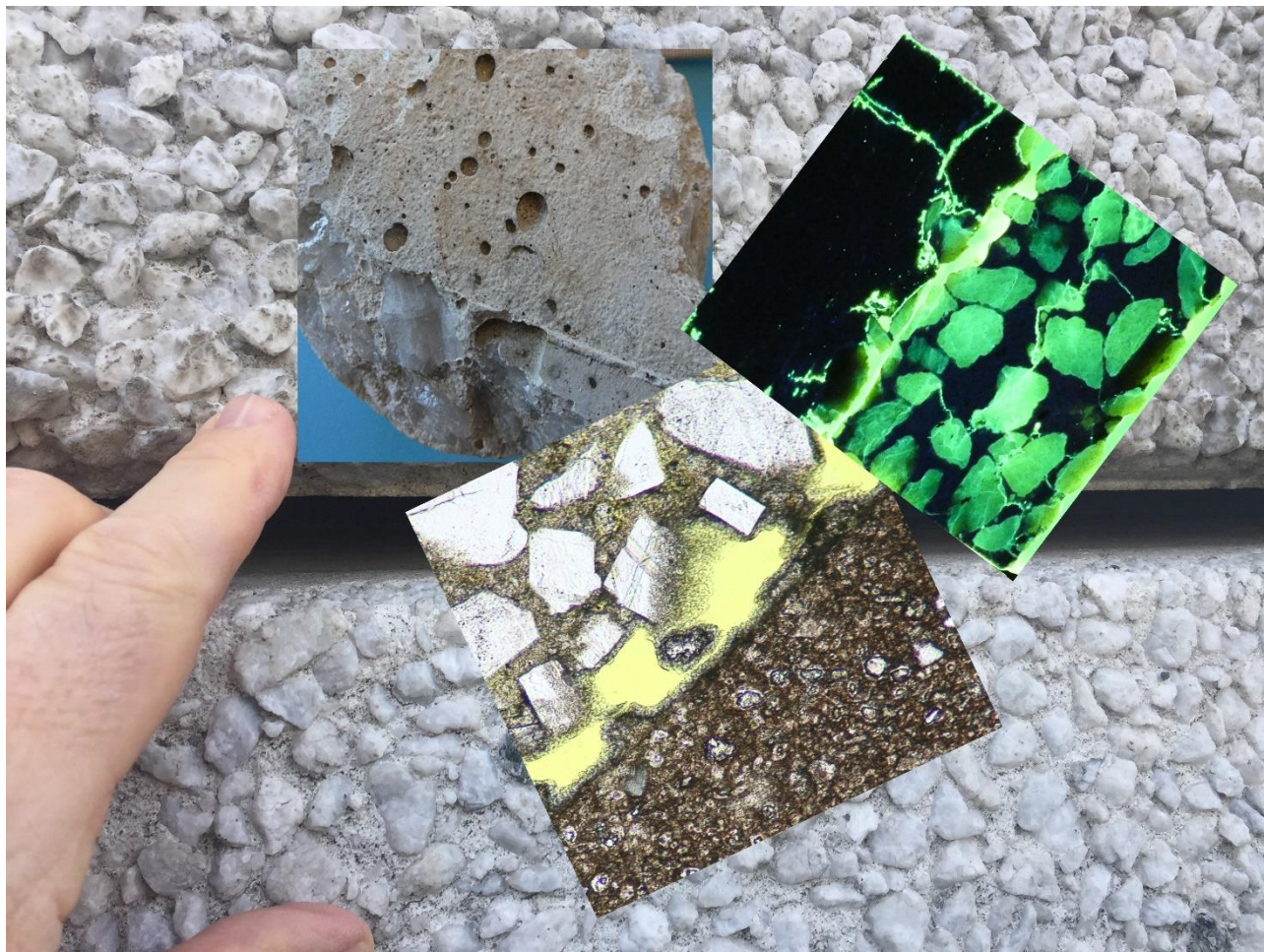


10.6 Mikroskopi af beton

Af Kirsten Eriksen



Figur 1: Strukturanalyse anvendt på prøver fra facadeelementer, for undersøgelse af årsag til lokalt forekommende afskalninger og armeringskorrosion i betonen tæt på fugerne. Det blev i dette tilfælde fundet, at elementkanter i områder med skader var støbt mangelfuldt mod en overforskalling, og at der her forekom defekter i form af hulrum mellem elementbetonen og et reparationsmateriale.

Anvendelse af polarisationsmikroskopi til analyse af cement, kalk og stenmaterialer er blevet anvendt som analysemetode fra omkring 1870. Midt i 1940'erne blev det muligt at indstøbe prøvelegemer i epoxy, og herefter udvikledes mikroskopiteknikkerne til brug for materialer som beton. På dansk betegnes undersøgelser af beton, hvor mikroskopi indgår, som 'strukturanalyse', men også betegnelsen petrografi anvendes. For beton kan man ved disse metoder kigge ind i materialet vha. polarisations- og fluorescensmikroskopi og vurdere type, tilstand og egenskaber af delmaterialerne, helt ned til cementkornstørrelser (5-10 μm).

Strukturanalyse kan udføres på andet end beton, herunder malinger, belægninger, asfalt, facadesten af fx marmor og til forskellige specialmørtler og andre bygge-

materialer, fx fra historiske bygninger. Hvert materiale kræver særlige forudsætninger og erfaringer for at kunne give en relevant beskrivelse.

Fra midt i 1970'erne og videre frem gennem 1980'erne foregik et betydeligt udviklingsarbejde mht. fremstilling af præparater samt systematisk anvendelse af strukturanalyse på beton på Teknologisk Institut i Taastrup, se [1] og [2].

10.6.1 Generelt om metoden

Makroanalyser udføres på overflader af prøver som modtaget (udboret eller udskåret) og på plane snit eller brudflader gennem materialet. Mikroanalyse udføres oftest ved gennemlysning af udskårne og nedslebne tyndslib i et polarisations- og fluorescensmikroskop, men kan også udføres på polerede flader.

Analyserne udføres typisk på borekerner udtaget af konstruktioner med store krav til funktion og holdbarhed som svømmehaller, altaner, parkeringskældre, facader, gulve, vandtanke, rensningsanlæg, broer, belægninger m.m. Af disse kerner fremstilles præparater som tyndslib og planslib for nærmere undersøgelser. Er der i særlige tilfælde brug for dybere indsigt i specielle sammensætninger eller skadesmekanismer, kan man anvende SEM/EDX (Scanning Elektron Mikroskopi / Energidispersiv røntgen (X-ray) spektrometri).

Prisen for strukturanalyse er relativt høj, og delprøver eller borekerner, der ønskes analyseret, bør derfor udvælges nøje, så mest mulig information opnås. Resultater af en strukturanalyse kan fx anvendes som en del af grundlaget for valg af den teknisk og økonomisk optimale reparationsmetode samt fremtidigt vedligehold af en skadet betonkonstruktion. Anvendelsen spænder fra analyser af byggematerialer, før de anvendes i beton, til kvalitetskontrol og skadesanalyser af både ny og gammel beton.



Figur 2: Tv. ses Oddesundbroen, opført i 1938, hvor der gennem tiden er holdt øje med betonens tilstand på både makro- og mikroniveau samt udført reparationer løbende. Foto: Vejdirektoratet. Th. ses udtagelse af borekerne under en buebro.

10.6.2 Anvendelse af strukturanalyse

Petrografiske analyser blev taget i brug i Danmark i 1950'erne i forbindelse med SBI og alkaliudvalgets udredninger, se [3] og [4].

Anvendelse af strukturanalyse på beton og tolkning af resultater kræver oplæring og opbygning af erfaring hos de ingeniører og geologer (petrografer), der typisk udfører arbejdet. Der stilles særlige krav i komplekse sager, hvor der indgår elementer af udredningsarbejde.

Den viden om tilstand og nedbrydningsmekanismer som strukturanalysen kan give, kan sikre, at betonen opnår en kvalitet, der kan sikre dens bestandighed i et givet miljø. Omvendt, hvis der er problemer med holdbarheden, kan man med metoden vurdere, hvad der er galt, hvilken nedbrydningsmekanisme det drejer sig om, og hvor udbredt en skade er i konstruktionen.

Resultaterne kan således danne en del af det grundlag, der skal bruges for at kunne vælge en økonomisk optimal reparationsmetode for en skadet betonkonstruktion. Resultaterne bør vurderes sammen med andre målinger og vurdering af fx chloridindhold og restbæreevne.

Internationalt er der på mikroskopiområdet to organisationer, der ca. hvert andet år afholder seminarer; 1) EMABM-seminarer "Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials" og 2) ICMA, "The International Cement Microscopy Association". Disse fora er førende på området, og der udgives hvert andet år Proceedings, hvor man kan blive opdateret med den seneste viden på området

I Danmark har sammenslutningen FMIB – Foreningen for Mikroskopering af Byggematerialer - været aktiv siden sidst i 1980'erne. Her afholdes ca. 2 årlige medlemsmøder med gensidig orientering og foredrag, herunder indlæg fra DTU om igangværende projekter med mikroskopi af byggematerialer.

10.6.3 Hvad kan man undersøge med strukturanalyse

Strukturanalyse omfatter typisk makroanalyse og mikroanalyse, evt. en luftporeanalyse og/eller anvendelse af avancerede analysemetoder som SEM/EDX.

