

DBF

BETONS HOLDBARHED

En oversigt

Anders Nielsen

PUBLIKATION 1: 1977

2. reviderede udgave, maj 1978

DANSK BETONFORENING



DANSK BETONFORENING

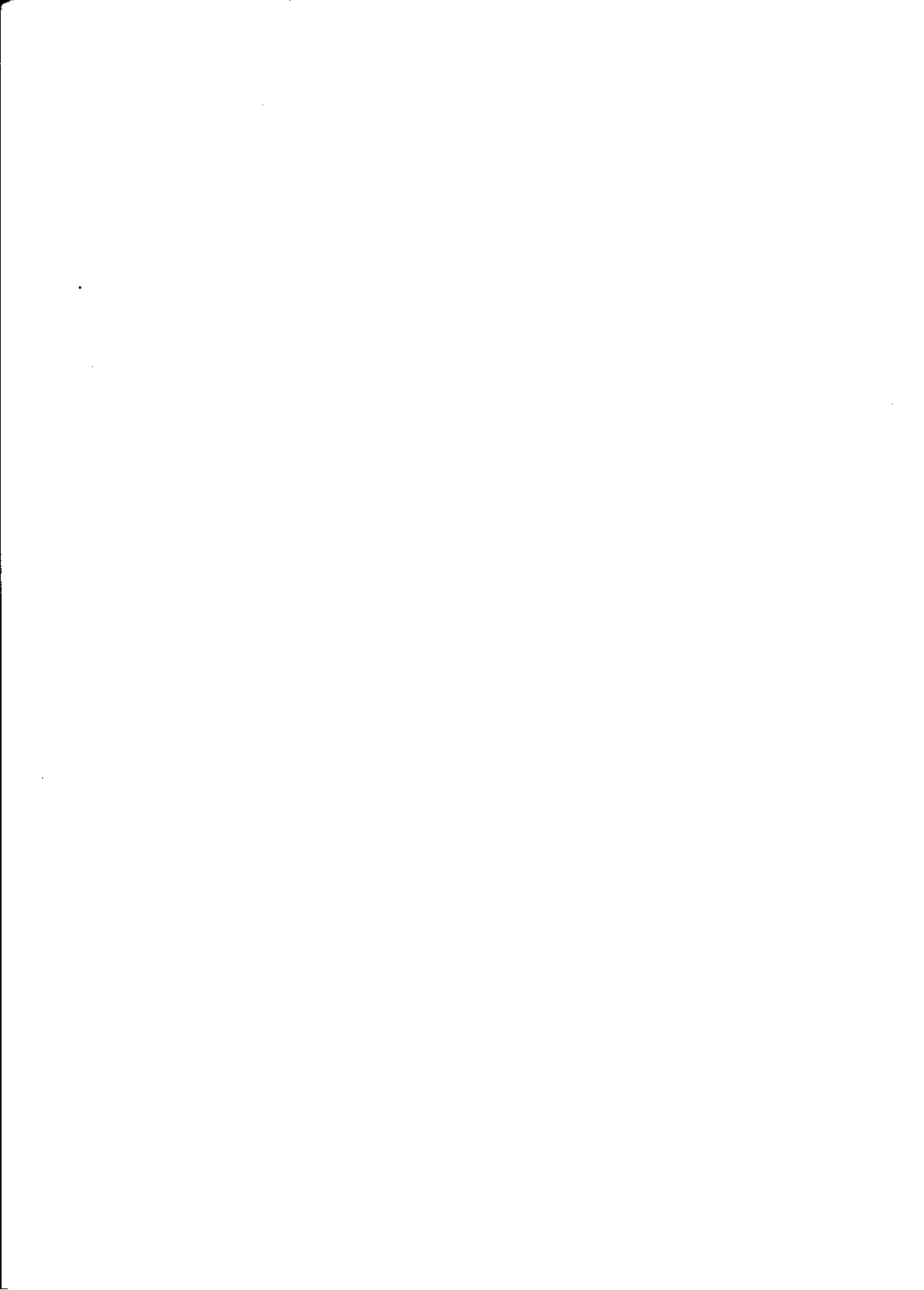
2. reviderede udgave

BETONS HOLDBARHED

En oversigt

Anders Nielsen

København, maj 1978



FORORD

Emnet "betons holdbarhed", eller dens mangel på samme, er desværre stadig alt for aktuelt. Gamle og nye konstruktioner nedbrydes i et omfang, som påkalder sig opmærksomhed. En del af årsagerne til, at det ser ud, som om forholdene i Danmark er værre end i vore nabolande er, at vi her har en kombination af et meget stort antal frysepunktpassager pr. år og nogle til betonfremstilling besværlige grusmaterialer. Desuden har vi en ulykkelig tradition blandt ingeniører for, at den eneste egenskab hos betonen, som man behøver at stille krav til, er dens styrke.

Dansk Betonforening har med jævne mellemrum holdbarhedsproblemer på programmet. I efteråret 1976 er der blevet gennemført en serie foredrag om holdbarhed og reparation. Jeg havde fornøjelsen at indlede denne serie med et oversigtsforedrag. Materialet i det foreliggende hæfte dannede grundlag for dette foredrag.

Fremstillingen er forsøgt holdt således, at materialet skulle kunne anvendes på ingeniørskolerne. Hæftet er skrevet med henblik på udgivelse i en større samlet bog, som er under udarbejdelse, hvorfor proportioneringsforskrifter for holdbar beton og reparationsmetoder ikke er behandlet her.

Synspunkterne på emnet og erfaringerne fra praksis er mangfoldige. Hvis nogle af mine kolleger vil have ulejlighed med at fremkomme med synspunkter på stoffet inden den næste udgivelse, vil jeg med glæde tage imod dem.

Lundtofte den 11. januar 1977

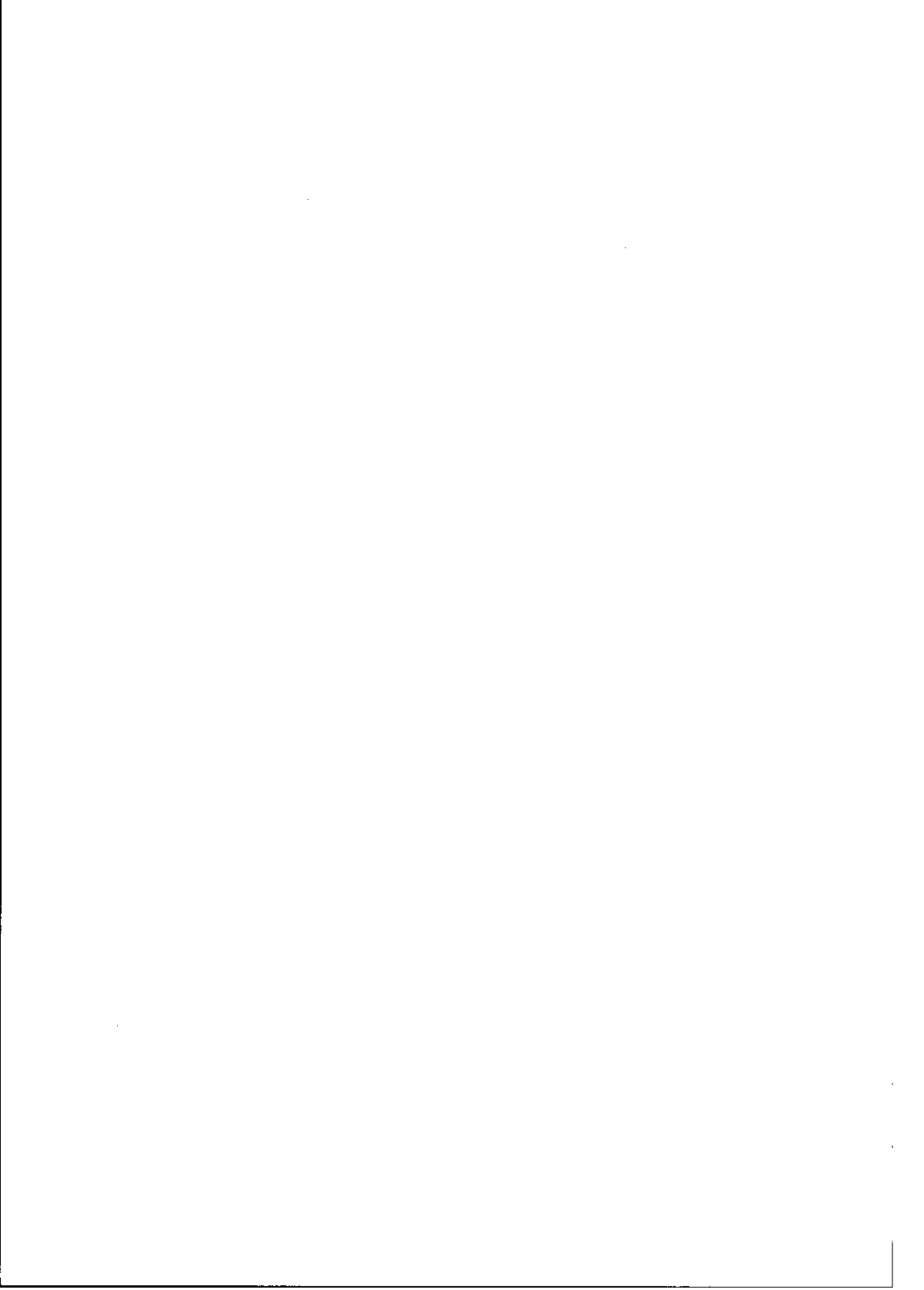
Anders Nielsen

FORORD til 2. udgave

1. udgave af "Betons holdbarhed" blev meget hurtigt udsolgt. I det år, der er gået, har jeg nået at få samlet mere stof sammen, bl.a. takket være mange kollegers nyttige reaktioner på 1. udgaven. Jeg takker for bidragene og håber samtidig at høre meninger om den nye udgave.

Lundtofte den 24. april 1978

Anders Nielsen



INDHOLD	Side
BETONS HOLDBARHED	5
1. Nedbrydningskendetegn	6
1.1 Smuldring og afskalning	6
1.2 Blotlægning af tilslag	7
1.3 Springere	7
1.4 Alkalikiselgel	8
1.5 Revner	9
1.6 Drypsten og belægninger	10
1.7 Overflademisfarvning	11
1.8 Rustudfældning og -afskalning	12
2. Omdannelsesprocesser	12
2.1 Karbonatisering	13
2.2 Frostangreb	17
2.3 Alkalikiselreaktioner	26
2.4 Udludning	29
2.5 Mekanisk slid	30
2.6 Aggressive stoffer	31
2.7 Biologisk angreb	33
2.8 Korrosion på armering og andet metal	34
2.9 Revner og holdbarhed	41
3. Skadeeksempler	44
4. Forebyggelse af nedbrydning	49
4.1 Konstruktiv forebyggelse	49
4.2 Materiale-mæssig forebyggelse	52
4.3 Udførelsesmæssig forebyggelse	54
5. Omdannelse under brand	56
6. Litteratur	62



B E T O N S H O L D B A R H E D

Ved en holdbar beton forstås en beton, der kan bevare de tilstræbte konstruktive egenskaber i en ønsket (lang) tid på det sted, hvor den er anbragt. Af denne holdbarhedsdefinition fremgår det, at holdbarhed ikke er nogen brugsegenskab i sig selv. Den er en nødvendig forudsætning for, at materialet i øvrigt kan fungere. Parallelt med denne holdbarhedsdefinition kan man opstille en definition for levetid for en konstruktion, jf. /6/.

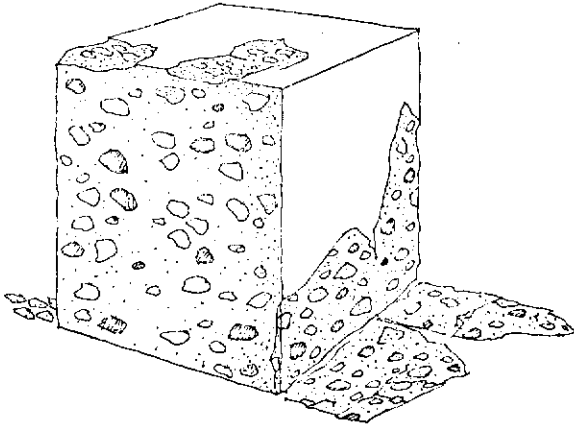
Nedbrydningen er en del af det geologiske kredsløb, som betonen er inde i. Beton kan betragtes som en syntetisk bjergart. Den er udsat for nedbrydning fra "varme, vind og væde", ligesom de naturlige bjergarter, og ligesom ved de naturlige bjergarter er det de tætteste materialer, der er de mest bestandige. Hvis vi ønsker at fremstille en holdbar syntetisk sten, må vi derfor tilstræbe så tæt et materiale som muligt, dvs. arbejde med så lavt v/c som muligt og med en god komprimering.

Beskrivelsen nedenfor omhandler primært betonen i almindeligt dansk anlægs- og husbyggeri. Indledningsvis beskrives kendetegn på dårlig holdbarhed. Herefter gennemgås de enkelte processer, som kan omdanne beton og armering, og de forholdsregler man kan tage for at undgå nedbrydning. Til sidst behandles brandbestandighed som et særligt tilfælde af holdbarhed.

1. NEDBRYDNINGSKENDETEGN

I dette afsnit beskrives de fænomener, hvorved betons nedbrydning ytrer sig. For hvert kendetegn er angivet, hvilke processer der kan forårsage det. Dette skulle være en hjælp ved bestemmelse af årsagssammenhængen i en given skadessituation.

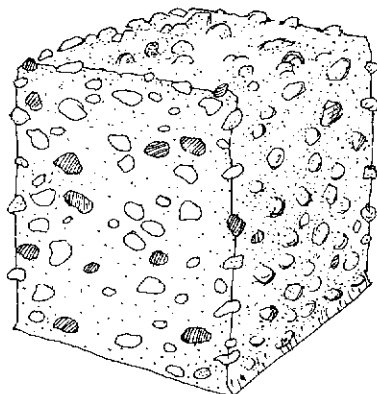
1.1 Smuldring og afskalning



Ved smuldring eller overfladeforvitring forstås, at betonoverfladen omdannes til pulver og småstykker af sand og sten. Ved afskalning menes, at større sammenhængende stykker af overfladen går af i skiver og flager, typisk op til 1 mm tykke. Ofte smuldrer cementslamlaget hurtigt, hvorefter angrebet går langsommere.

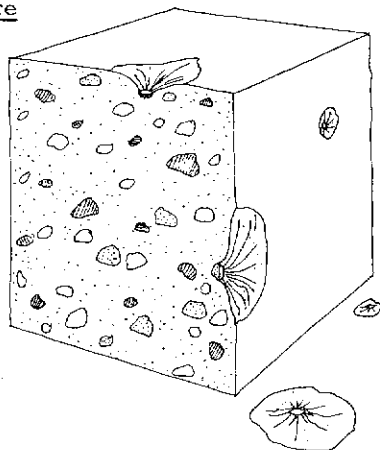
Smuldring og afskalning er overfladefænomener, som fremkaldes af frostangreb og af angreb af sulfater eller andre salte. Specielt kraftig afskalning forekommer ved brandpåvirkning. Smuldring og afskalning ses yderst sjældent på beton fremstillet med frilagt tilslag i overfladen.

1.2 Blotlægning af tilslag



Blotlægning af tilslag fremkommer ved at cementmørtelen fjernes mellem de større sten, hvorved disse træder tydeligt frem. Blotlægningen optræder, hvor cementmørtelen angribes kemisk, fx af røggasser i skorstene, ved syreangreb og ved strømmende aggressivt vand. Angrebet kan også skyldes fysiske årsager fx frostangreb, hvor kun cementmørtelen angribes, samt vind- og vanderosion.

1.3 Springere



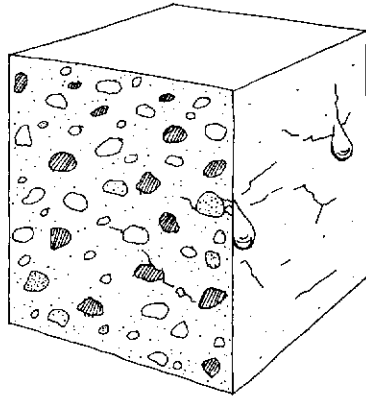
Ved en springer forstås et kegleformet stykke af betonen, som er presset ud af en expanderende sten. Stykket kan være fra 5 til 100 mm i diameter på overfladen.

