

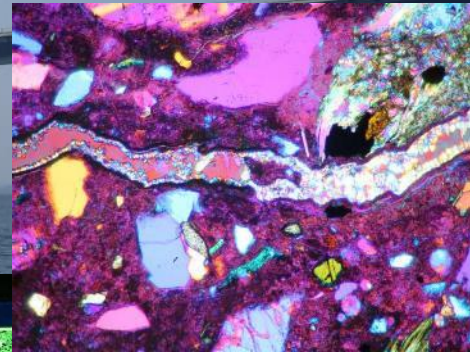
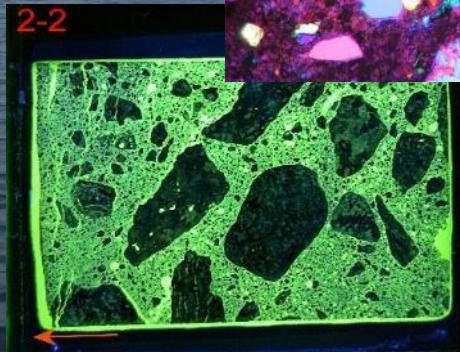
DBF Temadag 2018

Betonkonstruktioner i havvand

Mikroanalyse som del af beslutningsgrundlag for valg af reparationsstrategi for beton i infrastrukturprojekter

Kirsten Eriksen, civilingeniør (K)
COWI A/S

Broer, Tunneler og Marine Konstruktioner
kie@cowi.com



Beton i havvand, nedbrydning i overfladen
og dybere ind

Et problem eller ikke?

Hvordan undersøge, hvordan evaluere?

Reparere, hvorfor – hvornår – hvordan?

NB! Kloridindtrængning/dæklag er IKKE i
fokus her, men er andre parametre, der
skal tages i regning i den samlede
evaluering.

Klorider og korrosionsrisiko klares
oftest forebyggende vha. katodisk
beskyttelse



COWI

Der forskes på Teknologisk Institut og højere læreanstalter.....

Ny forskning på nanoskala skal styrke betons holdbarhed i havvand



Betoncentret på Teknologisk Institut undersøger bindersammensætningens indflydelse på sulfat- og chloridindtrængning i beton

Billigere og endnu mere miljøvenlige betonkonstruktioner i havvand. Det er et af perspektiverne i et forskningsprojekt, som udføres af Betoncentret på Teknologisk Institut.

Projektet undersøger, hvordan sulfat fra havvand påvirker betoner, som ud over cement indeholder f.eks. flyveaske, mikrosilica og slagge.

Det er velkendt, at sulfat fx i rensningsanlæg og afløbsrør kan ødelægge beton. Det er ligeledes velkendt, at havvand kan påvirke og omdanne beton - men der mangler viden om, hvad der egentlig sker, når havvandssulfat trænger ind i beton.

"Det skyldes, at vi i Danmark pr. tradition sikrer holdbarheden ved at bruge sulfatbestandig cement til betonkonstruktioner i aggressive miljøer. Det virker, ingen tvivl om det. Men derfor er det ikke sikkert, at det er hverken den bedste, billigste eller mest miljørigtige løsning", siger seniorkonsulent Ulla Hjorth Jakobsen fra Betoncentret på Teknologisk Institut.

FMIB -Foreningen for mikroskopering af byggematerialer

Der holdes 3-4 årlige møder i FMIB m. erfaringsudvekslinger - og nogle gange eksotiske studierejser.

Foreningen er med til at sikre, at der er et relativt højt niveau i Danmark på dette område.

Der er ca. 15 firmamedlemmer.

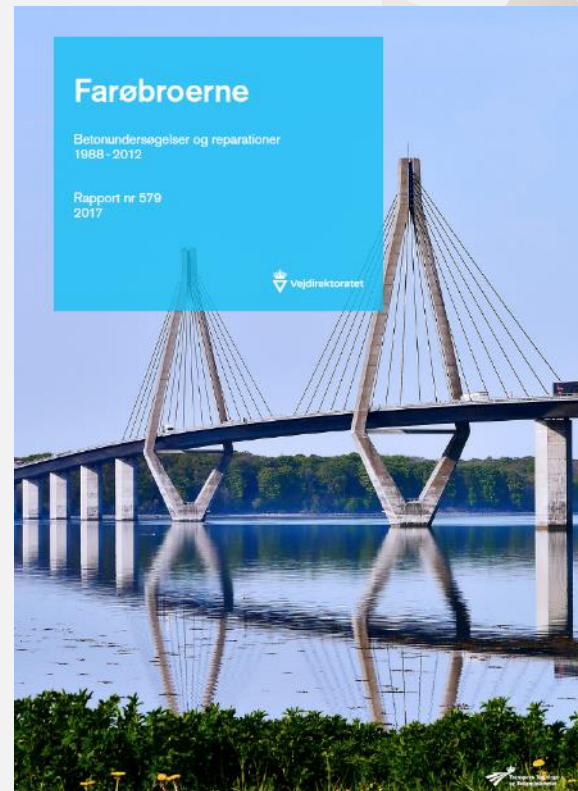


Farøbroerne 1988-2012

Ny rapport, opsamling af tidligere resultater
(lidt forsinket.....)

- › Opført i perioden 1980-85, indviet i 1985
- › Piller, undersøgelser og reparationer
- › Mikroskopi af piller over og under vandlinjen
- › Kloridindtrængning over og under vandlinjen
- › Pilotforsøg med overfladebehandling, hhv. katodisk beskyttelse
- › Iværksættelse af katodisk beskyttelse
- › Link til rapport

http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/publikationer/Lists/Publikationer/Attachments/959/Farobroerne_rap579.pdf



EKSEMPEL 1

Farøbroerne

Piller:

Cementindhold C: 330 kg/m³
(lavalkali-sulfatbestandig cement)

Flyveaske FA: 40 kg/m³ (11% af
bindemiddel)

V/(C+0,5FA)-forhold: 0,40-0,45

Dæklag til armering: 40-60 mm

Farøbroernes beton – undersøgt for VD flere gange under vand og i splashzonen

- Dykkereftersyn + inspektion fra båd
- Enkelte kerner udtaget under vand i 1992, 2004 og 2012
- 10 kerner udtaget i splashzone i 2014
- Undersøgelser på laboratoriet: Petrografi, makro- og mikroanalyse, kloridindtrængning
- Evaluering og rapportering
- Anbefalinger for fremtidigt vedligehold og reparation i samarbejde med VD

Antal kerner under vand er begrænset – kun stikprøver



Særeftersyn i 2014 – 10 borekerner i splashzone, i forbindelse med områder for indfræsede anodebånd



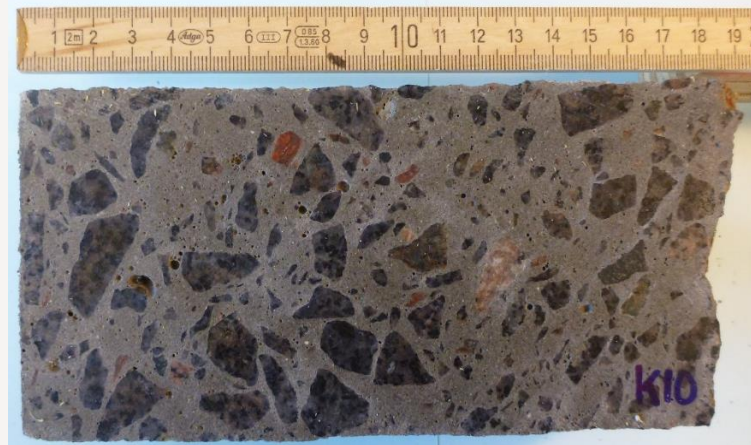
SF-06



FF-08 (40 cm mellem anodebånd)