Tolkning af resultater i forbindelse med vurdering af en konstruktions samlede tilstand bør ske i et tæt samarbejde mellem petrograf og rekvirent således, at alle relevante data og fagområder inddrages. Det kan dreje sig om konstruktionsalder, tegninger, materialer, udførelse, eksponering gennem tiden og evt. mekaniske påvirkninger.

Hvor der er tørsaltning eller betonen er eksponeret for saltvand eller luftbårne salte, er det i tillæg til strukturanalysen normalt at undersøge chloridindholdet af betonen i forskellige dybder fra overfladen. Ligeledes kan separate målinger af trykstyrke på udborede kerner bidrage til de samlede vurderinger af en konstruktions tilstand.

10.6.3.1 Oversigt

Strukturanalyse kan anvendes på både nye og ældre betonkonstruktioner og resultaterne kan anvendes til at vurdere følgende:

For nye konstruktioner:

- Initialkvalitet samt type og omfang af evt. defekter – fx støbefejl
- Overensstemmelse med specifikationer.

For ældre konstruktioner

- Nuværende tilstand og omdannelses-/nedbrydningstegn
- Sammensætning af beton og reparationsmaterialer
- Strategi for reparationer/vedligeholdelsesstrategi.

En række af de parametre, der kan undersøges ved strukturanalyse, er listet herunder:

- Sand- og stentilslag, type og kvalitet, indhold af alkalikiselreaktive korn
- Cementtype, hydratiseringsgrad
- Tilsætninger af flyveaske, mikrosilica, højovnsslagge, kalkfiller, fibre eller andet
- Kapillarporøsitet, estimeret på v/c-forhold
- Luftporer og luftporestruktur, indblandet luft og indkapslet luft
- Revnedannelser, omfang og årsager, forekomst af mikrorevner
- Kvalitet af udførelse (homogenitet, komprimering, bleeding, tidlig frysning, forurening, udtørring m.m.)
- Tegn på udludning eller omdannelser
- Tegn på kemisk eller fysisk angreb (alkalikiselreaktioner, frost, sulfat, forsinket ettringitdannelse, syreangreb, erosion, mv.)
- Karbonatisering
- Udfældninger i luftporer, tegn på fugtbelastning
- Vedhæfningsdefekter for maling, belægninger og reparationsmaterialer.

10.6.4 Prøver og borekerner

10.6.4.1 Placering af borekerner

Placering og antal af prøver til strukturanalyse afhænger først og fremmest af formålet med opgaven, og i sager hvor betonnedbrydning indgår, også af hvilken type skade, det drejer sig om. Det er en fordel at inddrage en petrograf tidligt i forløbet mht. udvælgelse af placeringer for borekerner, så der bliver udtaget det nødvendige eller et repræsentativt antal af borekerner for forskellige eksponeringer, med og uden synlige skader.

Prøver og borekerner skal nøje udvælgelse i forhold til vigtige konstruktionsdele, bygværkets tilstand in-situ, forskelligt eksponerede komponenter og en evt. forhistorie. Er der skadede områder i konstruktionen, foretrækkes prøver fra både 1) synligt

skadede områder og 2) tilsyneladende uskadte områder - men hvis det ikke er muligt, kan en tilstrækkelig stor prøve, der også indeholder uskadet beton, benyttes.

Erfaringsmæssigt kan der nogle gange under en tilsyneladende fejlfri overflade gemme sig omfattende nedbrydning og derfor en kort restlevetid af en konstruktionsdel. Omvendt kan overfladiske tegn på skader netop alene findes i overfladen og derfor være uden betydning for konstruktionen - ud over det æstetiske.



Figur 3: Tv. ses udtagning af boreprøver på Grøn Beton forsøgsbro. Th. ses et foto af et borehul, som er vigtig dokumentation i forhold til borekerner. For nye betontyper med særlige krav til lang levetid eller betoner med en grøn profil som anvendt i Grøn Beton projekterne indgår strukturanalyse som en vigtig metode til at følge betonerne i disse udviklingsprojekter fra de produceres til mange år efter.

10.6.4.2 Udboring af kerner

Udboring af kerner sker normalt med diamantboreudstyr, der fastholdes på overfladen før boring. Der bores med vandkøling. Det er vigtigt, at udstyret er fastspændt under boringen, da der ellers kan forekomme skader på kernernes boreflader.

Borekerner bør ikke være mindre end 75 mm i diameter ved stenstørrelse på maksimum 20 mm, og gerne større, op til 100 mm. Herved opnås det bedste grundlag for en makrobeskrivelse, og samtidig er der mulighed for, at kernen kan anvendes til flere forskellige analyser. Hvis der kun er mulighed for udtagning af små prøver, bør der udtages et større antal af disse.

For massive konstruktioner, og beton med tegn på alkaliskselreaktioner (AKR) og 'sen ettringitdannelse' (DEF) eller relaterede skader, er det vigtigt at udtage kerner i dybere positioner. For DEF ønskes kerner udtaget svarende til midten af konstruktionsdelens tykkelse, hvor temperaturen har været højest under den tidlige hærdning.

Borehuller skal tilstøbes korrekt med et anerkendt og egnet reparationsprodukt, men først efter, at der er taget et eller flere fotos af borehullet, når betonfladen er blevet overfladetør. Evt. revner vil da stå synligt aftegnet.

Ved opmærkning til borekerner anbefales, at der afmærkes med en ring med en diameter større end kernediameter, og et nr. uden for denne ring, så boringen kan foregå inde i ringen, på en overflade uden misfarvning fra kridt eller sprittusch. Overfladen kan evt. mærkes med en lille pil, hvis retning op eller ned på konstruktionen ønskes angivet.

Straks efter udboringen skal borekernerne afvaskes for boreslam og aftørres.



Figur 4: Tv. ses eksempel på borekerner lige efter udboring. Kernerne foreligger i flere dele, og det er vigtigt at samle "puslespillet" inden makroanalysen. På foto th. ses en kerneoverflade med revner og lidt kridtafmærkning. Revnerne ses som netrevner, mørkt aftegnede og med lidt fedtede udfældninger, hvilket kan være tegn på AKR.

10.6.4.3 Mærkning af prøver

Borekerner skal efter udboring mærkes med et unikt identifikationsnummer eller -bogstav. Det anbefales at tage et foto in situ af den mærkede kerne, samt det tilhørende borehul. Hvis kernen er i flere dele, mærkes hvert enkelt delstykke, også gerne med en pil, der peger mod boresiden.

Ved udtagelse af en række af kerner samtidigt anbefales det, at kernerne under mærkning og foto af hver enkelt kerne in situ placeres ens, dvs. med overfladen placeret i samme retning. Det letter både håndteringen i laboratoriet og beskrivelsen af kernefotos under rapporteringen.

Når kernerne er blevet overfladetørre efter udboring, pakkes de i en damptæt plastemballage, der lukkes tæt. Emballagen mærkes ligesom kernerne, og der anføres dato for udboring. Kerner bør følges af et dokument, der angiver kernemærkning og placering i konstruktionen, samt fotos af kerner og borehuller.

Kernerne må ikke tapes ind med gaffatape el.lign., da det klister overfladerne til og vanskeliggør den videre vurdering på makroniveau.

10.6.5 Petrografiske teknikker og præparater

Når prøver ankommer til laboratoriet, undersøges de først ved en oversigtsbeskrivelse og opmåling, evt. fulgt af observationer i et stereomikroskop med forstørrelser på op til 50-100X. Efter denne makroanalyse besluttet i samråd med rekvirenten, om der er

behov for undersøgelse af tyndslib, og hvor og i hvilke prøver disse tyndslib skal placeres for bedst at kunne belyse en given problemstilling.

Antallet af prøver fra en konstruktion eller konstruktionsdel til makrobeskrivelse er normalt højere end antallet af tyndslib, der fremstilles. Et vist antal prøver eller kerner, der ser ens ud på makroniveau, kan sikre imod, at der overses evt. materialevariationer i konstruktionen.



Figur 5: Tv. ses en borekerne i god kvalitet, med boresiden placeret tv. og med skarpt aftegnede snit gennem tilslagspartikler. Th. ses et helt tyndslib, ca. 30 mm x 45 mm.

