



TEKNOLOGISK
INSTITUT

RK-projekt: "Huller i vejen"

Opsummering af resultater fra
aktivitet vedrørende nye
reparationsmetoder og -strategier



Titel

Opsummering af resultater fra aktivitet vedrørende nye reparationsmetoder og -strategier

Udarbejdet af

Teknologisk Institut
Beton
Gregersensvej
2630 Taastrup

Støtte

Rapporten er udarbejdet som en del af aktiviteterne i resultatkontraktprojektet "Huller i vejen" (2016-2018), der er finansieret af Styrelsen for Institutioner og Uddannelsesstøtte (under Uddannelses- og Forskningsministeriet).

Kontakt

Søren L. Poulsen
Beton
Teknologisk Institut

Telefon: 7220 2025

E-mail: slp@teknologisk.dk

December 2018

Indholdsfortegnelse

1.	Introduktion	4
2.	Reparationsstrategi vedrørende selvhealing af revner i beton	4
2.1.	Generel beskrivelse af reparationsstrategi	4
2.2.	Healcon-projektet.....	5
2.3.	Feltekspnering af betonbjælker med <i>healing agents</i>	6
2.3.1.	Mix design for betonbjælker til feltekspnering	6
2.3.2.	Procedure for introduktion af revner i betonbjælker til feltekspnering	9
2.3.3.	Installation af betonbjælker ved feltekspneringsplads i Taastrup.....	10
2.4.	Supplerende undersøgelse af feltekspnerede betonbjælker fra Healcon-projektet	10
2.4.1.	Udtagning af borekerner og præparering af prøvemateriale til mikroskopiundersøgelser ..	11
2.4.2.	Resultat af mikroskopiundersøgelser	11
2.5.	Relaterede serviceydelser	12
3.	Reparationsstrategi vedrørende stålfiberarmeret højstyrkebeton til fugtisolering af broer og forstærkning af betonkonstruktioner	13
3.1.	Generel beskrivelse af reparationsstrategi	13
3.1.1.	Anvendelse af UHPFRC til fugtisolering af broer	13
3.1.2.	Anvendelse af UHPFRC til forstærkning af betonkonstruktioner	13
3.2.	Undersøgelse af mekaniske egenskaber af bro-mock-up med stålfiberarmeret højstyrkebeton	14
3.2.1.	Fremstilling af mock-up af brodæk	14
3.2.2.	Udskæring af testemner fra bro-mock-up til undersøgelse af mekaniske egenskaber	16
3.2.3.	Opstilling til 3-punkts bøjningsforsøg.....	17
3.2.4.	Resultat af 3-punkts bøjningsforsøg	18
3.3.	Relaterede serviceydelser	20
	Referencer	21
	Appendix 1: Petrographic analysis of 4 concrete cores from beams at Hveen Boulevard.....	22

1. Introduktion

I resultatkontraktprojektet *Huller i vejen* (2016-2018) er der defineret fem overordnede delaktiviteter med følgende overskrifter:

- 1) Nye belægningstyper
- 2) Nye byggesystemer til broer
- 3) Funktionsbaseret design og levetidsberegninger
- 4) Nye reparationsmetoder og reparationsstrategier
- 5) Undervisning og anden formidling

Denne rapport er knyttet til *Delaktivitet 4: Nye reparationsmetoder og reparationsstrategier* og er en opsummering af resultater opnået i forbindelse med arbejdet med nedenstående milepæl:

MP4.1 (Udvikling af teknologisk service) Nye reparationsstrategier er beskrevet, fx anvendelse af selvhelende revner, reparation af slaghuller i veje, anvendelse af stålfiberarmeret højstyrkebeton til erstatning af traditionelle bitumenmembraner. Serviceydelser defineret og beskrevet på www.teknologisk.dk.

Arbejdet har primært været fokuseret på følgende reparationsstrategier:

- 1) Anvendelse af *healing agents* i beton, der potentielt kan gøre betonen i en anlægskonstruktion i stand til selv at lukke/reparere revner i takt med, at de opstår. Fænomenet betegnes som selvhealing.
- 2) Anvendelse af stålfiberarmeret højstyrkebeton som (1) alternativ til traditionelle bitumenmembraner i forbindelse med reparation (eller etablering) af fugtisoleringen på broer og (2) til forstærkning af betonkonstruktioner i forbindelse med reparationsarbejder.

For hver af ovennævnte reparationsstrategier omfatter rapporten først en generel beskrivelse af reparationsstrategien og dernæst en beskrivelse af de undersøgelser, som er gennemført for at vurdere potentialet af den aktuelle strategi. Endelig gives en beskrivelse af Teknologisk Instituts serviceydelser knyttet til den enkelte reparationsstrategi.

2. Reparationsstrategi vedrørende selvhealing af revner i beton

2.1. Generel beskrivelse af reparationsstrategi

I biologiens verden findes der utallige eksempler på systemer, som har en fantastisk evne til selv at detektere og reparere opståede skader. Knogler, skind og planter er eksempler på sådanne systemer. Gennem de seneste år har der blandt forskere været en stor interesse for at overføre denne evne til "selvhealing" til ikke-biologiske områder, f.eks. til beton.

Revnedannelse udgør én af de største udfordringer ved anvendelsen af beton som konstruktionsmateriale, f.eks. i forbindelse med udførelsen af tunneler, hvor det er afgørende at have tæthed mod indtrængning af vand. Revner med selv små vidder kan generelt også have betydning for en betonkonstruktions evne til at beskytte det indstøbte armeringsjern mod uønsket indtrængning af vand og klorider fra f.eks. havvand eller tørsalte, som i sidste ende kan føre til armeringskorrosion og efterfølgende nedbrydning af den omgivende beton. Det er derfor forbundet med et enormt potentiale, hvis der kan udvikles en "selvhelende" beton, som selv er i stand til at reparere/lukke revner, når de opstår. På den vis vil udgifter forbundet med vedligehold og reparationer af betonkonstruktioner kunne reduceres betydeligt.

Forskningsgrupper på Ghent University (Belgien) og Technical University Delft (Holland) har gennem en årrække arbejdet på at udvikle diverse selvhelende ikke-biologiske materialer gennem anvendelse af særlige bakteriekulturer. F.eks. har man på laboratorieniveau haft held med at demonstrere selvhelende egenskaber i revnede mørtelprøver, som indeholdt bakterier. Disse bakterier viste sig at være i stand til lukke revner gennem udfældning af calciumcarbonat (CaCO_3). Bakterierne fungerer i princippet på den måde, at de bliver "aktiveret", når der opstår en revne, og der trænger vand og ilt ind i betonen. De aktiverede bakterier udfælder derefter calcit, som lukker revnen.

Såkaldte superabsorberende polymerer har ligeledes vist potentiale som *healing agents* i beton. Den selvhelende effekt af de superabsorberende polymerer fremkommer i store træk ved at indtrængende væske i en nyopstået revne får polymererne til at svulme op og blokere revnen. Derudover menes de superabsorberende polymerer bl.a. også at være i stand til at videregive absorberet vand til ikke-hydratiserede cementkorn, som derved reagerer og danner nye hydratiseringsprodukter med yderligere selvhealing til følge.

2.2. Healcon-projektet

Teknologisk Institut har deltaget i et stort europæisk forskningsprojekt med titlen 'Healcon' (2013-2016) [1,2], hvor potentialet for anvendelse af diverse *healing agents* til at opnå selvhealing af revner i betonkonstruktioner er blevet undersøgt. Specifikt er der i Healcon blevet arbejdet med beton, hvor den selvhelende effekt er baseret på indstøbning af *healing agents* bestående af enten bakterier i pulverform eller superabsorberende polymerer. Teknologisk Instituts primære rolle i Healcon-projektet har været at stå for den praktiske gennemførelse af laboratorie- og feltforsøg med beton, hvor de udvalgte selvhelende teknologier testes.

Efter afslutning af Healcon-projektet i december 2016 er der i forbindelse med resultatkontraktprojektet 'Huller i vejen' (2016-2018) blevet udført supplerende undersøgelser af en række betonbjælker, som blev fremstillet til felteksponeringsforsøg under Healcon-projektet. I det

følgende er fremstillingen af disse betonbjælker samt resultatet af de supplerende undersøgelser beskrevet nærmere.

2.3. Felteksponering af betonbjælker med *healing agents*

I Healcon-projektet var der oprindeligt lagt op til, at de selvhealende teknologier som afslutning på projektet skulle afprøves i fuld skala i en virkelig konstruktion, f.eks. i et tunnelsegment eller i kantbjælken på en bro. Men på grund af manglende dokumentation af en selvhelende effekt i de gennemførte laboratorieforsøg var det ikke muligt at finde en bygherre, som var villig til at stille et byggeri til rådighed til test af de selvhelende teknologier i felten. Som et alternativ blev det derfor besluttet at fremstille fire betonbjælker (200 x 40 x 20 cm) i laboratoriet til efterfølgende felteksponering: Én referencebjælke uden healing agents, én bjælke med healing agent i form af Leca-kugler (Liapor) imprægneret med bakterier, én bjælke med superabsorberende polymerer samt én bjælke med bakterier i pulverform (mixed ureolytic bacterial culture (MUC⁺⁺)) (Fig. 1). Alle bjælkerne blev fremstillet med indstøbt armeringsjern samt et system til trådløs registrering af eventuel korrosionsaktivitet.



