kravene i betonbeskrivelsen er baseret på korrekte nedbrydningsbetingelser, men miljøpåvirkningen er mere aggressiv end forudsat.
- Kontrollen med den hærdnede betons nedbrydningsmodstand har svigtet, fx på grund af, at der har været anvendt irrelevante prøvningsmetoder eller at kontrollen ikke har været tilstrækkeligt omfattende.
- Konstruktionsudformningen har medført, at lokalmiljøet er mere aggressivt end forudsat, fx på grund af lunger.

Bygherren må, via sin rådgiver, sikre sig imod disse forhold. Det sker ved i betonbeskrivelsen at stille krav, der skærpes med øget

- økonomisk konsekvens ved holdbarhedssvigt,
- usikkerhed ved de anvendte nedbrydningskriterier og de deri indeholdte parametre,

- tvivl med hensyn til de anvendte nedbrydningskriteriers »fuldkommenhed« (er alle parametre med?) og
- skepsis over for de anvendte prøvningsmetoders relevans.

Man kunne fx tænke sig, at det, på basis af litteraturundersøgelser og egen forprøvning, er valgt at regne med, at den pågældende beton er holdbar ved frysning i vandmættet tilstand, når følgende krav samtidig er opfyldt:

- Luftindhold i pasta,  $a_p > 15$  pct.,
- specifik overflade,  $\alpha > 25 \text{ mm}^{-1}$ ,
- vand/cement-forhold,  $v/c < 0,7$  og
- stendensitet,  $D_{st} > 2,4$ .

Ved fastlæggelsen af de krav, der skal stilles i betonbeskrivelsen, skal der for det første tages hensyn til de fundne grænsers usikkerhed. Det kan ske ud fra de spredninger eller variationskoefficienter, der er observeret ved egne forsøg og/eller beskrevet i litteraturen. Dernæst skal der tages et vist hensyn til, om alle relevante parametre er med i kriteriet eller om der desuden skal stilles krav, der sikrer, at betonen med hensyn til blanding, udstøbning, komprimering og efterbehandling ikke kommer til at afvige fra de omstændigheder, der var gældende, da holdbarhedskriteriet blev etableret. Desuden skal der tages hensyn til den usikkerhed, der ligger i definition og måling af  $a_p$ ,  $\alpha$ ,  $v/c$ -forhold og  $D_{st}$ . Endelig skal der tages hensyn til de økonomiske konsekvenser (for bygherren) ved manglende holdbarhed. Er konsekvensen stor, vælges større sikkerhedsmargin, end hvis konsekvensen er lille.

En skærpelse af kravene til beton vil medføre øgede anlægsudgifter, men også mindre risiko for holdbarhedsskader. Den sikkerhedsmargin, som bygherren må indlægge, vil altid være mere eller mindre subjektiv. Det må den være så længe der ikke findes en holdbarhedsnorm, som foreskriver regningsmæssige holdbarhedskriterier, afhængig af miljøklassen, kontrolklassen og en konsekvensklasse.

### *Entreprenøren*

I princippet kan man betragte krav i betonbeskrivelsen til frisk beton, dens delmaterialer, komprimering og efterbehandling som vejledende for entreprenøren og dennes materialeleverandør. Til gengæld er krav i betonbeskrivelsen til hærdnet betons nedbrydningsmodstand ultimative. Sådan foregår det dog ikke. I praksis betragtes såvel krav til den friske beton som til den hærdnede beton almindeligvis som ultimative af tilsynet.

Konsekvensen for entreprenøren og materialeleverandøren ved at få forkastet frisk beton før placeringen i formene er imidlertid begrænset i forhold til

de konsekvenser det har, hvis det ved kontrollen af den hærdnede beton i bygværket påvises, at de krævede holdbarhedsegenskaber ikke er til stede. Derfor må der være en større sikkerhedsmargin ved betonproportionering ud fra krav, der kun kan måles på hærdnet beton, end når der alene proportioneres ud fra krav til den friske betons egenskaber. De risici, som entreprenører ønsker at løbe, kan også være meget forskellige. I beslutningsgrundlaget for betonproportioneringen må entreprenøren imidlertid tage behørigt hensyn til

- påtalerisikoen, dvs. risikoen for at få betonen forkastet, selv om den er konditionsræssig (statistisk usikkerhed), og
- risikoen for at få betonen forkastet, fordi den ikke er konditionsræssig (for lille sikkerhedsmargin).

