

Kvalitetsregistrering af nystøbt, skadet og repareret beton

Af ingeniør, docent, cand. polyt. Ervin Poulsen, DIAB og AEC-laboratoriet

Der har altid været behov for at kunne beskrive betons kvalitet. Det skyldes måske, at beton var det eneste byggemateriale, der blev fremstillet på byggepladsen, og at kvaliteten kunne være svingende. I dag, hvor beton næsten udelukkende fremstilles på fabrik som andre byggematerialer, er dette behov alligevel ikke ændret. Kravene til en mere nuanceret, men stadig numerisk angivelig kvalitetsbeskrivelse, er nemlig steget i takt med udviklingen i samfundet.

Selve kvalitetsbegrebet har naturligvis undergået forandringer i tidens løb. Betons styrke har været, og er stadig, en af de parametre, der er bekvem at måle. Derfor optræder styrke ofte som eneste talmæssige mål for betons kvalitet i forbindelse med tilsynets kontrol. Vi ved – og det har man altid vidst – at betons styrke ikke er et entydigt mål for armerede betonkonstruktioners holdbarhedsmæssige kvalitet. For blot at tage nogle få nedbrydningsårsager, så har betonstyrken ingen entydig indflydelse på

- *Frost/tø-skader.* Luftporefordelingen i betonens cementpasta og stenens porøsitet er afgørende for betonens nedbrydning (smuldring og springerdannelse).
- *Karbonatiseringen.* Cementpastaens kapillarporøsitet, betonens grovporøsitet (komprimeringsvigt) og revner er af betydning for karbonatiseringshastigheden.
- *Alkaliskelreaktioner.* Sandets flintindhold og cementpastaens alkaliindhold styrer skadeforløbet (gel- og revnedannelsen).
- *Kloridindtrængningen.* Betonens tæthed og cementtype bestemmer indtrængningshastigheden og kloridophobningen.

Betons modstandsevne mod nedbrydning bestemmes derimod af

- *Betonens permeabilitet,* d.v.s. gennemtrængelighed for skadelige gasser og væsker.
- *Delmaterialernes forligelighed,* d.v.s. evne til sammenblanding uden skadelig volumenændring og nedbrydning.

Det kan vise sig teknisk umuligt eller for beko- steligt at fremstille beton med tilstrækkelig tæthed

og af velegnede delmaterialer. Det kan man så råde bod på ved at anvende effektive tilsætningsstoffer og egnede overfladebehandlingsmidler. Betonens styrke, det være sig trykstyrken eller trækstyrken, kan aldrig sige noget entydigt om

- betonens tæthed,
- delmaterialernes typer,
- tilsætningsstoffernes effektivitet, og
- overfladebehandlingens egnetthed.

Omvendt kan man derimod, ud fra betonens

- sammensætning,
- luftindhold,
- porøsitet,
- revneintensitet,
- cementtype,
- tilsætningsstoffer,
- tilslagets bjergarter, og
- overfladebehandling

sige noget om betonens styrke. Specielt kan man sige noget om, hvorfor en beton er svag. Styrkemålingen kan kun oplyse om, at betonen er svag – ikke hvorfor!

Betonkvalitet

Ved et betonbygværks projektering forstås såvel den bærende konstruktions udformning og anordning som konstruktionselementernes dimensionering og betonens proportionering. Konstruktionselementernes bæreevne og betonens holdbarhed fastlægges på basis af en analyse af de laster og de miljøpåvirkninger, bygværket udsættes for eller skal kunne modstå med en rimelig (normeret) sikkerhed.

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

I betonbeskrivelsen skal den projekterende ingeniør give en ydelsesspecifikation for betonen for såvidt angår tæthed, forligelighed og styrke.

Det udmøntes altid i vikarierende egenskaber.

For at opnå tilstrækkelig *tæthed*, stilles derfor krav i forbindelse med

- vand/cement-forhold.
- revnedannelse, og
- komprimering.

For at opnå *forligelighed* stilles krav i forbindelse med

- cementens type, d.v.s. sammensætning,
- støbevandets renhed,
- tilslagets bjergartsfordeling og renhed,
- tilsætningsstofferne egenskaber, og
- luftindholdets porefordeling.

