

Skadesramt beton – diagnosticering ved mikrostrukturel analyse

JØRN BREDAL-JØRGENSEN



Bredal-Jørgensen, J.: Skadesramt beton – diagnosticering ved mikrostrukturel analyse. *Dansk geol. Foren., Årsskrift for 1986*, side 7–15, København, 1. juni 1987.

Analysis of deteriorated concrete evolves from a detailed knowledge of the hydration of ordinary portland cement. Chloride attack on paste constituents seems to evolve through a sequence of microstructural imprints. The leaching of paste constituents and the process of chloride attack are reviewed in light of microstructural (textural) analysis of deteriorated concrete.

Jørn Bredal-Jørgensen, AEC Rådgivende Ingeniører A/S, Holte Midtpunkt 23–3, DK-2840 Holte, 21. oktober 1986.

Introduktion

Geologer har på forskellig vis deltaget i undersøgelser af cement og beton i de sidste 90 år. Naturligvis har geologer stået for efterforskning og vurdering af tilslagsmaterialer til betonen samt for undersøgelser af råstoffer til cementproduktionen, men geologer har også arbejdet med analyse af klinkerprodukterne. Geologers arbejde med undersøgelse af det færdige produkt – betonen – er derimod af lidt nyere dato.

Beton består dels af de almindeligt forekommende bjergarter og mineraler – i form af tilslagsmaterialer – dels af et netværk af krystalline og gel-lignende stoffer (klinkerfaser og hydratiseringsprodukter), der udgør bindemiddelstrukturen. Det er undersøgelsen af denne mikrostruktur, der har nødvendiggjort anvendelsen af geologiske arbejdsmetoder og -redskaber.

Med det stigende antal skader på betonbyggerier er der sket en holdningsændring fra en fokusering på betonens styrke til en forståelse for omgivelsernes samspil med og indflydelse på betonen. Denne holdningsændring har medført en øget interesse og en voksende erkendelse af behovet for petrografiske undersøgelser af beton. Brugen af geologer i denne del af materialevidenskaberne er derfor naturlig, da der er store ligheder mellem både de processer, der resulterer i beton og bjergarter, og de processer, der nedbrænder dem.

I denne artikel gives to eksempler på, hvorledes petrografiske undersøgelser er brugt til diagnosticering af skadesramt beton og til en kvalitativ vurdering af skadesomfanget.

Historisk oversigt

Det var den svenske geolog A. E. Törnebohm, der i 1897 gav klinkerfaserne navne (Törnebohm 1897), men en petrografisk undersøgelse af ødelagt beton fandt først sted i 1923 i U.S.A. (Poulsen 1958).

Med T. E. Stantons opdagelse – i Californien i 1940 – af den skadelige effekt af reaktionerne mellem alkalier og opalholdige tilslagsmaterialer i betonen, opstod behovet for petrografiske analyser af betonen.

I den første lange tid synes betonpetrografen at være koncentreret om undersøgelserne af de såkaldte alkalikiselreaktioner – således også i Danmark ved Alkaliudvalgets omfattende undersøgelser, der blev udført af blandt andre P. Nerenst, G. M. Idorn og E. Poulsen. G. M. Idorns doktordisputats fra 1967 (Idorn 1967) bryder dog dette mønster, og betonpetrografi indtager senere en vigtig plads i forsknings- og konsulentarbejdet på Betonforskningslaboratoriet (BFL) i

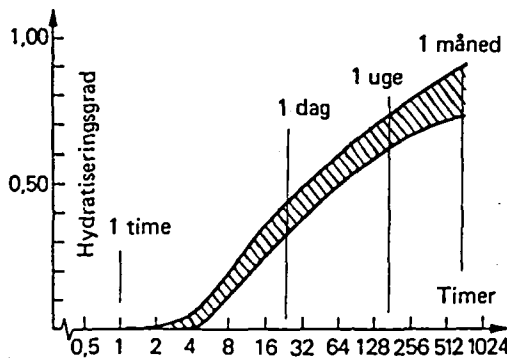


Fig. 1. Kurven viser variationsbredden i hydratiseringsforløbet for forskellige svenske cementer. Cementerne har vand/cementforhold på 0.58 og er vandlagrede ved 20°C. Variationen afspejler forskelle i cementernes kemiske sammensætning.

Hydration sequences for different swedish ordinary portland cements. w/c-ratio 0.58, 20°C moist cured. The different sequences of hydration reflects differences in the chemical composition. (based on Byfors 1980).

Karlstrup. Da BFL blev nedlagt, fortsatte forskerne deres arbejde på andre institutioner og udbredte således kendskabet til betonpetrografi yderligere.

I 1977 begyndte en bredt sammensat arbejdsgruppe på Teknologisk Institut at udføre betonpetrografiske skadesundersøgelser ved hjælp af tyndslib. Siden er metoderne gradvis blevet udbyggede, og anvendes nu rutinemæssigt ved 8 private og offentlige laboratorier i Danmark. (Jensen 1986).

Cementen og dens hydratisering

Det er en nødvendig forudsætning for en skadesanalyse, at cementpastaens normale struktur er kendt. Og kendskabet til cementpastaens mikrostruktur hænger uløseligt sammen med forståelsen af dens dannelse.