### *Tilsynet*

Tilsynet har i princippet to opgaver:

- Tilse, at der ikke forekommer fejl, dvs. ensidige afvigelser fra opfyldelsen af de krav, der er stillet i betonbeskrivelsen.
- Overvåge prøveudtagning, prøvning og vurdering af måleresultater og andre observationer i forbindelse med kontrollen.

Tilsynets kontrol sker stikprøvevis med deraf følgende risiko for at acceptere beton, der retteligen burde være forkastet. Denne risiko kan nedsættes ved at »skærpe kravene efter tilsynets nærmere anvisning« eller ved at »kræve supplerende undersøgelser af den hærdnede beton efter tilsynets nærmere anvisning«.

Der foreligger mulighed for at kræve totalkontrol af særligt vigtige kontrolafsnit efter DS 423.1, 2. udgave. Desuden eksisterer der muligheder for at analysere prøver af hærdnet beton, udtaget af det færdige bygværk. Ved visuel strukturanalyse af prøver af hærdnet beton (plan- og tyndslib) er det muligt at bestemme og vurdere

- betonstyrken,
- v/c-forholdet,
- tilslagets bjergarter,
- betonens luftindhold og fordeling af luftbobler,
- cementtypen og
- blandingsforholdet,

for blot at nævne nogle af de almindeligste parametre, til hvilke der normalt stilles krav.

Det har betydning for dokumentationen af bygværkets kvalitet, at der er effektiv produktionskontrol i alle led.

## Proportioneringsprocedure

Entreprenør og betonproducent må, ud fra kendskabet til, hvorledes betons egenskaber (styrke og holdbarhed) vil blive kontrolleret, fastsætte de tilstræbte proportioneringsværdier ud fra

- bedste skøn over usikkerheden af den leverede betons egenskaber og
- valg af acceptabel påtalerisiko ved det pågældende byggearbejde.

Der er principiel forskel på de beslutningsregler, der gælder for kontrol af betonens styrke (DS 411) og kontrol af betonens holdbarhedsegenskaber (DS 423.1). Derfor bliver der også forskel på, hvorledes de tilstræbte proportioneringsværdier beregnes.

### Proportioneringsstyrke

Acceptkravet ved kontrol af betons styrke fremgår af pkt. 8.1.1 i DS 411, 3. udgave.

Den middelværdi for trykstyrken,  $f_{cm}$ , der skal tilstræbes ved betonproportioneringen, fastsættes under hensyntagen til

- den krævede karakteristiske trykstyrke,  $f_{ck}$ ,
- producentens bedste skøn (databaseret) over trykstyrkernes variationskoefficient,  $\delta$ ,
- det antal prøver  $n$ , der skal udtages i kontrolafsnittet, og
- risikoen for at få kontrolafsnittet forkastet, selv om betonen opfylder styrkekravet (påtalerisikoen  $\epsilon$ ).

Table 1. Værdier af faktorerne  $k_1$  og  $k_2$  i formelen  $f_{cm} = k \cdot f_{ck}$ , hvor  $k = k_1 \cdot k_2^{\delta}$ . Her er  $\delta$  variationskoefficienten.