Fig. 1. Betonbjælker med indstøbte healing agents fremstillet til felteksponeringsforsøg i forbindelse med Healcon-projektet.

2.3.1. Mix design for betonbjælker til felteksponering

De individuelle mix designs anvendt til fremstilling af de fire betonbjælker er givet i Tabel 1-4. Det anvendte mix design til referencebjælken repræsenterer en typisk betonsammensætning for en kantbjælke i en dansk bro, dvs. en luftindblandet beton med CEM I 42.5 N cement med høj

sulfatbestandighed og ekstra lavt alkali-indhold i kombination med flyveaske og et vand/cement-forhold på 0,40 (beregnet med en aktivitetsfaktor på 0,5 for flyveaske). Mix designet for de tre bjælker med *healing agents* er stort set det samme som det, der er anvendt til referencebjælken, men med enkelte variationer. Der er anvendt forskellige mængder af additiver i de fire betonblandinger for at kunne opfylde kravene med hensyn til sætmål og luftindhold i den friske beton. De tilstræbte værdier for sætmål og luftindhold var henholdsvis 180 mm og 6%.

Støbning af bjælkerne blev udført på følgende datoer:

- Referencebjælke: 18. oktober 2016
- Bjælke med Liapor imprægneret med bakterier: 20. oktober 2016
- Bjælke med superSAP-G: 25. oktober 2016
- Bjælke med MUC++: 26. oktober 2016

Bjælkerne blev afformet to uger efter støbning og derefter pakket ind i plastik indtil proceduren for introduktion af revner blev gennemført ved en modenhed på 28 døgn (se nedenfor).

Tabel 1: Mix design for beton til referencebjælke.

Materiale	Densitet [kg/m ³]	kg/m ³	l/m ³
Portland cement, CEM I 42,5 N (HS/EA/<2)	3200	300	94
Flyveaske	2300	100	43
Healing agent	1000	0	0
Sand 0/4 mm	2620	680	260
Sten 4/8 mm	2740	295	108
Sten 8/16 mm	2750	800	291
Luftindblandingsmiddel (Amex SB 22)	1010	2.2	2
Superplastificeringsmiddel (Glenium SKY 631)	1050	2.7	3
Vand	1000	136	136
Luft			60
Total		2316	996

Tabel 2: Mix design for beton til bjælke med Liapor (letklinker) imprægneret med bakterier.

Materiale	Densitet [kg/m ³]	kg/m ³	l/m ³
Portland cement, CEM I 42,5 N (HS/EA/<2)	3200	300	94
Flyveaske	2300	100	43
Healing agent: Liapor	1000	167	167
Sand 0/4 mm	2620	535	204
Sten 8/16 mm	2750	800	291
Luftindblandingsmiddel (Amex SB 22)	1010	1.8	2
Superplastificeringsmiddel (Glenium SKY 631)	1050	1.4	1
Water	1000	137	137
Air			60
Total		2042	1000

Tabel 3: Mix design for beton til bjælke med SAP (superabsorberende polymerer).

Materialer	Densitet [kg/m ³]	kg/m ³	l/m ³
Portland cement, CEM I 42,5 N (HS/EA/<2)	3200	300	94
Flyveaske	2300	100	43
SAP	1500	3	2
Sand 0/4 mm	2620	680	260
Sten 4/8 mm	2740	295	108
Sten 8/16 mm	2750	800	291
Luftindblandingsmiddel (Amex SB 22)	1010	0	0
Superplastificeringsmiddel (Glenium SKY 631)	1050	8,5	8
Vand	1000	170	170
Luft			20
Total		2356	995

Tabel 4: Mix design for betonbjælke med MUC⁺⁺ (mixed ureolytic bacterial culture).

Materialer	Densitet [kg/m ³]	kg/m ³	l/m ³
Portland cement, CEM I 42,5 N (HS/EA/<2)	3200	300	94
Flyveaske	2300	100	43
MUC ⁺⁺	2000	4	2
Urea	2000	2	1
Sand 0/4 mm	2620	680	260
Sten 4/8 mm	2740	295	108
Sten 8/16 mm	2750	800	291
Luftindblandingsmiddel (Amex SB 22)	1010	1,8	2
Superplastificeringsmiddel (Glenium SKY 631)	1050	4,4	4
Vand	1000	140	140
Luft			60
Total		2327	1004

2.3.2. Procedure for introduktion af revner i betonbjælker til felteksponering

Ved en modenhed på 28 døgn blev der i hver af de fire bjælker introduceret fem isolerede revner med veldefinerede vidder på henholdsvis 0,1 mm, 0,15 mm, 0,2 mm, 0,3 mm og 0,4 mm. Revnerne blev frembragt separat gennem en operation med 3-punkts-belastning for hver individuel revne (Fig. 2).

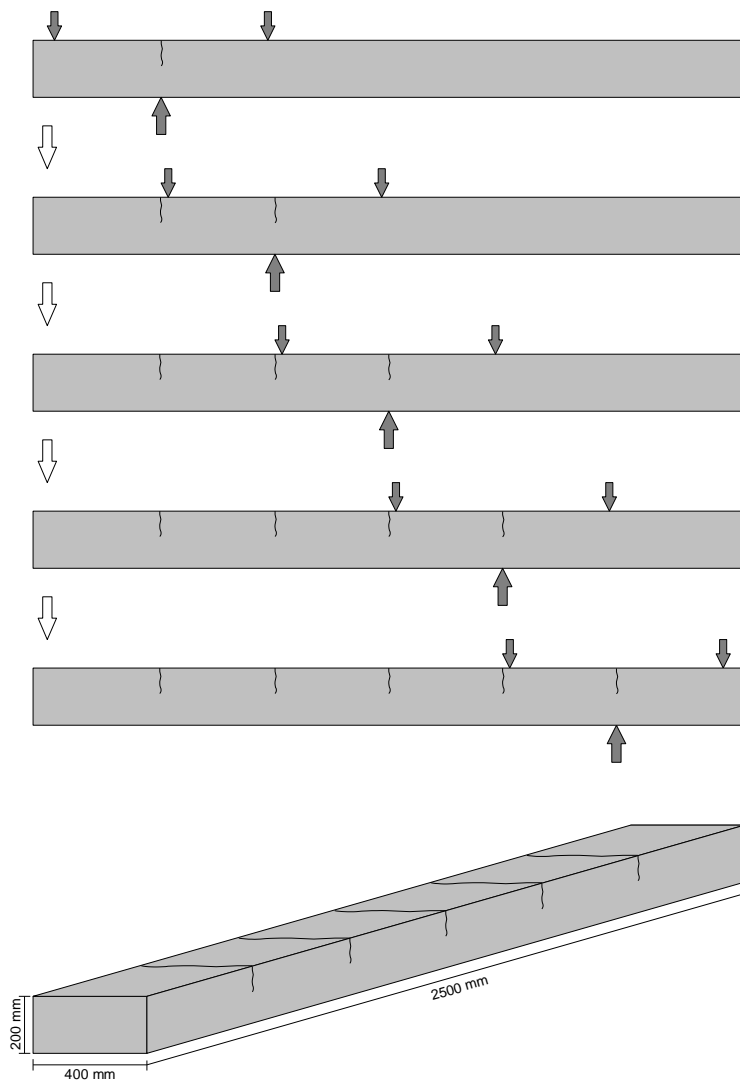


Fig. 2. Skematisk illustration af det anvendte princip for kontrolleret introduktion af revner i betonbjælke til felteksponeringsforsøg ved hjælp af en serie af 3-punkts-belastninger.

2.3.3. Installation af betonbjælker ved felteksponeringsplads i Taastrup

I december 2016 etablerede Teknologisk Institut en felteksponeringsplads i Taastrup, hvor bjælkerne blev installeret. Her ligger bjælkerne placeret umiddelbart ved siden af en større hovedvej (Fig. 3). Det vil sige i et bymiljø, hvor de bl.a. bliver eksponeret for klorider fra tørsalte i forbindelse med glatførebekæmpelse i vinterhalvåret.



Fig. 3. Felteksponeringsplads ved Hveen Boulevard, Taastrup. På billedet ses fire revnede betonbjælker, hvoraf de tre er fremstillet med indstøbte healing agents. Alle bjælkerne er fremstillet med indstøbt armeringsjern samt et system til trådløs registrering af eventuel korrosionsaktivitet.

2.4. Supplerende undersøgelse af felteksponerede betonbjælker fra Healcon-projektet

Healcon-projektet sluttede officielt ved udgangen af 2016, men i forbindelse med resultatkontraktprojektet "Huller i vejen" (2016-2018) er der udtaget borekerner fra de fire felteksponerede betonbjælker efter mere end 1 års eksponering til supplerende undersøgelser. Formålet med disse undersøgelser var at afklare, hvorvidt der kunne observeres en selvhelende effekt på nogle af bjælkerne efter længere tids felteksponering.

2.4.1. Udtagning af borekerner og præparering af prøvemateriale til mikroskopiundersøgelser

Den 20. marts 2018 blev der udtaget én borekerne fra hver af de fire betonbjælker fremstillet til felteksponering i forbindelse med Healcon-projektet, dvs. efter ca. 1 år og 3 måneders eksponering ved felteksponeringspladsen i Taastrup (Fig. 4). Hver kerne inkluderede én af de introducerede revner, nærmere bestemt revnen med en vidde på 0,2 mm.