Cement er en gammel betegnelse for et binde-middel. I denne sammenhæng bruges betegnelsen cement alene som synonym for det hydrauliske bindemiddel portlandcement, der ved blanding med vand binder og hærder til et fast materiale – cementpastaen – gennem en kompleks serie af reaktioner.

Portlandcement fremstilles ved at brænde en finformalet og homogeniseret blanding af kalk og ler. Brændingen foregår ved 1400–1500°C, og der sker en delvis opsmeltning, en sintring, hvorved klinkerkomponenterne dannes. Det nedkølede

produkt tilsættes under formaling nogle procent gips.

Portlandcement består hovedsagelig af faserne C_3S , C_2S , C_3A og C_4AF . Sammensætningen af de forskellige cementtyper varierer inden for ret vide rammer, men portlandcementerne indeholder altid de fire hovedfaser:

Tabel 1.

Klinker fase	Kemisk formel	*Cement nomenklatur	vt% af cement
Tricalcium silikat	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S	52–83
Dicalcium silikat	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S	5–30
Tricalcium aluminat	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A	0–9
Tetracalcium aluminoferrit	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF	0–11

*C=CaO, S=SiO₂, A=Al₂O₃, F=Fe₂O₃, H=H₂O, C=CO₂ og Š=SO₃.

De enkelte klinkerfaser reagerer på forskellig måde og med forskellig hastighed med vand. Det betyder, at cementpastaen er et dynamisk system, der ændrer sig med tiden og derfor let kan påvirkes af det omgivende miljø.

Som det fremgår af Fig. 1. fortsætter hydratiseringen over et længere tidsrum, og selv i meget gamle betoner vil hydratiseringsgraden oftest være under 1,0.

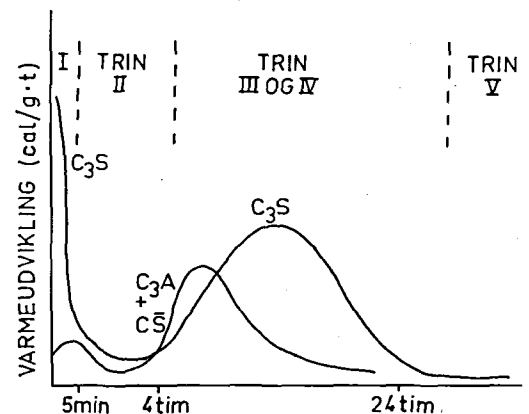


Fig. 2. Varmeudviklingen som en funktion af tid for C_3S og C_2S . Varmeudviklingen for en almindelig portlandcement vil stort set følge kurven for C_3S , dog med en ekstra top i slutningen af trin IV, hvor AFt reagerer og omdannes til AFm.

Rate of heat evolution as a function of time for C_3S and C_2S -phases. The curve for ordinary portland cement is similar to the curve for C_3S except for a peak at the end of stage IV where AFt reacts to form AFm. (based on Copeland & Kantro 1964; Ogawa et al. 1980).

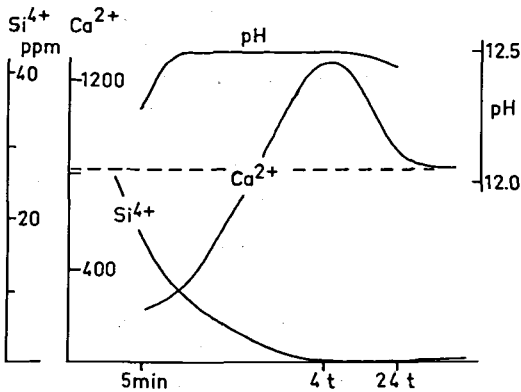


Fig. 3. Skematisk fremstilling af Ca^{2+} og Si^{4+} koncentrationen i den vandige fase under C_3S hydratisering. Med vandret stiplede linje er indtegnet mætningskoncentrationen for $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (som Ca^{2+}) i vand.

The change of concentration of Ca^{2+} and Si^{4+} ions in the liquid phase during the hydration of C_3S . The broken line is the saturation level with respect to $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (as Ca^{2+}). (based on Ogawa et al. 1980).

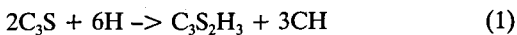
C_3S

C_3S hydratisering er ofte brugt som model for portlandcementernes hydratisering. På Fig. 2 er varmeudviklingen vist for C_3S reaktion med vand; kurven for portlandcement vil være næsten identisk med C_3S -kurven (Skalny & Young 1980).

Da C_3S ydermere er hovedkomponenten i portlandcement (Tabel 1) og samtidig er ansvarlig for hovedparten af den hærtnede cementpastas styrke, volumen-stabilitet o.s.v., beskrives hovedtrækkene i hydratiseringen af C_3S , mens de øvrige klinkerfasers hydratisering kun omtales kort.

Der eksisterer ikke fuld enighed om alle detaljer i processen, men det falder uden for rammerne af en oversigt som denne at diskutere dem. Da deres betydning for skadesanalysen ydermere synes at være ringe, refereres kun en model.

C_3S reagerer øjeblikkelig ved kontakt med vand. Den samlede reaktion kan tilnærmelsesvis skrives:



$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ repræsenterer de næsten amorfe calcium-silikat-hydrater, der udgør betonens bindemiddel. De har meget varierende sammensætning, og

benævnes derfor ofte blot C-S-H. CH er en relativt ren portlandit (Lachowski et al. 1980).