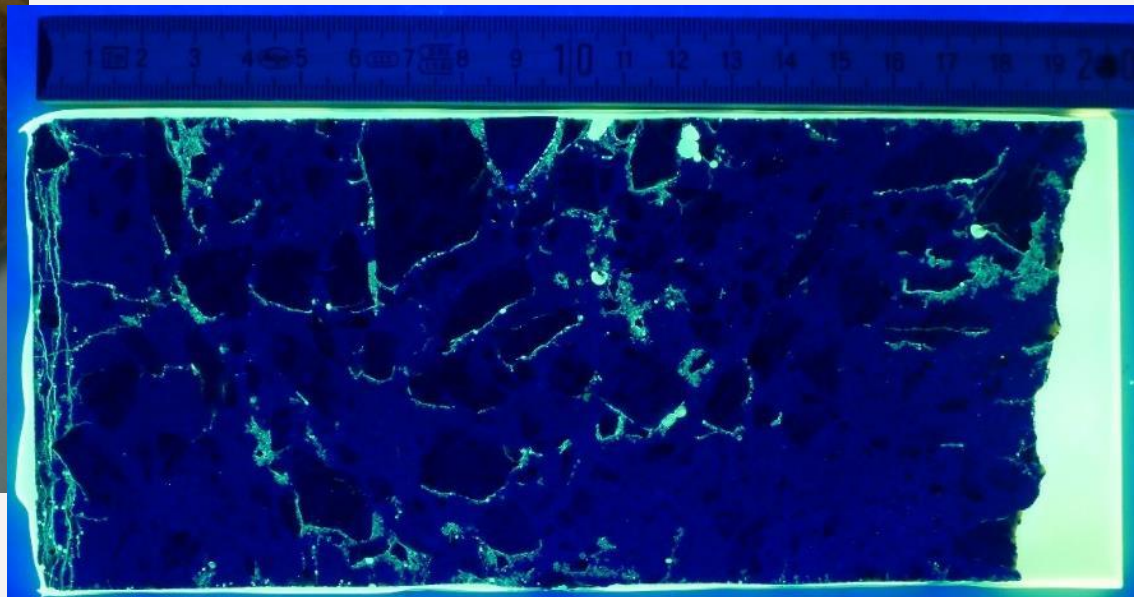
Kerne	Placering
1	Pille SF06 – side 3 (type A) Over nederste bånd, ved synlig skade.
2	Pille SF06 – side 3 (type B) Over nederste bånd, væk fra synlig skade.
3	Pille SF06 – side 3 (type C) Over tredje nederste bånd, lodret over kerne 1.
4	Pille FF02 – side 3 (type A) Over nederste bånd, ved synlig skade.
5	Pille FF02 – side 3 (type B) Over nederste bånd, væk fra synlig skade.
6	Pille FF02 – side 3 (type C) Over tredje nederste bånd, lodret over kerne 1.
7	Pille FF08 – side 3 (type A) Over nederste bånd, ved synlig skade.
8	Pille FF08 – side 3 (type B) Over nederste bånd, væk fra synlig skade.
9	Pille FF08 – side 3 (type C) Over tredje nederste bånd, lodret over kerne 1.
10	Pille FF03 – side 2 (type B-Ref). Over nederste bånd, fra pille generelt uden synlige skader.

For de fleste kerner ved nederste bånd ses der overfladeparallelle revnedannelser i de yderste 10 -15 mm fra overfladen. For enkelte af kernerne ses der desuden afskalninger i overfladen.

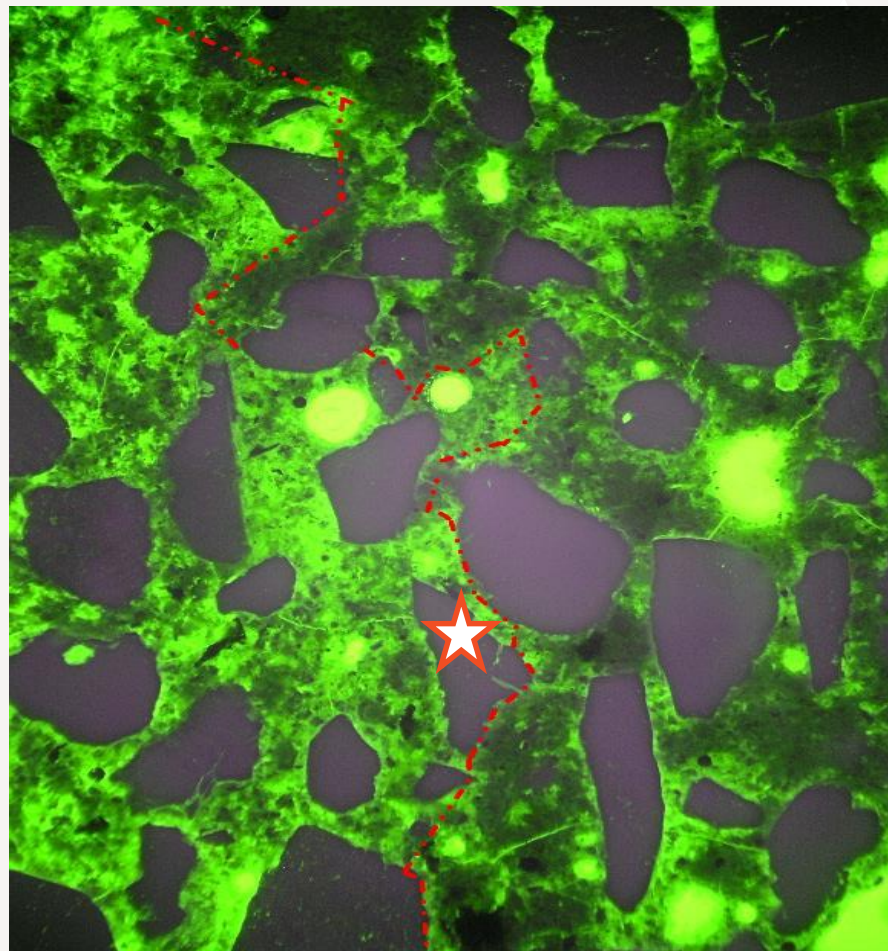
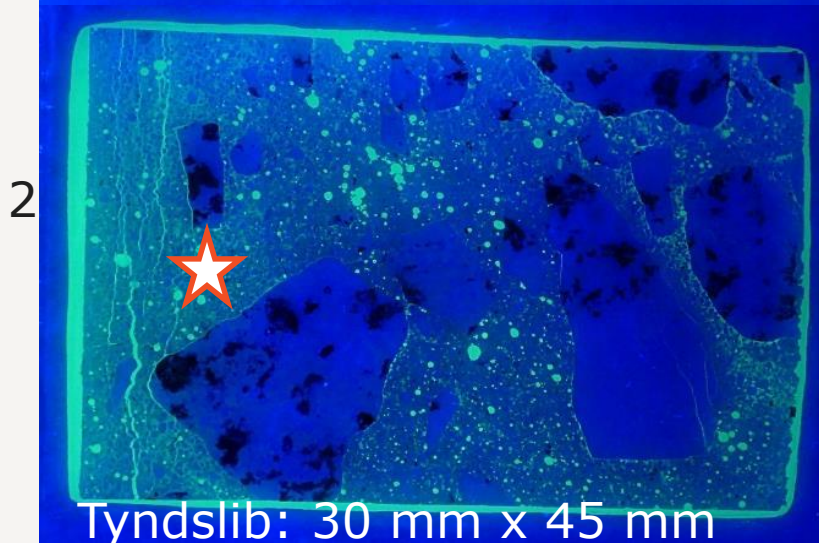
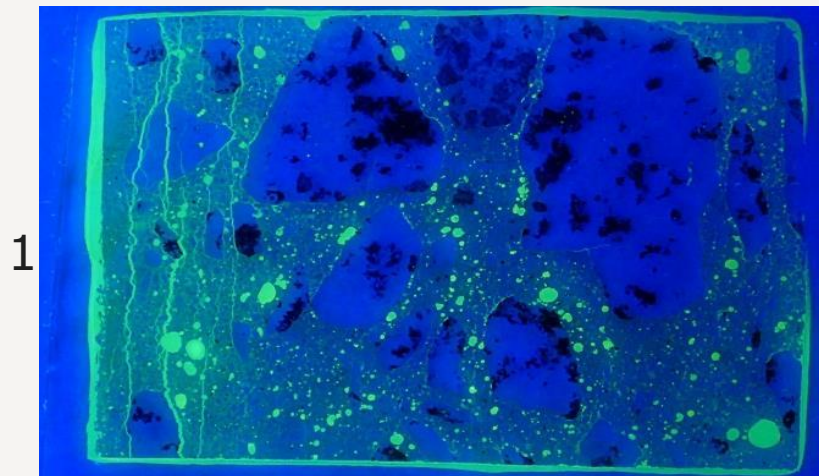