For hver af de fire udtagne borekerner blev der fremstillet et planslib, et tyndslib samt et poleret slib. Prøvematerialet blev analyseret ved hjælp af optiske mikroskoper og et scanning elektronmikroskop forsynet med udstyr til røntgenmikroanalyse (EDX). De analyserede områder var placeret i bunden af revnerne.



Fig. 4. Borekerner udtaget fra revnede betonbjælker fra felteksponeringspladsen ved Hveen Boulevard i Taastrup efter ca. 1 år og 3 måneders eksponering: (A) Referencebeton fremstillet uden healing agents, (B) beton med SAP-G, (C) beton med Liapor imprægneret med bakterier og (D) beton med MUC⁺⁺.

2.4.2. Resultat af mikroskopiundersøgelser

Resultaterne af mikroskopiundersøgelserne, som blev udført af seniorkonsulent Ulla Hjorth Jakobsen, Teknologisk Institut, fremgår af Appendix 1.

En opsummering af de opnåede resultater ses herunder:

- Ingen af de undersøgte betoner viste tegn på udfældning af calciumkarbonat i de revner, som var blevet introduceret i betonbjælkerne i forbindelse med deres fremstilling.
- Relativt store krystaller af monosulfat blev observeret i alle de undersøgte revner. Disse krystaller udfyldte imidlertid ikke revnerne. Monosulfat blev desuden observeret i luftporer langs revnerne.

- Der blev ikke observeret tegn på karbonatisering af revnernes overflader i nogle af de undersøgte borekerner.
- EDX-analyserne viste ikke distinkte forskelle i de dannede faseselskaber i cementpastaen af de fire undersøgte betoner.
- Der blev ikke observeret tegn på udefra kommende forurening (chlorider) langs de undersøgte revneoverflader.

Alt i alt viste mikroskopiundersøgelserne altså desværre, at de indstøbte *healing agents* i de revnede betonbjælker – selv efter mere en ét års felteksporering – ikke havde haft den ønskede virkning, da det ikke var muligt at erkende nogen egentlig healing-effekt fra hverken de indstøbte bakterier eller de superabsorberende polymerer.

2.5. Relaterede serviceydelser

Teknologisk Institut kan tilbyde følgende serviceydelser relateret til selvhealing af revner i beton:

- Identifikation af mineralske faser udfældet i revner vha. forskellige mikroskopiske metoder.
- Vurdering af årsag til udfældninger, fx udludning af faser fra betonen selv eller indtrængning af faser fra det omkringliggende miljø vha. SEM-EDX-analyse.
- Vurdering af udfyldningsgraden af revner og den generelle selvhealende effekt af revnefyldning.

3. Reparationsstrategi vedrørende stålfiberarmeret højstyrkebeton til fugtisolering af broer og forstærkning af betonkonstruktioner

3.1. Generel beskrivelse af reparationsstrategi

Potentialet for anvendelse af stålfiberarmeret højstyrkebeton (Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)) i forbindelse med reparation/rehabilitering af betonkonstruktioner er i de seneste år blevet fremhævet flere gange i litteraturen. Fx anvendelse af UHPFRC som et alternativ til traditionelle bitumen-membraner i forbindelse med reparation (eller etablering) af fugtisoleringen på broer [3,4] og til forstærkning af betonkonstruktioner i forbindelse med reparationsarbejder [5,6]. Det skyldes blandt andet, at UHPFRC er karakteriseret ved en række fordelagtige egenskaber så som ekstremt lav permeabilitet, som forhindrer indtrængning af potentielt skadelige stoffer, og meget høj styrke.

3.1.1. Anvendelse af UHPFRC til fugtisolering af broer

I Danmark beskyttes konstruktionsbetonen i bærende brodæk typisk ved hjælp af en bitumenbaseret fugtisolering (membran) bestående af enten en påsvejst bitumenplade-fugtisolering eller en kunststofbelægning. Det gøres for at forhindre indtrængning af fugt og chlorider til den underliggende konstruktionsbeton, der kan føre til armeringskorrosion og nedbrydning af betonen. Det er imidlertid en temmelig dyr og langsommelig teknik. For eksisterende brokonstruktioner er gennemførelse af en omisolering normalt forbundet med betydelige og bekostelige trafikforstyrrelser. Der er således et stort potentiale for at kunne reducere de økonomiske omkostninger, som er forbundet med den traditionelt anvendte belægningsteknologi til broer, hvis et brugbart alternativ kan implementeres.

Anvendelse af UHPFRC til fugtisolering af brokonstruktioner er blevet foreslået som en billigere og effektiv alternativ metode, bl.a. på grund af materialets tæthed og styrke samt muligheden for en hurtigere og mere simpel udførelsesproces. Fx har man i Schweiz positive erfaringer med anvendelse af en tyndt lagt af *in situ*-støbt UHPFRC (som alternativ til en bitumenbaseret membran) til fugtisolering af broer [3].

3.1.2. Anvendelse af UHPFRC til forstærkning af betonkonstruktioner

UHPFRC er også blevet foreslået som et materiale, der med fordel kan anvendes til forstærkning af diverse betonkonstruktioner [5,6]. Metodens grundlæggende princip går ud på at påstøbe et relativt tyndt lag af UHPFRC på overfladen af den "svage" konstruktion, man ønsker at forstærke. Ud over at forbedre de mekaniske egenskaber af den "svage" konstruktion, så har højstyrkebetonen også den egenskab, at den har en stor tæthed over for indtrængning af skadelige stoffer fra det omgivende miljø, f.eks. chlorider, som kan forårsage armeringskorrosion.

Anvendelse af denne metode er bl.a. relevant i forhold til følgende konstruktioner:

- Beskadigede konstruktioner, f.eks. pga. korrosion.
- Fejldimensionerede konstruktioner (pga. "regnefejl" i de statiske beregninger).
- Fejlkonstruerede konstruktioner (udførelsesfejl i forhold til et ellers korrekt tegningsmateriale).
- Konstruktioner der skal opgraderes til en større bæreevne pga. ændret brug.
- Konstruktioner med forkerte materialeegenskaber (for lave styrker for beton og/eller armering).
- Konstruktioner med behov for opgradering af holdbarhedsegenskaber, f.eks. konstruktioner med for dårlig modstand over for chloridindtrængning. Kunne f.eks. være autoværn eller kantbjælker på broer.

3.2. Undersøgelse af mekaniske egenskaber af bro-mock-up med stålfiberarmeret højstyrkebeton

Teknologisk Institut har i forbindelse med det tidligere resultatkontraktprojekt 'Ny Teknologi til Anlægskonstruktioner' (2013-2015) arbejdet med at undersøge potentialet for anvendelse af UHPFRC som materiale til fugtisolering af betonbroer [4]. I den forbindelse med der blandt andet fremstillet en mock-up af et brodæk bestående af almindelig konstruktionsbeton, hvor der blev påstøbt et tyndt toplag af UHPFRC.

I forbindelse med resultatkontraktprojektet 'Huller i vejen' (2016-2018) er der udført supplerende undersøgelser af mock-up'ens mekaniske egenskaber. Baggrundsinformation vedrørende fremstilling af mock-up'en samt en beskrivelse af de gennemførte supplerende undersøgelser gives i det følgende.

3.2.1. Fremstilling af mock-up af brodæk

Først blev en 2,0 m x 3,0 m stor mock-up af et brodæk inkl. kantbjælke fremstillet af almindelig konstruktionsbeton (Fig. 5 og 6). Efterfølgende blev der på selve brodækket (1,75 m x 3,0 m) påstøbt et 3 cm tykt lag af UHPFRC med følgende sammensætning:

- 129,71 kg Portland cement (CEM I 52,5 N)
- 129,71 kg kalkfiller
- 26,01 kg mikrosilica (Elkem 940-U)
- 6,80 kg superplastificeringsmiddel (BASF Glenium Sky 631)
- 66,73 kg messing-coatede stålfibre (0,3 x12,5 mm, 2600 MPa)
- 38,08 kg vand



Fig. 5. Billede fra fremstilling af mock-up af brodæk med et toplag af stålfiberarmeret højstyrkebeton.

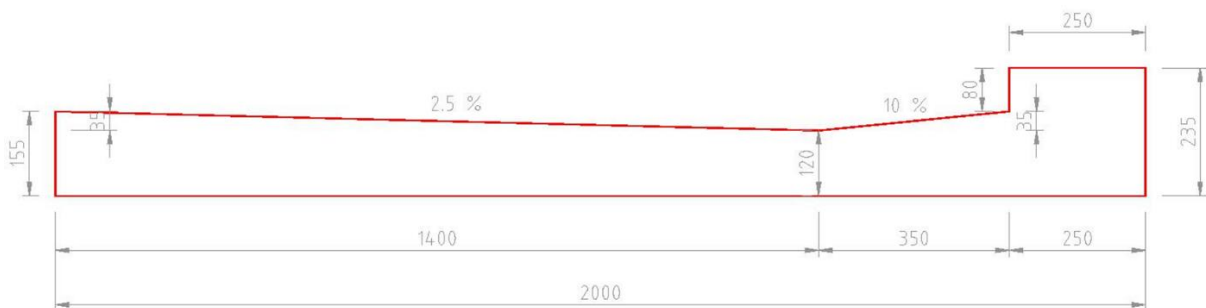


Fig. 6. Profiltegning af mock-up af brodæk, som blev fremstillet af almindelig konstruktionsbeton. Efterfølgende blev et 3 cm tykt lag af stålfiberarmeret højstyrkebeton påstøbt brodækket. Mock-up'ens længde er 3,0 m.