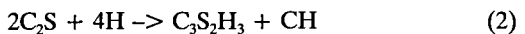
Kurven over reaktionens varmeudvikling – Fig. 2. – viser en kortvarig exoterm reaktion – trin I i hydratiseringsforløbet. Ved reaktionen dannes en semi-fluid gelatinøs hinde. Denne hinde nedsætter reaktionshastigheden – trin II på Fig. 2. Der sker kun en langsom hydratisering i denne periode, hvor vand vandrer gennem den gelatinøse hinde og reagerer med det stadig mindre C_3S -korn. Samtidig vandrer OH^- og Ca^{2+} ud i den omgivende vandfase (Fig. 3).

II trins afslutning sættes ofte, hvor der iagttages en krystallisation af portlandit. Som det fremgår af Fig. 3 er der ved begyndelsen af trin III og IV en tydelig overmætning af Ca^{2+} i vandfasen; ionkoncentrationen er nu høj nok til at nukleationskernerne kan vokse. Endvidere begynder C-S-H-geler at dannes i form af fibre og delvis krøllede lag – typisk 30–40 Å tykke og få my lange. Det er sammenvævningen af disse fibre og lag, der udgør bindemiddelstrukturen, cementgelen.

Den tidlige CH danner hexagonale flager mellem C-S-H-gelerne. Senere vokser CH dendritisk vinkelret på c-aksen – hvor der er plads i strukturen (Mindess & Young 1980; Groves 1981).

C_2S

Reaktionen mellem C_2S og vand foregår meget langsommere end hydratiseringen af C_3S .



Reaktionens forløb og dens produkter har stor lighed med hydratiseringen af C_3S . På grund af den store forskel i reaktionshastighed mellem C_3S og C_2S vil der i unge cementpastaer være overvægt af uhydratiserede C_3S , mens det omvendte er tilfældet for gamle pastaer.

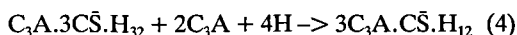
C_3A

Reaktionen mellem C_3A og vand er meget hurtig, og reaktionsprodukterne (calcium-aluminat-hydrater) er synlige inden for få minutter (Locher 1980). Disse danner en stiv struktur af gennemgående krystaller, der umuliggør videre bearbejdning af betonen. Derfor indformales råklinkerne med nogle procent gips ($\text{C}_2\text{S}_2\text{H}_2$) under cementfremstillingen. Reaktionsforløbet kan dermed tilnærmelsesvis beskrives ved:



Produktet $C_3A.3\bar{C}\bar{S}.H_{32}$ har stor lighed med mineralet ettringit (Lachowski et al. 1980), men betegnes AFt-fase på grund af de store kemiske variationer. AFt-fasen danner submikroskopiske, hexagonale krystaller på overfladen af C_3A , og det gennemgående netværk af krystaller undgås.

På et senere tidspunkt vil AFt-fasen kunne omdannes til AFm-fase:



C_4AF

Reaktionen mellem C_4AF og vand er en meget langsom proces og ligner reaktionen mellem C_3A og vand. Reaktionen synes uden betydning for diagnosticering af skadesramt beton.

Konklusion

I tyndslib af uskadet beton vil man altså forvente at finde en homogen fordeling af portlandit, en ensartet tæthed af C-S-H og kun en submikroskopisk AFt-fase, der vil være jævnt fordelt i pastaen.

Cementpastaens morfologi

I polarisationsmikroskopet vil der i den hærdnede cementpasta således ses uhydratiserede og delvis hydratiserede klinkerfaser og desuden hydratiseringsprodukter. Endelig vil der være et stort antal porer.

Den unge cementpasta vil nogenlunde afspejle den givne udgangssammensætning og er domineret af C_3S -fasen, se Tabel 1. Desuden vil antallet af uhydratiserede klinker være højt (Fig. 1).

I den gamle cementpasta vil der kun være få uhydratiserede klinker tilbage, og der vil endvidere være nogenlunde lige mange C_3S og C_2S , iblandt endog flest C_2S .

Hydratiseringsprodukterne består af C-S-H-geler, portlandit, AFt-fase og AFm-fase, som anført i reaktionerne (1)–(4). C-S-H udgør 50–66 volumen % af den hydratiserede pasta (Taylor & Newbury 1984) og danner et netværk af sammenvævede fibre og krøllede lag. Gelerne er isotrope og submikroskopiske, og i det petrografiske mi-

kroskop ses en hvidbrun til mørkebrun tæt masse.

Portlandit (CH) udgør 20–25% af pastavolumenet (Taylor & Newbury 1984) og har en meget varierende morfologi, der især er påvirket af tilsetningsstoffer (Berger & McGregor 1972) og hydratiseringstemperaturen (Bache et al. 1966; Groves 1981). I det enkelte tyndslib er morfologien dog ret ensartet, og CH danner let genkendelige, og op til flere hundrededele mm store krystaller.

AFt og AFm udgør mindre bestanddele af den modne pasta. De danner hexagonale prismer henholdsvis flager, men dimensionerne er oftest kun få my, og faserne observeres ikke i normale cementpastaer.

Porerne i cementpastaen opdeles traditionelt i gelporer (mindre end 10 nm) og kapillarporer (10–10000nm). Gelporerne er en del af gelerne. De udgør ca. 28 volumenprocent af det totale volumen af geler, men er uden interesse i denne sammenhæng.