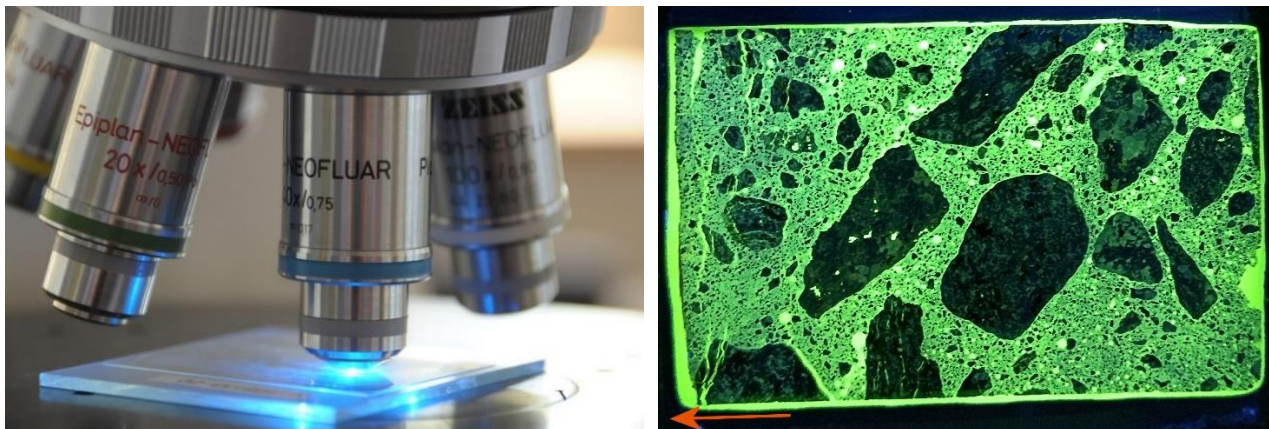
På samme måde kan springet tages videre ned til mikroniveau med nogle udvalgte placeringer af tyndslib, hvor der typisk heller ikke ses materialevariationer af betydning. Et tyndslib på 30 mm x 45 mm og med en tykkelse på 0,02 mm kan synes meget lille i forhold til en bro eller en svømmehal, men ved at have sikret sporbarheden fra prøveudtagning over kerner og videre til tyndslib, kan et sådant udsnit være repræsentativt – fx vedrørende anvendt cementtype – for en større konstruktionsdel.

10.6.5.1 Fremstilling af tyndslib

Fremstillingen af de kun 0,02 mm (20 µm) tykke epoxyimprægnerede tyndslib af beton kræver stor ekspertise og udføres på speciallaboratorier med særligt præparationsudstyr. I korte træk omfatter fremstillingen følgende trin:

- Placeringen af tyndslibet vælges under hensyntagen til formålet med analysen
- Der udskæres en klods på fx 30 x 45 mm, og tykkelse 10-15 mm
- Den skårne overflade planslibes og imprægneres derefter under vakuum med epoxy tilsat et fluorescerende farvestof
- Efter hærdning af epoxyen slibes fladen ren og en glasplade påklæbes – dette er den ene side af præparatet.
- Derefter saves prøven ca. 1 mm fra glaspladen, og med diamantvalser eller håndslibeudstyr slibes den anden side af præparatet, indtil prøven har en tykkelse på 20 µm
- Derefter pålimes et tyndt dækglas, der beskytter præparatet
- Præparatet er nu så tyndt, at man kan kigge gennem det i et mikroskop.

En tyndslibsundersøgelse er relativt kostbar, sammenlignet med en makroanalyse, ikke så meget pga. selve præparatfremstillingen, men på grund af den tid, der skal anvendes til analyse og rapportering for at få den ønskede information ud af prøven.



Figur 6: Et tyndslib undersøges i mikroskop ved forskellige belysningsteknikker og forskellige forstørrelser. Th. ses et helt tyndslib, ca. 30 x 45 mm, belyst med UV-lys. Betonoverfladen vender her mod venstre. Der ses overfladeparallelle revnedannelser nær overfladen. Årsagen til disse revnedannelser undersøges dernæst i mikroskopet.

Mikroskopi og belysningsteknikker

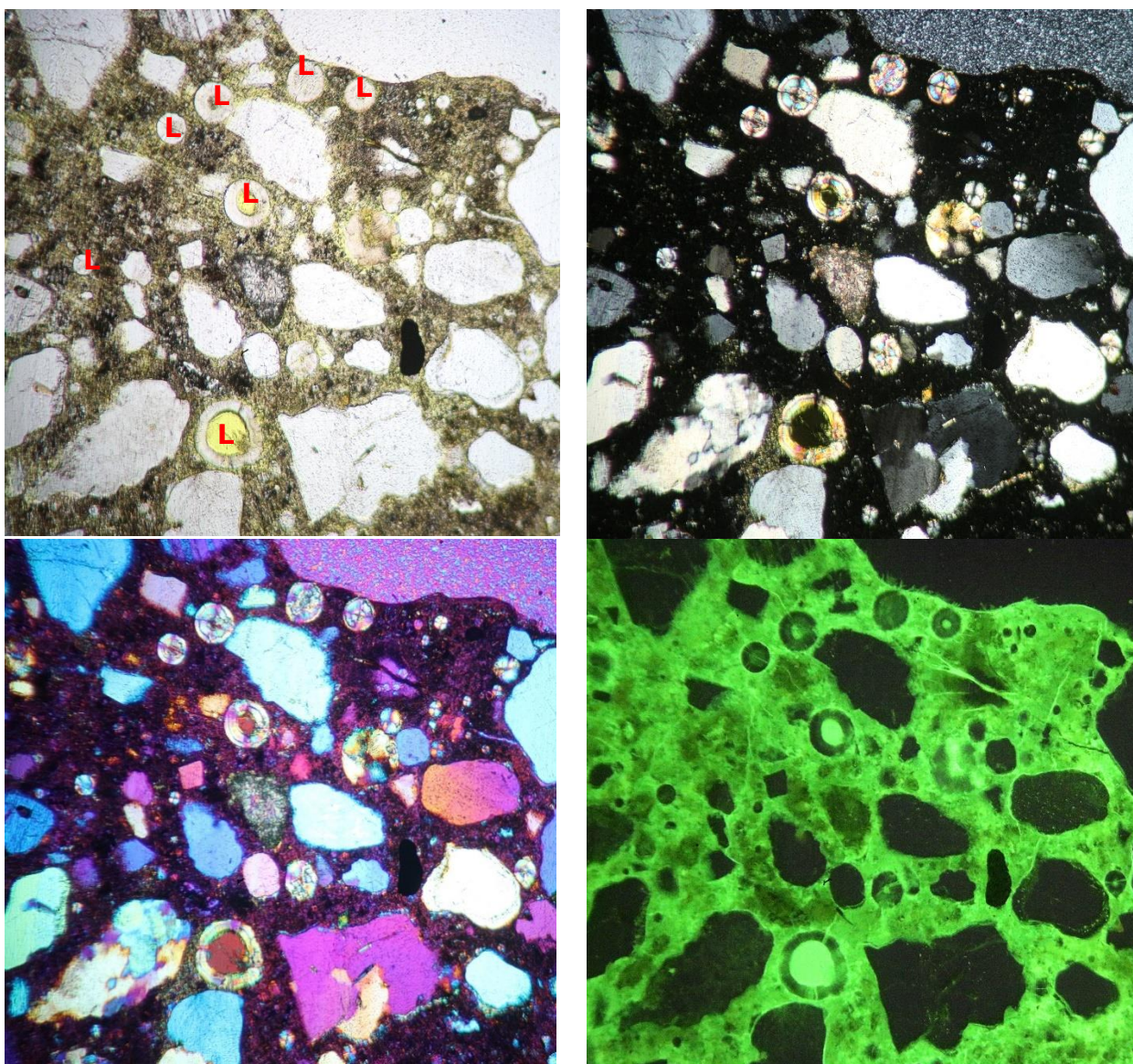
Til analyse af tyndslib anvendes et polarisationsmikroskop, udstyret med filtre til fluorescensmikroskopi. De sædvanlige lysindstillinger ved anvendelse af forskellige filtre er:

- Planpolariseret lys (parallelle nicoller)
- Polariseret lys (krydsede nicoller)
- Polariseret lys + gipsblad
- Fluorescens (UV-lys).

Ved undersøgelse af et fluorescensimprægneret tyndslib i polarisations- og fluorescensmikroskop vurderes betonens bestanddele og tilstand. I mikroskopet anvendes typisk forstørrelser fra ca. 30X og op til 500X, og bestanddele kan ses ned til 5-10 μm størrelse. Ofte foretages analyser med forstørrelser på 63-100X, hvor der kan opnås et overblik over sammensætning og bestanddele.

De forskellige lysindstillinger er illustreret med et eksempel i Figur 7.

I nogle tilfælde undersøges højpolerede prøver bedre ved reflektionsmikroskopi, hvor lyset ikke går igennem prøven, men reflekteres. Herved opnås yderligere information ved undersøgelse af fx organiske belægninger eller andre materialer, som er opake eller isotrope (ikke lys-brydende).