Springerdannelsen kan skyldes frost. En porøs sten med tilpas uheldig porestruktur kan mættes med vand. Ved frost afsprænges det karakteristiske kegleformede stykke.

Fænomenet kan også skyldes alkalikiselreaktion. Hvis en reaktiv partikel, fx en porøs flint, ligger i passende afstand under overfladen og bliver indblandet i en alkalikiselreaktion, vil den suge vand til sig og danne en springer.

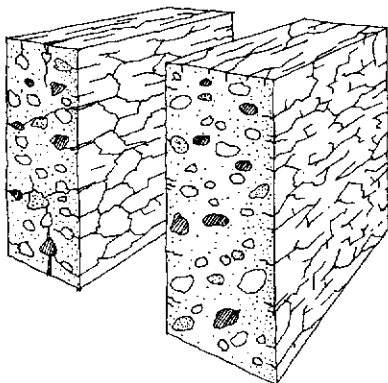
Urenheder i form af lerklumper eller træstykker kan også give afsprængninger.

1.4 Alkalikisegel



Undertiden finder man på indvendige overflader i fugtigt miljø dråber af et harpikksagtigt materiale, alkalikisegel. Det fremkommer kun i forbindelse med alkalikiselreaktioner. Gelen er fuldstændig opløselig i vand, hvorfor stoffet vaskes bort fra udvendige flader udsat for regn. Gammel gel er ofte karbonatiseret og dermed omdannet til uopløselige krystallinske forbindelser (se videre afsnit 2.3).

1.5 Revner

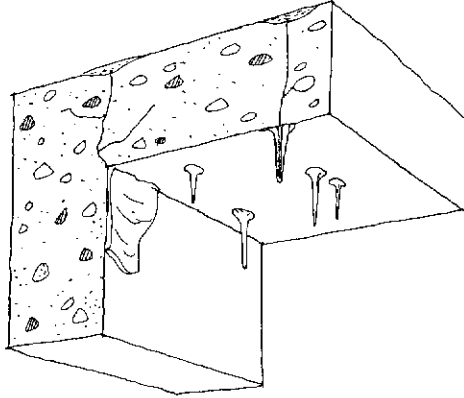


En revne er en luft- eller vandfyldt spalte ind i betonen. Den er fremkommet, fordi materialets trækstyrke er overskredet. Revner kan deles i overfladiske og dybtgående revner. Overfladiske revner og krakeleringer kan fremkaldes af svind, alkalikiselreaktioner, frost- og tørsaltangreb og af rustende armering. Dybtgående revner kan fremkaldes af overbelastning og sætninger, af plastisk svind, af for store temperaturforskelle i betonen under den tidlige hærdning, af frostangreb inden betonen er udtørret i dybden, af alkalikiselreaktioner og ved at overfladerevner udvikler sig indad ved frostpåvirkning og gentagne belastninger.

Revneforløbet afhænger både af revneårsagen, af konstruktionsdelens geometri og af armeringens mængde og fordeling. Det er derfor ikke muligt at opstille et "katalog" over revneformer, ud fra hvilket revnens årsag direkte og entydigt kan fastlægges.

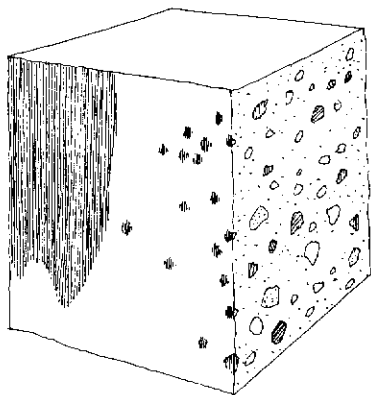
For eksempel opstår netrevner, som vist på hosstående figur, på en uarmeret eller jævnt armeret stor flade som følge af volumenekspansion, som kan skyldes enten hærdevarme, frost og/eller alkalikiselreaktion. De samme ekspansionsårsager kan give langsgående revner, hvis de fremkommer i bjælker eller søjler.

1.6 Drypsten og belægninger



Drypsten ses på undersider, og belægninger ses på lodrette flader af konstruktioner, som er udsatte for gennemsivende vand. Afsætningerne består oftest af kalk dannet ved, at vand, som siver gennem en revne, tager kalciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) med ud til overfladen, hvor det reagerer med luftens kuldioxid (CO_2) til kalciumkarbonat (CaCO_3). Omkring revner fremkaldt af alkalikiselreaktioner kan forekomme afsætninger, "udsvedninger", af alkalikiselgel. Omkring svømmebassiner og under vejbroer kan man desuden komme ud for, at saltvand er trængt igennem konstruktionen og har afsat drypsten og belægninger af salt (NaCl). Specielt på steder med stor fordampningshastighed kan saltet danne hårtynde krystaller, som kan minde om mugdannelse.

1.7 Overflademisfarvning

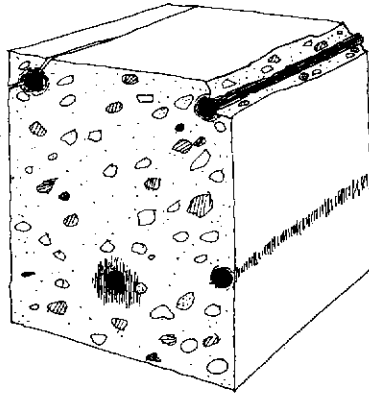


Ved misfarvning af overfladen forstås, at betonens farve inden for et begrænset areal varierer uacceptabelt meget i hvidgrå, grå, mørkegrå og brune nuancer.

Misfarvninger forekommer ofte lige efter afformningen og skyldes bl.a. uensartet påføring af formolie, ujævn vibring og varierende betonsammensætning. Desuden vil variationer i vandtilførsel og luftfugtighed under udtørringen give anledning til varierende grader af kalkudfældning på betonoverfladen.

Misfarvninger kan opstå senere i bygværkets levetid ved kalkudfældning eller udsvedning af alkalikiselgel fra små sten under overfladen. I det sidste tilfælde får overfladen i fugtigt vejr et "koparret" udseende. Desuden kan udvendige overflader få et skjoldet udseende på grund af uensartet vandafledning og dermed uensartet afvaskning af smuds. Begroninger af alger og mos er også årsag til misfarvninger.

1.8 Rustudfældning og -afskalning



Armeringen i jernbeton kan ruste, hvis den ikke er omhyggeligt omstøbt, og dæklaget er utilstrækkeligt. Det almindeligste rustangreb optræder på yderligt liggende jern. Korrosionsprodukterne giver rustpletter på overfladen eller de vokser så meget, at de sprænger det yderste betonlag bort, hvorved armeringen blottes.

Undertiden ses spredte rustpletter, som ikke stammer fra armeringen, men skyldes nedbrydning af svovlkis, andre jernholdige bestanddele af tilslaget eller bindetrådsrester.

Dybtliggende armering kan under uheldige omstændigheder tæres uden at der sker sprængning (!). Korrosionsprodukterne finder plads i den porøse beton omkring armeringsjernet.

2. OMDANNELSESPROCESSER

I dette afsnit behandles de vigtigste af de processer, som ud over hydratiseringsprocessen ændrer betonens struktur og egenskaber i tidens løb. Følgende processer behandles:

- 2.1 Karbonatisering
- 2.2 Frostangreb
- 2.3 Alkalikiselreaktioner
- 2.4 Udludning

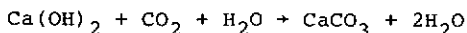
- 2.5 Mekanisk slid
- 2.6 Angreb af aggressive stoffer
- 2.7 Biologisk nedbrydning
- 2.8 Korrosion på armering og andet metal

Processerne forekommer næsten aldrig hver for sig. Det almindeligste er, at to eller flere virker samtidigt og forstærker hinanden. I tilfælde af, at der er opstået en skade, kan den primære årsag til skaden være svær at fastlægge. Den ydre last kan også medvirke til at fremme en skadeudvikling, specielt hvis lasten er svingende, således at den kan give udmattelsespåvirkning.

I afsnit 3 gives nogle eksempler på skader, hvor flere processer medvirker.

2.1 Karbonatisering

Cementpasta indeholder 25-50 vægt% kalciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Dette bevirker, at pH for frisk cementpasta ligger på 12 å 14. I dette afsnit beskrives, hvorledes cementpastaens kalciumhydroxid kan omdannes til kalciumkarbonat (CaCO_3). Det kan ske, hvis der tilføres kuldioxid (CO_2) enten fra *luften* eller fra *kuldioxidholdigt vand*. Omdannelsen kaldes *karbonatisering*. Den kemiske proces kan (forenklet) skrives således:



Når $\text{Ca}(\text{OH})_2$ fjernes fra cementpastaen, vil de hydratiserede kalciumsilikater afgive kalciumoxid (CaO), som også karbonatiserer.

Karbonatiseringsprocessen sker overalt, hvor atmosfærisk luft kommer i kontakt med betonens kalciumhydroxid, dvs. i overfladen og langs revner. Indtrængningen afhænger af betonens tæthed og fugtindhold. Stor tæthed, dvs. lavt v/c og god komprimering, giver ringe indtrængning. Meget tæt og stærk beton ($\sigma_{bu} > 60 \text{ MN/m}^2$) karbonatiseres praktisk taget ikke. Beton med stor porøsitet (højt v/c) kan omdannes fuldstændigt efter 10 å 20 år.

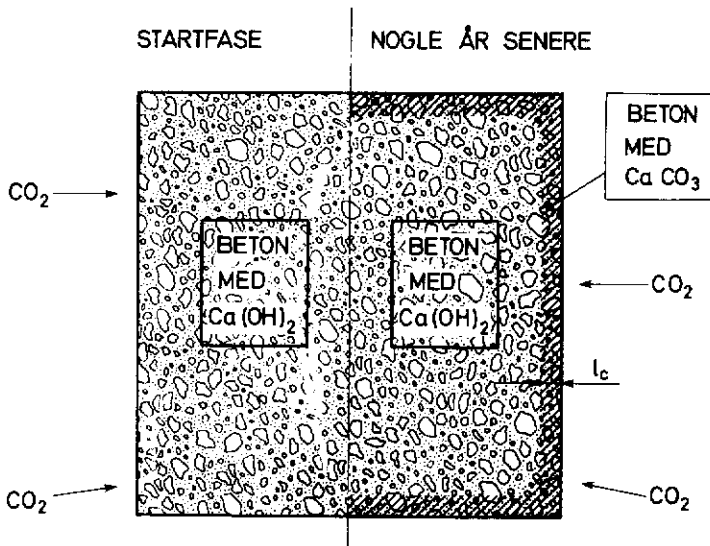


Fig. 2.1.1. Princippet i betons karbonatisering i atmosfærisk luft.

Karbonatiseringshastigheden afhænger af betonens fugtighedsindhold. Processen kræver tilstedeværelsen af vand, idet CO_2 skal opløses i vand til kulsyre, H_2CO_3 . Den kan derfor ikke finde sted i meget tør beton. Det er vist, at processen går i stå, hvis den relative luftfugtighed i omgivelserne synker under 40%. I meget våd beton kan kuldioxidens vanskeligt trænge ind, da CO_2 's opløselighed i vand er lav, hvorfor processerne går langsomt der. Processen foregår optimalt, når fugtigheden i den luft, som omgiver betonen, ligger mellem 40% RF og 90% RF og hurtigst ved ca. 50% RF.

Karbonatiseringens dybde i forskellige betontyper kan skønnes af diagrammet, figur 2.1.2. Diagrammet forudsætter, at karbonatiseringen foregår mellem 40 og 90% RF. På grund af den variation, som en ændring i luftfugtigheden giver, og på grund af den usikkerhed, som karbonatiseringsdybderne kan måles med, kan der forekomme afvigelser på op til 50% fra diagrammets værdier.

For uarmeret beton er karbonatisering en fordel, idet tætheden og dermed styrken bliver større. For armeret beton er om-

dannelsen farlig, fordi pH-værdien ved karbonatiseringen ændres fra de ovennævnte 12 å 14 til ca. 7. Denne værdi er ikke tilstrækkelig til at passivere armeringen, som vil ruste, hvis der kan trænge fugt ind til den. Det sker, hvis luftfugtigheden omkring betonen er større end 70% RF i gennemsnit.

Man må være opmærksom på, at karbonatiseringen også foregår langs revner i betonen. Der er i speciallitteraturen rapporteret undersøgelser om, hvor store revner der kan tillades i armeringen. Erfaringsmaterialet tillader dog kun at drage den slutning, at revnerne bør være så små som muligt. - Karbonatiseringen langs revner bremses i tidens løb på grund af krystaludfældninger i revnerne. Disse krystaller kan være kalcit eller cementhydratiseringsprodukter.

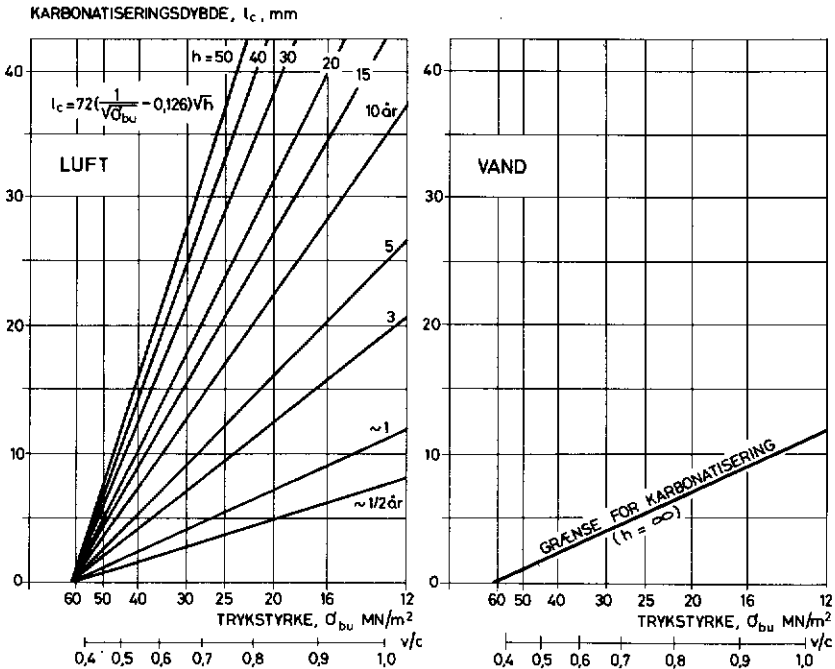


Fig. 2.1.2. Karbonatiseringens indtrængen i beton. Tv. i luft (ca. 50% RF), th. i vand. Diagrammet angiver middelværdier. Man må være forberedt på afvigelser op til 50% af middelværdien. h angiver exponeringstid. Efter Pihlajavaara (1976).

Omfanget af karbonatiseringen på en snitflade eller boreprøve af betonen kan konstateres ved, at overfladen påføres en opløsning af indikatoren phenolphthalein. Der hvor pH er større end 9, dvs. hvor betonen ikke er karbonatiseret, farves betonen rød. Andre steder forbliver den ufarvet. Prøvnin-gen skal foregå på en *frisk* brudflade, som fugtes let med vand inden prøvningen.

Beton, som udsættes for en strøm af *blødt, kulsurt vand*, karbonatiseres også. Denne vandtype kan forekomme i betonrørledninger eller i svømmebassiner med CO₂-neutraliseringsanlæg.

I god, velkomprimeret beton vil der foregå en karbonatisering som vist på figur 2.3.1. Yderst dannes et lag, som er frit for CaO. CaO er dels opløst og ført bort udad, dels er det ført indad og har dannet CaCO₃ efter ligningen

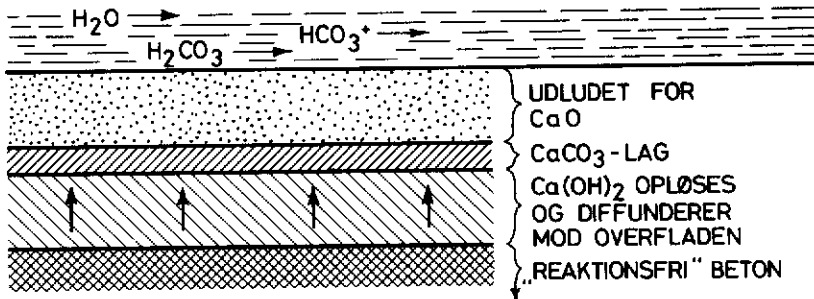
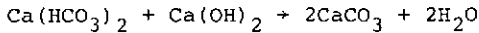


Fig. 2.1.3. Reaktionszoner i beton udsat for strømmende, kuldioxidholdigt vand /12/.