For at sikre en god vedhæftning mellem UHPFRC og konstruktionsbetonen blev overfladen af brodækket sandblæst (Fig. 7) og derefter påført en svummørtel (BASF Repahaft) forud for påstøbningen (vådt i vådt) af UHPFRC på svummørtel.

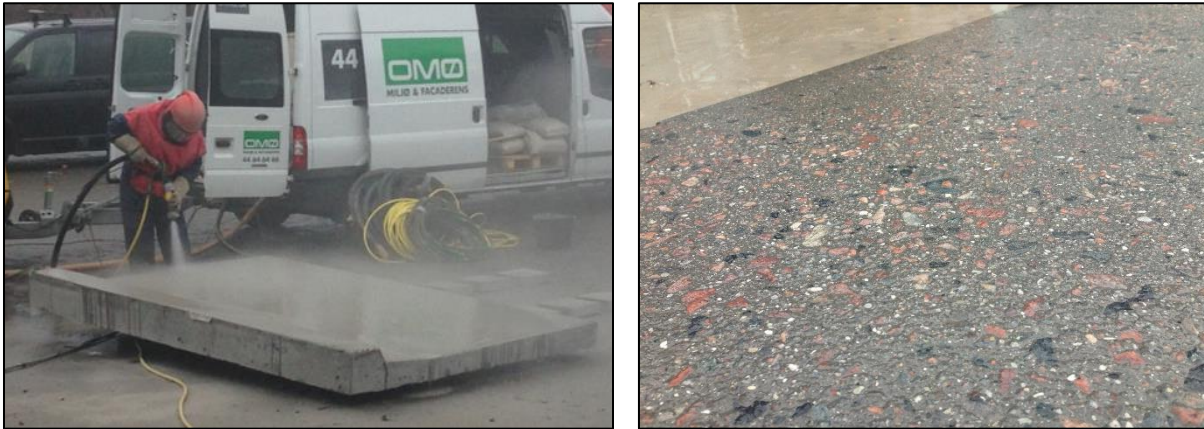


Fig. 7. Til venstre: Mock-up af brodæk sandblæses inden påstøbning af toplag af stålfiberarmeret højstyrkebeton. Til højre: Nærbillede af betonoverfladen efter sandblæsning.

3.2.2. Udskæring af testemner fra bro-mock-up til undersøgelse af mekaniske egenskaber

Til udførelse af 3-punkts bøjningsforsøg blev der udskåret fire testemner fra den eksisterende bro-mock-up som illustreret i Fig. 8. Hver af de fire testemner var ca. 1,5 m lange og havde et tværsnit på ca. 15 cm x 15 cm.

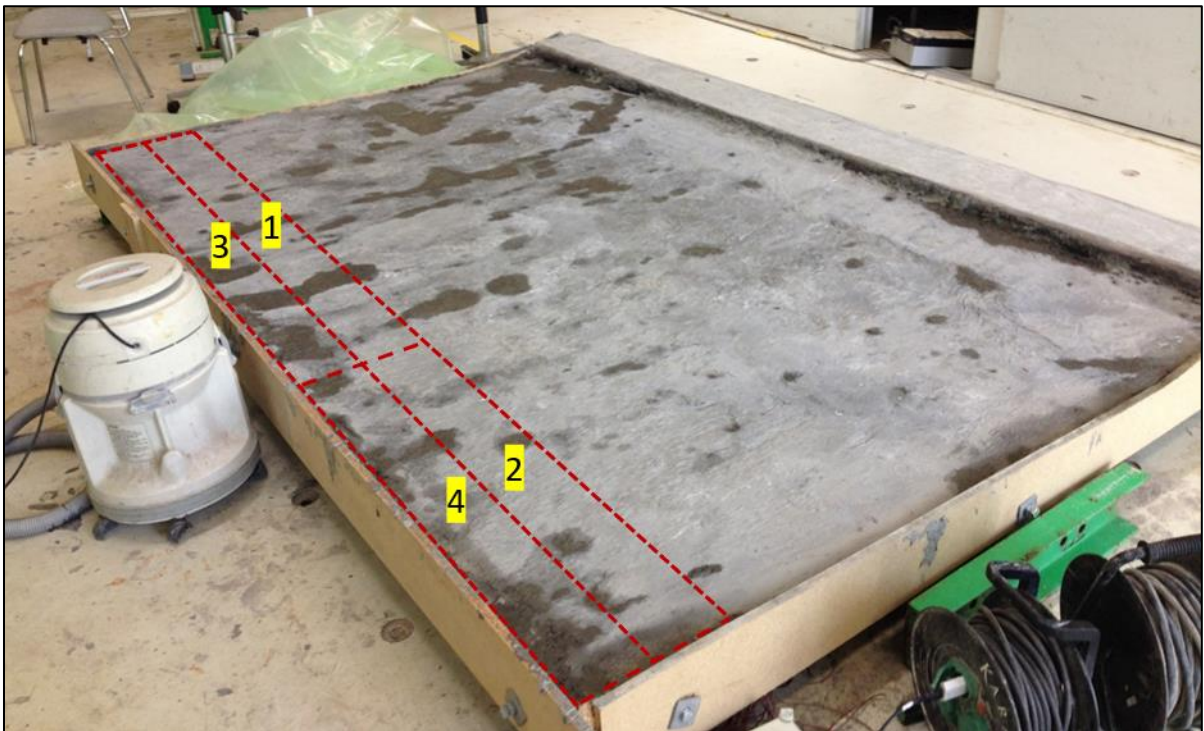


Fig. 8. Mock-up af brodæk fremstillet med et øvre lag af stålfiberarmeret højstyrkebeton. De røde stiplede linjer viser, hvor de fire testemner til 3-punkts bøjningsforsøg blev udskåret fra mock-up'en.

3.2.3. Opstilling til 3-punkts bøjningsforsøg

Fig. 9 viser den opstilling, som er anvendt til de gennemførte 3-punkts bøjningsforsøg. Belastningen påføres det aktuelle testemne ved hjælp af en 350 kN hydraulisk donkraft, og den påførte last og den resulterende deformation måles med henholdsvis en 250 kN lastcelle og en transducer.

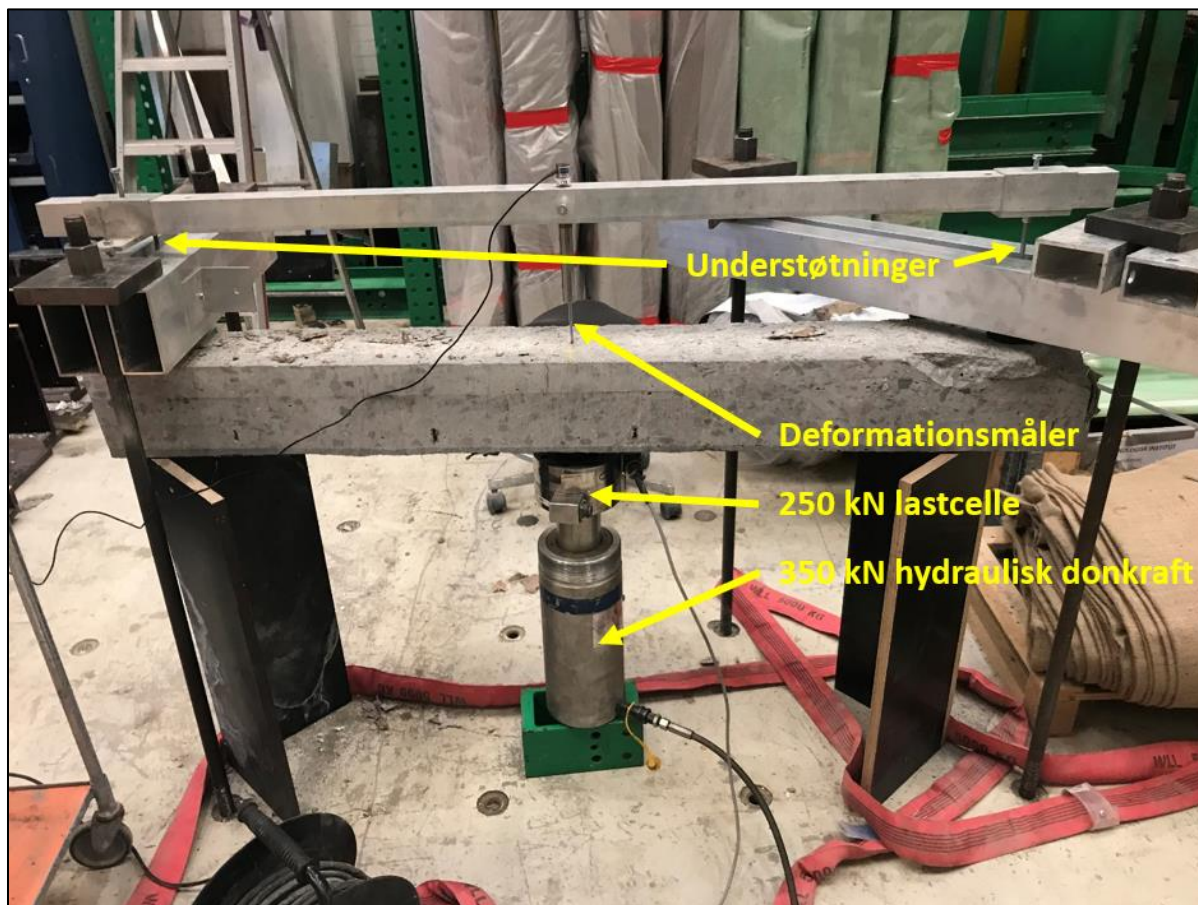


Fig. 9. Forsøgsopstilling: Pilhøjden (deformationen) måles med en målebjælke, der er står på betonen ved de to understøtninger. Der er 1,37 m mellem understøtningerne.