Antal prøver $n$	Værdier af $k_1$							Værdier af $k_2$			
	Karakteristisk styrke $f_{ck}$ , MPa							Påtalerisiko $\epsilon$ , pct.			
	10	15	20	25	30	35	40-50	1	2	5	10
3	1,39	1,35	1,31	1,27	1,24	1,20	1,17	3,83	3,33	2,59	2,10
5	1,35	1,32	1,28	1,25	1,21	1,18	1,15	2,83	2,54	2,09	1,77
8	1,33	1,30	1,26	1,23	1,20	1,17	1,14	2,28	2,09	1,79	1,57
10	1,32	1,29	1,26	1,22	1,19	1,16	1,13	2,09	1,93	1,68	1,50
12	1,32	1,28	1,25	1,22	1,19	1,16	1,13	1,96	1,82	1,61	1,45
15	1,31	1,28	1,24	1,21	1,18	1,15	1,12	1,82	1,71	1,53	1,39
20	1,30	1,27	1,24	1,21	1,18	1,15	1,12	1,68	1,59	1,44	1,33
25	1,30	1,26	1,23	1,20	1,17	1,14	1,12	1,59	1,52	1,39	1,29
30	1,29	1,26	1,23	1,20	1,17	1,14	1,11	1,53	1,46	1,35	1,26
40	1,29	1,25	1,22	1,20	1,17	1,14	1,11	1,44	1,39	1,30	1,22
50	1,28	1,25	1,22	1,19	1,16	1,14	1,11	1,93	1,34	1,26	1,20

Tabel 2. Værdier af  $k$  i formelen nødv.  $f_{cm} = k \cdot f_{ck}$ , for  $\delta = 15$  pct. og  $\epsilon = 5$  pct.

Antal prøver $n$	Værdier af $k$ for $\delta = 15$ pct. og $\epsilon = 5$ pct.							Antal prøver $n$
	Karakteristisk styrke $f_{ck}$ , MPa							
	10	15	20	25	30	35	40-50	
3	1,60	1,55	1,51	1,47	1,43	1,39	1,35	3
5	1,51	1,47	1,43	1,39	1,36	1,32	1,28	5
8	1,45	1,42	1,38	1,34	1,31	1,27	1,24	8
10	1,43	1,39	1,36	1,32	1,29	1,26	1,22	10
12	1,41	1,38	1,34	1,31	1,28	1,24	1,21	12
15	1,39	1,36	1,33	1,29	1,26	1,23	1,20	15
20	1,37	1,34	1,31	1,28	1,24	1,21	1,18	20
30	1,35	1,32	1,29	1,25	1,22	1,19	1,17	30
40	1,34	1,30	1,27	1,24	1,21	1,18	1,15	40
50	1,33	1,30	1,26	1,23	1,20	1,18	1,15	50

Den tilstræbte middeltrykstyrke kan beregnes af formelen

$$\text{nødv. } f_{cm} = k \cdot f_{ck}$$

hvor størrelserne  $k_1$  og  $k_2$  i faktoren

$$k = k_1 \cdot k_2^{\delta}$$

kan bestemmes af tabel 1. I det specielle tilfælde, hvor producenten vil regne med variationskoefficienten  $\delta = 15$  pct. og påtalerisiko  $\epsilon = 5$  pct. kan faktoren  $k$  aflæses af tabel 2. Det fremgår heraf, at entreprenør og betonproducent med disse forudsætninger skal fremstille beton, hvis tilstræbte middelstyrke er fra 15 pct. til 60 pct. større end den krævede karakteristiske styrke  $f_{ck}$ .

#### Andre betonegenskaber

Acceptkravet ved kontrol af andre af betonens egenskaber end styrken fremgår af DS 423.1, 2. udgave. Det forudsættes, at der i betonbeskrivelsen er stillet krav i form af grænser, inden for hvilke egenskaberne skal befinde sig.

Middelværdierne for de pågældende egenskaber, der skal anvendes ved betonproportioneringen, fastsættes under hensyntagen til

- producentens bedste skøn (databaseret) over de pågældende betonegenskabers spredning  $s$  eller variationskoefficient  $\delta$ ,
- det antal prøver  $n$ , der skal udtages i kontrolafsnittet, og
- risikoen  $\epsilon$  for at få kontrolafsnittet forkastet, selv om betonen opfylder de stillede krav (påtalerisiko).

Der anvendes iht. DS 423.1, 2. udgave alternativ kontrol ved vurdering af, om beton skal accepteres på basis af de målte holdbarhedsparametre i forhold

til det, der normmæssigt er krævet i DS 411 og de supplerende/skærpede krav, der eventuelt er stillet i betonbeskrivelsen. Fremgangsmåden ved denne alternative kontrol findes i DS 423.1, 2. udgave.