For at opnå tilstrækkelig *styrke*, stilles krav i forbindelse med betonens

- cylindertrykstyrke, evt.
- spaltetrækstyrke, og evt.
- bøjningstrækstyrken

til visse, nærmere fastlagte terminer, afhængigt af behovet.

Samlingen af disse krav opfyldelse ved arbejds udførelse repræsenterer betonens kvalitet ved afleveringen. Der er altså tale om et kompliceret mål, hvor styrken kun er et beskedent, men naturligvis nødvendigt element.

Kvalitetsmåling

Det fremgår af den tekniske litteratur, at betonens pionerer i Danmark har været helt klar over betydningen af betonens tæthed og delmaterialernes forligelighed. Det var blot ikke muligt at kontrollere disse begreber på hærdnet beton. Derfor bestod kvalitetsvurderingen tidligere af

- tilsyn med *arbejdets udførelse*, og
- måling og vurdering af *styrken af støbte prøvelegemer*.

Kvalitetsdefinition

For at kunne måle og vurdere betons kvalitet, må man definere, hvad der forstås ved betons kvalitet i holdbarhedsmæssig henseende. Kvalitet er et relativt begreb, idet beton kan befinde sig i miljøer med varierende aggressivitet. Dansk Ingeniørforenings norm for betonkonstruktioner. DS 411 ud-

gave 3 fra 1984, taler om fire miljøklasser, nemlig

- *Passivt miljø*, d.v.s. uden muligheder for skadelig nedbrydning af beton og armering.
- *Moderat miljø*, d.v.s. fugtig-ferske omgivelser.
- *Aggressivt miljø*, d.v.s. fugtig-salte og/eller røgholdige omgivelser.
- *Særligt aggressivt miljø*, d.v.s. fugtige omgivelser med høj saltkoncentration og/eller stærkt cementpastaopløsende væsker og gasser.

Om det særligt aggressive miljø siger betonnormen, at det bør overvejes, om ubeskyttet beton, selv af bedste kvalitet, er et egnet byggemateriale, idet der står, citat:

Der kan forekomme særligt aggressive miljøer inden for normens gyldighedsområde, for hvilke normen ikke foreskriver, hvilke forholdsregler, der skal tages for at sikre konstruktionens bestandighed.

Som vejledning hertil anføres, citat:

Blandt de foranstaltninger, der kan foreskrives, hvor særligt aggressive miljøer forekommer, kan nævnes udvendige membraner, betonteknologiske forholdsregler, herunder valg af cement, tilslagsmaterialer og v/c-forhold, geometriske forholdsregler, herunder valg af dæklag, og endelig valg af særlig korrosionsresistent armering.

Til aggressivt miljø, hvor der med rimelig sikkerhed imod nedbrydning skal kunne anvendes beton, må det være beton af den bedste kvalitet, der kan fremstilles i dag. Det er muligt med moderne betontechnologi at fremstille en beton, der har en sådan kvalitet. Det kræver, at den hærdede beton

- er sammensat af forligelige delmaterialer (krav til *bjergarter*),
- har tilslag, der er tætte (krav til *densitet*), velgraderede (krav til *betonkornkurven*) og velfordelte i betonmassen (krav om *stabilitet* af frisk beton).
- er luftindblandet og at luftporene er fintfordelte (krav til *afstands faktor*),
- har en tæt cementpasta (krav til v/c), der er velhydratiseret (krav til *hærdningsgrad*),
- er revnefri, både med hensyn til overfladerevner, pastarevner og vedhæftningsrevner (krav til *revneintensitet*),
- er velkomprimeret uden grovporositeter (krav til *komprimeringsgrad* og/eller *permeabilitet*).

Kun ved at nuancere kravene og få dem opfyldt kan der fremstilles betonkonstruktioner, der rationelt og økonomisk (ved en helhedsbetragtning) kan modstå miljøpåvirkningerne i betonnormens forskellige miljøklasser.

Som det fremgår af ovenstående oversigt, er styrkemåling ikke egnet til måling af kvalitet. Derfor må der anvendes andre målemetoder ved kvalitetsvurdering af beton. I betonbeskrivelserne og i betonnormer har der altid været verbale formuleringer, enten af vikarierende egenskaber eller af udførelsesteknikker og efterbehandling, der erfaringsmæssigt sikrede en tilfredsstillende betonkvalitet.