Hvert af de fire anvendte testemner består af en nedre del af almindelig konstruktionsbeton og et øvre lag af UHPFRC. Testemnerne nr. 1 og nr. 3 blev orienteret således i forsøgsopstillingen, at siden med UHPFRC blev udsat for tryk, mens siden med almindelig konstruktionsbeton blev udsat for træk ved påførelse af last. Det vil i praksis sige, at forsøgene med testemnerne nr. 1 og nr. 3 gav stort set sammen information om bøjningsstyrken, som man ville forvente at opnå, hvis testemnerne havde bestået af 100% almindelig konstruktionsbeton. Testemnerne nr. 2 og nr. 4 blev derimod orienteret således i bøjningsforsøgene, at siden med UHPFRC var i træk, mens siden med almindelig konstruktionsbeton var i tryk. Det vil sige, at forsøgene med testemnerne nr. 2 og

nr. 4 gav information om den eventuelle gevinst for de mekaniske egenskaber, som laget af UHPFRC giver anledning til.

3.2.4. Resultat af 3-punkts bøjningsforsøg

Resultatet af de gennemførte forsøg med 3-punktsbøjning er vist i Tabel 5 i form af brudlast og brudspænding for de fire testemner samt kurver for pilhøjde (deformation) vs. påført last (Fig. 10) og pilhøjde vs. spænding (Fig. 11). Det ses af resultaterne, at fiberforstærkningen virker til gunst, dels ved at det giver en højere brudstyrke – dette er mest udtalt for de to forsøg, der er lavet med testemnerne, der er skåret fra kanten, dvs. nr. 3 og 4.

Endvidere ses, at emnerne, hvor fiberlaget er i træksiden, har en vis sejhed. Det vil sige, der kan optages en del last, også efter at emnet er revnet (Fig. 12). For de to forsøg, hvor UHPFRC-laget er i tryk, falder lasten momentant til 0 ved revnedannelse.

Bøjningsforsøgene dokumenterer, at et lag af højstyrkebeton med fiberarmering kan give en mere robust konstruktion. Har man fx en underdimensioneret brovinge, så vil et lag af fiberbeton kunne afhjælpe problemer med for lille trækstyrke.

Tabel 5: Resultat af 3-punktsbøjningsforsøg med testemner af almindelig konstruktionsbeton med et top lag af stålfiberarmeret højstyrkebeton (UHPFRC).

Testemne #	Orientering af testemne i forsøgsopstillingen	Bredde af brudfladens tværsnit [mm]	Højde af brudfladens tværsnit [mm]	Brudlast [kN]	Brudspænding [MPa]
1	UHPFRC-side i tryk	160	162	12,8	6,3
2	UHPFRC-side i træk	154	163	14,0	7,0
3	UHPFRC-side i tryk	142	168	9,8	5,0
4	UHPFRC-side i træk	138	169	14,7	7,7

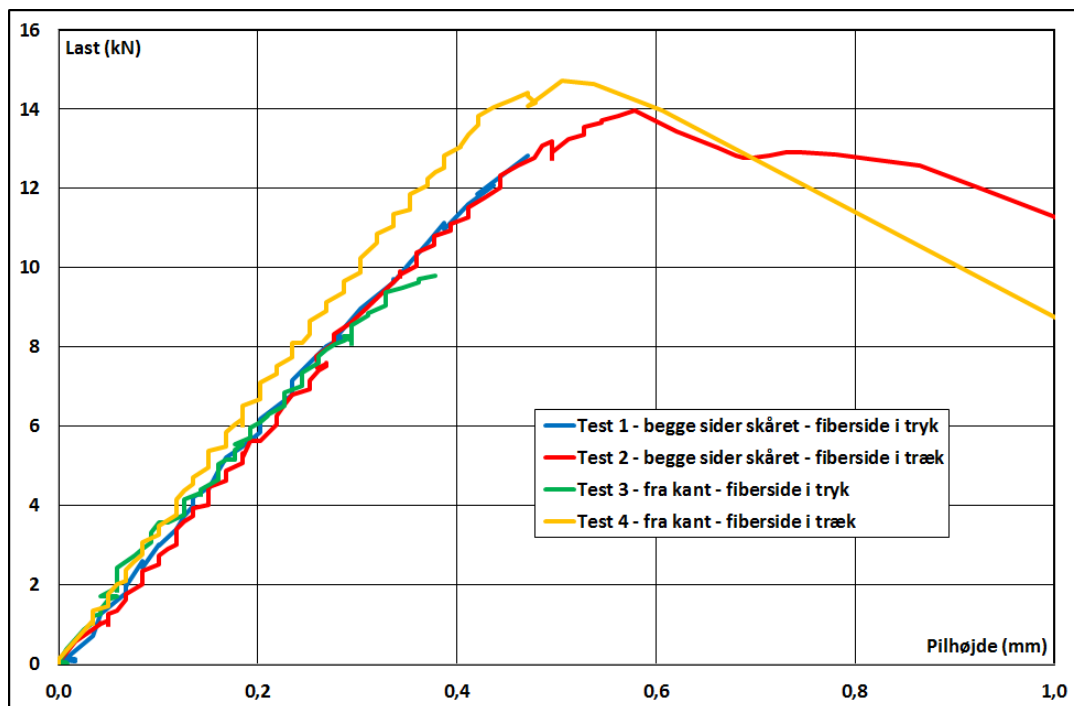


Fig. 10. Påført last (kN) plottet mod pilhøjde (mm) for de fire testemner fra bro-mock-up'en, som blev testet i 3-punktpunktsbøjningsforsøg.

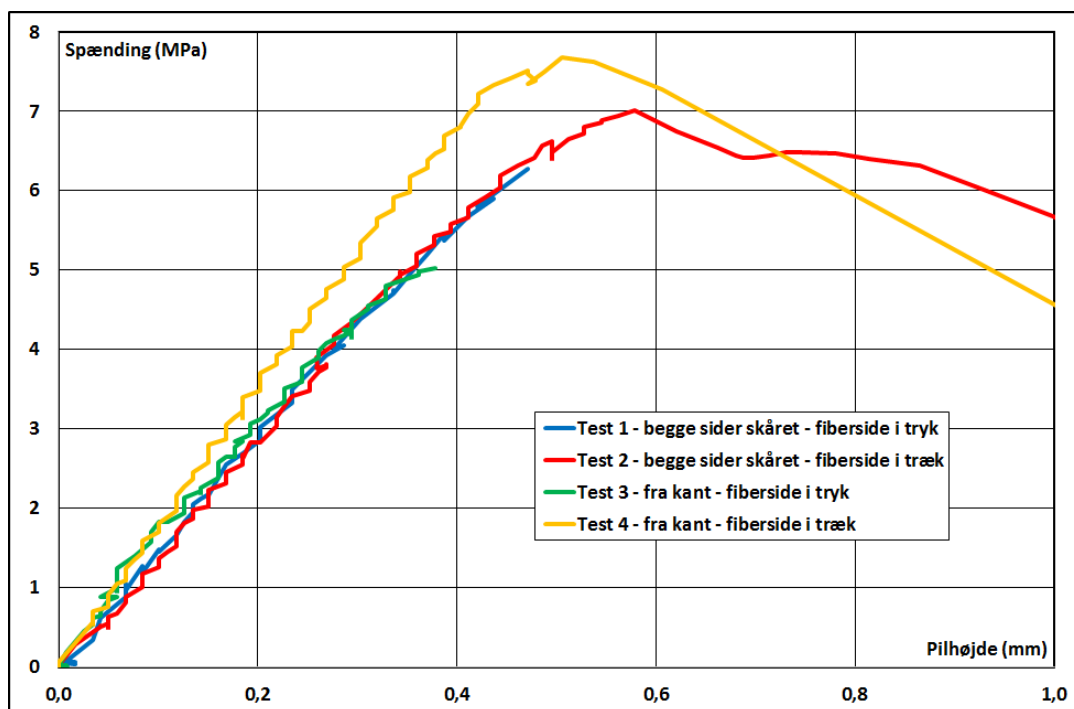


Fig. 11. Påført spænding (MPa) plottet mod pilhøjde (mm) for de fire testemner fra bro-mock-up'en, som blev testet i 3-punktpunktsbøjningsforsøg.



Fig. 12. Eksempel på revnedannelse i ét af de to testemner, hvor bøjningsforsøget blev udført med UHPFRC-laget i træksiden. Selv efter at emnet er revnet, kunne der optages en del last.