Ved fastlæggelse af proportioneringsværdien for en betons holdbarhedsparameter er der forskel i fremgangsmåden om der er stillet et enkeltsidet krav eller et dobbeltsidet krav.

#### *Enkeltsidet krav*

Som eksempel på et enkeltsidet krav kan nævnes krav til  $v/c$ -forhold, fx  $v/c < 0,50$  i aggressiv miljøklasse iht. DS 411. Et andet eksempel på et ensidigt krav er krav til indholdet af cement og filler i beton til aggressiv miljøklasse, fx  $C + F > 375 \text{ kg/m}^3$  på betingelse af, at  $d_{max} = 32 \text{ mm}$ , iht. DS 411, 3. udgave.

Et enkeltsidet krav til en holdbarhedsparameter  $x$  for beton kan altså formuleres som enten

$$x < x_{max}$$

eller som

$$x > x_{min}$$

Proportioneringsværdien, dvs. den tilstræbte middelværdi  $x_m$ , skal da bestemmes således, at

$$x_m = x_{max} - k \cdot s, \text{ når kravet er } x < x_{max}$$

og tilsvarende

$$x_m = x_{min} + k \cdot s, \text{ når kravet er } x > x_{min}$$

hvor  $s$  er producentens bedste skøn (databaseret) over standardafvigelsen for  $x$ . Faktoren  $k$  afhænger af de valgte stikprøveantal  $n$  og af påtalerisikoen  $\epsilon$ . I tabel 3 kan denne faktor aflæses.

*Tabel 3. Værdier af faktoren  $k$  i formlerne  $x_m = x_{max} - k \cdot s$  og  $x_m = x_{min} + k \cdot s$  for forskellige værdier af  $\epsilon$  og  $n$ .*

Påtalerisiko $\epsilon$ , pct.	Værdier af faktoren $k$										
	Stikprøveantal $n$										
	3	5	8	10	12	15	20	25	30	40	50
1	2,71	2,88	3,02	3,09	3,14	2,32	2,00	2,10	1,90	1,84	1,79
2	2,47	2,65	2,80	2,88	2,93	2,18	1,89	1,99	1,81	1,76	1,72
3	2,12	2,32	2,49	2,57	2,63	1,97	1,73	1,83	1,68	1,64	1,61



Ved alternativ kontrol er defektprocenten ikke konstant. Derfor er der tilsyneladende »spring« i tabel 3, som dog let kan undgås, idet entreprenøren altid kan vælge en større stikprøve end den minimale efter DS 423.1 eller efter den pågældende betonbeskrivelse.

#### Dobbeltsidet krav

Som eksempel på et dobbeltsidet krav kan nævnes krav til betonens luftindhold i pastafraktionen, fx 15 pct. <  $a_p$  < 30 pct., når hærdnet beton kan fryse i vandmættet tilstand. Andre eksempler på et dobbeltsidet krav er krav til betons cementindhold og krav til betons sætmål.

Et dobbeltsidet krav til en holdbarhedsparameter  $x$  for beton kan altså formuleres som

$$x_{min} < x < x_{max}$$

Proportioneringsværdien, dvs. den tilstræbte middelværdi  $x_m$ , skal bestemmes således, at  $x_m$  kommer til at ligge i et interval symmetrisk om midtpunktet mellem  $x_{min}$  og  $x_{max}$ , dvs.

$$x_{mid} - \Delta < x_m < x_{mid} + \Delta$$

Her betegner  $x_{mid}$  den gunstigste værdi, defineret ved

$$x_{mid} = 0,5 (x_{min} + x_{max})$$

Problemet er at bestemme  $\Delta$ ; men denne opgave behøver ikke altid at have en løsning. Hvis standardafvigelsen for  $x$  er større end en værdi  $s_{max}$ , er der ingen løsning. Værdien af  $s_{max}$  bestemmes af udtrykket

$$s_{max} = \frac{x_{max} - x_{min}}{c}$$

Størrelsen  $c$  afhænger af den valgte stikprøvestørrelse  $n$  og af påtalerisikoen  $\epsilon$ . I tabel 4 kan  $c$  aflæses.