I Danmarks første Normer for Jærnbeton-Konstruktioner, udgivet af Dansk Ingeniørforening i 1908, står der f.eks. om betonens tilslagsmaterialer, citat:

Sand og grus skal være grovkornet, frit for organiske stoffer, ler og andre indblandinger i skadelig mængde, og i det hele egne sig til betonstøbning. Skærver og singels skal være af et tilstrækkeligt hårdt materiale til at give en stærk beton, rene og fri for fremmede indblandinger. Kornstørrelsen må stå i forhold til afstanden mellem jernstængerne og til konstruktionens godstykkelse, og den må som regel ikke overskride 25 mm.

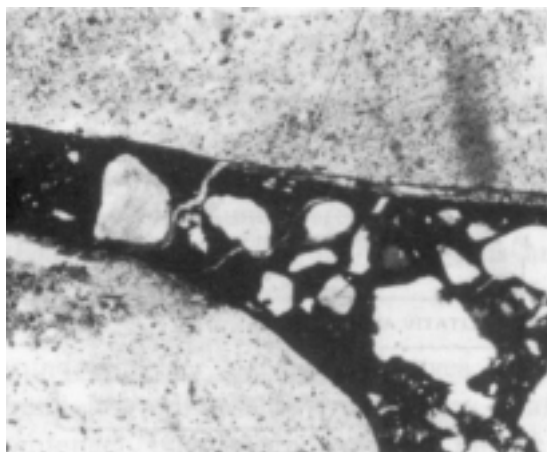
Det samme siges kortere, men ikke mere operationelt, i den nyeste udgave af betonnormen, DS 411 udgave 3 fra 1984. Heri står der om betonens tilslag, citat:

Grus skal bestå af materialer med egenskaber, der sikrer, at den foreskrevne betonstyrke kan opnås og bevares i den konstruktion, betonen tænkes anvendt til.

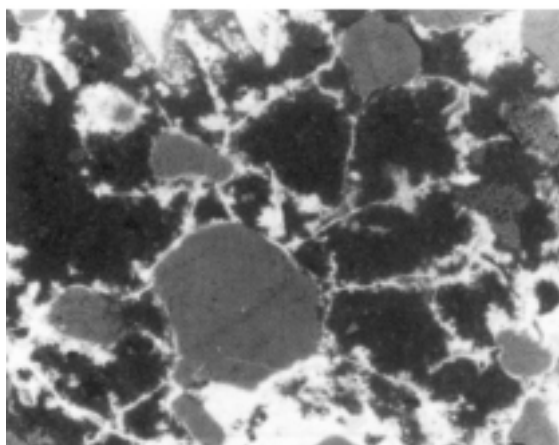
Det kan næppe siges kortere og klarere. Det giver dog ikke tilsynet mange muligheder for *måling, vurdering og handling* (accept/forkast), med mindre der foretages en strukturanalyse af prøver fra den hærdnede beton. Selv i det tilfælde kan det være svært, for mange betonbeskrivelser er ikke entydige og operationelle i deres krav.

Nye målemetoder

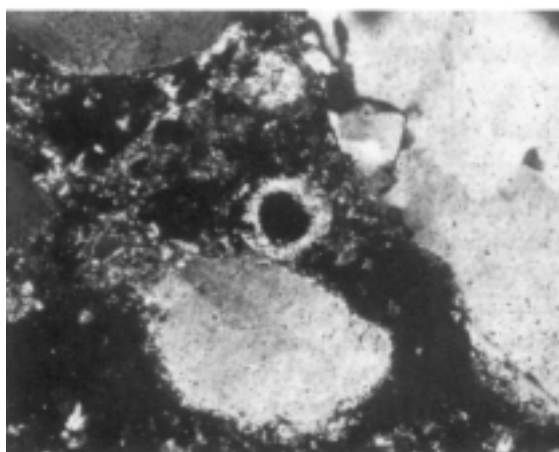
I begyndelsen af 1950'erne indførte Alkaliudvalget under ATV/SBI en ny og utraditionel prøvningsmetode for beton. Betons kvalitet blev målt og vurderet ved observationer på planslib og tyndslib