Kapillarporerne er derimod interessante. Under hydratiseringen udgør kapillarporerne den del af cementpastaen, der endnu ikke er udfyldt af hydratiseringsprodukter. Kapillarporøsiteten mindskes altså ved fortsat hydratisering. Ydermere er kapillarporøsiteten afhængig af vand/cement-forholdet. v/c-forholdet er vægtforholdet mellem vand og cement i betonblandingen. Forholdet fastlægges inden støbningen, under hensyntagen til de krav man stiller til den færdige betons egenskaber, og det andrager typisk værdier mellem 0,35 og 0,70. Kapillarporøsiteten er dermed både en funktion af v/c-forholdet og af hydratiseringsgraden (Fig. 4).

Både hydratiseringsgrad og v/c-forhold er vigtige parametre for den færdige beton, men med normale tyndslib, der er 25 my tykke, vil det kun være en meget lille del af kapillarporerne, der kan iagttages. Ydermere sætter selve mikroskopets opløsningsevne på 0,2 my en grænse. Disse vanskeligheder har man overvundet ved at imprægnere tyndslibene med et fluorescein; – som regel Hudson Yellow. Fluoresceinet består af så små partikler, at de kan imprægnere kapillarporerne, når betonen forinden er udtørret. Da de fluorescerende områder i tyndslibet således bliver lysende objekter, kan det submikroskopiske kapillarsystemet dermed kvantificeres ud fra intensiteten af fluorescensen.

Prøvebehandling

Hele prøvetagningsproceduren minder om traditionelt geologisk feltarbejde. Blot arbejdes der hovedsagelig med udborede cylindre i den del af betonpetrografen, der omhandler skadesramt beton; det er vigtigt at bevare betonens oprindelige mikrostruktur og ikke introducere f.eks. nye revner.

De udborede cylindre gennemskæres (oftest i aksialplanet), og mens den ene del af betoncylindren benyttes til kemiske analyser, fluorescein-imprægneres den anden halvdel, og der fremstilles tyndslib og polerslib.

Skadesramt beton

Skader kan defineres som ændringer i betonens struktur, der medfører, at betonen bliver dårligere end foreskrevet i bygværkets stipulerede levetid.

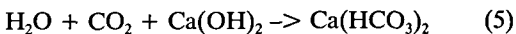
Skadestegn iagttages på betonens overflade. De hyppigst forekommende skadestegn er revner, kalkgardiner, rustudfældninger, springere og områder med delaminering.

I nedenstående eksempler på skadesramt beton forudsættes for overskuelighedens skyld, at der er tale om en beton, der er homogen på alle niveauer – mikro som makro. Endvidere omtales de udvalgte skadesårsager hver for sig, selvom der oftest er tale om synergetiske mekanismer.

Pastaudludning

Hvor surt eller blødt vand gennemsiver beton, vil det bl.a. opløse portlandit, CH. På overfladen af betonen vil portlandit carbonatisere, og udfældningerne får ofte form af kalkgardiner eller drypsten.

For gennemsivende surt vand kan nedbrydningsmekanismen beskrives ved reaktionen:



Det dannede bicarbonat er letopløseligt. Bicarbonatet kan udluges med vandet, og udfældes på betonens overflade som kalkgardiner eller drypsten (Poulsen et al. 1985). Ved fortsat vandbelastning vil endog C-S-H, der er betonens bindemiddel, dekomponere, og CH-delen ligeledes udluges. Endelig vil de sværere opløselige AFt-faser

mobiliseres, og de vil ofte udfældes i revner og tilstødende luftporer (Fig. 5).

På fig. 5 og 6 vises en vandbelastet beton. Cementpastaen i betonen er homogen og tæt med et jævnt fordelt indhold af små primære CH. Der ses relativt få uhydratiserede og delvis hydratiserede C₃S og C₂S i pastaen.

I en smal zone (ca. 3mm) om en gennemgående revne er cementpastaen stærkt præget af udludning. Her ses næsten ingen uhydratiserede C₃S og C₂S, og man skulle derfor forvente en så tæt C-S-H struktur, at CH ville danne små krystaller (Groves 1981). Alligevel optræder CH som mange og relativt grove, aflange korn. Ved fluorescensmikroskopi ses en forhøjet kapillarporøsitet i pastazonen, og de mange store krystaller af CH tolkes derfor som sekundære krystaller, der delvis stammer fra andre udludede områder i betonen.

Endelig ses neg af nåleformede AFt-fase i luftporer i det udludede område. Hvor den primære AFt-fase som nævnt danner jævnt fordelte submikroskopiske krystaller i cementpastaen, er der med de negformede udfældninger tydeligvis tale om en opkoncentrering af sekundære krystaller.