Tabel 4. Værdier af størrelsen  $c$  i formelen  $s_{max} = (x_{max} - x_{min})/c$  for forskellige værdier af  $\epsilon$  og  $n$ .

Påtalerisiko $\epsilon$ , pct.	Værdier af størrelsen $c$										
	Stikprøveantal $n$										
	3	5	8	10	12	15	20	25	30	40	50
1	5,88	6,18	6,43	6,58	6,70	5,15	4,55	4,73	4,37	4,27	4,17
2	5,42	5,76	6,04	6,18	6,28	4,86	4,34	4,55	4,22	4,11	4,05
3	4,78	5,14	5,46	5,60	5,71	4,52	4,07	4,24	3,97	3,90	3,86

Under forudsætning af, at  $s < s_{max}$  kan  $\Delta$  bestemmes. Det sker ved i tabel 5 at aflæse den defektprocent  $\theta$ , der svarer til den krævede stikprøvestørrelse  $n$  og den valgte påtalerisiko  $\epsilon$ . Ved dernæst at udregne parameteren

$$y = \frac{s}{x_{max} - x_{min}}$$

kan man i figur 89, svarende til kurven med den ovenfor fundne defektprocent  $\theta$ , aflæse værdien

$$\frac{\Delta}{x_{max} - x_{min}} = z$$

Tabel 5. Værdier af defektprocent  $\theta$  for forskellige værdier af  $\epsilon$  og  $n$ .

Påtalerisiko $\epsilon$ , pct.	Værdier af defektprocent $\theta$											
	Stikprøveantal $n$											
	3	5	8	10	12	15	20	25	30	40	50	
1	0,33	0,20	0,13	0,10	0,08	1,0	2,3	1,8	2,9	3,3	3,7	
2	0,67	0,40	0,25	0,20	0,17	1,5	3,0	2,3	3,5	4,0	4,3	
3	1,70	1,02	0,64	0,51	0,43	2,4	4,2	3,4	4,7	5,1	5,4	

Heraf kan  $\Delta$  beregnes som

$$\Delta = (x_{max} - x_{min})z$$

og producenten kan derefter proportionere betonen således at den tilstræbte middelværdi tilhører intervallet

$$x_m \in x_{mid} \pm \Delta$$

Inden for dette interval vil producenten vælge den billigste løsning.