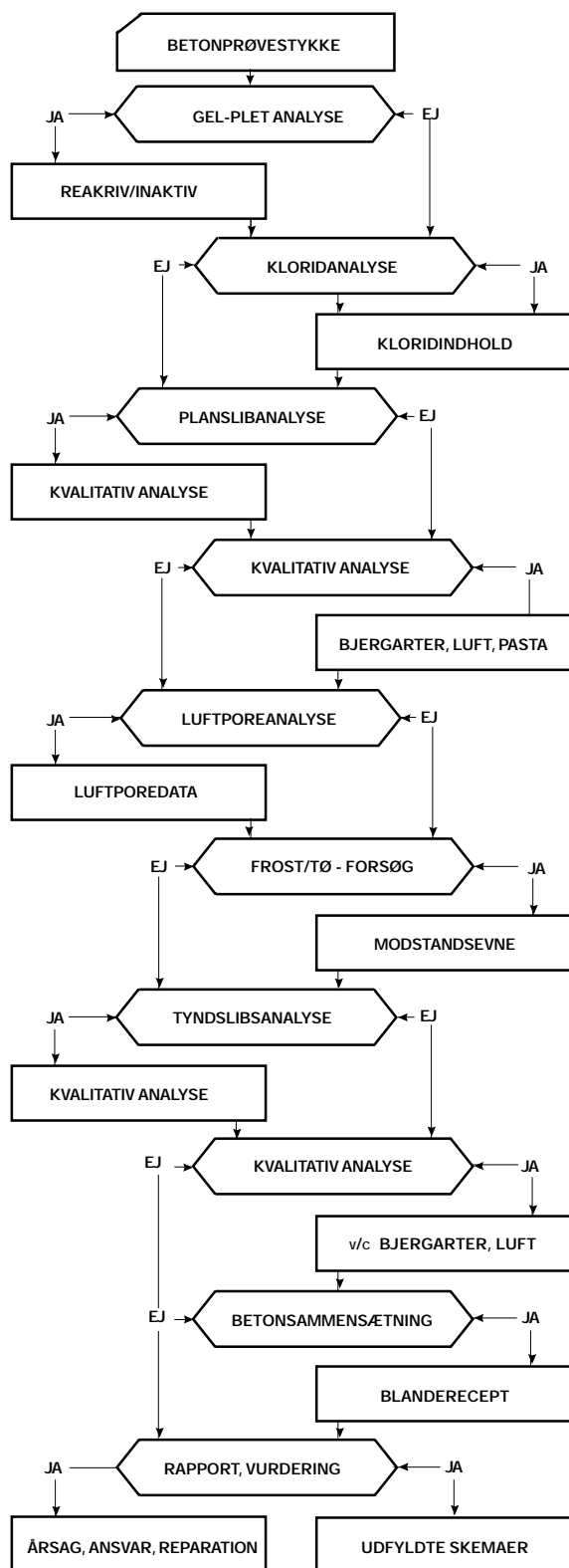
Revedannelse og udfældning af alkalikiselgel i revnen, der udspringer fra en tæt flints porøse flinktskorpe. Fotografiet dækker 2,7 · 4,0 mm.



Pastarevner i en inhomogen cementpasta. Selv den tætteste cementpasta (lille v/c) kan være gennemtrængelig, når den er gennemsat af pastarevner. Fotografiet dækker 1,0 · 1,5 mm.



Luftboble med udfældning af ettringite. Det er tegn på, at der er foregået en kemisk omdannelsesproces i cementpastaen. Fotografiet dækker 0,4 · 0,6 mm.



Rutediagram for visuel strukturanalyse af beton med supplerende kemiske analyser. Det har betydning for økonomien, at finde den kritiske vej i diagrammet, dvs. den kæde af undersøgelser, der er nødvendige og tilstrækkelige for at kunne drage en sikker konklusion.

af udborede betonkerner. Disse metoder er sidenhen kommet til at præge holdbarhedsforskning inden for betonområdet, ikke alene i Danmark, men også i udlandet. Byggeteknik, Teknologisk Institut, har videreudviklet imprægneringsteknikken. Ved at tilsætte imprægneringsvæsken et fluorescerende stof, er det blevet muligt at

- observere revner, der er tyndere end mikroskopets opløsningsevne, samt bestemme årsagen til de tidlige revners opståen, og
- måle cementpastaens kapillarporøsitet og omsætte måleresultatet til det velkendte v/c-forhold, som derved bestemmes indirekte.