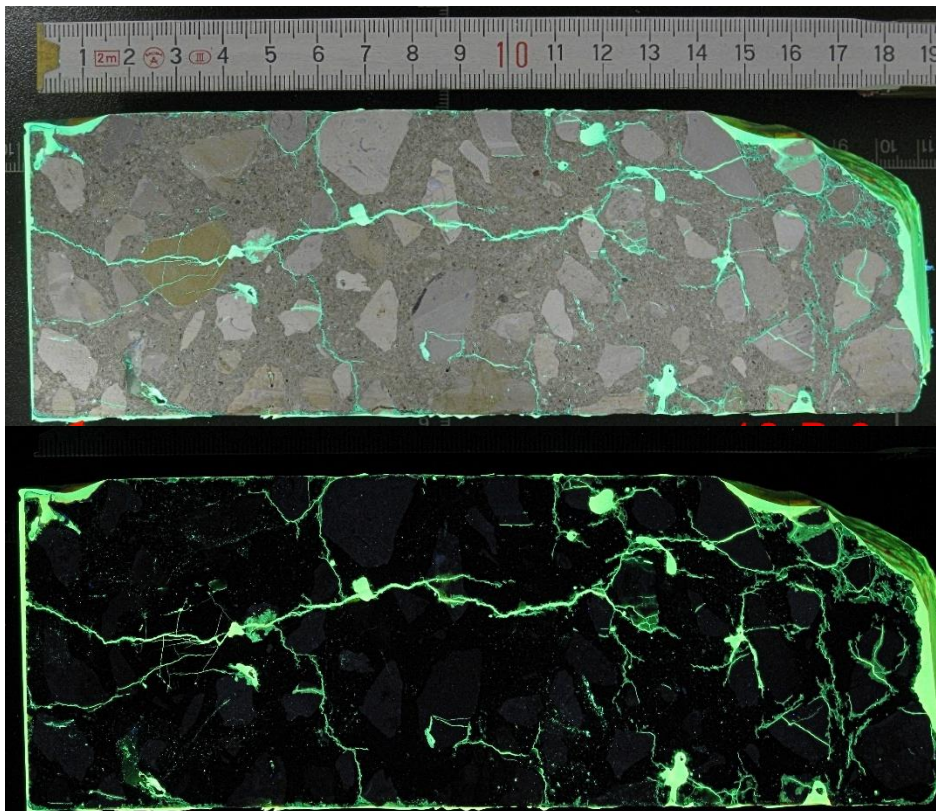
Figur 7: 4 billeder af det samme tyndslib, hvor der anvendt de fire belysningsteknikker ved mikroskopering af tyndslib af beton, hvor der for hver type belysning opnås forskellig information om materialet. Forstørrelsen er 63X, her svarende til et udsnit på ca. 1,8 mm x 1,8 mm. Øverst tv. parallelle nicoller, øverst th. krydsede nicoller, nederst tv. krydsede nicoller + gipsblad, nederst th. fluorescens. Tyndslibet er fra en ældre beton placeret i havvand. Der ses udfældninger i de cirkulære luftporer i betonen (markeret med røde **L**'er på billedet øverst tv.).

10.6.5.2 Fremstilling af plansnit og planslib

Omstøbes en betonprøve (helkerne) under vakuum med epoxy tilsat et fluorescerende farvestof, vil epoxyen trænge ind i fine porøsiteter og revner, der står i åben forbindelse med prøvens overflade under imprægneringen. På et *plant snit* gennem prøven vil disse blive synlige under UV-lys. Denne metode kan afsløre defekter, som ellers ikke er umiddelbart synlige for øjet.

Denne metode er hyppigt anvendt og relativ billig, sammenlignet med fremstilling af et planslib, og giver normalt tilstrækkelige informationer.

Ved anvendelse af et fluorescensimprægneret *planslib*, hvor et plant snit af betonen imprægneres, fås ud over revner og hulrum information om kapillarporøsiteten og dens evt. variation. På et planslib kan prøven yderligere vurderes efter nedslibning af den imprægnerede overflade til hhv. 1 mm dybde, dernæst til 2 mm dybde fra den imprægnerede flade. Herved opnås en vis 3D-information om defekter. For porøse betoner vil epoxy være synlig i cementpastaen også i 2 mm dybde.



Figur 8: Et plant snit gennem en epoxyimprægneret karnedel, hvor der ses omfattende revnedannelser, herunder revneforløb gennem stentilslag. Karnedelen er placeret ca. midt i en større betonklods, overfladen er placeret i retning mod venstre. Årsagen til revnerne er forsinket ettringitdannelse (DEF). Belysningen i øverste foto er UV-lys + dagslys, og i nederste foto UV-lys alene.

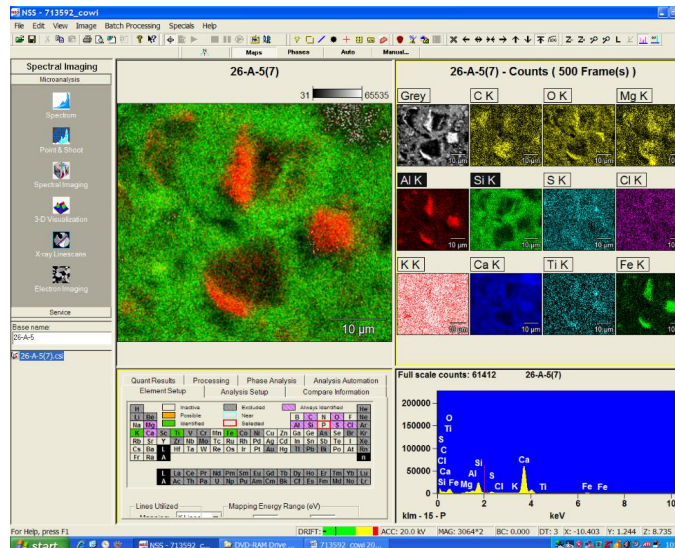
10.6.5.3 SEM/EDX

Supplerende til tyndslib kan der ved Scanning Elektron Mikroskopi (SEM/EDX) opnås forstørrelser på op til 10.000X eller mere. Her kan den kemiske sammensætning af cement, tilslag, uorganiske tilsætninger og reaktionsprodukter, dannet ved forskellige angrebstyper, bestemmes. Analysen udføres på polerede tyndslib eller polerede betonstykker.

I mange tilfælde kan forskellige krystaldannelser genkendes optisk ved anvendelse af lysmikroskopi. Men hvis enhver tvivl skal udelukkes, fx i retslige tvister, kan det være nødvendigt at anvende større forstørrelser sammen med røntgenanalyse for med sikkerhed at fastslå kemiske sammensætninger og forhold, der optræder på cementkornniveau (5 µm) eller mindre.

5/15/2009 HFW HV mag WD spot
11-05-17 AM 125 μm 20.00 kV 2.378 x 10.0 mm 5.0

40 μm



Side 10.6-11

- Metoden anvendes også i voldgiftssager, typisk for opklaring af årsager til nedbrydning – hvad er årsagerne til skaderne, og hvem har ansvaret?
- Mikroanalysen kan med stor sikkerhed afsløre årsager til synlige nedbrydningstegn, herunder alkalikiselreaktioner (AKR), sulfatangreb og andre typer kemisk angreb, forsinket ettringitdannelse (DEF), mekanisk nedbrydning, frostskafer, bakterieangreb, osv. I enkelte tilfælde kræves mere dybtgående analyser, fx ved SEM/EDX.
- Mikroanalysen kan også anvendes i sager med brandpåvirkning for vurdering af, hvor langt ind en beton har været påvirket af forhøjede temperaturer, og dermed hvor høj en temperatur, armeringen højst har været udsat for under branden. Dette er afgørende for vurdering af om armeringen ved branden har lidt et styrketab.

Resultater af strukturanalysen jävnføres med observationer på konstruktionen, hvis der her er tydelige tegn på en eller anden form for nedbrydning, herunder revnedannelser.

For armerede, udendørs konstruktioner sker vurderingen typisk sammen med bestemmelse af chloridindtrængning, hvor der er tøsalty eller havvand, for at få en samlet vurdering af konstruktionen og armeringens tilstand samt et bud på den fremtidige skadesudvikling, fx vha. kendskabet til betonens initialkvalitet samt evt. omdannelses- og nedbrydningstegn.



Figur 10: Foto tv. viser netrevnedannelser på undersiden af en bro, og th. ses revner og massive hvide kalkudfældninger under en kantbjælke. Strukturanalysen kan kigge ind i konstruktionen og se dybde af angreb samt årsagerne til de skader, der er synlige på overfladen, også lang tid før de udvikles så kraftigt som på fotos ovenfor.

Analyser af beton og mørtel med og uden nedbrydningstegn samt typer af skademekanismer beskrives med eksempler i afsnittet omhandlende undersøgelser af skadet beton.

10.6.7 Hvad ser vi på borekerner

10.6.7.1 Homogenitet, farve og tilslag

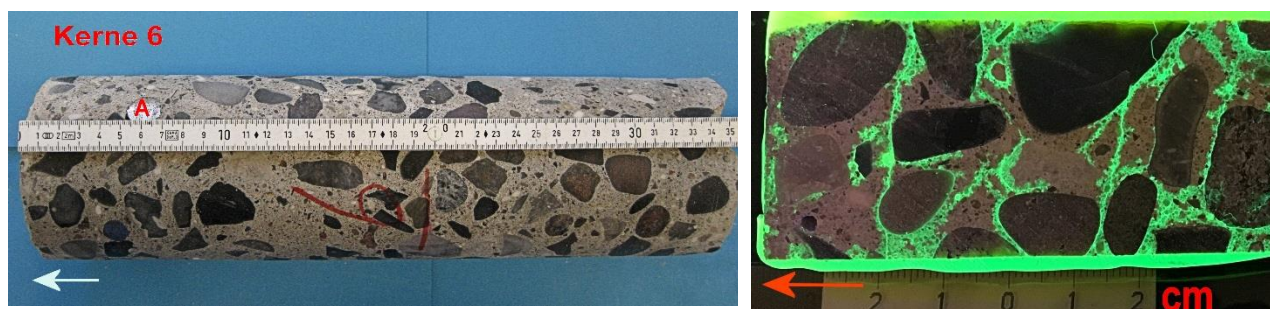
På makroniveau opnås vigtig information om homogenitet og komprimering af betonen, desuden observeres cementpastaens farve og indhold af indkapslede luftporer.