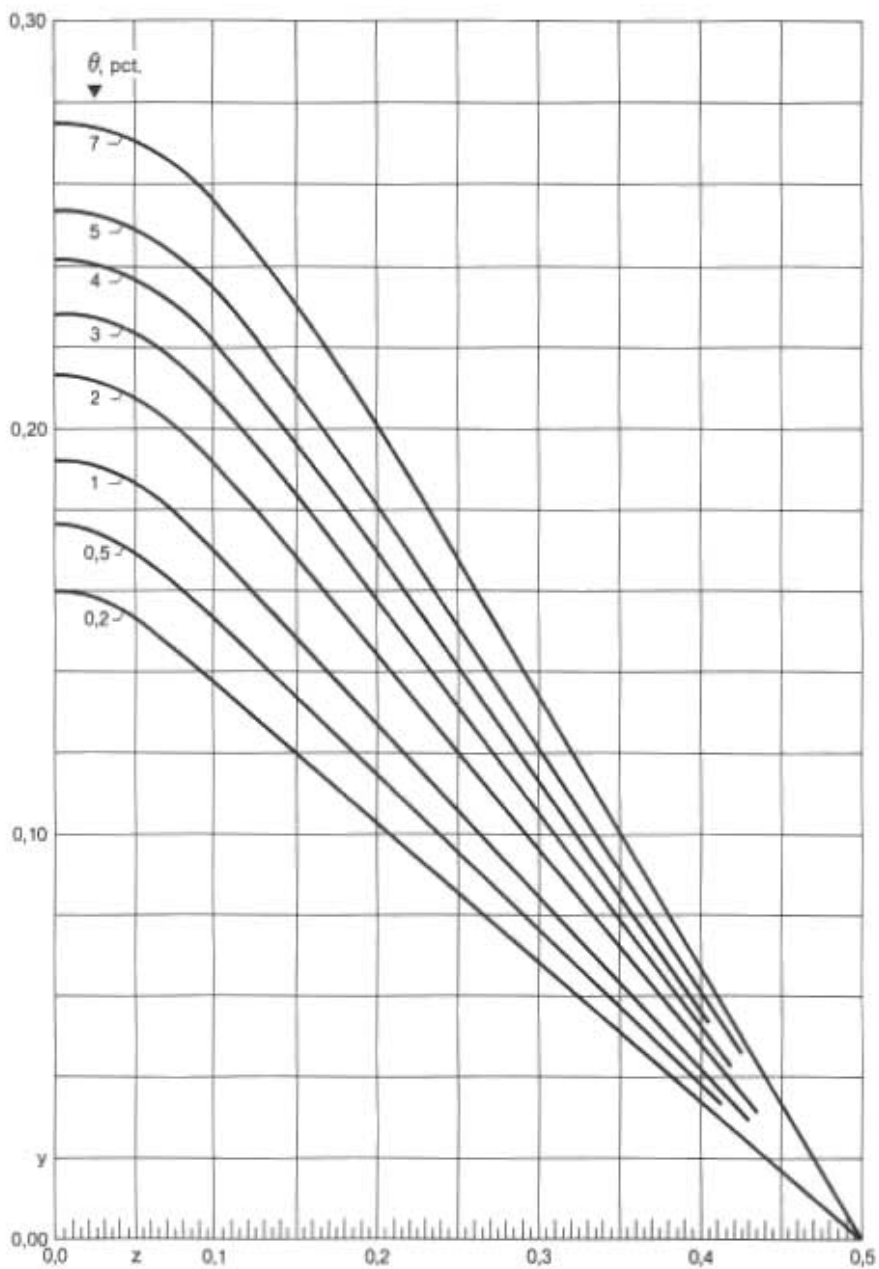
#### Eksempel 9

Til et kontrolafsnit skal der proportioneres en beton, hvor det i leveringsbetingelserne er krævet, at betonens cementindhold ligger mellem  $300 \text{ kg/m}^3$  og  $350 \text{ kg/m}^3$ . Producenten vælger en påtalerisiko på  $\epsilon = 3$  pct. og har erfaring for, at standardafvigelsen på cementindholdet er  $s = 7 \text{ kg/m}^3$ . Med en stikprøvestørrelse på  $n = 8$  stk. fås af tabel 4, at  $c = 5,46$ . Det viser, at

$$s_{max} = \frac{350 - 300}{5,46} = 9 \text{ kg/m}^3 > s = 7 \text{ kg/m}^3$$

Derefter beregnes

$$y = \frac{s}{C_{max} - C_{min}} = \frac{7}{350 - 300} = 0,14$$



Figur 89, modstående side. Diagram til bestemmelse af proportioneringsværdien  $x_m$  ved dobbeltsidet krav med øvre grænse  $x_{max}$  og nedre grænse  $x_{min}$ . Proportioneringsværdien  $x_m$  skal ligge i intervallet af længde  $2\Delta$  omkring midtpunktet mellem  $x_{min}$  og  $x_{max}$ . De viste kurver angiver relationen mellem  $y = \frac{s}{x_{max} - x_{min}}$  i afhængighed af  $z = \frac{\Delta}{x_{max} - x_{min}}$  for udvalgte defektprocentværdier  $\theta$ . Producentens (databaserede) skøn over standardafvigelsen er benævnt  $s$ .

og af figur 89 aflæses, svarende til  $y = 0,14$  og  $\theta = 0,64$  pct., at  $z = 0,15$  således at

$$\Delta = 0,15 (350 - 300) = 7,5 \text{ kg/m}^3$$

Betonen skal følgelig tilstræbes at have et cementindhold, hvis middelværdi tilhører intervallet

$$C_m \in 0,5 (350 + 300) \pm 7,5 = \begin{cases} 332 \text{ kg/m}^3 \\ 318 \text{ kg/m}^3 \end{cases}$$

Den billigste løsning vil da være at proportionere betonens med et cementindhold på  $318 \text{ kg/m}^3$ .