Kalciumkarbonaten danner et tæt uopløseligt lag, som forhindrer videre opløsning. Laget vokser indad, for så vidt (HCO₃)⁻ kan trænge igennem og reagere med Ca(OH)₂, som diffunderer ud inde fra betonen. Indtrængningsdybden kan skønnes fra figur 2.1.2.

Ovenstående betyder, at god, tæt beton kan anvendes i forbindelse med blødt, kulsurt vand (se /12/). Hvis en porøs beton eller mørtel udsættes for denne type vand, kan CaCO₃-dannelsen ske ude på betonoverfladen i klumper uden beskyttende virkning. Dette er fx set ved porøse fuger i svømmebassiner.

2.2 Frostangreb

Frostangreb kan føre til smuldring og afskalning fra overfladen eller til dybtgående revnedannelse. Ødelæggelsen skyldes, at vand udvider sig 9% ved omdannelsen til is. Hvis der ikke er plads i porerne til udvidelsen, trykker is og vand på porer væggene med en sådan kraft, at cementpastaen revner. Hvis cementpastaen skulle kunne modstå trykket, skulle den have trækstyrke som stål.

I dette afsnit gennemgås først begreberne kritisk og aktuel vandmætningsgrad. Herefter behandles urevnet betons forhold, herunder frysning af frisk beton. Til slut beskrives holdbarheden for beton med revner og hulrum, som utilsigtet opstår under udstøbning og hærkning.

Som parameter til bedømmelse af risikoen for frostangreb anvendes *vandmætningsgraden*, S . Herved forstås forholdet mellem volumen af fryseligt vand i porerne, V_{fv} , og det samlede volumen, der er til rådighed for isdannelsen, dvs. volumen af fryseligt vand plus volumen af de luftfyldte porer, V_{luft} .

$$S = \frac{V_{fv}}{V_{fv} + V_{luft}} \quad (2.2.1)$$

Ved fryseligt vand forstås det vand, som kan omdannes til is ved 0°C eller lige under 0°C . Det fryselige vand er i k k e identisk med det fordampelige vand. Den del af det fordampelige vand, som er adsorberet til de indre overflader, er så stærkt bundet, at det ikke kan omdannes til iskrystaller, hvorfor det ikke skal indgå i bedømmelsen af vandmætningsgraden (se /13/). Det er det vand, som findes i kapillarporer og større revner og hulrum, som kan fryse.

Ved bedømmelse af et porøst, sprødt materiales (her betons) risiko for at blive ødelagt af frost er det vigtigt at skelne mellem *materialets iboende egenskaber* og den *klimabelastning*, dvs. regn, salt og temperatursvingninger, som det bliver udsat for.

Denne skelnen er parallel til forholdene ved en statisk dimensionering, hvor man skelner mellem brudspændingen og spændingen hidrørende fra belastningen. Forholdet mellem dem udgør sikkerhedsgraden.

Betonens *ibøende egenskaber* karakteriseres ved *den kritiske vandmætningsgrad*, S_{KR} . Herved forstås den vandmætningsgrad, ved hvilken betonen netop kan modstå frysning uden at revne. S_{KR} er en egenskab hos betonen på linie med trykstyrken. Den bestemmes eksperimentelt ved frysning af et antal prøvelegemer med forskellig vandmætningsgrad /7/. Den ligger for beton på 60 til 90%.

Den kritiske vandmætningsgrad for urevnet beton afhænger af betonens trækstyrke, porestrukturen, frysehastigheden m.m. I /2/, /7/ og /8/ behandles beregning af S_{KR} ud fra primærdata.

Frysehastigheden i Danmark ligger normalt mellem 0 og 3°C/h. Den største værdi, som er opmålt, ligger på 6.5°C/h. Den forekommer gennemsnitligt en gang hvert tolvte år.

Det som er afgørende for, om en given beton er frostbestandig, er, at der er ringe sandsynlighed for, at den udsættes for frysning samtidig med at *den faktisk forekommende, aktuelle eller vandmætningsgrad* er større end den kritiske vandmætningsgrad. Størrelsen af den aktuelle vandmætningsgrad i porerne varierer med tiden, $S_{AKT}(t)$. Jo længere tid betonen har mulighed for at suge vand, desto større bliver $S_{AKT}(t)$. Frostbestandigheden bliver derfor afhængig af tiden. Man kan udtrykke en frostbestandighedsparameter, $F(t)$, som forskellen mellem S_{KR} og $S_{AKT}(t)$.

$$F(t) = S_{KR} - S_{AKT}(t) \quad (2.2.2)$$

Så længe forskellen er positiv, kan betonen ikke fryse i stykker. Så snart $F(t)$ bliver negativ, vil betonen frostskaedes, hvis temperaturen kommer under 0°C. $S_{AKT}(t)$ kan bedømmes laboratoriemæssigt ved et vandopsugningsforsøg (jf. figur 2.2.1).

Velblandet, velkomprimeret og urevnet beton, som hærder uden tilførsel af ekstra vand, vil kunne tåle frysning relativt kort tid efter udstøbningen (fra 10 til 60 timer afhængigt af

FROSTBESTANDIGHEDSPARAMETER,

$$F = S_{KR} - S_{AKT}$$

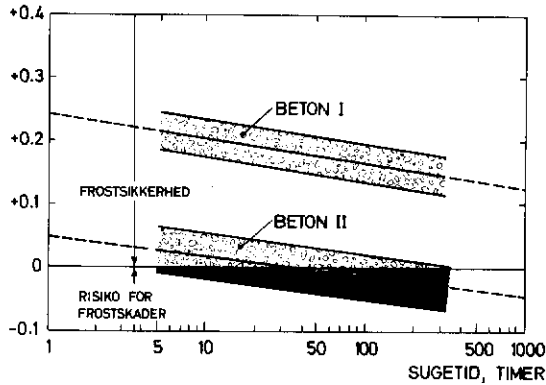


Fig. 2.2.1. Diagram til bedømmelse af frostbestandighed. To eksempler er vist. Beton I indeholder 7.1% luft, beton II har ingen luftindblanding. For beton I er S_{AKT} i meget lang tid mindre end S_{KR} , hvorfor denne beton vil kunne modstå frysning i denne periode. Sandsynligheden for at beton II udsættes for frysning ved negative F -værdier er større end for beton I, hvorfor beton II ikke er så frostbestandig som I. (Resultat af forsøg ved 5 europæiske laboratorier /8/).

Nødvendig hærningstid ved 20°C, timer

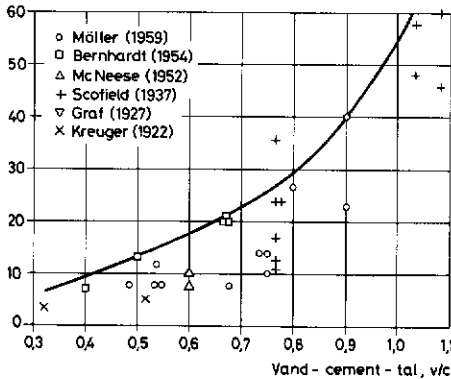


Fig. 2.2.2. Nødvendig hærningstid ved 20°C for opnåelse af frostbestandighed. Forseglet hærning. Almindelig portland-cement. Den viste øvre grænsekurve, som giver rimelig frostsikkerhed, svarer til en styrke på ca. 5 MN/m². Efter Møller (1962).

v/c, jf. figur 2.2.2). Dette skyldes for det første, at cementpastaen opnår en vis, omend ringe, trækstyrke, hvorved S_{KR} stiger. For det andet udtørres pastaen under cementens hærkning. De luftfyldte hulrum er i stand til at optage isens ekspansion, $S_{AKT}(t)$ er blevet lavere, således at forskellen mellem S_{KR} og $S_{AKT}(t)$ er positiv.

Den urevnede betons fremtidige frostbestandighed afhænger af v/c, af luftindblanding og af om tilslaget er frostbestandigt.

v/c influerer på frostbestandigheden. Lavt v/c giver stor trækstyrke og dermed en høj S_{KR} . Endvidere er vandgennemtrængeligheden lav for lave v/c, hvorved $S_{AKT}(t)$ vokser langsomt. Højt v/c bevirker, at der dannes mange gennemgående kapillarporer i cementpastaen, hvorigennem vand hurtigt kan ledes ind.

En anden virkning af lavt v/c er, at mængden af fryseligt vand nedsættes. I en velkomprimeret, fuldstændig hydratiseret cementpasta med v/c < 0.4, vil der kun være få kapillarporer til stede, som kan indeholde fryseligt vand. De fleste porer vil være gelporer, hvor vandet er så hårdt bundet på gelpartiklernes overflader, at det ikke kan fryse ved normalt frysepunkt. En sådan cementpasta vil være frostsikker også uden luftindblanding.

For at forbedre frostsikkerheden indblandes luft i betonen i en mængde på 15 å 25 volumenprocent af cementpastaen. Luftindblandingen fordrer, at betonen for at holde styrkeniveauet udstøbes med mindre v/c mellem boblerne. Herved stiger S_{KR} . Desuden går vandopsugningen langsommere, fordi vandet skal ledes uden om luftblæserne, som virker kapillarbrydende. Herved vokser $S_{AKT}(t)$ langsomt. Resultatet er, at $F(t)$ holder sig positiv i længere tid end $F(t)$ for en ikke-luftindblandet beton med samme konsistens og styrke, jf. figur 2.2.1.

Der er fremsat en del teorier for, hvorfor betonen går i stykker ved frysning. En teori går ud på, at der ved iskrystaldannelsen opstår et *hydraulisk tryk* i porerne. Dette tryk

sprænger pastaen. En anden teori går ud på, at der dannes *mikroskopiske islinser* i porerne. Disse islinser trækker vand til sig fra omgivelserne og virker derved sprængende. Begge teorier leder frem til, at der må være en vis mindste tykkelse, *den kritiske tykkelse*, under hvilken materialet ikke kan fryse i stykker.

Luftindblandingens virkning er ifølge teorien om hydraulisk tryk, at luftblærerne virker trykudlignende, og ifølge islinseteorien, at iskrystallerne dannes i luftboblerne, hvor der er plads til dem. For at luftboblerne skal virke, må afstanden fra et hvilket som helst punkt i cementpastaen og ud til en luftboble maksimalt være lig med den halve kritiske tykkelse. Da den kritiske tykkelse for cementpasta ligger på 0,5 å 1,0 mm, betyder dette, at luften skal være meget fint fordelt i pastaen.

Desuden betyder det, at det ikke er tilstrækkeligt ved en kontrol at måle det totale luftindhold; man må også måle luftporernes fordeling.

Der er erfaring for, at porestørrelser fra 0,005 til 0,2 mm er de mest effektive. Porer over 0,2 mm forbedrer ikke frostsikkerheden. (Se figur 2.2.3.)

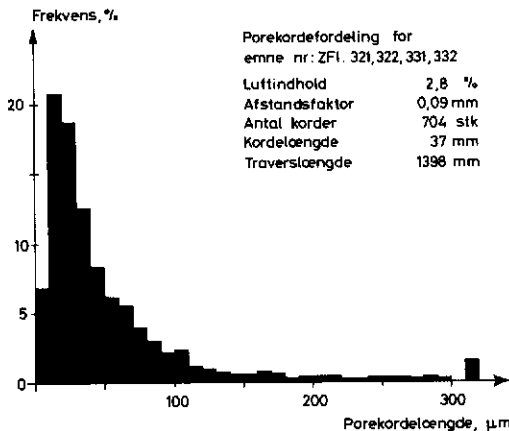
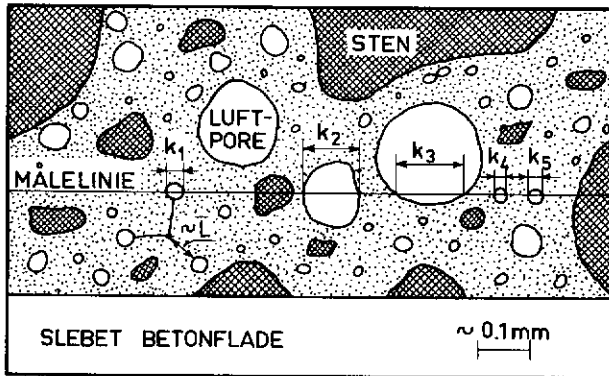


Fig. 2.2.3. Fordeling af luftporekorder i en frostbestandig beton, jf. omtalen af luftporeanalyse nedenfor (Thorsen (1977)).

LUFTPOREANALYSE



Luftporemåling i beton er standardiseret i ASTM C 457-71 "Standard Recommended Practice for Microscopical Determination of Air-Void Content and Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete."

En slebet flade af betonen mikroskoperes med 50 ganges forstørrelse. Der vælges en målelinie. Langs denne måles antal og længde af de korder, som afskæres af målelinien.

Luftindholdet, A (volumenprocent), kan beregnes af

$$A = (l_k / l_{tot}) \cdot 100\%$$

hvor l_k er summen af kordelængderne (mm) og l_{tot} er den totale målelængde (mm).

Poresystemet karakteriseres ved den specifikke bobleoverflade pr. volumenenhed af boblerne, α ($\text{mm}^2/\text{mm}^3 = \text{mm}^{-1}$), og ved afstandsfaktoren, \bar{L} . α beregnes således

$$\alpha = \frac{4n}{l_k} (\text{mm}^{-1}),$$

hvor n er det totale antal korder.

Afstandsfaktoren kaldes også for Powers afstandsfaktor, idet Powers var den første til at indføre dette begreb. Det er en fiktiv størrelse, som kan beskrives som den maksimale afstand fra et punkt i cementpastaen til den nærmeste bobleoverflade, beregnet ud fra den forudsætning, at alle porer er lige store og fordelt i et kubisk mønster i pastaen. \bar{L} fås af

$$\bar{L} = \frac{P}{\alpha \cdot A} (\text{mm}), \quad \text{hvis } \frac{P}{A} < 4.33.$$

$$\bar{L} = \frac{3}{\alpha} [1.4 \left(\frac{P}{A} + 1\right)^{1/3} - 1] (\text{mm}), \quad \text{hvis } \frac{P}{A} \geq 4.33.$$

Her er

P cementpastaens volumen uden porer, i % af betonvolumen.

Det almindeligt anerkendte krav til afstandsfaktoren i frostsikker beton, $\bar{L} \leq 0.25$ mm, forudsætter, at målingerne er foretaget efter ASTM's metode med 50 ganges forstørrelse. Ved mange laboratorier arbejder man i dag med forstørrelser på 100 gange og mere. Herved kan man se flere bobler. Af denne grund må kravet ændres fra 0.25 til 0.20 mm.

Som mål for porernes fordeling anvendes den såkaldte *afstands faktor*, \bar{L} . Det er en teoretisk størrelse beregnet under forudsætning af, at alle porer er lige store og fordelt i et simpelt kubisk mønster i pastaen (jf. beskrivelsen af luftporeanalyse, side 22). Der er international erfaring for, at hvis \bar{L} er mindre end 0.25 mm, er betonen frostbestandig (jf. figur 2.2.4). Hvis betonen kan blive udsat for tørsalte, peger nyere erfaringer på, at \bar{L} bør ligge under 0.20 mm.

Porøse sten (porøs kalk og flint) kan danne springere i betonens overflader, hvis de fryser med en vandmætningsgrad, som er større end deres kritiske vandmætningsgrad. Sandsynligheden for dette er størst, når stenene anvendes ved uendørs betonfremstilling om vinteren. Her kan stenene blive vandmættede af regn og blandevand. - Når stenene er tørret ud inde i betonen, bliver de vanskeligt vandmættede gennem cementpastaen, hvis deres porer er grovere end cementpastaens, idet vandet ikke kan suges til store fra små kapillarrør. Herved synker risikoen for springersår. Det samme er baggrunden for, at der kan støbes frostbestandig beton af letklinkertilslag. De grovporøse klinker kan aldrig eller kun meget langsomt mættes med vand gennem den finporøse cementpasta.