3.3. Relaterede serviceydelser

Teknologisk Institut kan tilbyde en række serviceydelser knyttet til anvendelsen af stålfiberarmeret højstyrkebeton, fx:

- Rådgivning om mulighederne for anvendelse af fiberarmeret højstyrkebeton til forstærkning af betonkonstruktioner – både i forbindelse med reparationsarbejder og udførelse af nye konstruktioner.
- Rådgivning om mulighederne for anvendelse af stålfiberarmeret højstyrkebeton som alternativ til bitumenbaserede løsninger i forbindelse med fugtisolering af betondæk på brokonstruktioner.
- Dokumentation af materialeegenskaber for fiberarmeret højstyrkebeton gennem laboratorieforsøg.
- Udvikling og optimering af mix design for fiberarmeret højstyrkebeton.

Referencer

- [1] Website om Healcon-projektet: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/106380/factsheet/en>.
- [2] Rapport med opsummering af resultater fra Healcon-projektet: <https://cordis.europa.eu/docs/results/309/309451/final1-publishable-summary-final.pdf>.
- [3] Habert, G., Denarié, E., Šajna, A., Rossi, P., 2013, Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes, Cement and Concrete Composites, Vol. 38, p. 1-11.
- [4] O. Svec and C. Pade, 2014, Ultra high performance fibre reinforced concrete as a waterproofing solution for concrete bridge deck renovations, Proceedings of the XXII Nordic Concrete Re-search (NCR) Symposium, Reykjavik, Island, 13.-15. august 2014, pp. 273-276.
- [5] Brühwiler, E., 2013, Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete, Structural Engineering International, Vol. 23, Issue 4.
- [6] Maltais, A., Petrov, N., Thibault, M & Bissonnette, B., 2018, UHPFRC for concrete repair. Proceedings of International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR 2018), MATEC Web of Conferences 199, 07007.

Appendix 1:

Petrographic analysis of 4 concrete cores from beams at Hveen Boulevard



Teknologisk Institut
Taastrup

Att.: Martin Kaasgaard

Gregersensvej
DK-2630 Taastrup
Telefon 72 20 20 00
Telefax 72 20 20 19

info@teknologisk.dk
www.teknologisk.dk

3. april 2018
UHJ/uhj
UHJ_2006146_HvensBoulevard.do
CX

Petrographic analysis of 4 concrete cores from beams at Hvens Boulevard

Introduction

The Danish Technological Institute has by Ulla Hjorth Jakobsen performed a petrographic analysis of 4 concrete cores taken from beams cast in the laboratory, cracked by force and then placed at Hvens Boulevard, in Taastrup, to be weathered.

Extent of Examination

One core was March 20, 2018 drilled through each of the 4 beams. Each core included a crack, the 0.2mm crack. One plane section, a thin section as well as a polished section were prepared from each core. The specimens were analysed using optical microscopes and a scanning electron microscope equipped with an EDX facility. The analysed sections were placed in the bottom of the cracks.

The following samples have been analysed:

Core No.	Thin section No.	Short description of core
1	8075-1	Concrete reference, with air
2	8075-2	Concrete with SAP-G, no air
3	8075-3	Concrete with Liapor impregnated with bacteria, with air
4	8075-4	Concrete with MUC ⁺⁺ , with air

Aim

The purpose of the petrographic examination was to verify whether calcite precipitation in the cracks had occurred.

Results

The concrete in all cores were similar in composition.

None of the concrete showed any sign of calcite precipitation in the cracks made through the concrete.

In all cracks, relatively large crystals of monosulphate was observed; these were however not entirely filling the cracks (Figure 1). Monosulphate were also seen in air voids along the cracks.

No sign of carbonation of the crack faces was observed in any of the samples.

EDX analysis did not show any distinct differences in the phase assemblages formed in the paste of the 4 concretes (Figure 1).

No sign of outside coming pollution (chlorides) were seen along the crack faces.

25. april 2019
UHJ/uhj

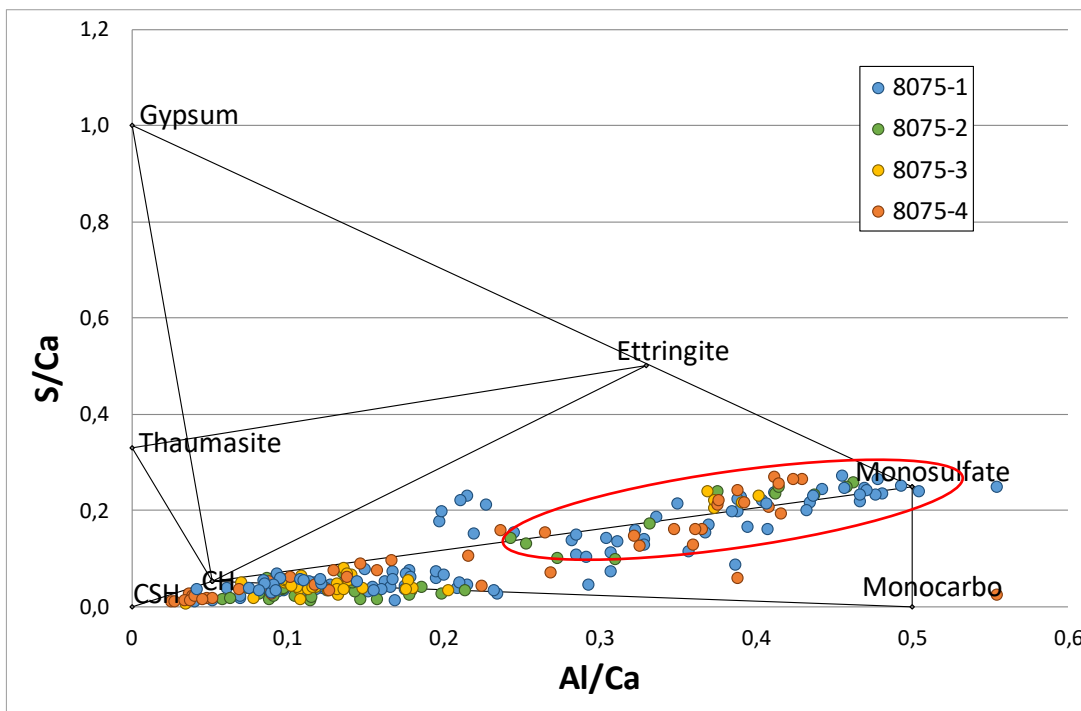


Figure 1: Phase assemblage analysis of crystals found in the cracks (encircled) and in the paste.

Detailed descriptions of the samples are found in the Appendix.

Best regards
Danish technological Institute

Ulla Hjørth Jakobsen, Ph.D. Geologist
Senior Consultant

Direct phono: +45 72 20 21 98
E-mail: uhj@teknologisk.dk

25. april 2019
UHJ/uhj

Appendix: Petrographic analysis

Macro-analysis

One fluorescent impregnated plane section has been prepared each of the 4 concrete cores. The plane sections are examined by naked eye and by use of a stereomicroscope in up to 40x magnification.

Optical Polarizing Microscopy

One thin section has been prepared from each of the 4 cores in the position where the cracks narrows out at a depth around 85-100mm.

The microscopic examination is performed on fluorescent impregnated thin sections. Each section represents an area of 30 x 45 mm.

The thin sections are made by vacuum impregnating slices of the samples with an epoxy resin containing a fluorescent dye. Subsequently, the impregnated slices are mounted on glass plates, and ground to a thickness of 0.020 mm (20 µm). Finally, the sections are covered with a cover glass.

The thin sections are examined in a polarizing optical microscope using transmitted light, crossed polarized light, and blue transmitted light with a yellow blocking filter (fluorescent mode).

The vacuum impregnation of the samples with epoxy causes all voids and cavities in the samples to be filled with fluorescent epoxy. By transmitting fluorescent light through the thin section in the microscope, the fluorescent epoxy in the various porosities will emit yellow light that makes voids, cavities and cracks easy to identify. The fluorescent epoxy also impregnates the capillary pores in the hardened cement paste causing a dense cement paste with low water to cement ratio to appear darker green while a more porous cement paste with a high water to cement ratio appears lighter green. By this, the apparent water to cement ratio (w/c) of the concrete can be estimated with an accuracy of ± 0.02.

Scanning Electron Microscopy

SEM-EDX analysis is performed on 4 polished sections made from the cut off piece from the thin sections, using a Quanta 400 from FEI at DTI.

An accelerating voltage of 15 KeV, spot size 5 and a working distance of around 10 mm are used during analysis. The data are Proza corrected. The analyses were performed using non-coated polished sections in low vacuum mode.