For det grove tilslag vurderes dets mængde, fordeling, type, form, gradering og vedhæftning til cementpasta. For sandet kan man se om det er finkornet, er lyst eller mørkt, og om det indeholder få eller mange hvide korn, som kan være potentielt alkalikiselreaktive.

Hvis sandet indeholder alkalikiselreaktive korn, kan dette vise sig som små, hvide, bløde korn, der ofte ses som mini-springere (ofte kaldet "pop-outs") på borede kerneflader. Der ses også fedtet, fugtig cementpasta omkring reaktive korn. Nogle gange ses revnedannelser i direkte forbindelse med reaktive korn.

Alkalikiselreaktive korn i danske betoner stammer helt overvejende fra porøs flint, opal eller kalkopal i sandtilslaget. Disse korn reagerer forholdsvis hurtigt, indenfor få år, hvis der er et fugtigt miljø og alkali til rådighed fra cement eller tørsalte. De samme reaktioner ses også i stenfraktionen, hvor porøs flint kan reagere, her dog først efter mange års eksponering (30-50 år).

I andre lande findes andre typer af reaktivt tilslag – fx reaktive granitlignende tilslag – i både sand- og stenfraktion, og her er reaktionerne i de fleste tilfælde mange år om at udvikle sig til skader og revnedannelser. Det samme kan optræde i Danmark for importerede stentilslag.



Figur 11: Opmåling af borekerne, pil angiver overflade svarende til udboringside. Vurdering af tilslag, homogenitet, farve af cementpasta, revner, luftporer, armering (A), dæklag, tegn på nedbrydning m.m. Th. ses et plant snit gennem en imprægneret kerne, med revnedannelser og porøs pasta.

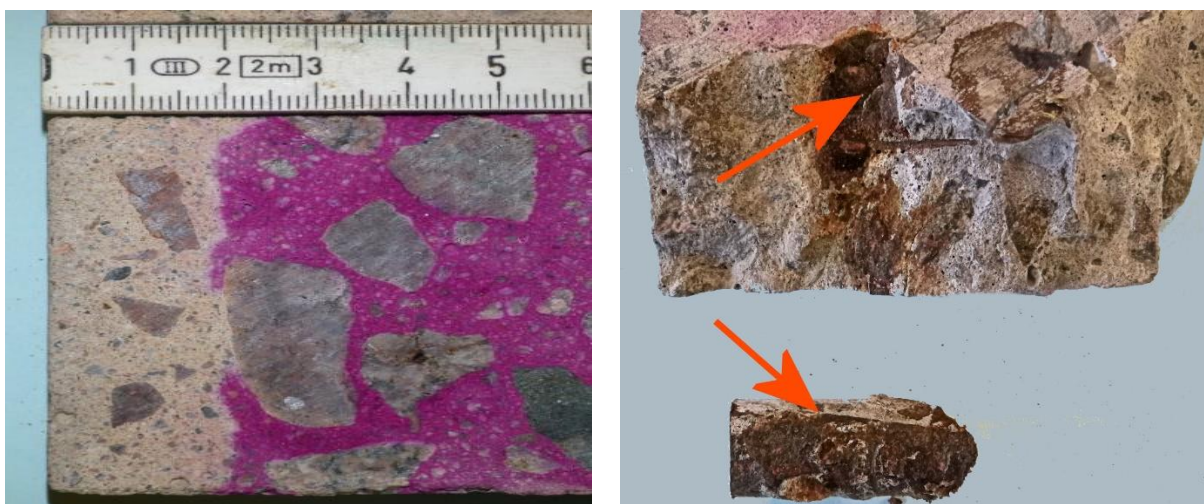
10.6.7.2 Karbonatisering

Ved makroanalysen opmåles karbonatiseringsdybden, typisk ved anvendelse af indikatoren phenolphthalein, som giver et rød-lilla udslag i de områder, hvor betonen ikke er karbonatiseret (betonen er i sin natur basisk, med en pH-værdi i cementpastaen på typisk 12-13). I karbonatiserede områder er udslaget farveløst (betonen er her neutral). Af arbejdsmiljøhensyn bør phenolphthalein dog ikke anvendes in situ. I stedet

kan anvendes thymolphthalein, der giver et blå farveomslag for pH-værdier $> 9,3$ - $10,5$.

Dybden af denne karbonatisering fra overfladen skal måles på en frisk brudflade, da en ældre brudflade vil karbonatisere med tiden.

Vurdering af karbonatiseringen er vigtig for bedømmelse af betonens evne til at beskytte armeringen. Hvis karbonatiseringen generelt eller langs en revne med tiden når ind til en dybde i nærheden af armeringsstålet i betonen, er der i udendørs (og fugtige) miljøer risiko for korrosion af armeringsstålet i betonen. Armeringen kan dog korrodere, også i en ikke-karbonatiseret beton, hvis indholdet af chlorid (Cl^-) overstiger en kritisk grænse.



Figur 12: Tv. ses et plant snit gennem en borekerne fra en ældre betonbygning, overfladen er placeret tv. i billedet. Vha. farveomslaget efter påføring af indikatorvæsken phenolphthalein ses karbonatisering i de yderste ca. 20 mm ud mod overfladen, hvor betonen er farveløs. Th. ses et eksempel på rustdannelse på armering, hvor der har været en revne ind til armeringen, og hvor betonen er karbonatiseret langs revnen. Betonen hér indeholdt ikke chlorid, hvorfor årsagen til rustdannelsen entydigt kunne henføres til betonens karbonatisering.

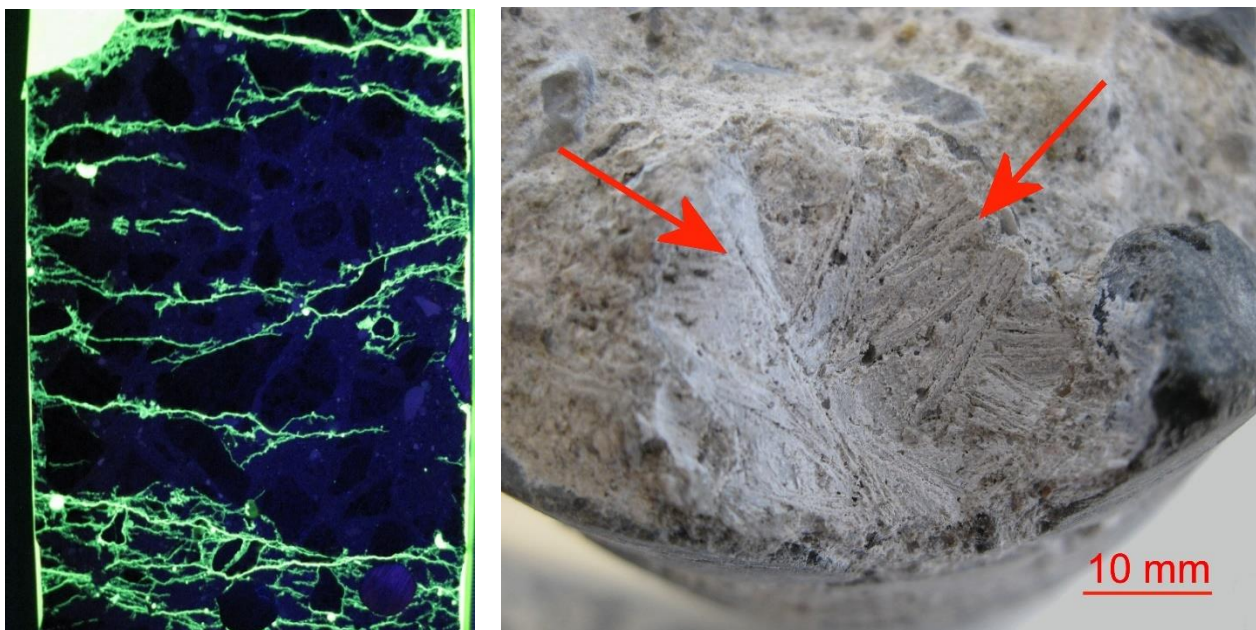
10.6.7.3 Porøsiteter og revner

Grove og fine revner, der er synlige for øjet beskrives i detaljer på makroniveau, med orientering, dybder og forløb gennem eller uden om tilslag.

For borekerner kan revner og porøsiteter bedst vurderes på et plant snit, der placeres vinkelret på overfladen. Den største information fås fra imprægnerede kerner, hvor selv meget fine revner ($<0,01$ mm) bliver synlige, se Figur 13.

Ud fra revnernes udseende, forløb og placering kan det ofte vurderes om der er tale om svindrevner eller revner opstået af andre årsager. Forekomst af et system af overfladeparallele revner beliggende fra overfladen og indad benævnes som delaminering. Frostpåvirkning kan være en sandsynlig årsag eller en medvirkende årsag. Hvis revnerne løber igennem stentilslag, er de dannet efter, at betonen har opnået en vis styrke.

Omvendt kan det ofte konkluderes, at hvis der ses et revneforløb udelukkende rundt om sten, så er revnerne sandsynligvis dannet i betonens tidlige alder.