AFSKALNING, vægt%

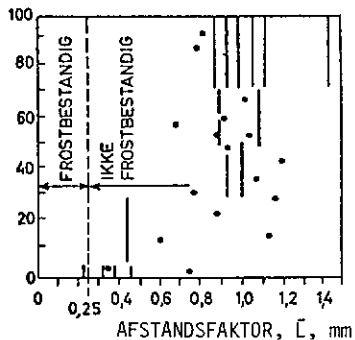


Fig. 2.2.4. Afskalning på betonprøver udsat for tørsalt og frysning som funktion af afstandsfaktoren. Under 0.50 mm ses ingen skader. Kravet om, at $\bar{L} < 0.25$ mm, giver en vis sikkerhed. Punkterne er amerikanske enkeltforsøg, stregerne er tyske serier. (Springenschmied (1967.).

Anvendelse af *tøsalte* forstærker de skader, som frysning med rent vand forårsager. Dette gælder uanset tøsaltypen. De vigtigste årsager til den forstærkende virkning er følgende (jf. /9/):

- * Saltopløsningens tilstedeværelse i cementpastaen forstærker det osmotiske tryk, hvilket forstærker den sprængende virkning.
- * Afkølingshastigheden forøges, hvorved både hydraulisk og osmotisk tryk forøges, og de mekaniske spændinger på grund af den termiske sammentrækning vokser.
- * Vandmætningsgraden forøges, fordi saltet omdanner is og sne til vand og fastholder vandet over længere tid. Herved stiger S_{AKT} , og risikoen for frostska-der øges.

Desuden kan visse salte angribe cementpastaen kemisk, men disse bør naturligvis ikke anvendes.

Tidligere tiders metoder til prøvning af betons frostbestandighed var ret brutale med meget store afkølingshastigheder. Desuden skelnede man ikke mellem materialeegenskab og påvirkning, dvs. mellem S_{KR} og $S_{AKT}(t)$. Der findes nu udviklet rationelle metoder til bedømmelse af frostbestandigheden /2/, /7/.

Revnet beton: Alt det ovenfor anførte har drejet sig om beton, som fra starten er uden revner. Velblandet, velkomprimeret og urevnet beton, som i velhærdet tilstand udsættes for vejrligets påvirkninger, vil, hvis den ikke er frostbestandig, nedbrydes ved afskalninger og smuldring fra overfladen og ind-efter. Dette skyldes, at vandopsugningshastigheden i beton er meget lav, hvorfor kun de yderste lag af betonen når op over S_{KR} . Der kan imidlertid dannes revner og hulheder under udførelsen. Disse revner kan lede vand dybt ind i konstruktionen, hvor det kan fryse og udvide revnerne. De vigtigste årsager til revnedannelse er:

Dårlig kornkurve, som giver for store hulrum til at cementpastaen kan fylde dem ud.

Utilstrækkelig vibrering, som efterlader luftlommer.

Vandseparation (bleeding). Risikoen for vandseparation er meget afhængig af kornkurven og af tilsætningsstoffer, herunder luftindblanding.

Sætning af frisk beton og plastisk svind.

Termorevner. Højt cementindhold, tvunget frem af ønsket om høj styrke og høj byggetakt, øger risikoen.

Alkalikiselreaktioner kan under ugunstige forhold (høj hærdetemperatur) udvikles ret hurtigt og give revner.

Revner i betonen vil nedsætte den kritiske vandmætningsgrad, fordi betonens trækstyrke nedsættes.

Desuden vil revnerne bevirke, at den aktuelle vandmætningsgrad hurtigt kan stige, fx under et regnvejr, fordi vandet ledes hurtigt af sted langs revnerne. Frostangreb i en revnet beton kan finde sted uden at hele betonmassivet er vandmættet. Hvis blot vandmætningsgraden i og lige omkring revnen er over den kritiske værdi, kan revnen udvides og vokse videre ind i betonen.

Yderligere kan der under byggeperioden ske det, at betonen vådholdes med rindende vand. Herved ledes vandet langs revnerne dybt ind i konstruktionen. Betonen kan ikke nå at tørre ud, idet udtørring er en meget langsom proces, og ved første frysning kan betonen sprænges.

Revnebilledet vil være bestemt af de primære revners forløb og af konstruktionsdelens form og armeringens placering og størrelse. Således vil et brodæk med netarmering i over- og underside sprænges i lameller i dækkets plan. En massiv konstruktionsdel med netrevner pga. termosspændinger kan få disse netrevner udvidet ved frostangreb.

Luftindblanding kan ikke sikre en revnet beton mod at fryse i stykker (!)

2.3 Alkalikiselreaktioner

Ved skadelige alkalikiselreaktioner dannes udsvedninger af gel på overfladen, springersår over porøse flintesten og i alvorligere tilfælde dybtgående revner og netrevnemønster på overfladen. Revnerne kan, især efter samvirken med frostan-greb, blive 1 å 2 millimeter brede.

Alkalikisegel kan kendes således: Hvis en vandig opløsning af gelen tilsættes en opløsning af CaCl_2 , fås et hvidt bund-fald af kalciumsilikat.

De kemiske reaktioner i alkalikiselreaktionerne er langt fra at være klarlagte. Meget kortfattet kan den nuværende viden sammenfattes således: Alkaliioner (Na^+ og K^+) fra cement, blandevand eller omgivelser bevirker, at OH^- -koncentrationen i porevæsken stiger. OH^- opløser tilstedeværende amorf kisel (SiO_2) fx fra flintesten og danner en gel. Denne gel er stærkt hygroskopisk og trækker vand til sig fra omgivelserne. Herved opstår der et tryk på omgivelserne ud fra stenen. Hvorvidt dette tryk leder til revnedannelser og skader afhænger af de nærmere omstændigheder i den pågældende beton. Man kan skelne mellem følgende situationer:

- * Koncentrationen af alkalier, kisel og vand er så ugunstig for processen, at den forløber uden synlige skader. (Denne situation er den normale.)
- * Koncentrationen af alkalier, kisel og vand er gunstig for processen, som giver revnedannelser i hele betonvoluminet.
- * I sten, som ligger nær en overflade, kan der ske reaktion, hvorved der dannes en springer (tegning afsnit 1.3). Hvis cementmørtlen er tilstrækkeligt stærk til at modstå gelens tryk, kan gelen presses ud gennem betonens overflade og danne dråber eller mørke pletter på overfladen. I det sidste tilfælde får betonen et "koparret" udseende (tegning i afsnit 1.4 og 1.7).

De materialemæssige betingelser for, at alkalikiselreaktioner kan opstå, er, at der i betonen findes alkalier, reaktivt tilslag og vand. Skader forebygges ved at udelukke en eller flere af disse komponenter.

Alkalier findes i cementen. Undersøgelser har vist, at hvis der er mindre end 0.6% ækv. Na_2O i cementen, er der ikke fare for revnedannelser, hvis der ikke tilføres alkalier andetsteds fra. En tysk regel siger, mere logisk, at der højst må være 3.0 kg Na_2O pr. m^2 beton.

Alkalier tilføres også, hvis der anvendes havvand til blandingen. Endelig kan de tilføres den færdige konstruktion fra omgivelserne; således kan alkalier trænge ind fra havvand og svømmehalsvand, eller i vejbaner fra salt (NaCl).

Reaktivt tilslag er i Danmark hovedsageligt porøse flinter. I Nordtyskland og Holsten forekommer den grønne opalsandsten, som er særlig farlig. Også andre typer tilslag end de SiO_2 -holdige kan give reaktioner, således er der af mange meldt om karbonatreaktioner. Bl.a. kan der være problemer med dolomit. Roosar (1962) melder om skader forårsaget af tilslag med magnetkis.

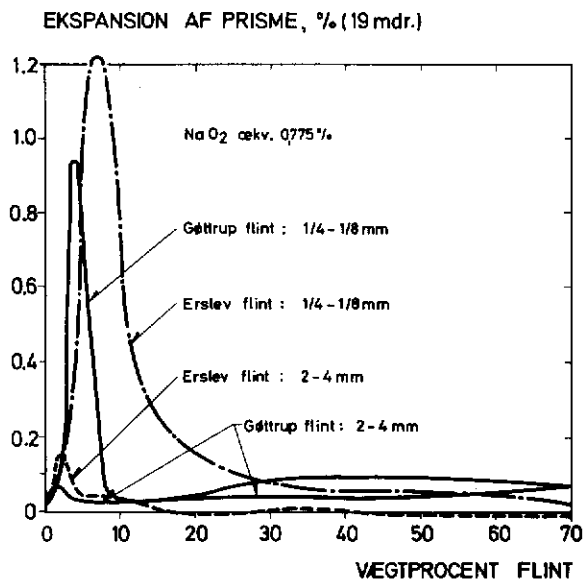


Fig. 2.3.1. Ekspansion af mørtelprismer (25×25×125 mm) med varierende mængder reaktivt tilslag i forskellige kornstørrelser. Der er anvendt to typer flint. (Fra alkaliudvalgets forsøg 1966.)

Tilslagsmængden virker således, at meget små mængder og meget store mængder ikke er farlige. For hver kornstørrelse inden for hver flinttype findes der en farligste mængde, hvor ekspansionerne er størst. (Figur 2.3.1.)

Erfaringen fra en del skadetilfælde gør det nødvendigt at fremhæve, at der kan forekomme skadelige reaktioner ved alle kornstørrelser, også i sandfraktionen. Det er således ikke tilstrækkeligt at foreskrive anvendelse af granitskårer som groft tilslag; også sandfraktionen skal være af ikke-reaktivt materiale.

De allerfleste danske grusforekomster indeholder reaktivt materiale. En mulig metode til at udskille de farligste bestanddele kan være massefyldesortering, idet den reaktionsfarlige porøse flint er lettere end de øvrige bestandige korn i gruset og derfor kan skilles fra i dertil indrettede anlæg ($2000 < \rho_{\text{flint}} < 2500 \text{ kg/m}^3$).

Vandet tilføres fra omgivelserne. I det omfang man kan udelukke vandet, kan man forebygge alkalikiselreaktioner.

Alkalikiselreaktioner og frostangreb supplerer hinanden, idet de revner, der dannes ved alkalikiselreaktioner i varmt vejr, vil kunne udvides af frosten om vinteren.

Alkalikiselreaktioner synes også at forværre revnedannelse opstået under udstøbningen (jf. 2.2). Det er dog meget vanskeligt at afgøre, hvor stor en rolle alkalikiselreaktioner spiller for skadeforløbet. I nogle tilfælde sker opløsninger af de porøse flintkorn kun som følge af, at betonen er blevet lukket op af anden årsag. Reaktionsprodukterne fylder revner og hulrum, men er ikke nødvendigvis medvirkende i skadens forløb. Det er muligt, at mange af de netrevnebilleder man hidtil har tillagt alkalikiselreaktioner, i virkeligheden skyldes frost, jf. afsnit 2.2. Det skal i denne forbindelse nævnes, at der i de senere års undersøgelser af skadede betonkonstruktioner ikke er fundet nogen konstruktion, hvor alkalikiselreaktioner har været eneste skadeårsag.



Fig. 2.3.2. Flintesten i cementpasta. Stenens øverste del er omdannet til gel, som er presset ud i luftblære ved siden af stenen. Den reagerede del af stenen ligger hævet ca. 1/10 mm over snitfladen. Luftblæren nederst ligger i halvskygge (AN, 1976).

Alkalikiselreaktioners tidsmæssige forløb er et meget kompliceret spørgsmål. Revnedannelser og springere kan opstå meget hurtigt efter udstøbningen og op til flere år efter. Hvor alkalikiselreaktioner og frostangreb virker sammen, kan revnedannelsen fortsætte indtil nedbrydningen er total.

Et lavt v/c modvirker alkalikiselreaktioner, idet betonen bliver stærkere og vandopsugningen går langsommere.

Man kan iagttage, at ældre konstruktioner (fra før 1925) klarer sig pænt. De er udstøbt meget stift og med stampning. Konstruktioner efter 1925 klarer sig væsentligt dårligere. Omkring denne tid begyndte man at støbe med "rendebeton", dvs. beton, som blev gjort så tyndtflydende ved vandtilsætning, at den selv kunne flyde ud i formen uden stampning. Denne beton fik et meget højt v/c.

Luftindblanding modvirker også skadelige alkalikiselreaktioner, dels fordi vandoptagelsen forsinkes på grund af luftporernes kapillarbrydende virkning, og dels fordi gelen kan udvikles ind i boblerne (figur 2.3.2).

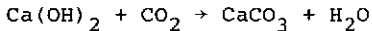
2.4 Udludning

Med udludning menes, at betonens indhold af calciumhydroxid (Ca(OH)_2) fjernes af gennemsivende vand.

De synlige tegn på udludning er dannelse af kalktapeter og drypsten på konstruktioners undersider (afsnit 1.6).

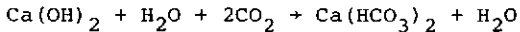
Hvis betonen er meget porøs (højt v/c) eller er revnet af en eller anden grund, kan vand sive igennem betonmasserne ad de dannede kanaler. Undervejs opløser det Ca(OH)_2 .

Når opløsningen når ud til overfladen, reagerer den med luftens kuldioxid, CO_2 , og danner calciumkarbonat, CaCO_3 :

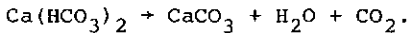


Denne reaktion foregår i vanddråbens periferi, hvorfor drypsten bliver hule og kalktapeter meget porøse.

Hvis vandet indeholder kuldioxid, CO_2 , kan det blive særligt aggressivt. Da foregår opløsningen efter formlen



$\text{Ca(HCO}_3)_2$ er meget letopløseligt. På ydersiden af konstruktionen afgives det overskydende CO_2 , og man får udfældet calciumkarbonat.



I urevnet beton, som er udsat for vandgennemsvivning, og hvor vandet kan fordampe inden der dannes dråber på ydersiden, vil karbonatiseringen ske inde i betonen, hvorved ydersiden tætnes.

2.5 Mekanisk slid

Mekanisk slid forekommer på gulve, fortove og vejbaner, og hvor betonkonstruktioner er udsat for sandflugt og bølgeslag.

Beton vil som de naturlige bjergarter nedbrydes af sandflugt og bølgeslag. Ofte fremtræder overfladen med frilagt tilslag, idet den blødere cementpasta fjernes først - og længst ind.

Mekanisk slid modvirkes ved at anvende så lavt v/c som muligt og ved at anvende stærkt tilslag (tæt flint, granit, basalt, kvartsit). Til industrigulve udsat for meget tung trafik anvendes granit som tilslag. Til tynde belægninger på trapper og lignende anvendes undertiden karborundum- eller korundpulver som tilslag.

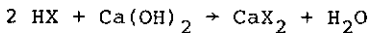
2.6 Aggressive stoffer

Beton kan angribes af en lang række vandopløselige stoffer og af vegetabiliske olier og syrer. De fleste af disse stoffer virker ved, at de angriber cementpastaen fra overfladen og indefter. Urene mineralolier kan angribe beton.

Betonens porøsitet er af afgørende betydning for et angrebs hastighed og karakter. I en tæt beton tager det lang tid for det angribende stof at diffundere ind. Yderligere kan uopløselige reaktionsprodukter udfældes i porerne og gøre diffusionen endnu vanskeligere (jf. angreb af kulsurt vand i afsnit 2.1). En tæt beton, som angribes af et stof, som giver opløselige reaktionsprodukter, vil selvfølgelig have større modstandskraft end en porøs beton vil have over for det samme stof. Neville anfører, at ved forebyggelse af angreb er det vigtigere at sørge for at få tæt beton end at anvende specialcement. Med tæt beton menes velkomprimeret beton med lavt vandcementtal (0.40 á 0.45).

Det skal fremhæves, at de fleste af de i litteraturen angivne erfaringer med angreb af aggressive stoffer, herunder sulfater, er baseret på laboratorieforsøg med betoner med høj porøsitet. Den høje porøsitet vælges ofte for at der hurtigere skal "ske noget". Erfaringerne er ikke altid repræsentative for, hvad der foregår i praksis.

Alle syrer angriber beton (kulsyre dog på en særlig måde, jf. afsnit 2.1). Cementpasta er basisk. Dens bestanddele nedbrydes derfor ved kontakt med syre; fx nedbrydes kalciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) efter følgende reaktion



(X står for den anvendte syres syrerest).