Som regel er de lysoptiske metoder fuldt tilstrækkelige til at måle og beskrive hærdnet betons kvalitet. Der undersøges *planslib* (polerprøver) og *tyndslib*. De instrumenter, der anvendes er

- *stereomikroskop*, og
- *polarisations/fluorescens-mikroskop* til gennem- og påfaldende lys.

Disse mikroskoper er forsynede med diverse hjælpemidler som *krydsbord* og *mikrocomputer*, således at de forskellige bestanddeles volumenandel af betonen kan måles hurtigt og bekvemt.

Der findes *elektroniske mikroskoper* med meget stor forstørrelse og opløsningsevne. De benyttes normalt ikke i kontrolarbejdet, men kan finde anvendelse inden for forskningen til løsning af specialproblemer.

Der er udviklet *kemiske mikroanalysemetoder*, der muliggør måling af sammensætningen af meget små prøver. Det er dog stadig en videreudvikling af den traditionelle *titreringsmetode*, der dominerer de kemiske analyser i kontrolarbejdet.

Betonprøvers udtagning

Der udtages et antal prøver af den hærdnede beton fra den betonkonstruktion, der skal undersøges. Der skal her erindres, at de målinger, der foretages, refererer til betonen i de udtagne prøver og gælder kun for betonen i hele bygværket i den udstrækning, hvor betonprøverne kan betragtes som repræsentative for hele bygværket.

Der er flere muligheder for at udtage betonprøver, og her spiller både formål og økonomi ind. Normalt vælges en af følgende muligheder:

- Betonprøvelegemer, støbt samtidig med bygvær-

ket af samme betonblanding og under samme betingelser.

- Betonkerner, udboret af prøvestøbninger før støbning af selve betonbygværket.
- Betonkerner, udboret af betonbygværket.
- Betonhåndstykker, afhugget eller udsavet af betonbygværket.

De udborede betonkerners diametre kan varierer fra ca. 25 mm til 150 mm, alt afhængig af formålet med undersøgelsen.

Betonprøvers præparering

Betonprøverne bringes til et laboratorium, hvor der fremstilles præparater til brug for en makro/mikroskopisk analyse.

Imprægnering

Er der tale om skadet og nedbrudt beton, foretages der en imprægnering af betonprøven, inden den videre forarbejdning. Formålet med imprægneringen er for det første at bevare betonens struktur og skadebillede svarende til det tidspunkt, hvor betonprøven udtages. Dernæst har imprægneringsmidlet til formål at tydeliggøre revner og porøse partier i betonen. Derfor tilsættes imprægneringsmidlet et fluorescerende stof, således at revneudbredelse og porøse partier kan studeres og opmåles på *UV-belyste planslib*.

Planslib

Et planslib er et slebet og poleret snit i en betonprøve. Planslibet kan kontrastbehandles til specialanalyser.

Tyndslib

Et tyndslib er en 0,02 mm tyk, fluorescensimprægneret betonskive, slebet og poleret på begge sider og indlimet mellem to glasplader. Tyndslibet er så tyndt, at betonen, dens cementpasta, tilslag og udfældninger er gennemsigtige. Tyndslibet kan derfor studeres i mikroskop med gennemfaldende lys. Særlige teknikker, som f.eks. anvendelse af polariseret lys, gør det muligt at identificere betonens bestanddele, udfældninger m.v.

Aktuelle undersøgelser

Undersøgelse af betons kvalitet finder sted, når der er tale om

- *aflevering* af et nyt eller repareret betonbygværk, hvor der har været stillet krav til betonens eller

reparationens kvalitet, og denne kvalitet skal dokumenteres.

- *skadet beton*, hvor skadeårsag og ansvarsplacering skal klarlægges.

De undersøgelser, der kan inddrages, afhænger af henholdsvis de stillede kvalitetskrav og af skadeomfanget. I det følgende omtales kun de hyppigst forekommende undersøgelser.