Ved den senere stikprøvekontrol skal alle målte cementindhold ligge i intervallet fra  $300 \text{ kg/m}^3$  til  $350 \text{ kg/m}^3$  iht. DS 423.1, idet godkendelsestallet for  $n = 8$  er  $A = 0$  og afvisningstallet er  $R = 1$ .

### Fra krav til blandingsforhold

Kravene til betonens delmaterialer, sammensætning og styrke er i betonnorm og betonbeskrivelser opstillet som grænseværdier. Når disse grænseværdier er omregnet til proportioneringsværdier (tilstræbte middelværdier) ud fra kendskab til usikkerhed og ønsket om maksimal påtalerisiko som beskrevet ovenfor, skal betonens delmaterialer og blandingsforhold vælges og/eller beregnes. Formålet er at sikre, at de stillede krav opfyldes til den lavest mulige pris.

Denne pris skal i princippet omfatte alle udgifter, der kan relateres til betonen i bygværkets stipulerede funktionstid, dvs. udgifter til:

- Materialer, dvs. cement, vand, sand, sten og tilsætningsstoffer.
- Arbejde, dvs. blanding, transport, udstøbning, komprimering, efterbehandling og kontrol.
- Drift, dvs. vedligehold og reparation.

De krav, der er stillet i betonnormen og de supplerende, eventuelt skærpede krav, der er stillet i betonbeskrivelsen, må anses for at tage det nødvendige hensyn til, hvad bygherren (via sin rådgiver) ønsker at påtage sig af driftsudgifter i forbindelse med vedligehold og reparation i bygværkets stipulerede funktionstid. Derfor vælger betonproducenten, sammen med entreprenøren, alene at minimalisere anlægsudgifterne (materiale og arbejde) på betingelse af, at de stillede krav til betonen og betonbygværket er opfyldt ved afleveringen.

De krav, der er stillet i betonnormen afhænger af miljøklasserne, men ellers ens i en passende lang årrække (ændres kun ved normrevision). De supplerende krav i betonbeskrivelser kan derimod være ret forskellige. De er nemlig afhængige af bygværkets udformning og anvendelse og af bygherrens ønske om at sikre sig imod for store udgifter til vedligehold og reparation. Det samlede kravkompleks giver sjældent en entydig betonsammensætning. Det normale er, at betonen enten er

- kravmæssigt underbestemt, eller
- kravmæssigt overbestemt!

I sidste tilfælde må betonproducenten udvælge de kritiske krav, dvs. at betonen opfylder alle krav, blot de kritiske er overholdt. Der kan forekomme tilfælde, hvor enkelte krav eller kombinationer af krav ikke kan opfyldes. Det kan medføre særlige problemer, som dog ikke skal diskuteres her.

Der kan være mange delmaterialer og betonsammensætninger, der opfylder et givet krav sæt – selv om betonen er kravmæssigt overbestemt. Blandt disse mange betonblandinger er det betonproducentens opgave at finde den billigste beton. Denne optimeringsproces kan ske ved beregning, men bygger normalt alene på praktisk erfaring.

I litteraturen er der omtalt flere metoder til beregning af betonsammensætning ud fra givne krav (CtO, Beton-Bogen, 1979. Hansen, 1980. Puckman, 1981). Beskrivelsen af disse metoder falder uden for denne publikations rammer.

## Litteratur

- Beton-Bogen. 1979. CtO. Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor.
- Torben C. Hansen. 1980. Kompendium i Betonteknologi, Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Teknisk Rapport 80. DTH.
- Ervin Poulsen. 1983. Proportionering af langtidsholdbar beton med indbygget sikkerhed. Dansk Betonforening. Publikation nr. 19.
- Knud Puckman, 1981. Proportionering af Konstruktionsbeton efter Intervalmetoden, Beton-Teknik 2/08/1981. CtO.