Angrebets styrke afhænger foruden af betonens porøsitet også af syrens koncentration, af opløseligheden af syrens kalciumsalt (CaX_2) samt af væskebevægelsen langs betonen. Letopløselige salte vil aflejres i porerne og delvis stoppe angrebet. Kalciumsaltene af eddikesyre, salpetersyre og saltsyre er

letopløselige; disse syrer angriber stærkt. Kalciumsaltene af fosforsyre, oxalsyre og humussyre er tungtopløselige, hvorfor disse syrer er mindre farlige. Svovlsyre angriber beton særligt stærkt, idet man her får en kombination af syre- og sulfatangreb.

Sulfater træffes i havvand, i mosevand og spildevand. De virker i starten ved at omdanne kalciumhydroxiden (Ca(OH)_2) til gips, som udfældes i porerne. Herved bliver betonen tættere. Senere reagerer sulfationerne med de aluminatholdige dele af cementen og danner forbindelsen ettringit (C_3A , $\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Efterhånden omdannes alle hydratiserede kalciumsilikater til gips og ettringit, hvorved betonen mister sin styrke. Desuden sker der en ekspansion af cementpastaen, som får det yderste lag af betonen til at revne og falde af. Særligt farlige er magnium- og ammoniumsulfat, som foruden at reagere med C_3A også reagerer med kalciumhydroxiden, fx $\text{MgSO}_4 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 + \text{Mg(OH)}_2$. Herved fjernes Ca(OH)_2 fra cementpastaen samtidig med at Mg(OH)_2 virker ekspanderende. Ovenstående nedbrydningsforløb gælder for beton med portlandcement. Angrebet kan forhindres ved anvendelse af sulfatbestandig cement.

Mineralske olier er råolie og raffineringsprodukter heraf (petroleum, benzin, benzen, smøreolie, brændselolie, vaseline etc). Rene mineralske olier er ikke aggressive. Disse olieprodukter kan kun nedbryde cementpastaen, hvis de indeholder sure bestanddele (fenol og organiske syrer). Oliens viskositet har også betydning. Højviskøse olier (svær og midelsvær brændselolie) kan opbevares i betonbeholdere, idet de ikke trænger særligt dybt ind i betonen, således at et eventuelt angreb kun bliver overfladisk. Lavviskøse olier (let brændselolie) kan trænge dybt ind i betonen, som da kan nedbrydes indefra af eventuelle urenheder i olien. De lette olier kan dog opbevares i betonbeholdere med vandmættede vægge. Bizok /1/ anbefaler overfladebehandling med natriumsilikat.

I /3/ er (fra /4/) givet en *oversigt over 128 stoffers aggressivitet* overfor beton. Det fremgår, at beton uden overflade-

behandling er anvendelig i mange tilfælde. Endvidere ses, at beton med fordel kan bruges, også når den kommer i forbindelse med angribende stoffer, blot man giver betonen en passende overfladebehandling. Der er for hvert stof givet forslag til overfladebehandling af betonen. Dette er også gjort ved stoffer, der ikke er aggressive overfor beton, af hensyn til brugere, der ønsker at give beton en dekorativ behandling, der kan tåle det pågældende stof. Overfladebehandling bruges også, hvor man ønsker at forhindre, at betonen suger væske fra stoffer i beholderen, eller i tilfælde, hvor man ønsker at forhindre, at en væske (fødevarer etc.) bliver "forurennet" af betonen.

2.8 Korrosion på armering og andet metal

Armeringen i en betonkonstruktion er beskyttet mod rustangreb, når den er omgivet af tæt, sund beton. I utæt beton kan armeringen ruste, *korrodere*. Desuden kan beskyttelsen i tæt beton ødelægges ved karbonatisering, ved udludning af $\text{Ca}(\text{OH})_2$ og ved indtrængning af klorid, hvorefter armeringen også kan korrodere her.

Korrosionskemi

Ubeskyttet jern nedbrydes efter følgende kemiske formel (jf. figur 2.8.1)



Det areal, hvor denne proces sker, kaldes *anoden*. Hvis der findes vand og oxygen ved jernoverfladen, forbruges elektroderne efter ligning (2)



Det areal, hvor denne proces sker, kaldes *katoden*.

Resultatet af (1) og (2) er, at der dannes Fe^{++} - og OH^- -ioner. De medvirker i dannelse af korrosionsprodukter, *rust*. Rust er imidlertid ikke et bestemt stof. Dets sammensætning vil afhænge af, hvor meget oxygen (ilt), der er til stede.

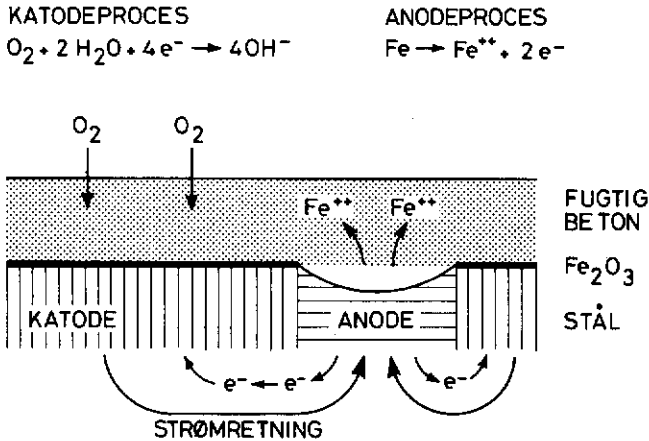
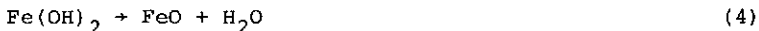


Fig. 2.8.1. De grundlæggende kemiske processer ved korrosion af armering i beton. Fe_2O_3 -laget virker passiverende. Sammensætningen af korrosionsprodukterne afhænger af tilførslen af oxygen, jf. figur 2.8.2.

I oxygenfattige omgivelser får man processen

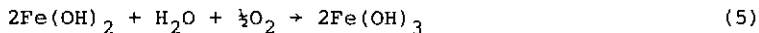


$Fe(OH)_2$, *ferrohydroxid*, er et hvidt, tungtopløseligt stof. Det kan nedbrydes til det sorte *jern(II)oxid*

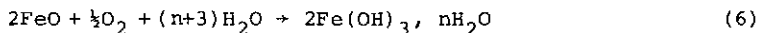


FeO kan oxideres til det sorte Fe_3O_4 , *magnetit*.

Hvis det hvide $Fe(OH)_2$ udsættes for oxygen (fx når det udtages inde fra en betonkonstruktion og kommer ud i luften), vil det oxideres gennem nogle grønne forbindelser til rødbrunt *ferrhydroxid*:



Hvis det sorte FeO (ligning (4)) udsættes for fugtig luft, omdannes det til brunjernsten (rust):



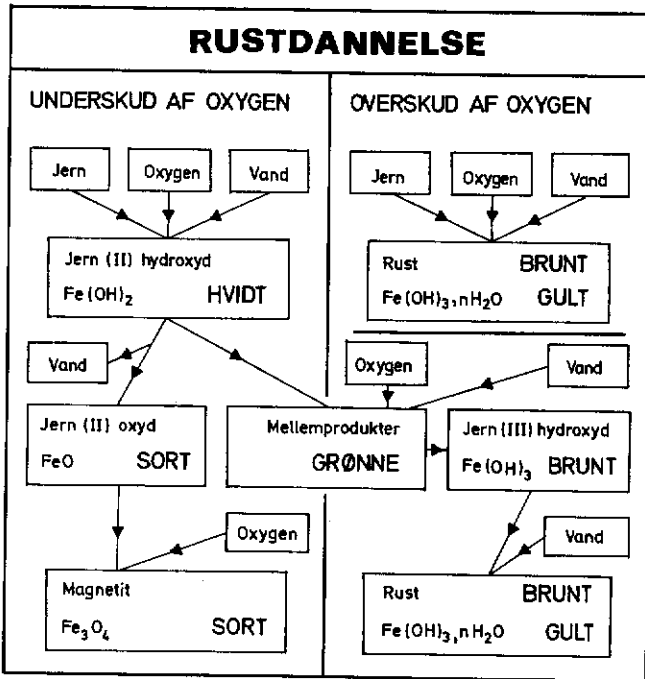
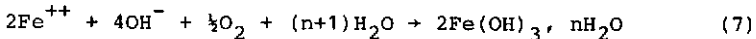


Fig. 2.8.2. Oversigt over jerns korrosionsprodukter og deres farve.

I normale, oxiderende omgivelser vil ionerne fra (1) og (2) omdannes til brunjernsten (rust) efter en proces som denne



Figur 2.8.2 giver en oversigt over korrosionsprodukterne.

Korrosionsprodukternes volumen

Alle korrosionsprodukter fylder mere end det jern de er dannet af (figur 2.8.3). Ved den sædvanlige atmosfæriske korrosion dannes brunjernsten $\text{Fe}(\text{OH})_3, n\text{H}_2\text{O}$, som fylder 4 å 8 gange mere end jernet. Rusten formes som krystaller. Betondæklaget kan ikke yde tilstrækkelig trækraft til at modstå krystallisationstrykket, hvorfor dæklaget revner eller skaller af.

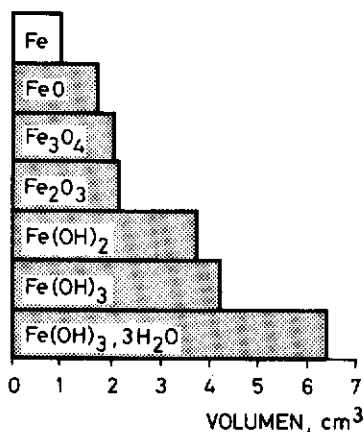


Fig. 2.8.3. Volumet af korrosionsprodukter fra 1 cm³ jern (7.86 g Fe).

I oxygenfattige omgivelser dannes de reaktionsprodukter, som fylder mindre. Desuden sker processen langsomt og i vand. Alle disse ting gør, at korrosionsprodukterne kan finde plads i porerne i den omkringliggende beton. Korrosionsangrebet kan derfor ske uden at man udefra kan se revner eller afskalninger. Dette ses gerne i forbindelse med kloridangreb, jf. nedenfor.

Nedbrydning af passivering

Jern, som ligger i tæt cementpasta, er beskyttet på grund af pastaens høje indhold af calciumhydroxid, Ca(OH)₂, som gør porevandet basisk (12 < pH < 14). Den høje koncentration af OH⁻-ioner formindsker opløseligheden af Fe⁺⁺. Den ringe mængde Fe⁺⁺ vil hurtigt oxideres og danne et tæt lag af Fe₂O₃. Dette lag forhindrer videre jernopløsning. Overfladen er blevet *passiveret*. Den passive jernoverflade har et meget højt elektrisk potentiale, den er ædel i forhold til den aktive jernoverflade, omtrent som kobber i forhold til jern.

Passiveringen kan nedbrydes, hvis

- * OH⁻-koncentrationen nedsættes, hvilket kan ske gennem karbonatisering eller gennem udludning, eller hvis
- * Cl⁻-ioner trænger ind.

Desuden kan et rustangreb starte, hvis armeringen udsættes for vildfarende elektrisk strøm (*vagabonderende strøm*) fra nærliggende elektriske anlæg.

OH^- -koncentration kan ikke opretholdes, når Ca^{++} omdannes til karbonat. Omdannelsen sker hurtigt omkring støbefejl og stenreder og i porøs beton. Indtrængningsdybden kan bedømmes af figur 2.1.2. Ved karbonatisering vil passiveringen brydes over et stort område, omtrent samtidig. Korrosionsangrebet får derfor karakter af *fladetøring*, dvs. angreb over hele den ubeskyttede flade.

Udludning kan ske langs revner. Hvis udludningen bliver så stærk, at OH^- -koncentrationen bliver for lille, kan jernet tøres. Dette angreb vil få karakter af *grubetøring*, dvs. et lokalt angreb.

Kloridioner, Cl^- , er i stand til at nedbryde det passiverende lag, når de forekommer i tilstrækkelig mængde. Evnen hos Cl^- til at bryde det passiverende lag skyldes antagelig dens evne til at polariseres. Cl^- -virkningen er vist principielt på figur 2.8.4. Et kloridangreb vil ofte give anledning til grubetøring, idet de elektriske kræfter bevirker, at Cl^- -ioner tiltrækkes til de steder, hvor angrebet først er kommet i gang.

Oplysninger om, hvor meget Cl^- , der kan tolereres i betonen før korrosionen begynder, varierer mellem 0.03 og 0.4 vægt% af betonmassen. Årsagen til den store variation synes at være, at det ikke er alt Cl^- , der er aktivt, dvs. i stand til at angribe armeringen. Cl^- kan bindes i komplekse kemiske forbindelser med cementgelen, og den kan absorberes af cementgelen. Endelig afhænger dens aktivitet også af mængden af andre ioner i porevandet, såsom Na^+ , Ca^{++} og OH^- . Desuden skal katodeprocessen (2) kunne foregå; hvis den ikke kan forløbe, vil korrosionen gå i stå af den grund. Beton kan således være fuldstændigt mættet med havvand, hvorved Cl^- -koncentrationen kommer op over 0.03 vægt%, uden at der kommer korrosion på armeringen, hvis oxygentilførslen stoppes.

Konklusionen af ovenstående er, at Cl^- er farligt, men at det endnu ikke er muligt at angive en grænse for tilladelig mængde Cl^- i armeret beton.

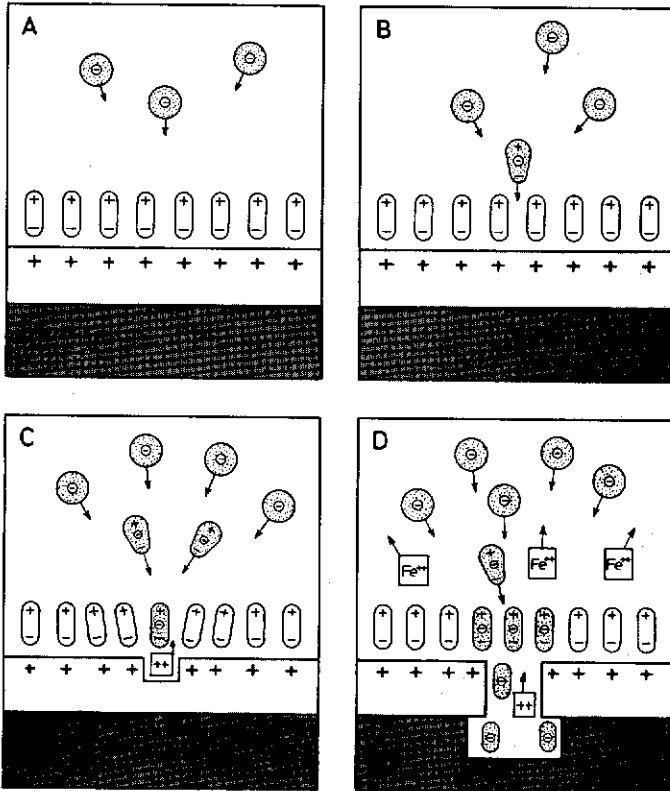


Fig. 2.8.4. Klorid-virkningen principielt.

- A. En passiveret jernoverflade med et elektrisk dobbeltlag af diverse ioner. Cl^- -ioner tiltrækkes.
- B. Nær ved overfladen polariseres Cl^- og bliver aflang.
- C. Cl^- -ioner indgår i dobbeltlaget, hvorved jernioner, Fe^{++} , kan passere.
- D. Flere Cl^- -ioner tiltrækkes til det sted, hvor kredsløbet først er begyndt. Virkningen forstærkes. Der opstår grubetæring.

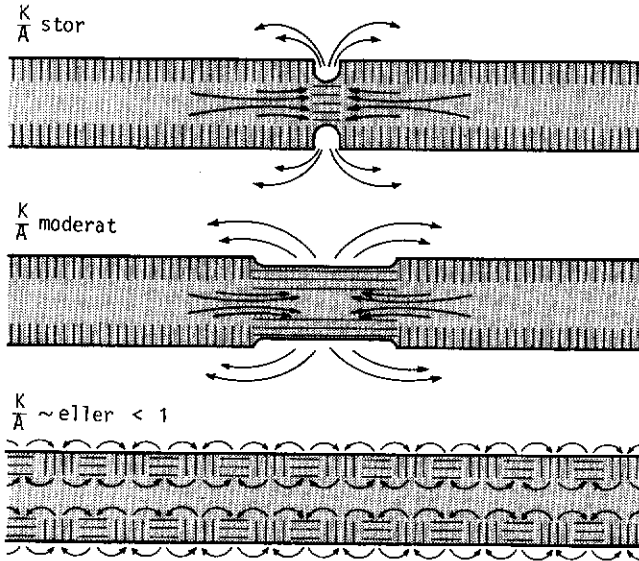


Fig. 2.8.5. Betydningen af forholdet mellem katodisk (K) og anodisk (A) areal på jernoverfladen. Strømtætheden er stor i anoden, når K/A er stor. Dette giver grubetæring.