Kerne 10 (overfl. tv).
Ingen synlige skader.

Kerner fra 3 piller, i 3 niveauer, lige over vandlinjen.

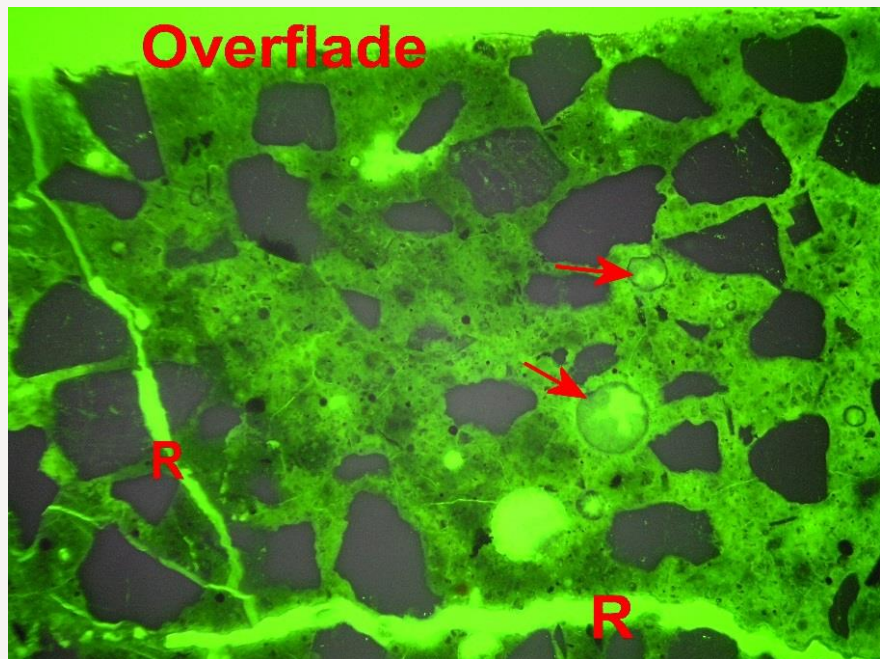


Overflade tv.

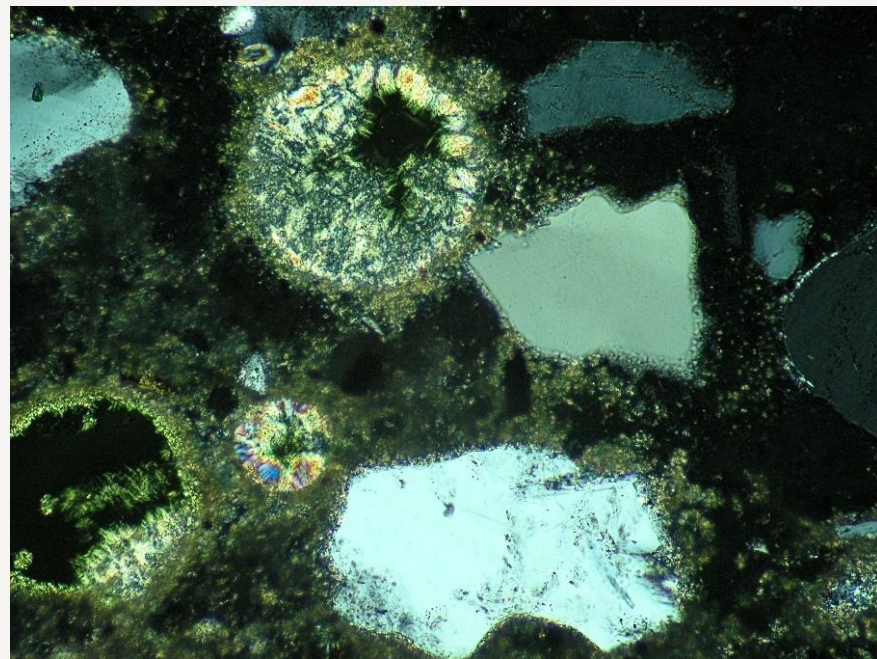


Kerne 2, ca. 10 mm dybde (1,8 mm x 2,4 mm).
Overfladeretning tv.

Kerne 2



1.8 mm x 2.4 mm



0.4 mm x 0.6 mm

Pille og slib nr.	Ækv. v/c (Mikro)	Overfladeparall. revner, dybde, mm (Mikro)	Udludet, dybde, mm (Mikro)	Overfladeparall. revner, dybde, mm (Makro)	Frostresistent, Ja/nej / Bemærkninger
SF06					
1	0,40	1-3, 4-6, 6-7	~9	10-15	Nej /
2	0,38	1-2, 3-4	10-11	10-15	Nej /
3	0,50	Ingen	~1	Ingen	Nej /
FF02					
4	0,38	1-3, 3-6, 7-8	6-9	10-15	Nej / Ingen FA
5	0,38	1, 3-4	5-6	10-15	Nej / Ingen FA
6	0,50	Ingen	0	Ingen	Nej / Ingen FA
FF08					
7	0,38	3-4	9-10	8-10	Nej /
8	0,40	3-6, 9-11	10-12	10-15	Nej /
9	0,50	0-1, 2-3	2-3	8-10	Nej /
FF03					
10	0,50	Ingen	2-3	Ingen	Nej /

2014-undersøgelser, Farø splashzone (alder 30-35 år)

- Kerner nær vandlinjen i pillerne SF06, FF02 og FF08 viser et overfladeangreb, dels med overfladeparallelle revnedannelser og mindre afskalninger, og dels med kemisk nedbrydning/omdannelser og udludning pga. havvandspåvirkning. Angrebets dybde er fra 5-6 mm op til 10-12 mm.
- Frost/tø-påvirkning af overfladen skønnes medvirkende til revnedannelser og afskalninger.
- Kerner udtaget lidt højere over vandlinjen (kote ca. 1,5 m) er generelt i god stand uden betydende tegn på angreb - der ses dog enkelte fine overfladerevner yderst i kernen fra pille FF08.
- Fremover kan der forventes at optræde yderligere afskalninger i forbindelse med de observerede overfladeparallelle revnedannelser i kerner omkring vandlinjen og det nederste anodebånd, op til ca. 10-12 mm dybde.