Ved analyser af skader er kvantificeringen af deres omfang et stort problem, idet kvantificeringen ideelt skulle rumme både en parameter for den aktuelle ødelæggelse (nedsættelse af tryk-

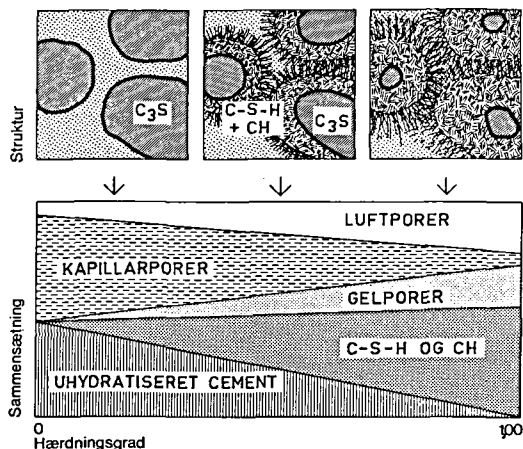


Fig. 4. Skematisk fremstilling af gelstrukturens udvikling sammenholdt med udviklingen i porestrukturen ved stigende hydratiseringsgrad.

The evolution of C-S-H (above) is compared to the evolution of the structural elements in the paste (below). (based on SBI-anvisning 125: Vinterstøbning af beton, 1982).

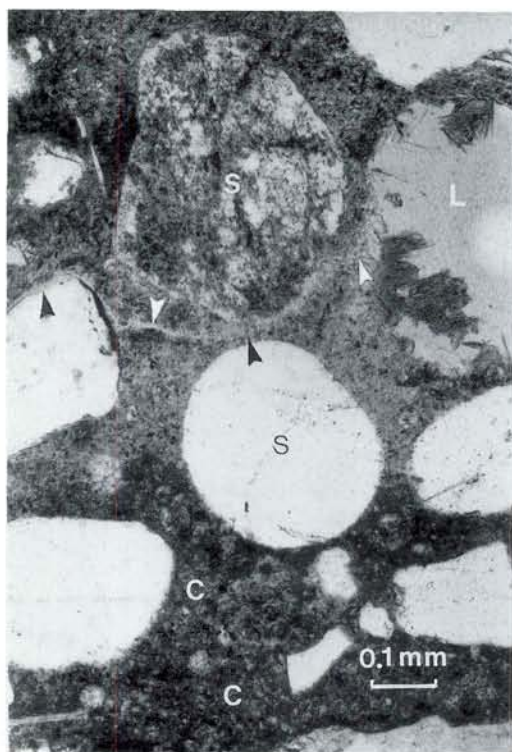


Fig. 5. Billedet er optaget med parallelle polarisationsfiltre og viser en tæt cementpasta (C) med sandtilslag (S) af kvarts og feldspat. En tværgående revne (pil) udmunder i en luftpore (L). Omkring revnen ses en lysere farvet zone i cementpastaen.

The dense and homogeneous cement paste (C) with quartz and feldspar aggregate particles (S) is traversed by a crack (arrow). Around the crack light coloured cement paste is seen. Plain light.

styrke f.eks.) samt en estimering af byggeriets restlevetid. Begge dele rummer stadig uløste problemer. Teoretisk set er det dog muligt at beregne formindskelsen i betonens trykstyrke, f.eks. ved brug af Feret's formel (Neville 1981), hvis der er tale om en homogen pastaudludning. Selvom dette næsten aldrig er tilfældet, antyder enkelte resultater fra trykprøvninger af pastaudludet beton dog, at der kan slækkes på kravet om en homogen udludning (Bredal unpubl. data).

Armering og armeringskorrosion

Betonens trykstyrke fastlægges ved blandingen af betonen. Men som for bjergarters vedkommende er betonens evne til at modstå trækkræfter meget ringe. Af styrkemæssige grunde forsynes kon-

struktionselementerne i betonbygværket derfor med armeringsstænger gennem de områder, der udsættes for træk.

Rustudfældninger – eller rettere rustimpregneret cementpasta – på betonens overflade samt afsprængninger af betondæklaget over armeringsstængerne er derfor altid alarmerende skades tegn.

Betonen beskytter normalt armeringen mod iltning. Porevæsken i beton er en mættet opløsning af $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (samt KOH og NaOH), med en pH-værdi på 12,5–13,0. I dette stærkt alkaline miljø dannes hurtigt en tynd beskyttende film af jernoxid på metallets overflade, og armeringsstængerne siges at være passiverede (Page et al. 1986).

Nedbrydningen af passiveringsfilmen kan ske,

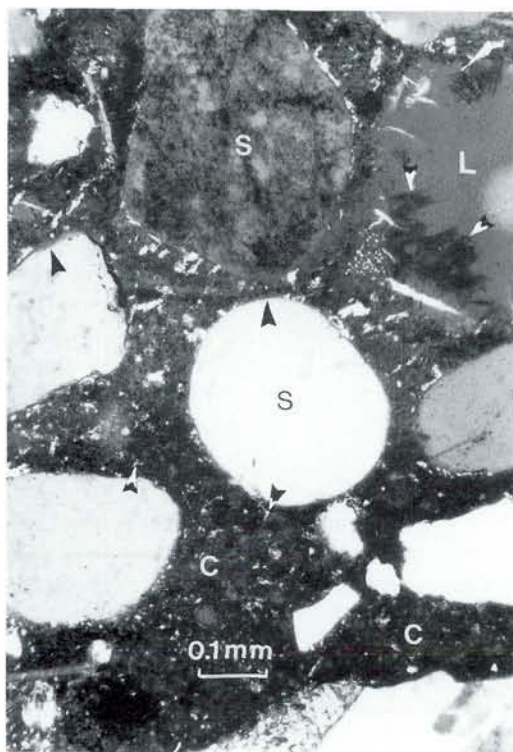


Fig. 6. Billedet er optaget med krydsede polarisationsfiltre samt gipsblad indskudt i strålegangen. Billedet dækker samme område som Fig. 5 og viser jævnt fordelte små CH (pil) i den tætte cementpasta. I den lysere, udludede zone ses mange og tydeligt større CH. I luftporen ses lange CH samt flere negformede aggregater af nåleformet Aft-fase (pil).