Katode/anodeforholdet

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 anodearealer er vist principielt på figur 2.8.5. Katode/anodeforholdet er også medbestemmende for den hastighed, hvormed angrebet går i dybden. Der er eksempler på, at man under ugunstige omstændigheder kan få 5 å 10 mm dybe gruber i løbet af et år.

Grubetæring er særlig farligt på dybtliggende jern, idet der dannes oxygenfattige korrosionsprodukter, som ikke sprænger betonen, men finder plads i porerne omkring skadestedet. Her ved kan skaden ikke ses udefra, men må konstateres ved hugning eller boring. Der er dog nu udviklet målemetoder, potentialmålinger, med hvilke korrosion kan indikeres udvendigt på våd beton.

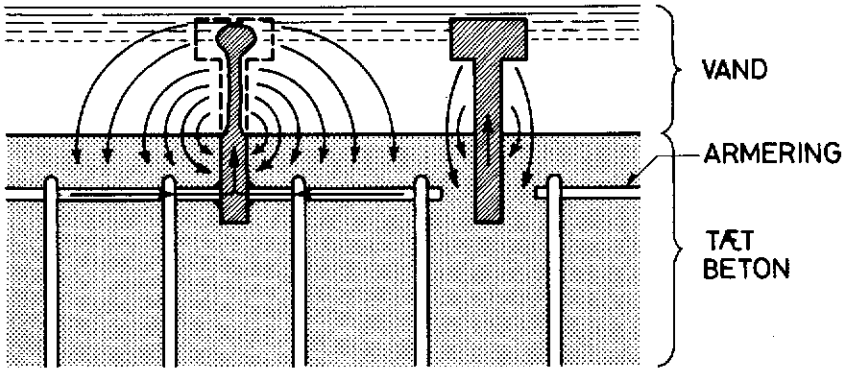


Fig. 2.8.6. Korrosion på faststøbte dele i beton. Bolten tv. er i elektrisk forbindelse med armeringen og tærer hurtigt på grund af den store værdi for K/A . Bolten th. er isoleret fra armeringen og tærer langsomt, idet $K/A < 1$. Pilene viser den elektriske strøms retning.

Korrosion på ubeskyttede ståldele, som er faststøbt i betonkonstruktioner i fugtige omgivelser fx havvand, er også afhængig af katode/anodeforholdet (se figur 2.8.6). Den del af stålet, som stikker udenfor konstruktionen, vil være anode og tæres. Katoden i processen vil være den del af stålnettet, 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 muligheden for korrosionsstrøm og ståldelen vil hurtigt tæres. ("Hurtigt" kan være nogle år.)

Korrosion på andre metaller

Zink angribes af frisk beton under dannelse af hydrogenbobler. Angrebet stopper dog i tør beton. Forzinket (galvanise-

ret) armeringsjern anvendes en del i udlandet. Ifølge udenlandske (især amerikanske) erfaringer angribes zinken kun minimalt, hvis zinklaget er tyndt og foreligger som legeringen jernzink. Forzinkningen skulle yderligere kunne beskyttes ved at male jernene med kromatholdig maling eller ved at tilsætte kromat til betonen. I de senere år har man opdaget, at der alligevel kan optræde korrosion, selv om armeringen er forzinket. Dette gør, at danske eksperter ikke i øjeblikket vil anbefale anvendelsen af forzinket armering.

Bly angribes af frisk beton og af fugtig hærdnet beton.

Aluminium og aluminiumlegeringer angribes også af frisk beton under dannelse af hydrogenbobler. Angrebet ophører, når betonen bliver tør. Hvis betonen forbliver fugtig i hærdnet tilstand, korroderer metallet. Korrosionsprodukterne har større volumen end metallet, hvorfor afsprængninger kan forekomme.

Kobber angribes ikke af beton.

2.9 Revner og holdbarhed

Revner kan være dybtgående eller overfladiske (overfladekreklering).

Dybtgående revner opstår af mange forskellige årsager. En oversigt ses i tabel 2.9.1. I denne tabel er også angivet, om revnen er i ro eller om der kan være bevægelser i den. Dette er vigtigt at vide i forbindelse med reparationsarbejder.

En revne vil kunne transportere vand, oxygen, kuldioxid og klorider ind i betonen, hvor der kan ske omdannelser, jf. de foregående afsnit.

Spørgsmålet om, hvor bred en revne kan tillades at være, stilles ofte i forbindelse med dimensionering af armerede betonkonstruktioner. Spørgsmålet kan imidlertid ikke besva-

res entydigt, fordi farligheden af en revne vil afhænge af en mængde faktorer:

- * Betonkvaliteten (v/c, cementtype, cementindhold)
- * Muligheden for selvheling af revnen
- * Tilstedeværelsen af klorid
- * Revnens geometri
- * Det omgivende klima, herunder vandtryk

Som eksempler skal nævnes følgende: I en indendørs konstruktion, hvor der ikke kan forekomme korrosion på armeringen på grund af mangel på vand, er den acceptable revnevidde kun bestemt af æstetiske hensyn.

I en konstruktion helt neddykket i vand med ens vandtryk overalt i revnen, således at der ikke kan transporteres ioner med vandstrømmen, vil nedbrydningen være uafhængig af revnevidden.

I en udendørs konstruktion, hvor passiveringen nedbrydes ved karbonatisering, eksisterer der ikke nogen mindste revnevidde, under hvilken der ikke er nogen fare for korrosion.

I en konstruktion udsat for ensidigt vandtryk kan det strømmende vand udlude OH^- -ioner og lede muligt tilstedeværende Cl^- -ioner ind. I dette tilfælde findes der heller ikke nogen mindste, sikker revnevidde.

TABEL 2.9.1. Revneårsager	
R = revne i ro, B = revne i bevægelse	
Plastisk svind	R
Termorevner	R
Svind	R,B
Varmetøjning	B
Patologiske ekspansioner (frost, alkalikiselreaktioner)	B
Fundamentssætninger	R,B
Belastning	R,B

Krakelering er revner, som opdeler betonens overflade i felter med udstrækning på 10 å 80 mm. Revnerne er op til 50 mm dybe, oftest kun 10 å 20 mm. Krakelering kan opstå på grund af

- * Temperaturforskel mellem konstruktionsdelens indre og dens overflade og/eller
- * Udtørring af overfladen.

Fordampning af vand medfører både svind og afkøling af overfladen. Til at fordampe 1 gram vand medgår ca. 2450 J. Denne varme tages fra betonen, hvorved temperaturen synker. Differenssvindet mellem betonoverfladen og de indre dele kan være op mod 1%, hvis overfladen er særlig cementpastaholdig.

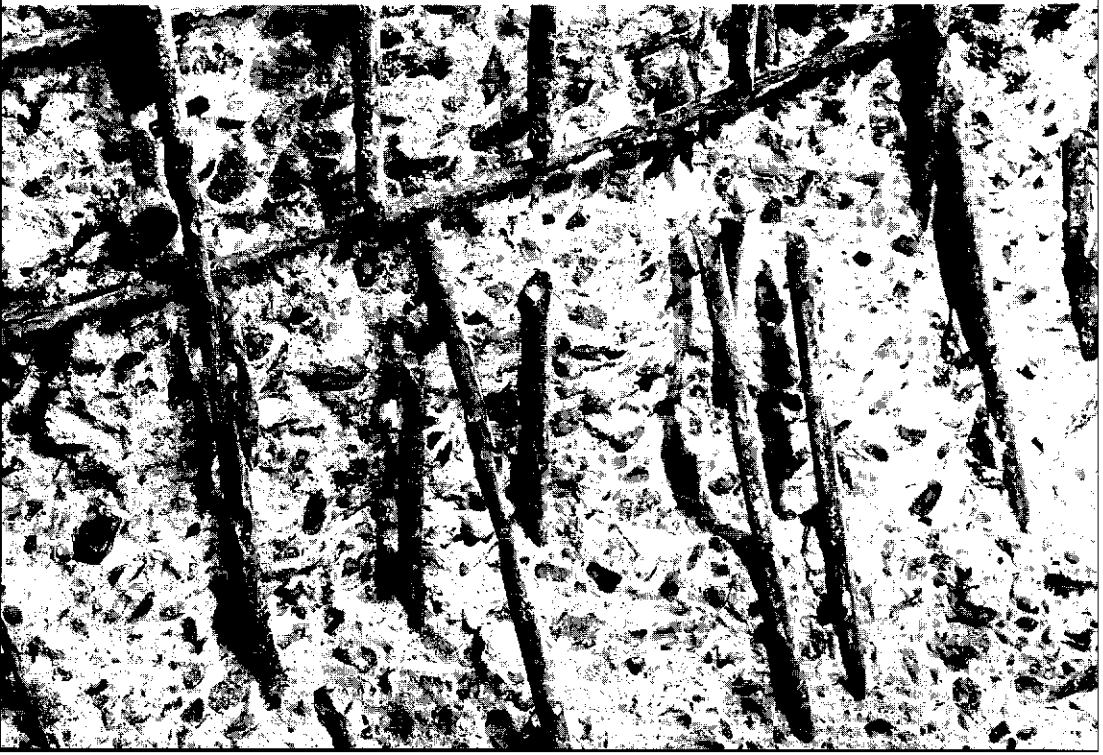
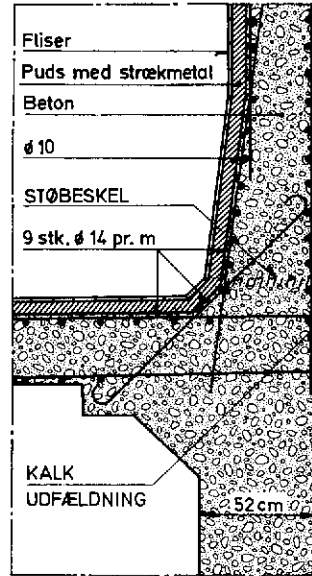
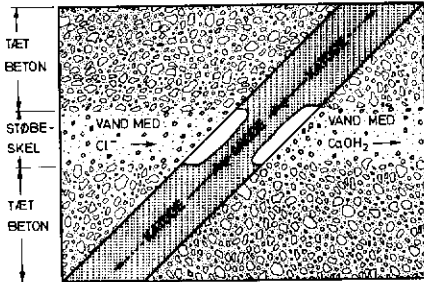
Betonoverfladens evne til at modstå påvirkningerne afhænger af dens trækstyrke på det tidspunkt påvirkningen forekommer, dvs. af v/c, cementpastaindhold, hærdningsgrad og komprimering. Cementpastaindholdet er afhængigt af grusets kornkurve. Det kan forøges i betonoverfladen ved overdreven glitning.

Risikoen for krakelering på en given beton mindskes ved at beskytte betonen mod fordampning og afkøling så længe som muligt og ved at undgå kuldechok ved afkøling.

Krakelering kan danne udgangspunkt for frostangreb, men har ellers mest æstetisk betydning. Revnerne kan tiltrække snavs og derved skæmme en i øvrigt pæn betonoverflade.

4. EKSEMPLER PÅ SKADEDE BYGVÆRKER

Eksempel 1. Frederiksberg Svømmehal.
Armering med grubetøring fra 40 år gammelt bassin. Skaderne er startet i støbeskellet mellem bund og sider. Her har jernene været omgivet af et slamlag med urenheder. Dette lag har været porøst. Kloridholdigt vand er strømmet ind og har startet korrosionen, som er blevet meget stærkt lokalt p.g.a. det store katode/anodeforhold. Senere har korrosionen bredt sig langs de dårligt omstøbte jern. Skaden kan være sket de første år. Senere er gennemstrømningen stoppet af aflejrede urenheder og af karbonatisering. Korrosionshastigheden er da gået ned. /5/. Foto L. Allesen-Holm.

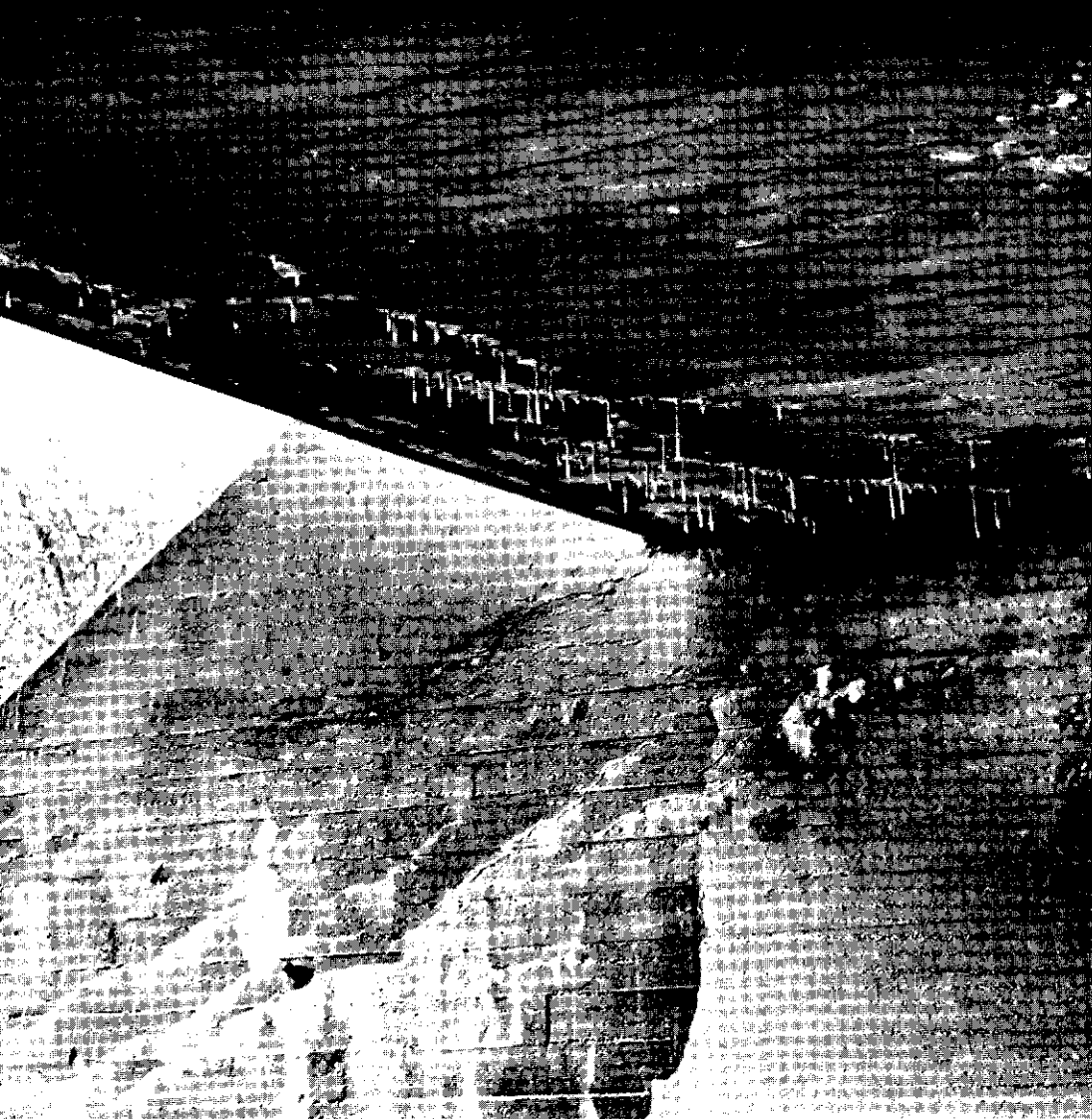




Eksempel 2. Varmehærdet altanelement med netrevnemønster. De første revner er opstået på grund af store temperaturforskelle mellem betonens indre og ydre dele under hærdningen. De er senere udvidet af alkalikiselreaktioner og frost. Frosten vil fortsætte nedbrydningen så længe revnerne er åbne for vandindtrængning. Alder ved fotografering 3 år.