Farø, splashzone (fortsat)

- Katodisk beskyttelse i tidevandszonen med indfræsedde anodebånd til 40 mm dybde har vist sig at være et robust valg, med baggrund i de observerede overfladenære skader og risiko for afskalninger.
- Hvis en løsning med omstøbning med anodenet var blevet valgt, ville der have været risiko for dårlig vedhæftning.
- Katodisk beskyttelse i kote 0-2 m blev pga. høje kloridindhold etableret i 2008 for lavbroen (SF) og i 2009 for højbroen (FF). I 2016/2017 er der udført katodisk beskyttelse > 2 m over vandlinjen.
- Under og i vandlinjen blev der iværksat katodisk beskyttelse m. påtrykt strøm tilbage i 2007.

Farøbroerne under vand



Splashzone

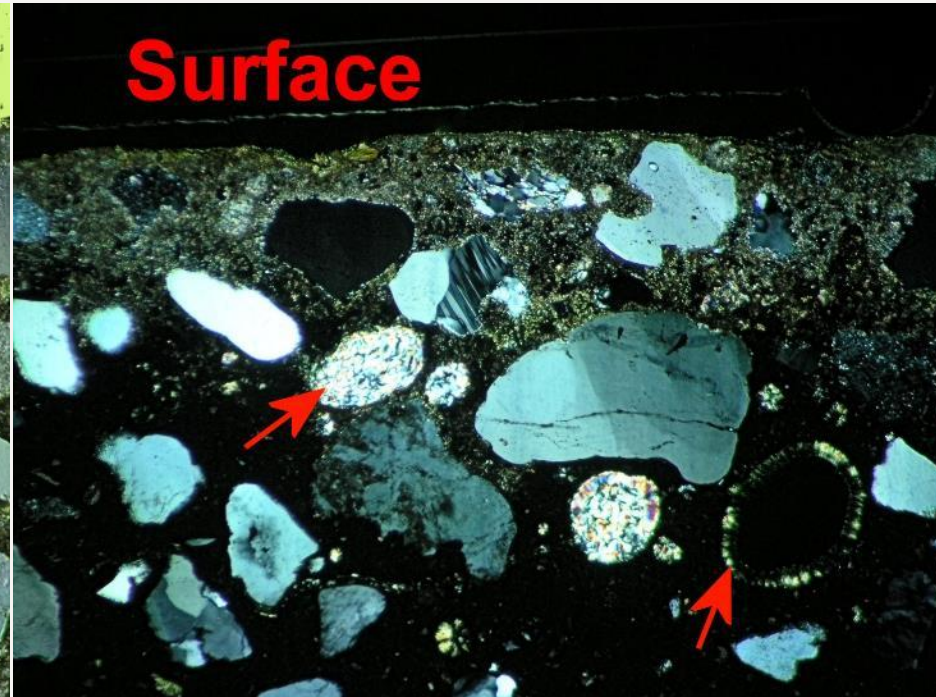
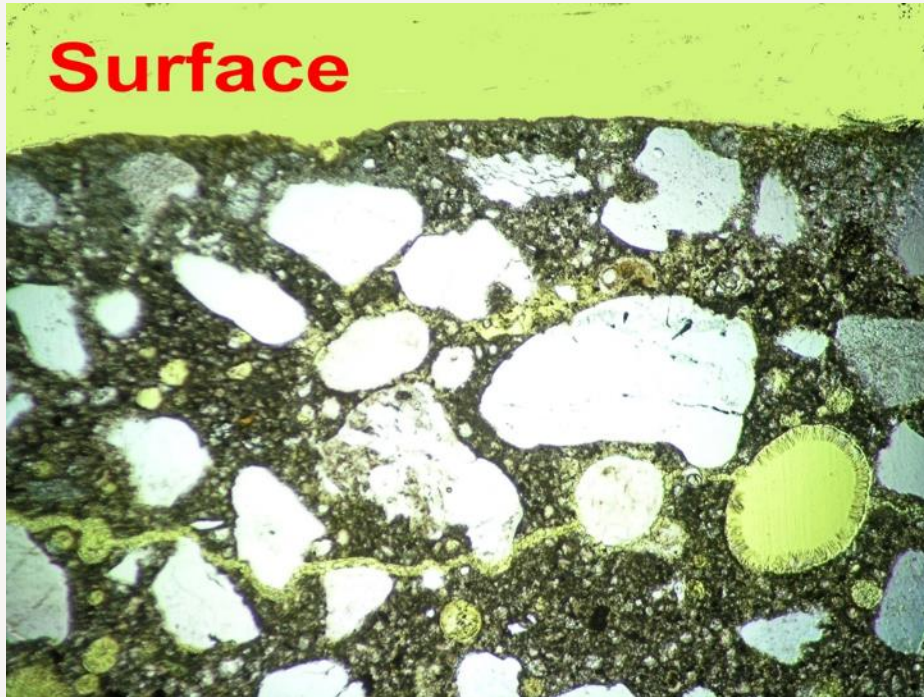
Under vand ved
lettere behugning:
Op til 30 mm dybe
afskalninger omkring
hjørner, ellers op til
10-15 mm



Under vand, ca. kote -1,5 m

COWI

Kerne N, overflade



Fotos: 1.8 mm x 2.4 mm. Porer og overfladeparallelle revner, m. ettringit og thaumasit. Karbonatisering og udludet pasta.

Kerne N



Foto: 1,2 mm x 1,5 mm. 4-5 mm under overfladen (opad). Udfældninger i porer og omdannelser i pasta.