Cross polarised light with gypsum plate. The same area as shown on Fig. 5. CH (arrow) are small and evenly distributed in the unaffected cement paste in contrast to many large CH in the leached zone. Sheaf-like bundles of Aft (arrow) are easily distinguished in the air void.

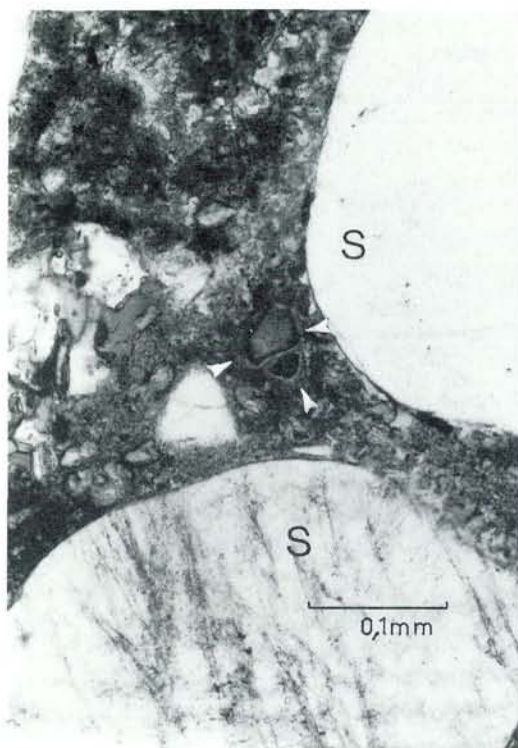


Fig. 7. Billedet er optaget med parallelle polarisationsfiltre og viser C₂S med en tydelig hydratiseringszone (pil) omkring den delvis hydratiserede klinkerfase.

A conspicuous hydration zone surrounds the C₂S-phase. Plain light.

enten ved at cementpastaen carbonatiserer, eller ved tilstedeværelse af en kritisk mængde chloridioner i betonen.

Carbonatiseringen af cementpastaen er en naturlig forvittringsproces. Processen foregår som en reaktion mellem luftens CO₂ og hydratiseringsprodukterne CH og C-S-H. Carbonatiseringen foregår i en tynd vandhinde om hydratiseringsprodukterne og omdanner først portlandit til calcit (CĀ), således at det alkaliske miljø neutraliseres:



Reaktionen foregår fra betonens overflade og ind, og i overensstemmelse med Ficks 1. lov (Poulsen et al. 1985). Ved betonens fortsatte eksponering for luftens CO₂ vil også C-S-H dekomponere, og cementpastaen fremstår porøs og per-

meabel, fordi det oprindelige netværk af C-S-H-geler delvis erstattes af diskrete aggregater af calcit.

Carbonatiseringen af cementpastaen bevæger sig således som en front ind i betonen og når armeringen samtidig over større områder. Det medfører, at rustdannelsen også kan ske over større områder, hvilket igen medfører, at afsprængninger af betondæklaget eller rustimpregnering af cementpastaen også er udbredte.

Chloridangreb

Chloridangrebet har et helt andet forløb. Chlorider kan tilføres betonen ved blandedprocessen i form af urenheder i vandet eller på tilslagsmaterierne. Dels kan betonbygværker modtage chlorider fra bl.a. havgus, tørsaltning og svømmebadsvand. Med den store opmærksomhed chloridinitieret korrosion har fået, føres der idag nøje regn-

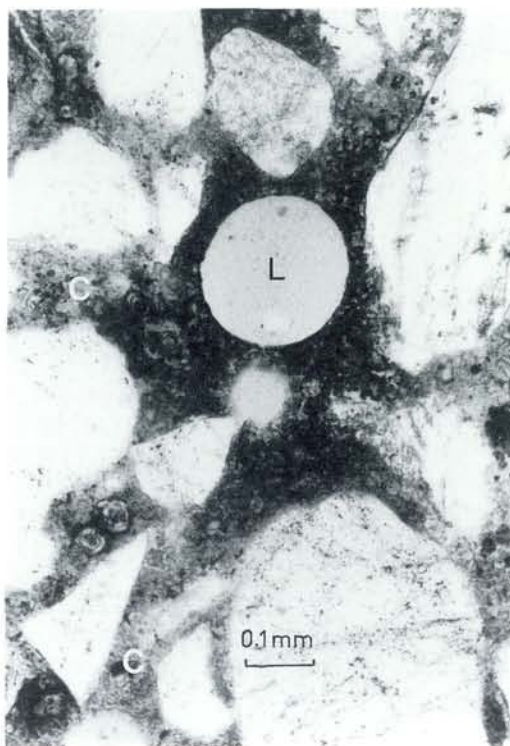


Fig. 8. Billedet er optaget med parallelle polarisationsfiltre. Der ses overvejende kvartstilslag i en lys cementpasta (C). I en zone om luftporen (L) ses en misfarvning af cementpastaen.

Discoloration and partial disintegration of the cement paste is restricted to a narrow zone around the air void. Plain Light.