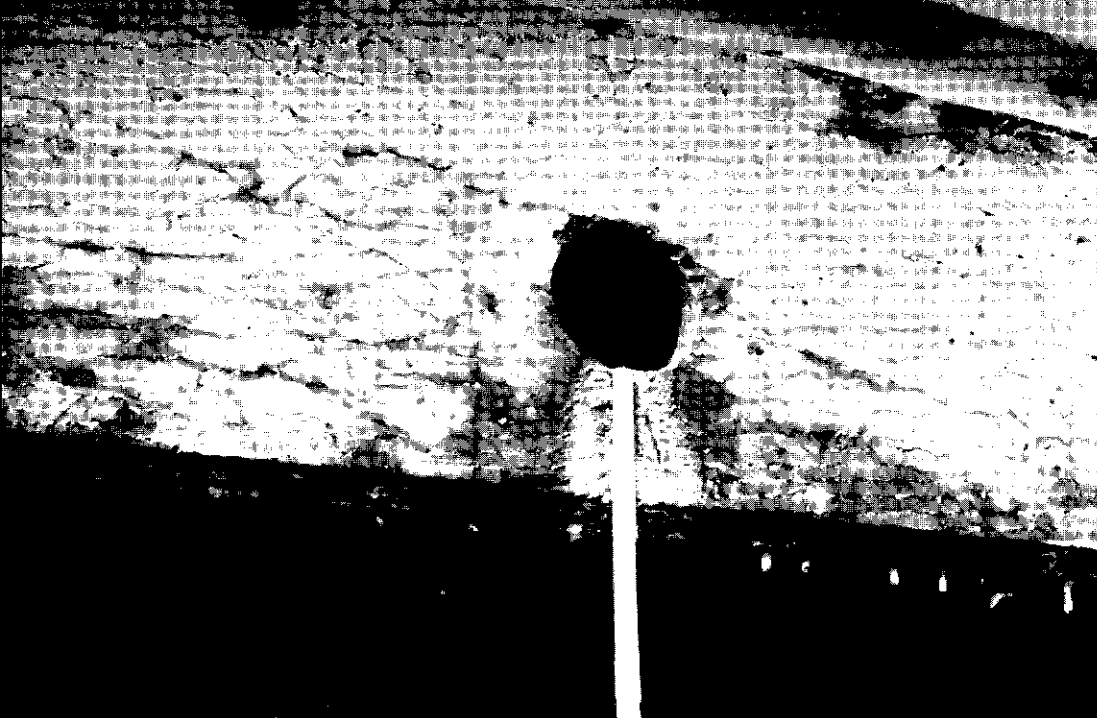


Eksempel 3. Bropille i havvand, Limfjorden. Betonen er nedbrudt som følge af alkalikiselreaktioner, frostangreb, sulfatangreb, udludning og erosion fra bølger og is. Endvidere er armeringsjernene naturligvis rustne. Det vides, at betonens begyndelseskvalitet var dårlig med højt v/c og alkali-reaktive tilslagsmaterialer. Opførelsestidspunkt 1932. Alder ved fotografering 26 år.



Eksempel 4. Fodgængertunnel under motorvej, Lyngby.

Der ses drypsten og udfældninger af vejsalt på loftet. Vejsaltet danner hårede, filtagtige belægninger. På støttemuren er parallelrevnemønster fremkaldt af frost og muligvis alkaliselreaktioner og fremhævet ved senere kalkudfældninger fra gennemsivende vand. I støttemuren udfor loftets underside en skrå revne fremkaldt af brobanepladens temperaturbevægelser. Pladen vil, når den udvider sig, forsøge at presse den øverste trekant af støttemuren, idet der ikke er tilstrækkeligt stor ekspansionsfuge. Denne revne har været repareret. Alder ved fotografering ca. 20 år. Foto: T. Thorsen 1976.



Eksempel 5.

Vejbro i Nordjylland.

Øverst: Kantbjælke med parallelrevnesystem fremkaldt af frosten. Betonens begyndelseskvalitet har været for ringe på grund af vandseparation og termorevner. Alder ved fotografering 10 år.

- Hullet i bjælken er boret 4 måneder før billedet blev taget. I denne tid har hullet drænet vandet fra bjælken, hvorved et kalktapet er dannet under hullet.

Til højre: Lodret snit i prøvecylinder udboret af brodækket. Revnerne er hovedsageligt vandret orienteret. Dette skyldes, at netarmeringen i pladens over- og underside modvirker dannelsen af lodrette revner.
- Revnerne er gjort synlige med fluorescens. Armeringsjernets diameter er 14 mm.
(Foto T. Thorsen 1977.)



4. FOREBYGGELSE AF NEDBRYDNING

Alle nedbrydningsprocesserne forudsætter, at der er vand til stede. Derfor går bestræbelserne for at øge betonkonstruktionernes holdbarhed ud på at forhindre vandindtrængning. Desuden kan man ved at vælge kemisk modstandsdygtige delmaterialer mindske risikoen for skader, hvis vandet skulle komme ind.

Forebyggelsen skal foregå både konstruktivt, materialemæssigt og udførelsmæssigt. I det følgende nævnes de vigtigste punkter. Det er umuligt i denne korte fremstilling at dække alle aspekter.

4.1 Konstruktiv forebyggelse

Fremstilling af en holdbar betonkonstruktion begynder på tegnestuen. Man kan vælge ukomplicerede konstruktioner, udforme detaljer, så de kan udføres rent praktisk, og tænke en evt. reparationsfase igennem.

Valget af konstruktion har indflydelse på holdbarheden. Ubeskyttede konstruktioner med almindelig slap armering bør ikke vende træksiden og dermed revnerne opad. De vil herved kunne danne udgangspunkt for frostangreb. Dette vil ofte betyde, at man bør anvende statisk bestemte konstruktioner med simpelt understøttede bjælker og plader.

Spændingsniveauet i konstruktionen kan vælges lavt. Herved mindskes risikoen for høje spændingskoncentrationer og revnedannelser, når et frost- eller alkali-angreb sætter ind.

Forspændte konstruktioner vil generelt være fri for revner og dermed mere modstandsdygtige end slapt armerede konstruktioner. Hvis uheldet er ude, og betonen bliver ødelagt, kan en sådan konstruktion imidlertid være meget kompliceret at reparere på grund af de store trækkræfter, som ligger i tråde og kabler.

Vandafledningen fra konstruktionens horisontale dele skal være gennemtænkt, således at der ikke kan komme vandansamlinger. Vandet skal ledes helt bort til afløb. Hvis man er tvunget til at lede vandet ud over en lodret flade, bør det ske via en drypnåse. Som eksempel skal nævnes, at på broer bør længdefaldet være mindst 20%, tværfaldet mindst 30% og særligt udsatte dele, som fx kantbjælker bør have mindst 150% fald ind mod bromidte. Der må ikke forekomme vandrette flader på broer.

Dæklaget uden på armeringen skal være tilstrækkeligt. Dæklagstykkelsen afhænger af det miljø og den betonkvalitet, som er anvendt.

I den nugældende danske betonnorm, DS 411, står angivet følgende krav til dæklag uden på armering og til karakteristiske vandcementtal $(v/c)_k$, i de tre miljøklasser A, B og C.

TABEL 4.1		
Miljøklasse	$(v/c)_k$	Min. dæklag, t
A	0.6	30 mm
B	0.7	20 mm
C	-	10 mm

Ud fra kendskab til betonens karbonatiseringshastighed (figur 2.1.2) må der sættes et spørgsmålstegn ved, om DS 411's krav i miljøklasse B er tilstrækkeligt. Dæklagstykkelsen bør være 30 mm i alle udendørs fugtige konstruktioner.

I off-shore-betonkonstruktionerne i Nordsøen foreskrives dæklagstykkelser på 50 til 75 mm.

Ang. miljøklasser angiver DS 411 følgende:

§2.3 Hensyntagen til miljø

Med henblik på bevarelse af den krævede brudsikkerhed i en rimelig levetid for konstruktionen, stilles der i normen miljøafhængige krav til dæklagets tykkelse og betonens sammensætning. Disse krav knytter sig til tre miljøklasser, der er karakteriseret ved forskellige grader af aggressivitet, men som alle er almindeligt forekommende i Danmark.

Miljøklasse A omfatter de mere aggressive påvirkninger. Herunder falder salt- eller røgholdig atmosfære, havvand og brakvand.

Miljøklasse B omfatter moderate påvirkninger. Herunder falder fugtig, ikke aggressiv, udendørs såvel som indendørs atmosfære samt strømmende eller stillestående ferskvand.

Miljøklasse C omfatter svage til ingen påvirkninger. Herunder falder tør, ikke aggressiv atmosfære, navnlig indendørs klima.

Det skal for betonkonstruktionen som helhed eller for hver konstruktionsdel for sig vurderes, hvilken af de tre nævnte miljøklasser, der bedst dækker de miljøpåvirkninger, som konstruktionen udsættes for.

Armeringens placering inde i konstruktionen skal være således, at betonen med den foreskrevne maksimale kornstørrelse kan bringes på plads omkring jernene og fuldstændigt omslutte disse. Mindstefaststande mellem armeringslængerne anbefales i vejledningen til betonnormen DS 411, side V37-39. F_x skal den vandrette frie afstand være mindst $2 \cdot d_a$ eller $d_{max} + 10$ mm. Normens krav er stillet under hensyn til, at stenene rent geometrisk skal kunne komme forbi jernene. Et andet væsentligt hensyn, som bør tages, er imidlertid hensynet til vibreringsmateriellet. Den mindste stavvibrator med rimelig effekt har en kolbediameter på 50 mm. Hvis man ønsker en stiv beton ned mellem jernene, bør der være plads til stavvibratoren, eller der bør anvendes formvibrator.

Konstruktionens form kan indeholde *revneanvisninger*. Ved bratte ændringer af en murs tværsnit og omkring åbninger i vægge får man revner ved konstruktionens afkøling og senere svind. Særligt ved beholdere og bassiner, som kan blive udsat for ensidigt vandtryk skal man være opmærksom på dette og om fornødent indlægge ekstra armering.

Støbearbejdet kan lettes, hvis *formen* er anpasset således, at betonen løber let ned i formen, og således at vibreringen kan udføres sikkert. (Se figur 4.1.1.) Støbeskel placeres således, at de kan udføres omhyggeligt.

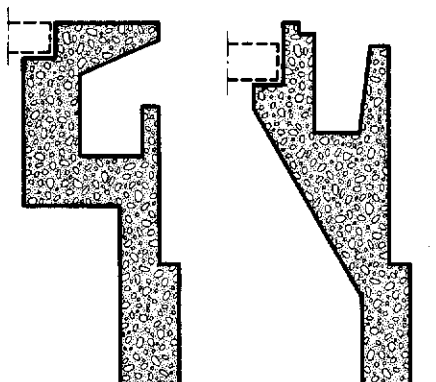


Fig. 4.1.1. Eksempler på udformning af svømmebassinkant med skulperende. Formen th. bør foretrækkes, da den er lettere at fylde og nemmere at vibrere i.

4.2 Materiale-mæssig forebyggelse

Cementtype: Almindelig portlandcement bør i almindelighed foretrækkes frem for hurtighærdnende cement for at mindske termoproblemerne. Hvis der anvendes alkalireaktive tilslagsmaterialer, kan risikoen for skader nedsættes ved at anvende cementer med lavt alkaliindhold (fx *lavalkali-sulfatbestandig cement* eller *hvid cement*). Til havvandskonstruktioner kan risikoen for sulfatangreb nedsættes ved at anvende *sulfatbestandig cement* med lavt indhold af C_3A .

Cementindholdet bør ligge under 350 kg/m^3 for at formindske termorevneproblemerne og svindet. Cementindholdet kan holdes lavt ved at arbejde med velgraderet grus. Det bør ligger over 300 kg/m^3 af hensyn til vandtæthed.

v/c skal sættes så lavt, at man får en tæt beton. TABEL 4.1 giver retningslinierne fra DS 411. De senere års erfaringer peger på, at der kan være grund til at skærpe kravet ved at foreskrive et karakteristisk *v/c* på 0.5 i klasse A og 0.6 i klasse B. Det betyder, at middelværdien for *v/c* kommer til at ligge på ca. 0.45, henholdsvis 0.55. Hvis konstruktionen skal være vandtæt, skal den udføres med $(v/c)_k = 0.5$.

Kornkurven skal sammensættes således, at den giver minimum hulrumsprocent og maksimum bearbejdelighed. Det er to krav, som ofte vil modvirke hinanden. Det første vil kræve kornkurver nær den s.k. Fullerkurve, medens det andet ofte kan imødekommes ved partikelspring. Maksimal kornstørrelse bestemmes af armeringstætheden jf. ovenfor. - Ved vandtæt beton skal summen af vægten af cement og sandkorn mindre end 0.25 mm være større end 375 kg/m^3 . - Betonens svind mindskes med voksende maksimal kornstørrelse, men samtidig vokser risikoen for utætheder langs de store sten, hvorved vandgennemtrængeligheden forøges og dermed risikoen for frostska-der.

Tilslagstypen: Absolutte grænser for, hvor stor en del af et grusmateriale, der må være frostfarligt og alkalireaktivt, er meget vanskelige at håndtere. Hvis der skulle fastsættes absolutte grænser, kunne det samfundsmæssigt set blive meget kostbart. Følgende retningslinier kan gives.

Hvis man vil undgå frostspringere i overfladen ved vinterstøbning, må stenmaterialet ($d_{\text{max}} \geq 4 \text{ mm}$) ikke indeholde porøse korn, jf. dog afsnit 2.2.

Hvis man vil undgå skadelige alkalikiselreaktioner er det sikreste at anvende ikke-reaktive grusmaterialer. Det vil i praksis sige granitskærver og sand med mindre end 2% reaktive korn. Det skal indskærpes, at det ikke er tilstrækkeligt at anvende granitskærver, sandet skal også være ikke-reaktivt.

De fleste danske grusforekomster har mere end 2% reaktivt materiale. Disse grustyper kan anvendes i forbindelse med lavalkali-cementer. Der opnås dog ikke fuld sikkerhed mod alkalikiselreaktioner, især hvis alkalier kan tilføres udefra, fx fra havvand eller vejsalt.

Usikkerheden omkring hvilke retningslinier der skal foreskrives er dog stor. En mulighed for at undersøge en given grustypes egnethed er at studere egenskaberne hos bygværker, hvor den er blevet anvendt (/15/).

Luftindblanding foreskrives normalt i al konstruktionsbeton. Det er cementpastaen, som skal sikres mod frostangrebet. De nye finske normer foreskriver et luftindhold på 25 vol% af cementpastaen. Det svarer til danske vejledningers 4 å 8 vol% af betonen. Mængden er afhængig af kornkurve og største stenstørrelse. Luften skal findes fint fordelt i små porer. Afstands faktoren (jf. afsnit 2.2) skal være højst 0.25 mm, ved beton som udsættes for tørsalte højst 0.20 mm. - Betonvarer, dvs. fliser, rør og belægningssten, fremstilles normalt af jordfugtig beton uden luftindblanding. Disse produkter bliver frostbestandige på grund af betonens lave v/c.

Plastificerende tilsætningsstoffer har indirekte indflydelse på holdbarheden ved at sikre en letflydende beton med lavt v/c. Særligt flydetilsætningsstofferne giver store muligheder for at sikre god udstøbning af tæt beton.

Hydrofobierende tilsætningsstoffer, fx stearater og silaner, skulle kunne anvendes med en vis effekt. Der foreligger ikke danske erfaringer med dem.

Overfladebehandlinger anses ofte for at være "kosmetik". Imidlertid er der adskillige eksempler på, at en vandafvisende (men permeabel) overfladebehandling har sikret en konstruktions holdbarhed.

4.3 Udførelsesmæssig forebyggelse

Blandetiden skal være tilstrækkelig for den anvendte blander-type. Utilstrækkelig blandet beton vil indeholde cementfattede partier, som kan suge vand og danne udgangspunkt for angreb.

Transporten skal foregå uden separering. Placeringen i formen skal foregå således, at betonen ikke skiller i sten og mørtel.

Træforme giver erfaringsmæssigt de mest holdbare overflader, antageligt fordi træet suger lidt vand fra betonen nærmest formen.