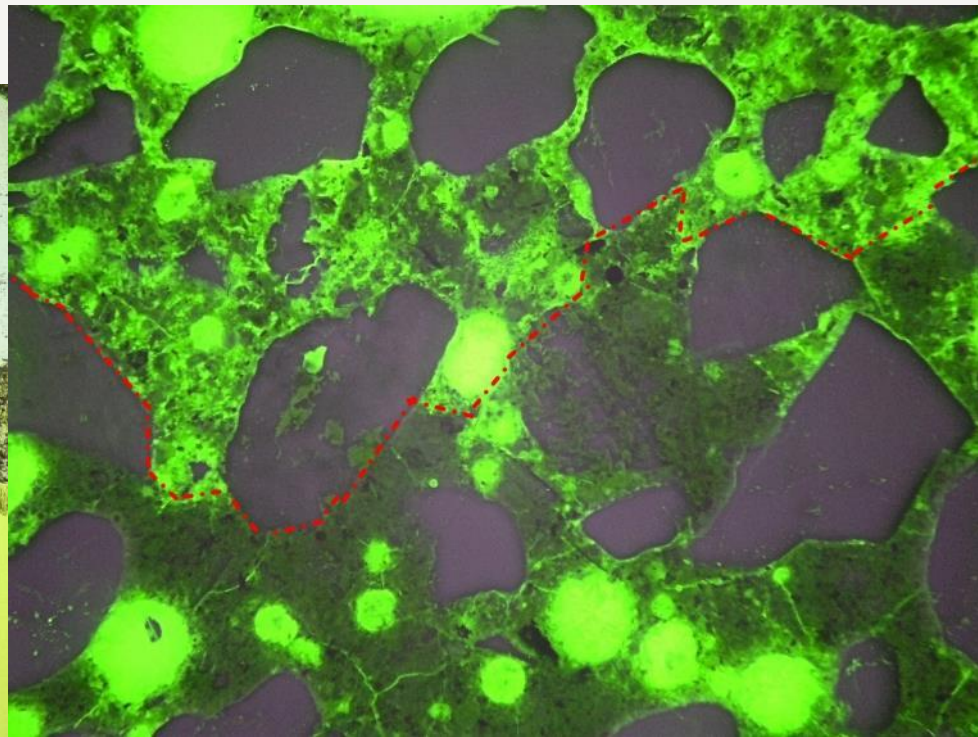
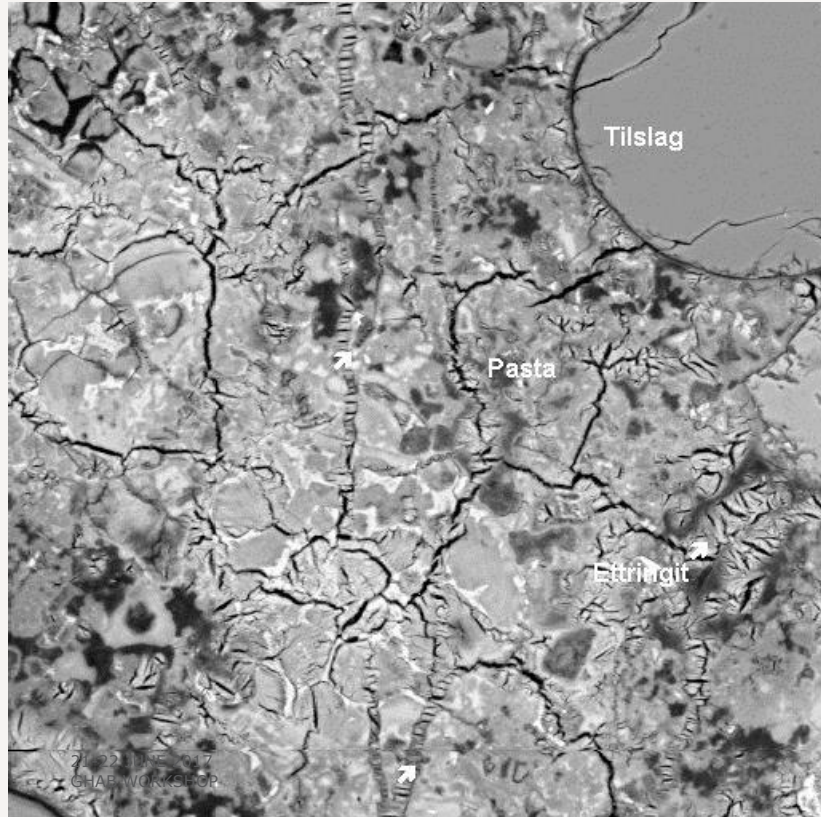


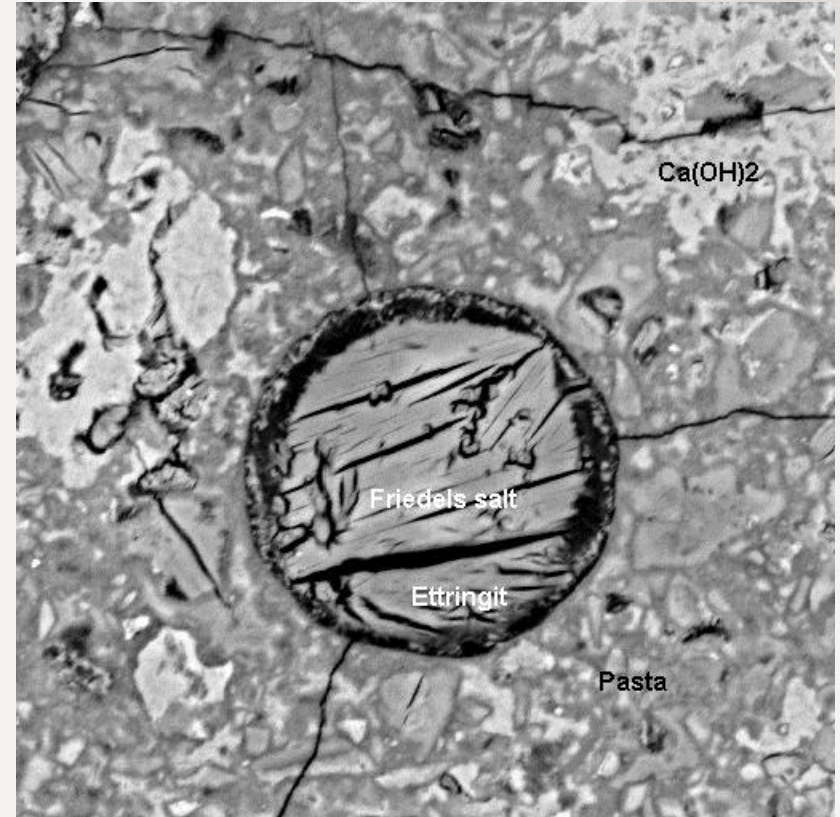
Foto: 1,8 mm x 2,4 mm. Ca. 12 mm under overfladen (opad). Skarp grænse mellem porøs og tæt pasta. Samme type grænse (udludning), som fundet i tidevandszone.

Eksempel: Dansk bro, pille m. Portlandcement, ca. 70 år gl.