Figur 13: Tv. ses plant snit i UV-lys, efter imprægnering af kernen og gennemskæring vinkelret på overfladen (retning opad). Længde af udsnittet er ca. 150 mm. Overfladeparallele revner og porøsiteter ses tydeligt under UV-lys. En kombination af alkalikiselreaktioner og frostpåvirkning har her medført, at betonen lagdeles eller delamineres. Th. ses et eksempel på tidlig frostpåvirkning af en beton, før den er hærdnet. I et aftryk efter en sten ses islinsedannelser, med et karakteristisk udseende, der benævnes som "hønefødder" eller "påfuglespor".

10.6.8 Mikroanalyse

Ved undersøgelse af et fluorescensimprægneret tyndslib i polarisations- og fluorescensmikroskop vurderes betonens bestanddele og tilstand. I mikroskopet anvendes forstørrelser fra ca. 30X og op til 600X.

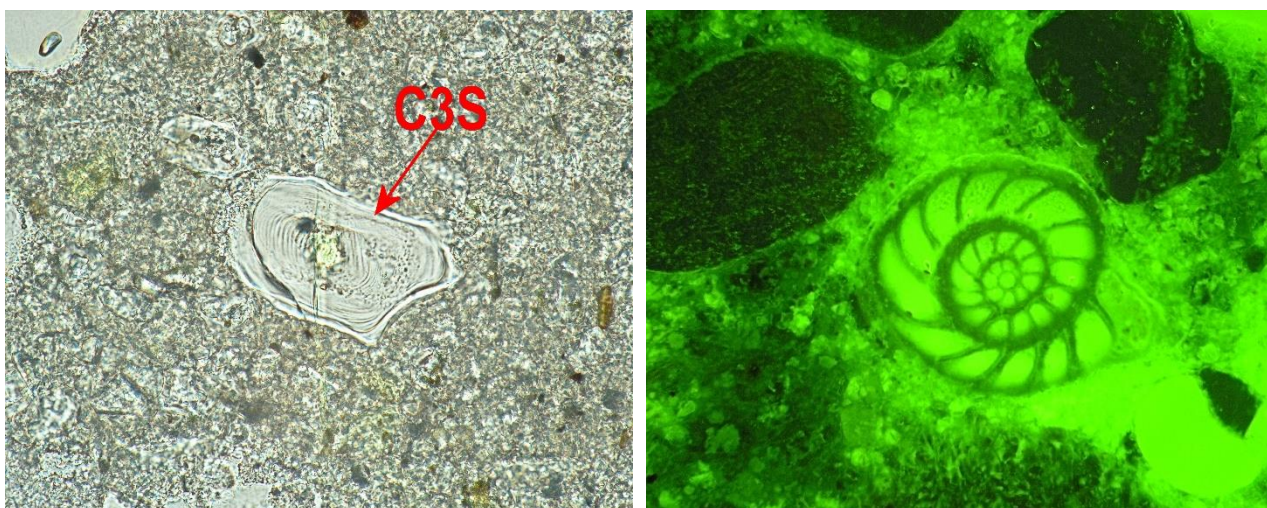
10.6.8.1 Porøsitet og estimat på v/c-forhold

Ved fluorescensmikroskopi kan kapillarporøsiteten bestemmes og på baggrund heraf estimeres et ækvivalent v/c-forhold ved sammenligning med referencetyndslib, fremstillet efter 28 døgns hærdning af blandinger med kendt sammensætning, herunder cementtype og v/c-forhold som de vigtigste parametre.

10.6.8.2 Sammensætning og homogenitet

Det kan i mikroskopet vurderes om betonen svarer til en oplyst sammensætning, om den indeholder skadelige bestanddele, om den er under nedbrydning og af hvilken årsag, samt om den er blandet, udstøbt og efterbehandlet som foreskrevet.

Cementtype og tilsætninger af fx flyveaske, mikrosilica, fibre og højovnsslagge kan vurderes, ligesom sand og stentilslag.



Figur 14: Tv. ses et nærbillede (500X forstørrelse) af et cementkorn af C_3S , helt reageret og med mange reaktionszoner dannet gennem årene (såkaldte årringe). Th. ses en lille kalkskal i sandet, omgivet af en cementpasta med lidt varierende homogenitet (200X forstørrelse, ca. 0,6 mm x 0,7 mm).

10.6.8.3 Luftporer og luftindblanding

Under blandingen af betonen tilsættes et luftporedannende middel, for at der i den hærdnede beton opnås et system af kuglerunde luftporer, der sikrer, at beton, der kan blive eksponeret for frost/tø-påvirkninger i vandmættet tilstand, ikke fryser i stykker. Dette system af luftporer skal der være et vist volumen af, og porerne skal være fine og velfordelte i betonen. Kvantitativt skal den indblandede opfylde forskellige kriterier mht. volumen og maksimal "afstandsfaktor" for at være konditionsmæssig. Luftporeanalyser udføres på kontrastimprægnerede plansnit efter metoden angivet i DS/EN 480-11 eller ASTM C 457, se fx kapitel 15.1.8.

I et tyndslib kan man vurdere, om betonen er luftindblandet, og desuden vurdere, om luftporesystemet skønnes at opfylde de sædvanlige krav til en frostbestandig beton. Indblandede luftporer er små og kuglerunde, mens indkapslede porer typisk er større og med en uregelmæssig form.

Tilstedeværelse af udfældninger i luftporerne i beton, der har været eksponeret i et vådt eller fugtigt miljø, viser om betonens indre har været fugtbelastet gennem tiden.

10.6.8.4 Optisk styrkebestemmelse og sammensætning af beton

Optisk styrkebestemmelse af beton kan foretages ved anvendelse af Férets formel, se [5]. Ved punkttællinger i mikroskopet og bestemmelse af v/c -forholdet kan indhold af cement, vand og luftporer i mørtelfasen bestemmes og anvendes i formlen. Metoden kan estimere trykstyrken af en beton og kan fx anvendes på små betonprøver, hvor der ikke foreligger tilstrækkeligt materiale til en egentlig trykprøvning. Der er nogen usikkerhed på målingen (anslået 10-15 %).

I tillæg til styrkebestemmelsen kan betonens faktiske sammensætning beregnes efter bestemmelse af stenindhold på plane snit gennem prøver, ligeledes ved punkttælling. Sammensætning beregnes efter procedurer som anført i DS 423.42:2002.

10.6.9 Undersøgelser af skadet beton

10.6.9.1 Generelt

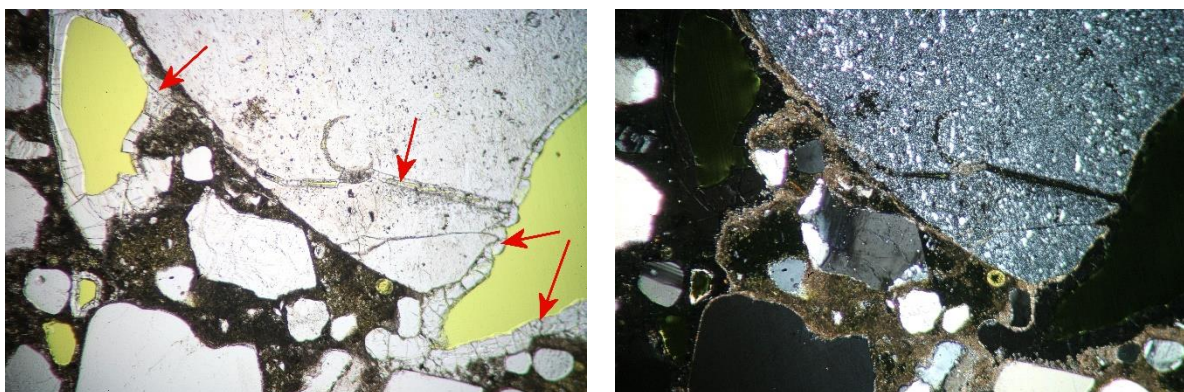
Strukturanalyse anvendes ofte, hvor der optræder en eller anden form for nedbrydning af beton for at afklare type og omfang af skader samt estimere forventet skadesudvikling. I litteraturen findes talrige og omfattende beskrivelser af skadestyper og deres forekomst i beton, men her skal anbefales [6], [7] og [8].