The samples examined are described below:

Core No.	Thin section No.	Short description of core
1	8075-1	Concrete reference, with air
2	8075-2	Concrete with SAP-G, no air
3	8075-3	Concrete with Liapor impregnated with bacteria, with air
4	8075-4	Concrete with MUC ⁺⁺ , with air

25. april 2019
UHJ/uhj

Microanalysis

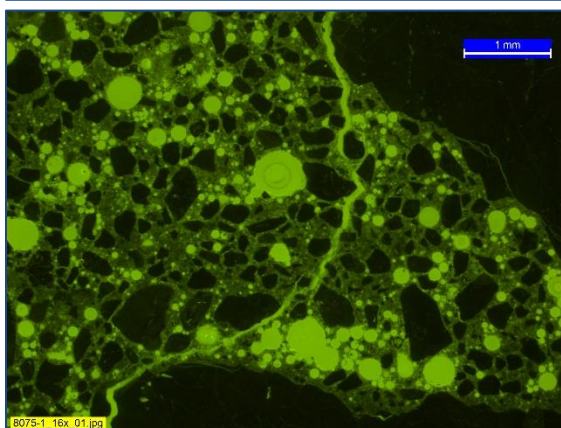
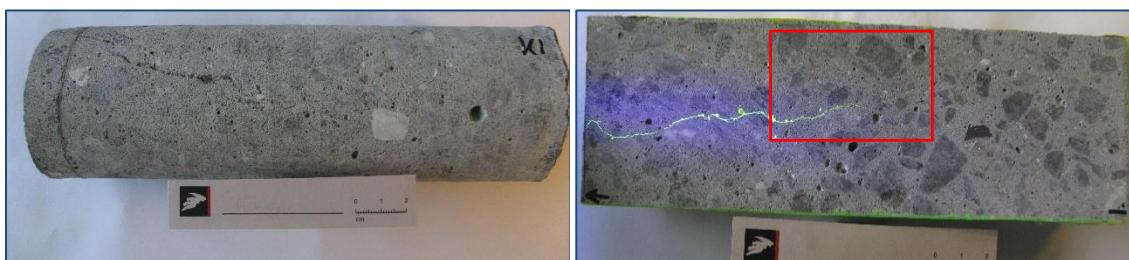
Object:	Concrete Core	Project No.	2006146
Sample ID	1	Lab ID:	8075-1
		Position:	86-132mm

The concrete consists of a relatively coarse grained Portland cement with fly ash. The coarse aggregate fraction is grey granitic rock and the sand fraction mainly quartz. The concrete is air entrained. The section contains the lowermost part of the crack at a depth from 86-132mm.

The crack is generally open from the surface of the core to about 125mm. The crack is oriented vertical to the surface with minor branching along the patch of the crack. The crack traverses mainly paste.

No sign of carbonation of the paste along the crack is observed and no sign of carbonate (calcite) precipitation within the crack is seen the examined section.

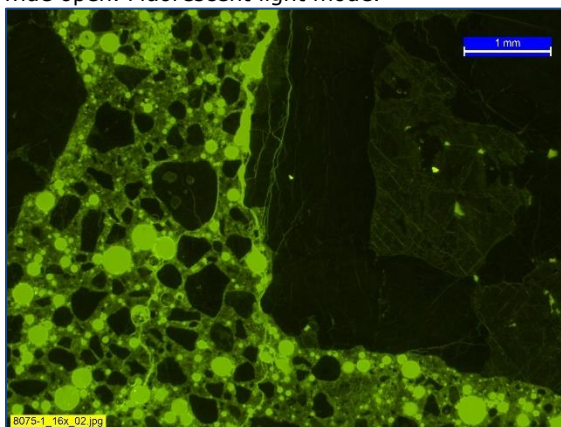
Occasionally a crystalline phase, of low birefringence, is observed within, but not filling the crack. This phase is, by SEM-EDX analysed to be monosulphate.



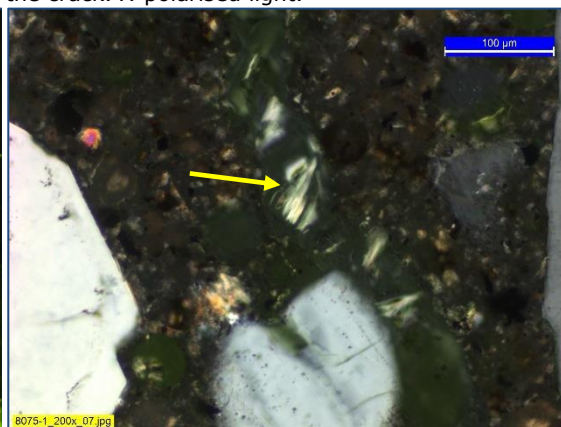
The crack at a depth around 86mm. The crack is wide open. Fluorescent light mode.



Monosulphate phases are occasionally observed in the crack. X-polarised light.



The crack at a depth of 132mm. The crack is wide open.



Monosulphate phases are occasionally observed in the crack. X-polarised light.

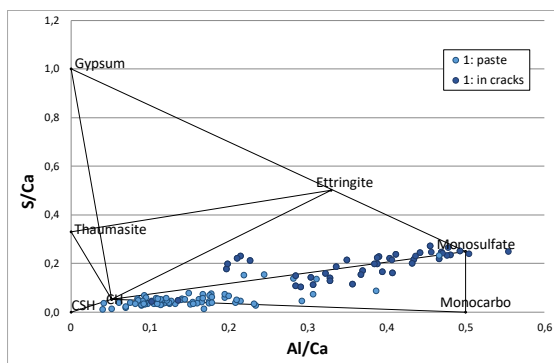
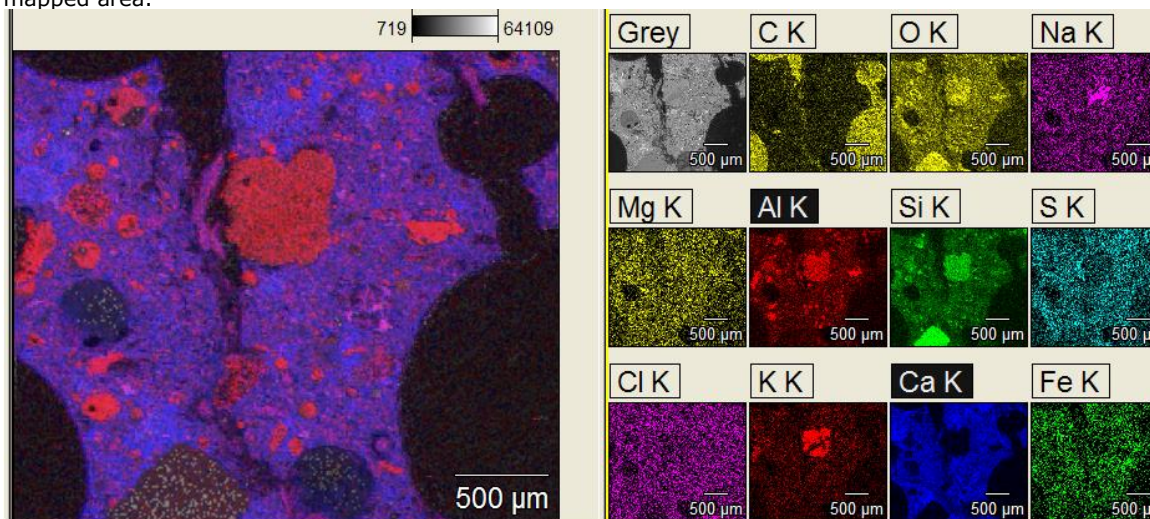
25. april 2019
UHJ/uhj

Microanalysis: SEM-EDX

Object:	Concrete Core	Project No.	2006146
Sample ID	1	Lab ID:	8075-1
		Position:	86-132mm



Few parts of the crack contains crystals, consisting of Al, S and Ca. Below is X-ray maps visualizing the distribution of the phases in the mapped area. The maps of Al (red) and Ca (blue) is placed on top of the mapped area.



Phase diagram showing the phase assemblages in cracks and the paste. Generally, the concrete does not contain ettringite. The cement paste consists of a mixture of CH and a monocarboaluninate hydrate phase.

25. april 2019
UHJ/uhj

Microanalysis

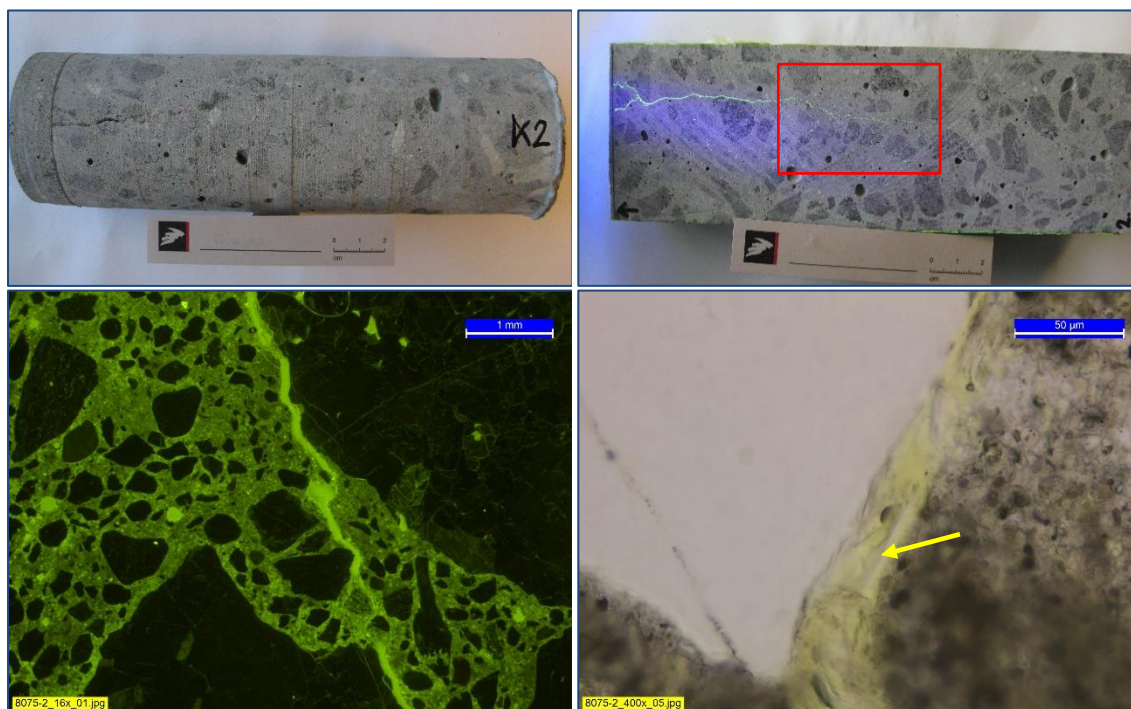
Object:	Concrete Core	Project No.	2006146
Sample ID	2	Lab ID:	8075-2
		Position:	85-130mm

The concrete consists of a relatively coarse grained Portland cement with fly ash. The coarse aggregate fraction is grey granitic rock and the sand fraction mainly quartz. The concrete is not air entrained. The section contains the lowermost part of the crack at a depth from 85-130mm.