Eksempler fra tidligere undersøgelser med SEM/EDS

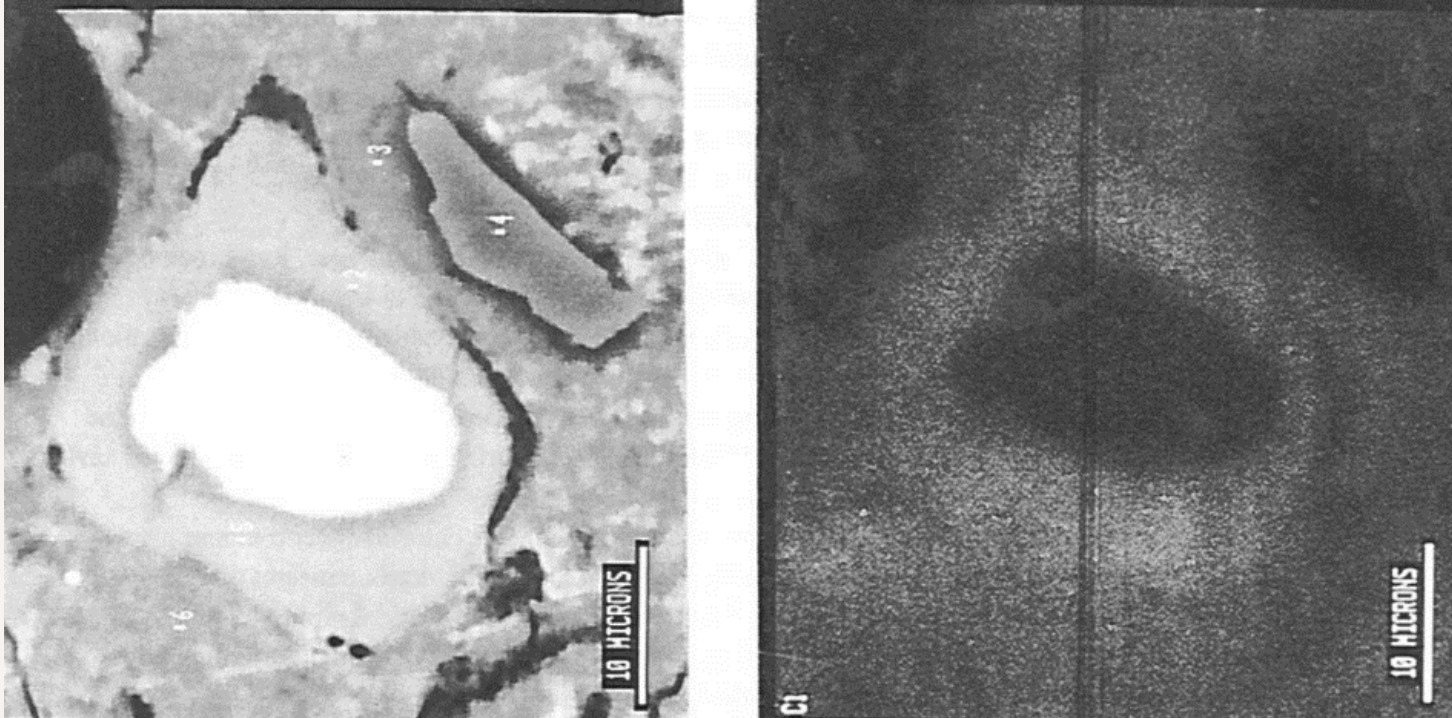


300X



600X

Kloridbinding i CSH



Eriksen, K., Thaulow, N. og Grelk, B.:
Vejdirektoratet, Rapport nr. 75: Mikrodefekters indflydelse på
kloridindtrængning i beton (1996)

Farø under vand 1992, 2004 og 2012

Årstal / alder, år	Udludning, revner til dybde X, mm	Konstant B	Udludning, angreb til dybde 20 mm* (estimeret)
1992 / 10	7,0	2,2	2075
2004 / 22	9,5	2,0	2104
2012 / 30	13,5	2,5	2076

* forudsat, at der ikke sker afskalninger

$$\text{Angrebsdybde } X = A + B \cdot \sqrt{t}$$

Konstant A = 0 (for intakt overflade)

Konstant B = 2,2 i gennemsnit
(X i mm, t i år)

COWI

Eksempel 2

Beton fra pæle/søjler i havvand

Afrensning/inspektion/
ophugning og klassificering

Ca. 10 % omfang
– top-midte-bund

Borekerner, 8-10 %,
stikprøver og særligt
udvalgte



Modelfoto

Makroanalyse, eksempel på borekerner 50-60 år gamle



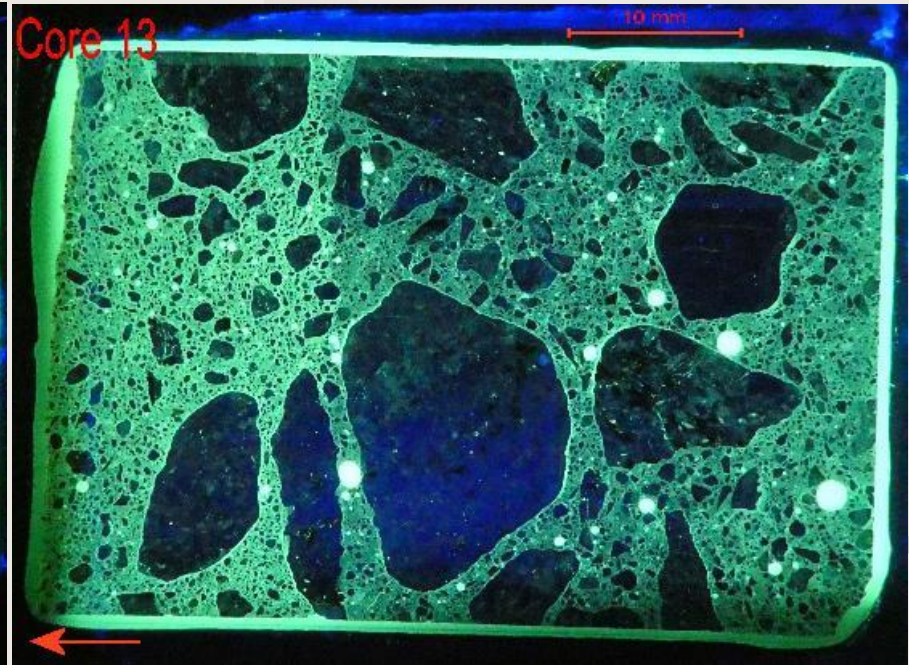
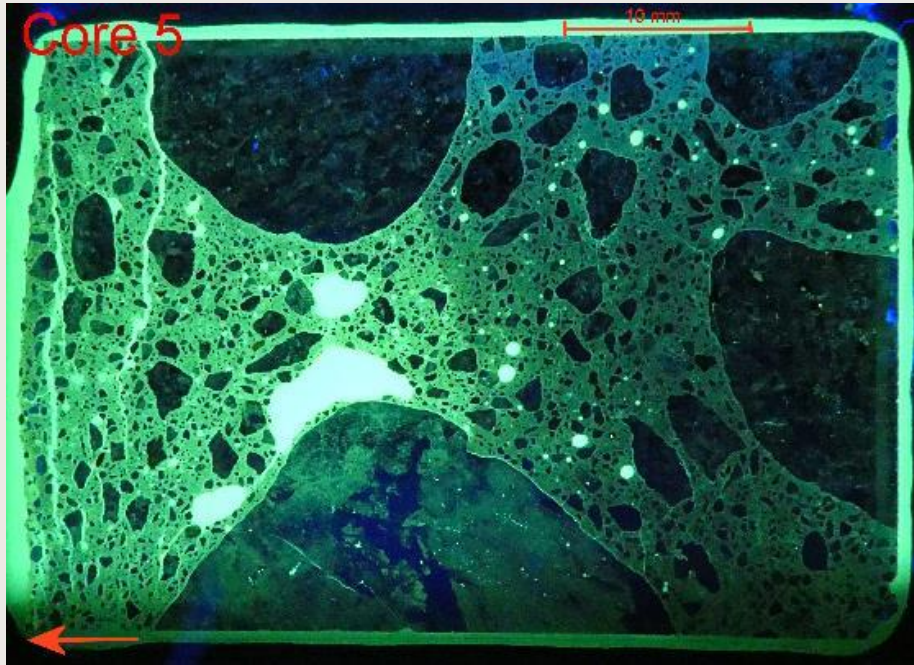
På overfladen af kerner ses ruhr og rester af alger – også med begroning de steder, hvor der tidligere er sket mindre afskalninger i overfladen

Makroniveau:

Generelt fremtræder borekerner i god tilstand, homogene og uden tegn på nedbrydning ud over i den eksponerede overflade



Mikroanalyse på tyndslib, 50-60 år gl. beton

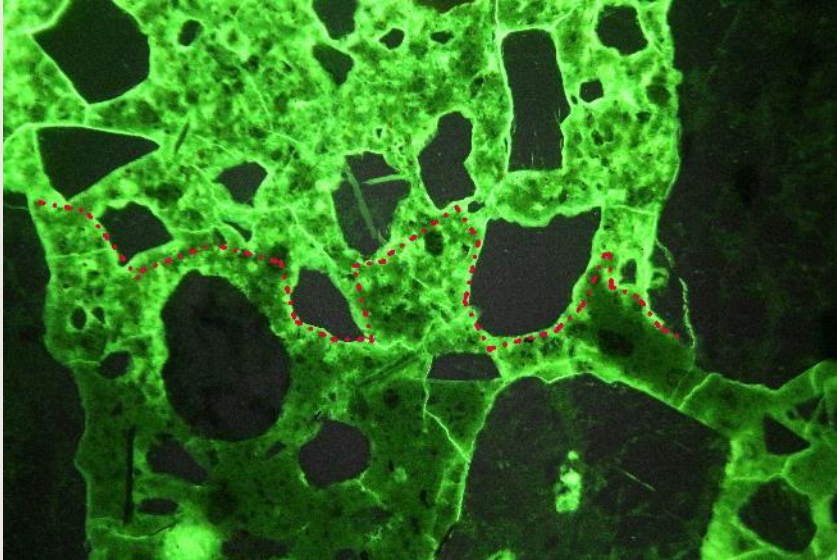


Overflade tv. (pil)