Bjergartsfordeling

For at sikre sig, at betonens delmaterialer er forlignelige, stilles der i betonbeskrivelser krav om begrænsning af f.eks. *sandets flintindhold* (af hensyn til risikoen for skadelige alkalikiselreaktioner) og *stenens indhold af porøse partikler* (af hensyn til risikoen for frostspringere). Sandets og stenens indhold af specifikke bjergarter kan måles ved enten

- *punkttælling*, eller
- *traversmetoden*.

Ved punkttælling indlægges et net over planslibet eller tyndslibet. Ved at bestemme og optælle de aktuelle bjergarter i de derved fastlagte koordinater, kan bjergarternes volumenfordeling beregnes. Der tælles ofte mellem 3.000 og 10.000 punkter, afhængig af den pågældende bjergarts mægtighed i slibet.

Ved traversmetoden indlægges et parallelliniesystem over planslibet eller tyndslibet. Ved at måle hvor stor en andel de aktuelle bjergarter optager af linien, kan bjergarternes volumenfordeling beregnes. Ved traversmetoden kan kornkurven også bestemmes.

Luftporefordeling

For at sikre sig, at betonens cementpasta er frostsikker, stilles der i betonbeskrivelser krav til luftboblernes fordeling i den hærdede beton. Det kan ske med krav til luftboblernes

- samlede volumen (*luftindholdet*),
- boblestørrelse (*specifik overflade*, d.v.s. overflade pr. volumenenhed), og
- bobleafstand (*afstandsfaktor*).

Disse størrelser måles ved traversmetoden som beskrevet ovenfor. For at kunne beregne afstandsfaktoren, må betonens pastaindhold dog kendes eller estimeres. Det sker ud fra kendskabet til betonrecepten eller ved måling af betonens sammensæt-

ning som beskrevet nedenfor. Ofte er det dog tilstrækkeligt at fastsætte en formel værdi af betonens pastaindhold, f.eks. 27,5% af betonvolumet.

Betonsammensætning

Til ethvert betonbygværk foreligger der en eller anden form for godkendelse af betonrecepten, d.v.s. betonens sammensætning, forud for betonstøbningens start. Den anvendte betons sammensætning kan kontrolleres på basis af

- indkøbte og medgåede delmaterialer til hele byggeriet,
- registrering af de doserede mængder delmaterialer pr. blanding samt måling af grusets vandindhold,
- analyse af udborede betonprøvers grusindhold og v/c-forhold.

De to første metoder lider under øjensynlige mangler. Ved den sidste metode bestemmes betonens grusindhold, g , i vol% af betonen ved traversmetoden eller ved punkttælling. Betonens luftindhold, a , i vol% måles ligeledes ved traversmetoden eller ved punkttælling. Betonens v/c-forhold bestemmes ved analyse af tyndslib i et fluorescensmikroskop. Af tyndslibet fremgår det også hvilken cementtype, der har været anvendt. Derved kendes cementens densitet D_c , i rent tal. Betonens cementindhold, C , i kg/m^3 beregnes dernæst af formlen

$$C = \frac{1000 - 10(a + g)}{v/c + 1/D_c}$$

Betonens grusindhold, G , i kg/m^3 bliver derefter

$$G = 10gD_g$$

hvor D_g er grusets densitet målt i rent tal. Densiteten D_g fastlægges på basis af den målte bjergartsfordeling. Betonens vandindhold, V , i liter/m^3 bliver endelig

$$V = Cv/c$$

Den målte/beregnete betonsammensætning kan oplyse om betonens initialegenskaber, f.eks. betonens trykstyrke, beregnet ud fra Ferets formel.

Kloridindhold

Før enhver reparation er det tilrådeligt at bestemme betonens kloridindhold. Kravene i DS 411 udgave 3 fra 1984 til det maksimale kloridindhold er blevet skærpet væsentligt i forhold til kravene i udgave 2

fra 1973. Efter betonnormen DS 411 udgave 3 fra 1984 skal betonens kloridindhold nu begrænses på følgende måde, citat:

Det totale indhold af opløselige korider, beregnet som vandfrit calciumklorid, må ikke overstige følgende andel af cementvægten: 0,5% i slapt armeret beton i aggressivt miljø og i spændbeton,...

En reparation vil som regel omfatte beton i *aggressivt miljø*. Har man den mindste mistanke om, at betonen har været udsat for saltbelastning, må der foretages en kloridanalyse. Denne undersøgelse er i øvrigt både billig og hurtig.