Komprimeringen skal foregå meget omhyggeligt for at sikre en tæt betonmasse. Betonen må ikke transporteres med vibratorerne, idet man da risikerer afblanding. Formvibrato-
rer kan i mange tilfælde være at foretrække for stavvibrato-
rer, idet de giver en mere ensartet påvirkning over et større felt. Vibrering må ikke foretages på arme-
ringsjernene, idet disse ved vibrationerne kan samle cement-
slam omkring sig, hvilket kan give dårligere vedhæftning. Yderligere risikerer man ved større støbninger at ryste
jernene løse i allerede afbundet beton. Herved dannes revner
langs jernene. Revnerne kan, hvis de kommer i forbindelse
med overfladen, lede vand ind i konstruktionen.

Støbeskel skal være så få som muligt inden for konstrukti-
ons dilatationsafsnit. De udgør en inhomogenitet, som kan
være udgangspunkt for angreb. Vandtætte konstruktioner bør
så vidt muligt støbes i en arbejdsgang. Ved overgang fra
bund til væg bliver et støbeskel nødvendigt. Inden man fort-
sætter støbningen mod et afbundet støbeskel, skal den først
udstøbte beton oprenses omhyggeligt med sandblæsning og vand-
spuling. Det første lag beton kan evt. støbes uden sten.

Det ses undertiden anbefalet, at store støbninger fx af
bassinbunde udføres i striber af 4-5 m's bredde for at lade
betonen få mulighed for at svinde. Hertil er at bemærke, dels
at betonen ikke når at svinde noget af betydning i den tid
man har til rådighed på en byggeplads, og dels at man får ind-
ført en masse ekstra støbeskel, som kan give revner og ekstra
besvær ved udstøbningen. Metoden kan således ikke anbefales.

Støbeophold kan indføres ved at tilsætte retarder til betonen,
som tillader, at betonen vibreres op til flydende tilstand
igen efter flere timers forløb.

Efterbehandlingen består i fugtisolering og temperatursty-
ring. Fugtisolering med plastfolie eller "curing"-membran
skal hindre vand i at fordampe fra betonen og forhindre, at
vand suges ind i eventuelle revner. Der behøver ikke at til-
føres ekstra vand, hvis betonen er støbt med fugtige grusma-
terialer og med $v/c > 0.4$. Fugtisoleringen skal opretholdes
mindst indtil den kontinuerte kapillarporøsitet er brudt,
jf. tabel 4.3.1. - Temperaturstyringen skal sikre, at beto-

nen opnår tilstrækkelig hærkning og at temperaturforskellene mellem betonens indre og ydre dele ikke bliver for stor, da der ellers kan opstå revner. Dette kan ske, selv i små konstruktioner, hvis afkølingen er meget kraftig. Den maksimalt tilladelige temperaturforskel er af størrelsesordenen 10 å 20°C (se litt. /14/).

TABEL 4.3.1.		
Middel- v/c	Tid ved 20°C til sammen- hængende kapillarporer er brudt.	Anbefalet fugtisoleringstid ved 20°C.
0.40	3 døgn	6 døgn
0.45	7 døgn	10 døgn
0.50	14 døgn	18 døgn
0.60	6 mdr.	-

5. OMDANNELSE UNDER BRAND

Beton er et af de bedste byggematerialer ud fra et brandmæssigt synspunkt. Dette skyldes, at det er ubrændbart, ikke afgiver brændbare gasser og, takket være en stor varmekapacitet og en relativt dårlig varmeledningsevne, bevarer sin styrke i lang tid. Nedenfor gennemgås de omdannelser, som brandpåvirkning kan forårsage på betonkonstruktioner. Det er kun omdannelserne, som behandles. Forudsætningerne for en egentlig brandteknisk dimensionering, såsom styrkens, deformationernes og de termiske egenskabers temperaturafhængighed må søges i speciallitteraturen.

Når beton udsættes for brandpåvirkning i længere tid, sker der først det, at de yderste lag af betonen springer af som følge af den termiske udvidelse i forhold til de indre lag og som følge af damptrykket fra det vand, som fordamper. Dette er mest udpræget ved hjørner af bjælker og søjler. Fugtig beton er mere udsat for disse afskalninger end tør beton.

Yderligere vil betonen efterhånden miste sin styrke, jf. figur 5.1. Dette skyldes revnedannelser, dels hidrørende fra temperaturdifferenser mellem de ydre og de indre dele af prøvelegemet, dels hidrørende fra forskelle i delmaterialernes varmeudvidelse (figur 5.2). Desuden skyldes styrkereduktionen, at cementpastaen dehydreres, efterhånden som temperaturen stiger.

Ved brandpåvirkningen ændrer betonen også farve, jf. figur 5.1. Efter opvarmning til maksimalt 300°C er betonen stadig grå, men efter opvarmning til 300 á 600°C slår farven over til lyserød eller rødbrun. Dette skyldes antagelig, at jernforbindelser i cement og tilslag oxideres. Over 600°C bliver farven atter lysere, hvidgrå. Over 900°C skulle den kunne blive lys grågul.

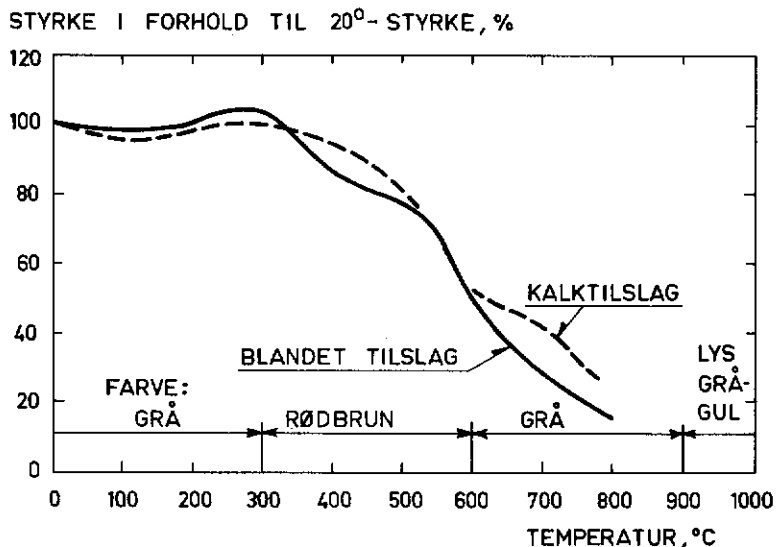


Fig. 5.1. Betons resttrykstyrke og farveskift efter opvarmning. (Forsøg af Zoldners, gengivet efter Neville (1963)).

Der foreligger rapporter fra opvarmning af beton i laboratorium, hvor man ikke har kunnet konstatere nogen farveændringer. Dette kan forklares ved, at opvarmningen kan være foregået uden tilstrækkelig adgang for oxygen, hvorved der kan være blevet dannet farveløse eller grå jernforbindelser.

Hvis de i figur 5.1 viste farveændringer forekommer, kan de anvendes til at bestemme, hvor stor en del af betonen der skal borthugges ved en retablering.

Brandbestandigheden er afhængig af, hvilket tilslag der anvendes. Granit og andre kvartsholdige tilslag har stor varmeudvidelse ved høje temperaturer. Specielt skal fremhæves kvartsomdannelsen ved 573°C , hvor α -kvarts går over til β -kvarts. De store udvidelser giver stor revnetilbøjelighed og

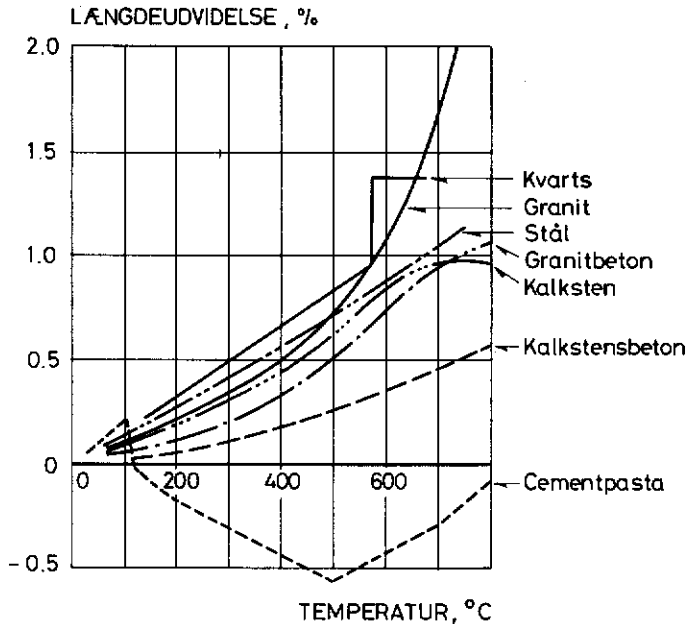


Fig. 5.2. Længdeudvidelse hos delkomponenterne i armeret beton under opvarmning til brandtemperaturer.

stort styrketab. Kalksten regnes til det bedste af de naturlige tilslag på grund af dets mindre varmeudvidelse og på grund af, at det under branden afgiver kuldioxid og herved forbruger varme (jf. figur 5.2).

Keramiske letklinker (exler) er dog bedre som tilslag end naturlige sten. Dette skyldes, at klinkerne ved fremstillingen er brændt ved $1000-1100^{\circ}\text{C}$ og derfor ikke brydes ned ved brand. Desuden har de mindre varmeudvidelse ($4 \cdot 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$) end de naturlige sten ($8 \text{ \AA } 12 \cdot 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$) og lavere varmeledningstal. Som følge heraf bliver varmespændinger og sprængvirkning mindre i letklinkerbeton end i normal beton. Som illustration skal nævnes et engelsk forsøg, hvor almindelige betonbjælker modstod en brand i $1\frac{1}{2}$ time, hvorefter de brød sammen, medens tilsvarende bjælker med letklinkertilslag modstod en lignende brand i 4 timer uden at brydes.

Luftindblanding i betonen virker i retning af at forbedre brandbestandigheden på grund af luftboblernes isoleringsevne.

Armeret beton er den kombination af de almindelige byggematerialer, som tåler de største varmepåvirkninger. Her ligger stålet indlejret i beton, som optager varmen, så stålet ikke taber sin styrke. Jo tykkere dæklaget er, desto længere tid kan konstruktionen tåle varmen. For de tykkeste dæklag kan det være nødvendigt at armere dæklaget med net for at forhindre afskalning, så hovedarmeringen blottes.

Armeringens tilstedeværelse bevirker imidlertid, at armerede bygningsdele kan få dybere revner end uarmerede. Dette skyldes, at armeringen udvider sig ved varmen, samtidig med at betonen svinder på grund af cementens dehydrering, jf. figur 5.2.

Til orientering om den armerede betons gode brandmodstandsevne gengives i tabel 5.1 Bygningsreglementets eksempler på bærende bygningsdele, som må anvendes uden særlig dokumentation eller prøvning af de brandtekniske egenskaber.

Som eksempel på en endnu længere varighed end de i tabellen viste, kan nævnes at en dobbeltarmeret 300 mm betonvæg med 50 mm dæklag regnes brandsikker i 8 timer. Dæklaget skal dog være armeret med trådnæt (2.5 mm tråd, max 100 mm maskevidde).

TABEL 5.1. Brandsikre, bærende bygningsdele af beton.
Uddrag fra Bygningsreglementet af 1977, bilag 4.

"BS 120" betyder "Brandsikker i 120 minutter"

Bærende, lodrette bygningsdele:

<i>BS-vægge 120 og brandvægge</i>	230 mm væg af teglsten (massive eller mangelhulsten), kalksandsten, betonsten, klinkerbetonsten eller molersten. 190 mm væg af betonhulbloksten. 190 mm væg af massive betonbloksten. 150 mm væg af autoklaverede letbetonbloksten. 150 mm væg af letklinkerbetonbloksten. 150 mm væg af elementer af autoklaveret letbeton. 150 mm væg af elementer af letklinkerbeton. 150 mm væg af uarmeret beton. 150 mm væg af dobbeltarmeret beton med mindst 20 mm dæklag. Dobbeltvæg af to BS-vægge 60, bærende, med eller uden mellemiggende luftspalte. Såfremt der anvendes hulrumsfyld, skal dette være ubrændbart.
<i>BS-søjler 120</i>	230×230 mm søjle af teglsten. 300×300 mm armeret betonsøjle med mindst 30 mm dæk- lag. 250×250 mm armeret betonsøjle med mindst 25 mm dæk- lag, armeret med svejset net af mindst 2.5 mm tråd og højst 100 mm maskevidde, placeret 15 mm fra overfladen.
<i>BS-vægge 60</i>	110 mm væg af teglsten (massive eller mangelhulsten), kalksandsten, betonsten, klinkerbetonsten eller molersten. 150 mm væg af dobbeltarmeret beton. 120 mm væg af enkeltarmeret beton med centralt pla- ceret armering. 100 mm væg af autoklaverede letbetonbloksten. 100 mm væg af letklinkerbetonbloksten. 100 mm væg af elementer af autoklaveret letbeton. 100 mm væg af elementer af letklinkerbeton.
<i>BS-søjler 60</i>	Søjle af armeret beton med mindste tværsnit på 40.000 mm ² og et mindste tværmål på 180 mm. 300×300 mm søjle af uarmeret beton.

Bærende, vandrette bygningsdele:

<i>BS-dragere 120</i>	Armeret betondrager med mindst 30 mm dæklag på hovedarmeringen.
<i>BS-dragere 60</i>	Armeret betondrager med mindst 20 mm dæklag på hovedarmeringen. Drager af forspændt beton med mindst 5 mm bøjler pr. 300 mm omsluttende hovedarmeringen og med mindst 25 mm dæklag. Tværmål mindst 80 mm, tværsnitsareal mindst 40.000 mm ² , for dragere sammenstøbt med mindst 80 mm betondæk dog mindst 20.000 mm ² .
<i>BS-etage- adskil- lælses 60</i>	80 mm massiv armeret betonplade. 100 mm dæk af armerede elementer af autoklaveret letbeton. 100 mm dæk af armerede elementer af letklinkerbeton.

I mange brandsituationer opstår de alvorligste ødelæggelser af betonen ikke under selve brandpåvirkningen, men først når man under *slukningen* sprøjter vand på konstruktionen. Det termochok, der da opstår, fremkalder langt større afskalninger end de, der opstår under opvarmningsfasen. Skumslukning giver ikke samme termochok som vandslukning.

I /16/ gives en metode til hurtig bedømmelse af en betonkonstruktions mulighed for genanvendelse efter en brand.

Vedrørende fremstilling af varmebestandig beton henvises til speciallitteraturen, fx /11/.

6. LITTERATUR

- /1/ Biczók, I.: Concrete corrosion - concrete protection. Budapest 1967. ~400 sider. Meget bred fremstilling med svar på en mængde detaljerede spørgsmål.
- /2/ Fagerlund, G.: Significance of critical degress of saturation at freezing of porous and brittle materials. Rapport 40. Inst.f. Byggnadsteknik, Lund 1973.
- /3/ Kjær, Ulla: Beton i aggressivt miljø. Betonteknik 3/03/1974. 8 sider.
- /4/ Anonym: Effect of chemical agents and commonly used protective treatments. J. of ACI 63 (1966):12, s. 1305-1392.
- /5/ Nielsen, A.: Hvid, grøn og sort rust. Nord.Betong 1976, nr. 2, s. 21-24, s. 25-26.
- /6/ Nielsen A.: Betonkonstruktioners levetid. Nord.Betong 1976, nr. 5.
- /7/ Fagerlund, G.: RILEM Recommendation: The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. CBI. Report F. 7607. Stck. 1976.
- /8/ Fagerlund, G.: The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. CBI. Report F. 7608, Stck. 1976.
- /9/ Herholdt, A.D.: Beton og tørsalte. Nord.Betong 1975:1, s. 29-36.
- /10/ Idorn, G.M.: Durability of Concrete Structures in Denmark. Kbh. 1967.
- /11/ Nekrassow, K.D.: Hitzebeständiger Beton. Wiesbaden og Berlin 1961.
- /12/ Nielsen, J. & Skovgaard, P.: Blødt, kulsurt vands indvirkning på betonrør. Nord.Betong 1962/3, s. 235-246.
- /13/ Fagerlund, G.: Non-Freezable water contents of porous building materials. Rapp.42. Inst.f. Byggnadstekn., Lund 1974.
- /14/ Freiesleben Hansen, P.: Hærdeteknologi 2. Dekrementmetoden. Aalborg 1978.
- /15/ Kjær, Ulla & Nepper-Christensen, P.: Alkalireaktioner i beton. Betonteknik 3/02/1973.
- /16/ NORCEM - temahefte 1975: Rehabilitering af betonkonstruksjoner etter brann. Oslo, aug. 1975.