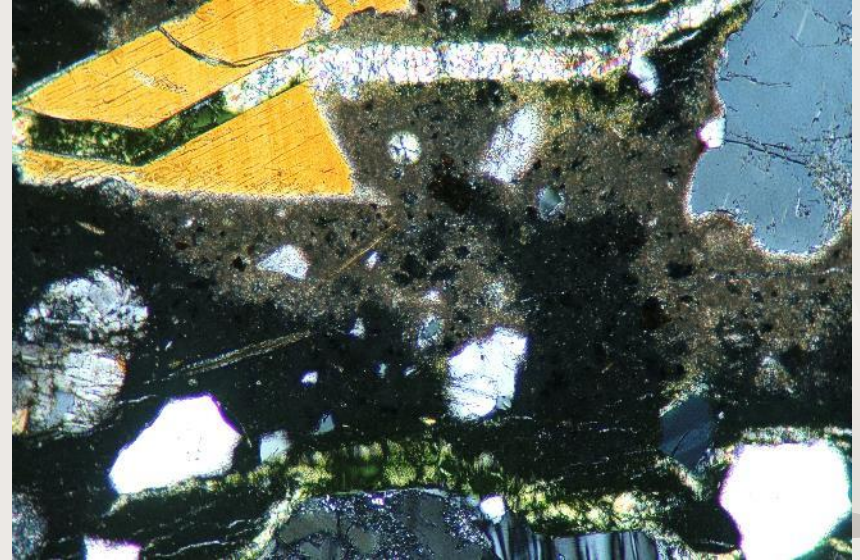
Areal af tyndslib: 30 mm x 45 mm

Mikroanalyse

Overflade



Kerne 5: Udludet pasta over stiplede linje, i dybde ca. 25 mm. Porøs og tæt pasta, nogle mikrorevner, ingen tegn på luftindblanding.
Størrelse: 1.8 mm x 2.4 mm

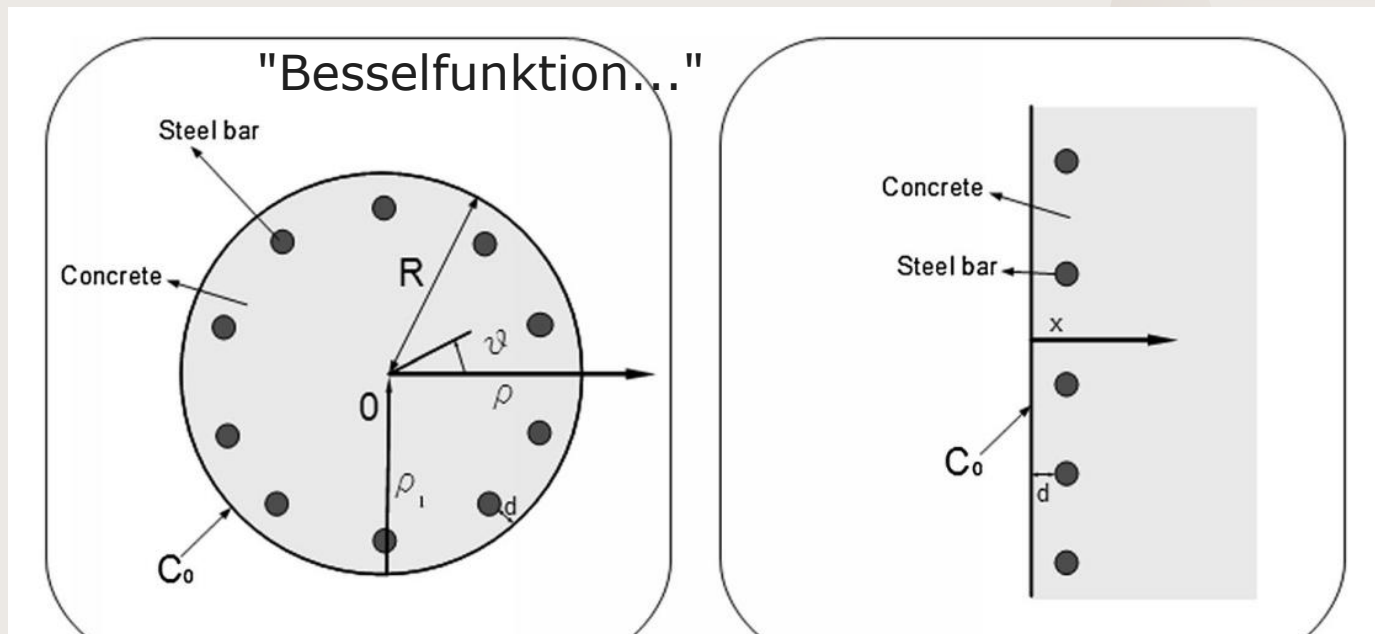


Kerne 18: Overfladeparallelle revner, helt eller delvist fyldte med thaumasit og ettringit. Dybde ca. 3 mm. Pasta er delvis karbonatiseret, delvis isotrop.
Størrelse: 1.2 mm x 1.8 mm

Zoner	Dybde, [mm]	Observationer
1	Op til 1-2	Karbonatiseret, tættere pasta evt. med højporøst overfladelag. Cementhud typisk afskallet. Forekomst af pop-corn karbonatisering.
2	Op til 10-15	Helt udludet zone, svag, porøs, med gips/ettringit i porer og revner og lokalt forekomst af thaumasit i såvel pasta som i revner. Endvidere ses calciumkarbonatkrystaller og brucit i denne zone, i porer og revner.
3	Op til 15-18	Overfladeparallelle mikrorevner med overvejende gips/ettringit. Alle mikrorevner er fyldte. Revneforløb som ved pastaekspansion. Fine/grove revner dannet antagelig som resultat af de mange mikrorevner og pastaekspansion. Udfældninger i grove revner varierer med dybde fra overfladen.
4	Op til 20-30-40 mm	En mere porøs pasta, typisk med overgang til tættere pasta, hvor indhold af calciumhydroxid tiltager.
5	Hele slibet (> 45 mm)	Høj grad af porefyldning. Betonen har været udsat for høj grad af fugtbelastning gennem årene, og de fleste små luftporer er næsten helt udfyldte - nogle større porer er delvist udfyldte (af ettringit overvejende).