Ved en kloridmåling får man betonens kloridindhold i enheden $\text{kg Cl}^-/\text{m}^3$ beton. Kendes betonens cementindhold, kan man omregne kloridindholdet til enheden vandfrit calciumklorid i vgt% af betonens cementindhold. Det vil være de færreste betoner, som skal repareres på grund af skader fra saltpåvirkning, der kan klare det nye krav!

Skadeårsager

Det er en meget vigtig regel, at beton ikke må repareres, uden at grunden til nedbrydningen er fastlagt og årsagen fjernet.

Årsagerne til betons nedbrydning kan som regel fastslægges ud fra

- *revneforløbet* i plan- og tyndslib, og
- *omdannelser og udfældninger*, observeret i tyndslib.

Kendetegnene for de forskellige nedbrydningstyper er øjensynlige for den trænedede betonpetrograf.

Reparationskontrol

En reparations kvalitet afhænger både af reparationsmaterialets egen kvalitet og sammenhængen i kontaktfladen mellem reparationsmaterialet og den gamle beton. Her er analyse af planslib og tyndslib af en udboret prøve gennem repareret beton en velegnet, hurtig og billig kontrolforanstaltning. Det gælder både for sprøjtepuds, mørtelreparation, genstøbning og injektion.

Efterskrift

Hovedparten af al betonfremstilling foregår på fabrik. Undtagelser er beton til meget store projekter som f.eks. Farø-broerne.

Man hører undertiden det postulat, at beton og betonelementer derfor er blevet *industrielle kva-*

litetsprodukter. Det er dog nok ønsketænkning – produktionen af beton og betonelementer kan højst karakteriseres som *mekaniseret håndværk!*

Hvad er der da galt? Ja, det ser man tydeligst, hvis man sammenligner en betonleverance med de egentlige industriprodukter. Man behøver blot at skele til produktionen af armeringsstål; man behøver ikke at sammenligne beton og betonelementer med avancerede produkter fra maskin- og elektronikindustrien. Hvorfor kan man ikke få beton med en deklaration, der angiver kvalitet og ydeevne? Hvorfor sælges der beton til aggressivt miljø, hvor denne beton kun opfylder enkelte af kravene i DS 411? Jeg tror, at svaret skal søges både hos *køber, sælger og normgiver!*

Dansk Ingeniørforenings norm for betonkonstruktioner, DS 411, *er ikke en holdbarhedsnorm* – selv om mange tror det! Når køber derfor blot kræver beton, der opfylder kravene i DS 411, er der ingen »garanti« for holdbarhed i bred forstand. Køber må være mere bevidst og konkret i sin kravformulering for at få holdbar beton, og sælger må være mere villig til at deklare betonens kvalitet, f.eks. ved de kvalitetsmål, der er anført i denne artikel.

Supplerende litteratur

- *Ervin Poulsen:* »Preparation of Samples for microscopic Investigation«. Alkaliudvalgets Progress Report M 1. Statens Byggeforskningsinstitut, 1958.
- *Preben Christensen, et al.:* »Måling og vurdering af hærdnet betons holdbarhed«. Dansk Betonforening, publikation 10:1981.
- *Preben Christensen, et al.:* »Prøvningsmetoder for Beton, struktur- og bestanddelsanalyse af beton«. Dansk Betonforening, publikation 4:1978.
- *Jørn Bredahl-Jørgensen, Ervin Poulsen:* »Kvalitetsvurdering af Betonbyggeri ved Projektering, Udførelse og Reparation«. Dansk Institutions Tidsskrift, 10:1983.
- *Børge T. Lorentzen:* »Fejl og skader ved Betonkonstruktioner – ved Planlægning, Projektering og Udførelse«. Byggefejlregistret, hefte 7. Rødovre 1983.
- *G.M. Idorn:* »Durability of Concrete Structures in Denmark«. Afhandling DtH 1967. I kommission hos Dansk Beton Institut.
- *Ervin Poulsen:* »Betons holdbarhed i særlig aggressivt Miljø, indtryk fra et studieophold i Bahrain«. Årsberetning for Danmarks Ingeniørakademi 1983.