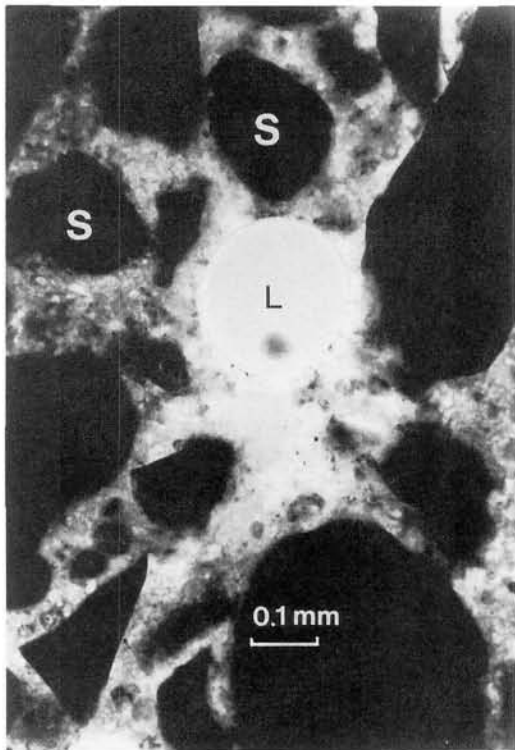


Fig. 9. Fluorescencemikroskopi af samme område som Fig. 8. Billedet viser tydeligt forhøjet kapillarporøsitet (i form af større lysintensitet) i den misfarvede cementpasta.

The discolored cement paste from Fig. 8 shows a distinct increase in capillary porosity. Fluorescence microscopy.

skab over den friske betons chloridindhold. Interessen samler sig derfor om chlorider, der er tilført udefra (f.eks. tørsalt).

Når chlorider trænger ind i betonen, er der ingen chloridfront med veldefineret indtrængningsdybde, men i stedet en gradvist aftagende koncentration indad. Chloridindtrængningen beskrives dermed af Fick's 2. lov (Poulsen et al. 1985).

Chloridionernes virkning på armeringen har form af meget lokale, men til gengæld intense angreb – såkaldt grubetæring (Page et al. 1986). Det medfører, at der, ved chloridinitieret korrosion, kun dannes små mængder korrosionsprodukter og således kun små og lidet synlige rustimprægnede områder på betonens overflade.

Det er derfor af betydning, at det har vist sig, at chloridioner påvirker cementpastaen, og at der opstår karakteristiske morfologiske ændringer, der kan iagttages ved rutinemæssige undersøgelser af tyndslib.

Nedenstående morfologiske ændringer er tyde-

ligvis en funktion af chloridkoncentrationen, men det mangler endnu at blive fastlagt, i hvilket omfang morfologien er en følge af chloridpåvirkningens varighed. De anførte koncentrationer er derfor kun foreløbige rammer.

Chloridgenereret morfologi

Ved lave koncentrationer af chlorider ses en normal cementpasta med et net af jævnt fordelt CH. De uhydratiserede C_2S -faser er dog stedvis angrebet i overfladen og viser afvigende, svage egenfarver. Denne morfologi opstår typisk, hvor chloridkoncentrationen er lavere end de kritiske værdier, der sættes for passiveringsfilmens nedbrydning og rustangrebets begyndelse ($<0,6-0,8$ kg Cl/m^3 beton).

Ved højere koncentrationer af chlorider ses tydelige hydratiseringszoner omkring en del af C_2S -faserne (Fig. 7). Ydermere konstateres lokale ændringer i CH-fasens habitus (Berger & McGregor 1972), ledsaget af en lavere koncentration af CH (Richartz 1969). Som nævnt under cementens hydratisering er C_2S -fasens reaktion med vand en meget langsom proces. Hydratiseringszoner om C_2S må således tilskrives chloridionernes accelererende virkning, men den nøjagtige mekanisme er ukendt (Skalny & Young 1980).

Kun ved meget høje chloridkoncentrationer (typisk >7 kg Cl/m^3 beton) ses en disintegrering af cementpastaen, og ofte kun lokalt om luftporer (Fig. 8 og 9), hvor chloridkoncentrationen er højest (Hoffmann 1984; Midgley & Illston 1984). Ud over en misfarvning af cementpastaen (Fig. 8) ses der en tydeligt forhøjet kapillarporøsitet ved fluorescencemikroskopi (Fig. 9). CH-fasen mangler helt, og C-S-H-gelerne er delvis erstattet af globulære mørke aggreger, hvis kemiske sammensætning ikke kendes.

Som nævnt er de ovenstående grænser foreløbige, og mindre justeringer vil sandsynligvis forekomme. Det vil dog aldrig være muligt at erstatte de våd-kemiske analyser af beton. Metodens betydning ligger i muligheden af at opdage chloridindtrængning under rutinemæssige undersøgelser af tyndslib af beton.

Konklusion

Med kendskab til portlandcement hydratisering og dens mikrostrukturelle udvikling er det, ud fra

betonpetrografiske undersøgelser, muligt at diagnosticere nogle af de skadesårsager, der bidrager til overraskende nedsættelser af betonbygværkers levetid. Med kendskab til skadesårsagen følger viden om skademekanismen, og det vil ofte være muligt at foreskrive metoder til at afhjælpe skaderne samt forhindre deres videre udvikling på baggrund af de petrografiske undersøgelser.