Søjle versus væg situation

Højere kloridindtrængning over tid i en søjle, alt andet lige



International Journal of Concrete Structures and Materials
Vol.9, No.2, pp.173–183, June 2015
DOI 10.1007/s40069-014-0095-y
ISSN 1976-0485 / eISSN 2234-1315

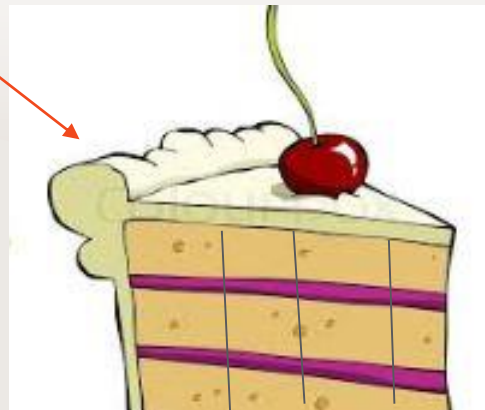
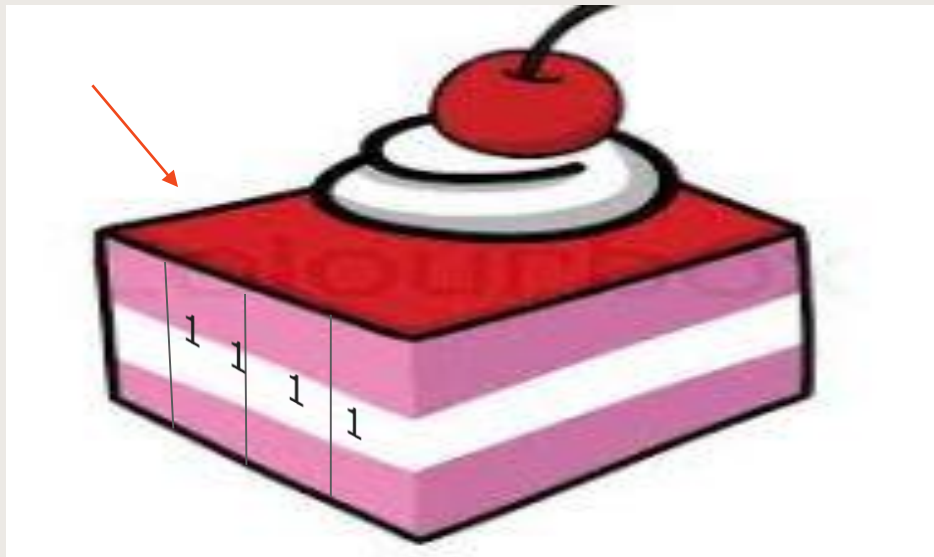


Chloride Penetration in Circular Concrete Columns

M. Morga¹⁾, and G. C. Marano^{2),*}

Søjle versus væg, kemisk påvirkning/udludning

Princippet må være det samme som for kloridindtrængning, dvs. lidt mere effekt over tid på en søjle, alt andet lige, med størst indflydelse på de mindste diametre



1/0.7/0.4/ 0.14

COWI

50-60 år gamle pæle/søjler

- Fortsat angreb fra havvand/koblet med udludning – evalueret med kvadratrodt ligningen

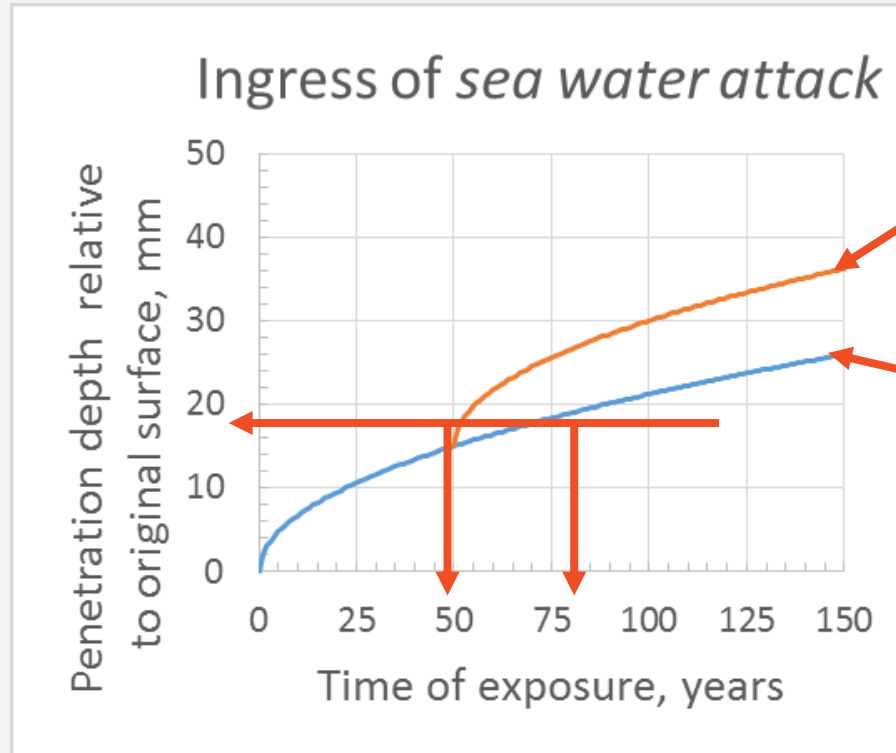
$$X \text{ (mm)} = A + B \cdot \sqrt{t} \quad (A, B = \text{konstant, } t = \text{år})$$

- For $A = 0$ kan B kan beregnes til 2,1 (For Farøbroerne var A i gennemsnit 2,2)

For angreb fra 15 mm til 25 mm dybde vil der gå ca. 90 år (såfremt ingen tidligere afskalninger er observeret)

For angreb til yderligere 10 mm dybde, fra en frisk, afskallet overflade, kan det estimeres, at der vil forløbe ca. 23 år fra nu.

Hugge det løse/svage lag af eller lade det sidde?



Forløb fremover, hvis overfladen frihugges eller sandblæses til sund beton efter efter f.eks. 50 år

Forløb uden indgreb mht. svækket overfladelag

Slanke elementer

- Tykkelsen af udludet/revnet lag bestemmes og fratrækkes ($\times 2$ for pæle/søjler) tykkelsen af element. Reduktion i tværsnitsareal beregnes.
- Det skal verificeres, at bæreevnen er tilstrækkelig for den resterende del af elementet.
- Afrensning af svage betonoverflader kan være en dårlig ide, da det kan accelerere yderligere overfladeangreb. Dette forudsætter, at betonen under overfladelaget er af god kvalitet.
- Holde øje med udviklingen ved jævnlige eftersyn

Beton i havvand,
nedbrydning i overfladen
og dybere ind

Et problem eller ikke?

Hvordan undersøge,
hvordan evaluere?

Reparere, hvorfor –
hvornår – hvordan?

Observeret på en række ældre konstruktioner, op til 15-20 mm på 50-60 år. Revner og styrketab giver risiko for afskalninger.

Det er et problem ☹

Omfanget kan undersøges i dybden ved mikroskopi. Evaluering skal ske sammen med informationer fra inspektion, kloridmålinger, styrke, bæreevne, armeringens tilstand etc.

Tage beslutninger på et oplyst grundlag, under hensyntagen til forventet levetid

COWI

Levetidsvurderinger

Beton

For beton neddykket i havvand er der for ældre betoner ofte sket et angreb i overfladen pga. primært sulfatangreb m. dannelse af ettringit, thaumasit og revnedannelser, overlappet af en dyberegående udludning (som medfører styrkereduktion).

For de mere massive konstruktioner i havvand kan et sådant angreb være ubetydeligt, med mindre dæklaget helt forsvinder.

For slankere konstruktioner, herunder pæle, kan der blive tale om et kritisk angreb, hvis f.eks en pæls bærende tværsnit reduceres, eller hvis der sker afskalninger ind til armeringen

Armering

Avancerede levetidsmodeller, baseret på kloridmigration og dæklag, tager IKKE ALTID hensyn til, at der i marint miljø kan være et angrebet overfladelag. Ved meget høje kloridindhold er levetiden opbrugt i hht. normalt anvendte levetidsmodeller – MEN, armeringen kan ofte beskyttes vha. katodisk beskyttelse