Skader og andre observationer kan fx være:

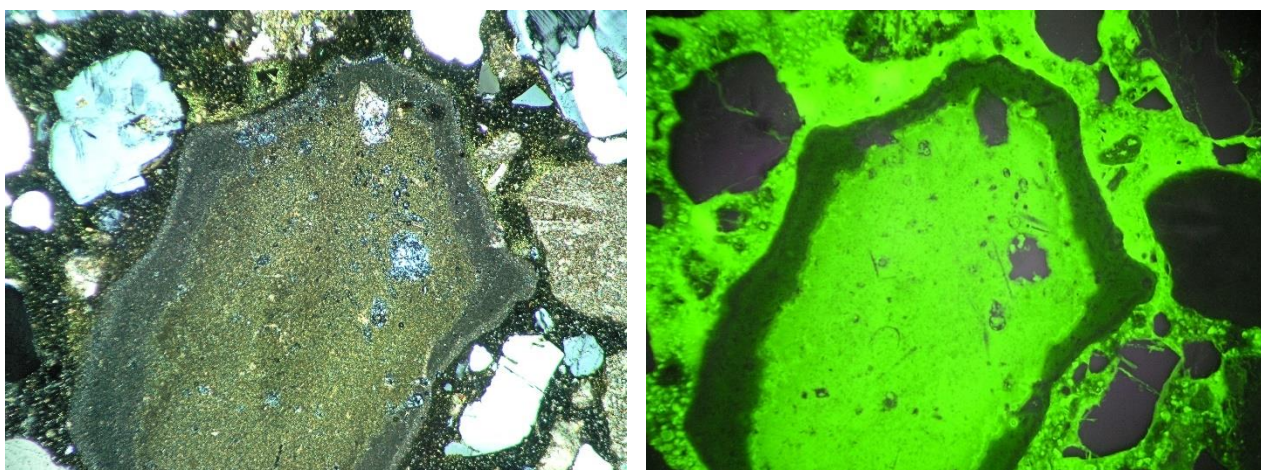
- Overfladeafskalninger
- Tegn på delaminering
- Mini-springere (Pop-outs)
- Karbonatisering
- Frostangreb
- Revnedannelser
- Årsag til lave styrkeresultater
- Misfarvninger
- Tegn på sulfatangreb, overflader
- Tegn på alkalikiselreaktioner
- Tegn på internt sulfatangreb (DEF)
- Tegn på angreb af blødt vand eller syre
- Brandpåvirkning
- Korrosion af armering.

10.6.9.2 Eksempler

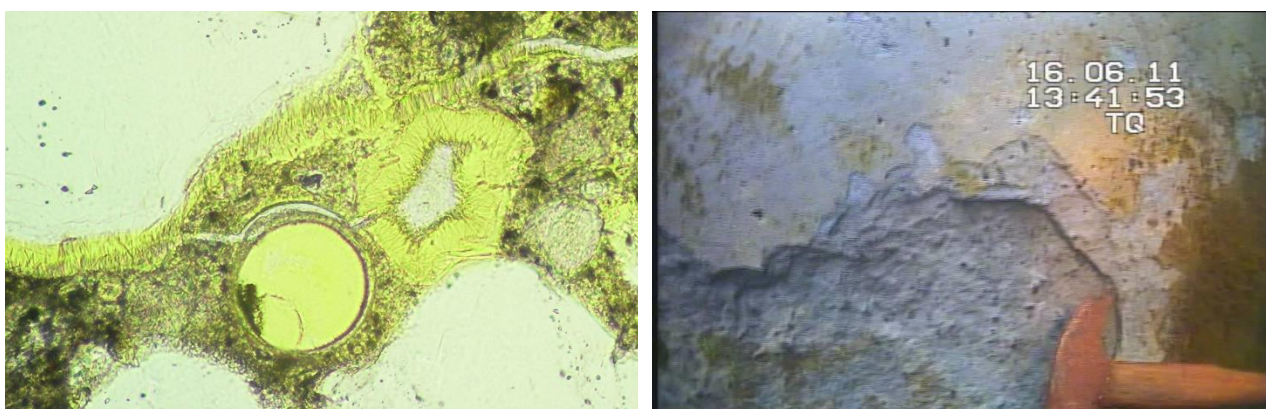
Herunder følger nogle fotos fra mikroanalyser af beton, sammen med en kort tekst for at illustrere udvalgte eksempler af forskellige skadestyper.



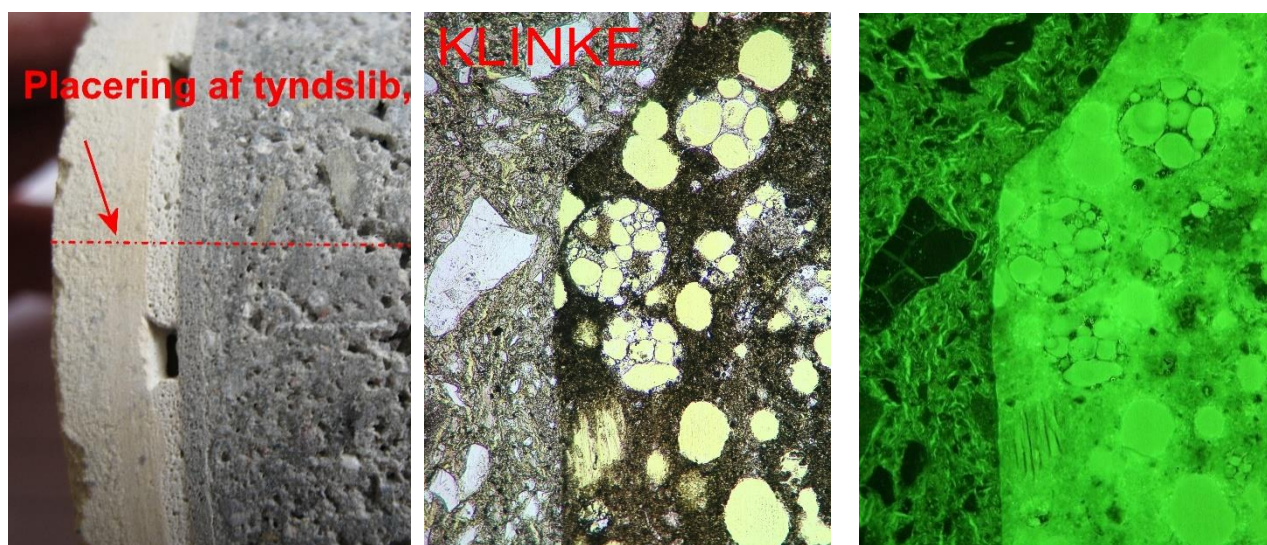
Figur 15: Alkalikiselgel i porer og revner i ældre beton. Tv. er den hvidlige gel angivet med pile. Th. er gelen ikke synlig, da gelen ikke er krystallinsk. Den store tilslagspartikel er flint, hvor en revne fyldt med gel ses med forløb gennem partiklen. Tyndslib, parallelle nicoller tv. og krydsede nicoller th., 1,8 mm x 2,4 mm.



Figur 16: Alkalikiselreaktivt korn (kalkopal) i en ældre beton. Kornet er porøst og har en mørk, tæt randzone pga. reaktioner mellem gel og calciumhydroxid fra pastaen gennem tiden. Der ses ikke revnedannelser. Kapillarporøsiteten er høj, specielt omkring det reaktive korn, hvor der er sket omdannelser. Tyndslib, krydsede nicoller tv. og fluorescens th., 1,2 mm x 1,5 mm.



Figur 17: Tyndslibsudsnit tv. og betonoverflade eksponeret under havvand i ca. 30 år, se foto th. Overfladen er svag og skaller af ved lette slag med en hammer. Inde i betonen, i luftporer nær overfladen, ses udfældninger af ettringit og thaumasit, lokalt dannet i flere lag, i en pasta der er under omdannelse pga. havvandets påvirkninger. Angrebet er et sulfatangreb, der med tiden svækker sammenhængskraften i betonens overflade. Tv. parallelle nicoller, 1,2 mm x 1,5 mm.

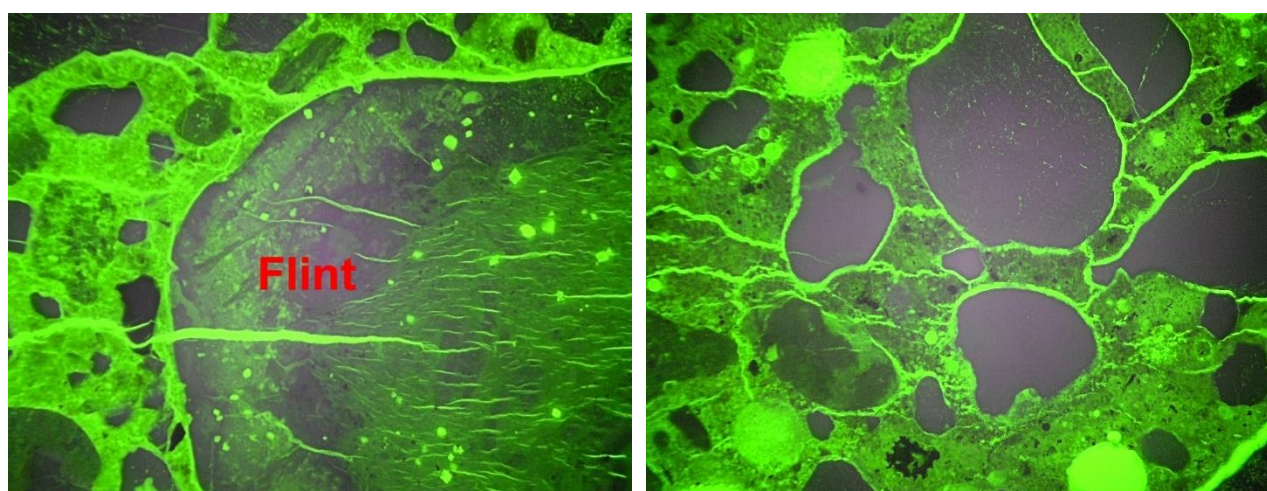


Figur 18: Eksempel på springet fra makrostørrelse til mikrostørrelse. Tv. ses en borekerne med en hvid klinke yderst. Et tyndslib er placeret vinkelret på overfladen af kernen, til 45 mm dybde. I midten og th. ses fotos fra mikroskop af overgang mellem klinke og specialmørtel. Foto midt og th: Størrelse 1,2 mm x 0,9 mm, hhv. parallelle nicoller og fluorescens.