Tak

Jeg vil gerne takke ingeniør Niels Thaulow for god hjælp og lærerige diskussioner ved projektets start. Ingeniørdocent Ervin Poulsen har ydet mig en venlig og aldrig svigtende kritik i talrige diskussioner. Endelig tak til Louise Bagge og Camilla Norlander samt specielt til lic.scient. Marianne Bagge Johansen, der har ydet værdifuld kritik på forskellige stadier af manuskriptets færdiggørelse, uden dog at andre end jeg selv hæfter for dets indhold. Til Egmont H. Petersens Fond rettes en varm tak for financieret støtte.

Litteratur

- Anderson, A. R. & Black, R. W. 1985: Questioning the Limit. *Concrete Int.*, 7, No 9, 28-34.
- Bach, F. 1981: *Introduktion til bærende konstruktioner*. A.B.K., D.T.H., 1-134.
- Bache, H. H., Idorn, G. M., Nepper-Christensen, P. & Nielsen, J. 1966: Morphology of Calcium Hydroxide in Cement Paste. Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete, *Special Report 90*, Highway Research Board, Washington, 154-174.
- Berger, R. L. & McGregor, J. D. 1972: Influence of Admixtures on the Morphology of Calcium Hydroxide Formed During Tricalcium Silicate Hydration. *Cem. Concr. Res.*, 2, 43-56.
- Brown, P. W., Franz, E., Frohnsdorff, G. & Taylor, H. F. W. 1984: Analyses of the aqueous phase during early C₃S hydration. *Cem. Concr. Res.*, 14, 257-262.
- Byfors, J. 1980: *Plain Concrete at Early Ages*. Cement- och Betonginstitutet, Stockholm, 1-464.
- Copeland, L. E. & Kantro, D. L. 1964: Chemistry of Hydration of Portland Cement at Ordinary Temperature, in: Taylor, H. F. W. ed.: *The Chemistry of Cements*, Academic Press, London, 313-370.
- Groves, G. W. 1981: Microcrystalline Calcium Hydroxide in Portland Cement Pastes of Low Water/Cement Ratio. *Cem. Concr. Res.*, 11, 713-718.
- Hoffmann, D. W. 1984: Changes in Structure and Chemistry of Cement Mortars Stressed by a Sodium Chloride Solution. *Cem. Concr. Res.*, 14, 49-56.
- Idorn, G. M. 1967: *Durability of Concrete Structures in Denmark*. Dansk Beton Institut, Holte, 1-208.
- Jensen, J. H. 1986: *Strukturanalyse af hærdnet beton*. ATV Erhvervsforskerprojekt EF 126, PC-laboratoriet A/S.
- Lachowski, E.E., Mohan, K., Taylor, H. F. W. & Moore, A. E. 1980: Analytical Electron Microscopy of Cement Pastes: II, Pastes of Portland Cements and Clinkers. *J. Am. Ceram. Soc.*, 63, 447-452.
- Locher, F. W. 1980: Hydration of Pure Portland Cements. *7th Int. Conf. Chem. Cem.*, Paris, 49-55.
- Midgley, H. G. & Illston, J. M. 1984: The Penetration of Chlorides into Hardened Cement Pastes. *Cem. Concr. Res.*, 14, 546-558.
- Mindess, S. & Young, J. F. 1981: *Concrete*. Prentice-Hall, INC., New Jersey, 1-671.
- Neville, A. M. 1981: *Properties of Concrete*. Pitman Publishing Ltd., London, 1-779.
- Ogawa, K., Uchikawa, H., Takemoto, K. & Yasui, I. 1980: The Mechanism of the Hydration in the System C₃S-pozzolana. *Cem. Concr. Res.*, 10, 683-696.
- Page, C. L., Short, N. R. & Holden, W. R. 1986: The Influence of Different Cements on Chloride - Induced Corrosion of Reinforcing Steel. *Dansk Betonforening*, 27,7-15.
- Poulsen, E. 1958: Preparation of Samples for Microscopic Investigation. *Alkaliudvalgets Progress Report M1*, SBI/ATV København, 1-46.
- Poulsen, E., Andersen, B., Bach, F., Bredal-Jørgensen, J. & Mørup, H. 1985: *13 betonsygdomme. Hvordan de opstår, forløber og forebygges*. Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm, 1-192.
- Richartz, W. 1969: Die Bindung von Chlorid bei der Zementerhärtung. *Zement-Kalk-Gips*, 22, 447-456.
- Schwiete, H. E., Ludwig, U. & Albeck, J. 1970: Bindung von Kalziumchlorid in den aluminatisch-ferritischen Klinkermineralien bei der Hydratation. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar*, 17, 369-371.
- Skalny, J. & Young, J. F. 1980: Mechanism of Portland Cement Hydration. *7th. Int. Conf. Chem. Cem.*, Paris, II1/4-II1/45.
- Taylor, H. F. W. & Newbury, D. E. 1984: Calcium Hydroxide Distribution and Calcium Silicate Hydrate Composition in Tricalcium Silicate and -Dicalcium Silicate Pastes. *Cem. Concr. Res.*, 14, 93-98.
- Törnebohm, A. E. 1897: *Über die Petrographie des Portland-Cements*. Verein Skandinavischer Portland-Cement-Fabrikanten. 1-39.