Beton udsat for brandpåvirkning er et særligt tilfælde, hvor strukturanalyse på tyndslib kan anvendes til at estimere, hvilken maksimaltemperatur, betonen har været udsat for i en given dybde under overfladen.

I takt med opvarmningen sker der forskellige omdannelser i betonen, som angiver den maksimalt opnåede temperatur i en given dybde. Betonen i sig selv kan tåle en del opvarmning, mens den indstøbte armering kan blive svækket, hvis den opvarmes for meget. Den kritiske temperatur er afhængig af stålqualiteten.

Tyndslibsanalyse har i udviklingssammenhæng bidraget mht. vurdering af effekt af PP-fibre (polypropylen) tilsat beton for at reducere omfang af afskalninger under brandpåvirkning.



Figur 19: Tv. ses omdannelser og revner i pasta og opsprækning af flintpartikel (kalcinering) pga. brandpåvirkning. Th. ses revner i cementpasta, overvejende rundt om tilslag, efter et

forløb med flere brandpåvirkninger. Overfladen, der har været udsat for brand, er i begge fotos placeret nogle få cm i retning opad. Fluorescens, 1,2 mm x 1,5 mm.

I tabel 1 nedenfor er beskrevet en række temperaturafhængige omdannelser og observationer i tyndslib ved forskellige temperaturniveauer.

Tabel 1: Temperaturafhængige omdannelser og observationer i tyndslib

Ved ca. 600-900 °C dekomponerer CaCO_3 til CaO og CO_2
Ved 573 °C sker en omdannelse af α -kvarts til β -kvarts ved kraftig ekspansion og medfølgende pastarevner
Ved ca. 450 °C sker en omdannelse af Ca(OH)_2 til CaO . Ved påvirkning af slukningsvand gendannes denne fri kalk til Ca(OH)_2 med volumenekspansion og pastarevner til følge
Fra ca. 400 °C sker en omdannelse (kalcinering) af tæt flint med farveændring til hvid under udvikling af mikrorevner. Nogle flintvarieteter brunfarves fra ca. 250 °C
Ved 150-200 °C sker en dekomponering af ettringit
I området 150-250 °C dannes grove, fine eller mikrorevner parallelt med overfladen, som følge af varmeudvidelse
Fra 50-100 °C begynder en fordampning af frit vand samt kemisk bundet vand i betonen, kapillarporøsiteten øges

10.6.10 Strukturanalyse i fremtiden

Siden fremkomsten af Basisbetonbeskrivelsen (BBB) i 1986 og den efterfølgende udvikling af betonkrav i Danmark og øvrige europæiske lande, er betonen til nye konstruktioner nu så velbeskrevet og defineret afhængig af eksponeringsmiljøet, at man skulle forvente, at strukturanalyse af beton er en metode på vej ud.

Det er sandsynligt, at anvendelsen af mikroskopi vil blive reduceret for nyere konstruktioner, fordi der netop er styr på tidligere tiders mangler såsom forekomst af alkalikiselreaktioner, manglende frostbestandighed, for tidlig rustdannelse på armering, utilstrækkelig komprimering, hærdeproblemer i tidlig alder, efterbehandling osv. Fremover vil man nok skulle se mere på indtrængning af chlorid og korrosion af armeringen som den væsentligste parameter for at opnå de forventede levetider af betonkonstruktioner.

Hvor det gælder udvikling af nye betontyper, nye bindemidler og grønnere betontyper med lavere CO_2 -aftryk må det derimod forventes, at mikroskopi vil kunne spille en stor rolle. Anvendelse af scanning elektron mikroskopi (SEM/EDX) og nyere metoder vil sammen med petrografi anvendes i højere grad for afklaring af effekten af nye materialer, cementens hydratisering og omdannelser ved nedbrydningsforløb.

I skadessager er strukturanalyse fortsat et uundværligt redskab for at få fastlagt initialkvalitet, type og grad af nedbrydning og for at kunne stille en troværdig prognose for en given beton under en given eksponering.

10.6.11 Standarder og anvisninger

Anvendte standarder på området:

- ASTM C856 Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete.
- ASTM C457 Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete.
- DS/EN 480-11:2005 Tilsætningsstoffer til beton, mørtel og injektionsmørtel - Prøvningsmetoder - Del 11: Bestemmelse af luftporestruktur i hærdnet beton.
- DS 423.36:1995 Betonprøvning. Hærdnet beton. Bestemmelse af mængden af mikrosilica i klumper (denne standard beskriver en metode til at bestemme, hvor stor en andel af en tilsat mængde mikrosilica, der er til stede som klumper efter betonens blanding og hærdning).
- DS 423.39:2002 Betonprøvning - Hærdnet beton - Fremstilling af fluorescens-imprægnerede planslib (denne prøvningsmetode beskriver fremgangsmåden for fremstilling af fluorescensimprægnerede planslib, der bl.a. anvendes til analyse af betons indre stabilitet. Til metoden er knyttet et billedatlas).
- DS 423.40:2002 Betonprøvning - Hærdnet beton - Fremstilling af fluorescens-imprægnerede tyndslib (denne prøvningsmetode beskriver fremgangsmåden for fremstilling af fluorescensimprægnerede tyndslib til anvendelse for analyse af betons mikrostruktur).
- DS 423.41:2002 Betonprøvning - Hærdnet beton - Indre stabilitet (denne prøvningsmetode anvendes til at vurdere en betons indre stabilitet vha. fluorescensimprægnerede plansnit)
- DS 423.42:2002 Betonprøvning - Hærdnet beton - Betonsammensætning (denne prøvningsmetode anvendes til at dokumentere en betons effektive v/c-forhold samt betonens bestanddele og deres mængdeforhold vha. analyser på makro- og mikroniveau).
- DS 423.43:2002 Betonprøvning - Hærdnet beton - Pastahomogenitet (denne prøvningsmetode anvendes til at dokumentere homogeniteten af cementpasta i færdigblandet beton, udstøbt i cylindre. Metoden kan anvendes til at dokumentere om den anvendte blandetid er tilstrækkelig. Til metoden er knyttet et referenceatlas).

10.6.12 Referencer

- [1] Christensen, P., Gudmundsson, H., Thaulow, N., Jensen, A. D., Chatterji, S. (1979): "Struktur- og bestanddelsanalyse af beton" i Nordisk Betong. Nr. 3.
- [2] Jensen, A. D., Eriksen, K., Chatterji, S., Thaulow, N., Brandt, I. (1985): "Strukturanalyse af beton" i serien BETON-TEKNIK. Nr. 4/07/1985, Aalborg Portland.

- [3] Larsen, Erik Stoklund (1992): "Betonkonstruktioners levetid. Et forprojekt. SBI Rapport 225." Statens Byggeforskningsinstitut.
- [4] Idorn, Gunnar M. (1997): Concrete Progress from Antiquity to the Third Millenium. London, Thomas Telford.
- [5] Thaulow, N., Jensen, A. D., Chatterji, S. Christensen, P. og Gudmundsson, H. (1982): "Estimation of the compressive strength of concrete samples by means of fluorescence microscopy", Nordisk Betong, Nr. 2-4.
- [6] Poole, Alan B., Sims, Ian: "Concrete Petrography: A Handbook of Investigative Techniques." Second Edition. CRC Press, 2015.
- [7] Ingham, J.P.: "Geomaterials under the microscope – a colour guide." Manson Publishing Limited, London, UK, 2011.
- [8] Technical Report No. 71: "Concrete Petrography – An introductory guide for the non-specialist". The Concrete Society, CCIP-52, 2010.

10.6.12.1 Nyttige links

- EMABM: <https://www.uni-kassel.de/fb14bau/institute/institut-fuer-konstruktiven-ingenieurbau-iki/emabm-2024-in-kassel>
- ICMA: <https://cemmicro.org/>
- Jakobsen, U.H.: "Strukturanalyse af beton - Et værktøj til brug ved bestemmelse af skadesårsager og holdbarhed". Dansk Beton, 2007.
<https://www.danskbeton.dk/media/17225/danskbeton2-07.pdf>
- Jakobsen, U.H.: "Petrografi af beton – Teori og eksempler fra praksis på nedbrydning af beton". Dansk Betonforening, Temadag 2018, Kolding.
https://www.danskbetonforening.dk/media/betonrepdag_2018/petrografi_af_beton_ida-rep_060218.pdf
- Eriksen, K.: "Farøbroerne og andre konstruktioner i havvand- mikroskopi som del af beslutningsgrundlag for valg af reparationsløsning". Temadag 2018, Kolding.
https://www.danskbetonforening.dk/media/betonrepdag_2018/dbf-tema_dag_2018.pdf
- "Fehmarn Belt Exposure site". Teknologisk Institut, Expert Centre for Infrastructure Materials (2015): <http://www.expertcentre.dk/demo-projects/fehmar-belt-exposure-site.aspx>
- Laugesen, P.: Kæmpeskridt for genbrugsbeton i nye huse. BYG-TEK (2018)
<https://bygtek.dk/artikel/byggeri/kmpe-skridt-for-genbrugsbeton-i-nye-huse>