The crack is generally open from the surface of the core to about 130mm. The crack is oriented vertical to the surface with minor branching along the patch of the crack. The crack traverses mainly paste.

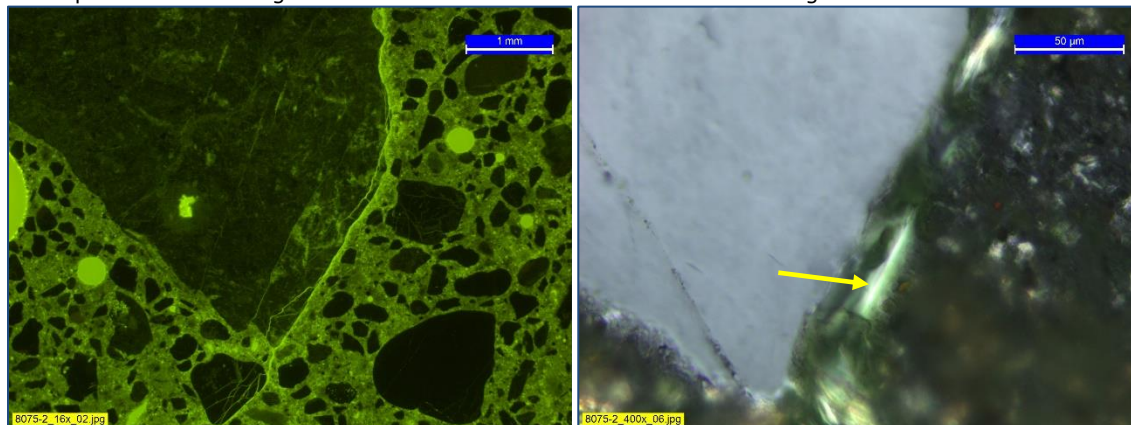
No sign of carbonation of the paste along the crack is observed and no sign of carbonate (calcite) precipitation within the crack is seen the examined section.

Occasionally a crystalline phase, of low birefringence, is observed within, but not filling the crack. This phase is, by SEM-EDX analysed to be monosulphate.



The crack at a depth around 85mm. The crack is wide open. Fluorescent light mode.

Monosulphate phases are occasionally observed in the crack. Polarised light.



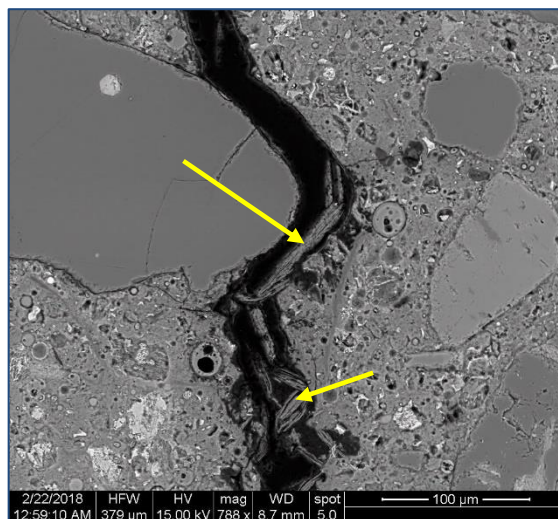
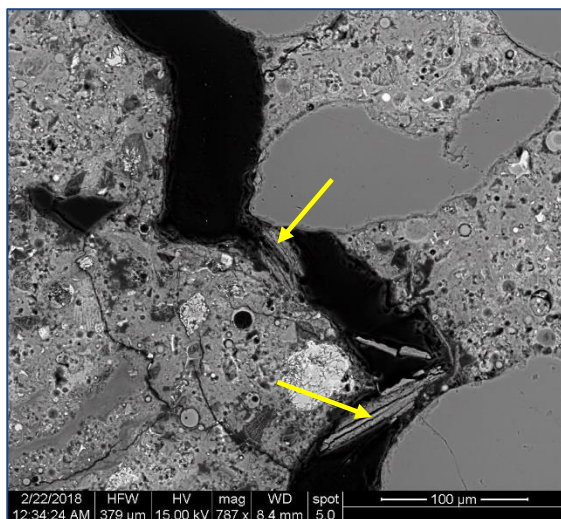
The crack at a depth of 130mm. The crack is wide open.

Monosulphate phases are occasionally observed in the crack. X-polarised light.

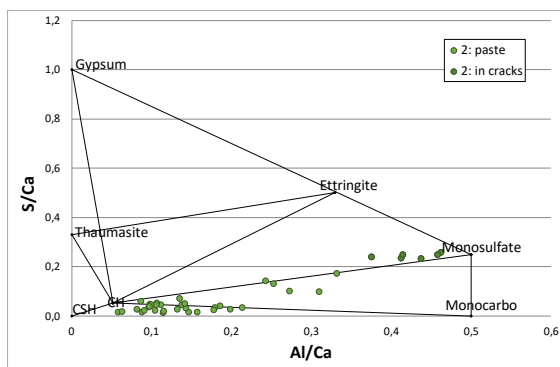
25. april 2019
UHJ/uhj

Microanalysis: SEM-EDX

Object:	Concrete Core	Project No.	2006146
Sample ID	2	Lab ID:	8075-2
		Position:	85-130mm



Few parts of the crack contains crystals, consisting of Al, S and Ca.



Phase diagram showing the phase assemblages in cracks and the paste. Generally, the concrete does not contain ettringite. The cement paste consists of a mixture of CH and a monocarboaluninate hydrate phase.

25. april 2019
UHJ/uhj

Microanalysis

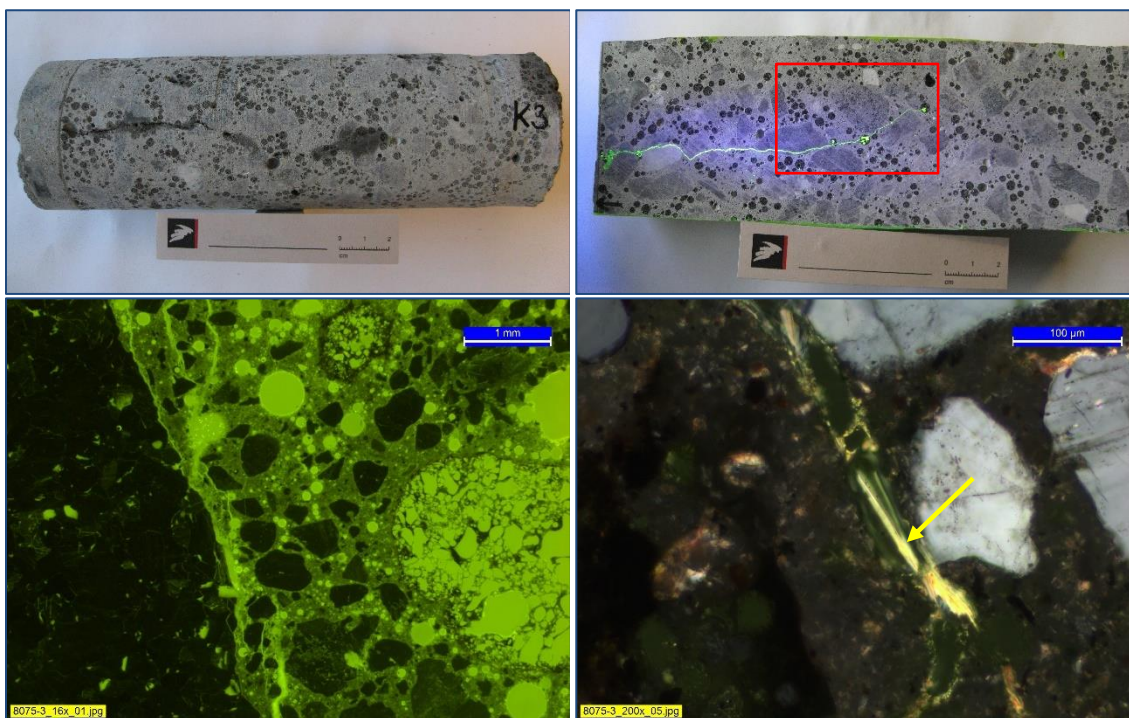
Object:	Concrete Core	Project No.	2006146
Sample ID	3	Lab ID:	8075-3
		Position:	85-130mm

The concrete consists of a relatively coarse grained Portland cement with fly ash. The coarse aggregate fraction is grey granitic rock and the sand fraction mainly quartz. Black LECA balls are mixed into the concrete. The concrete is air entrained. The section contains the lowermost part of the crack at a depth from 85-130mm.

The crack is generally open from the surface of the core to about 125mm. The crack is oriented vertical to the surface with minor branching along the patch of the crack. The crack traverses mainly paste, and occasionally also the LECA balls.

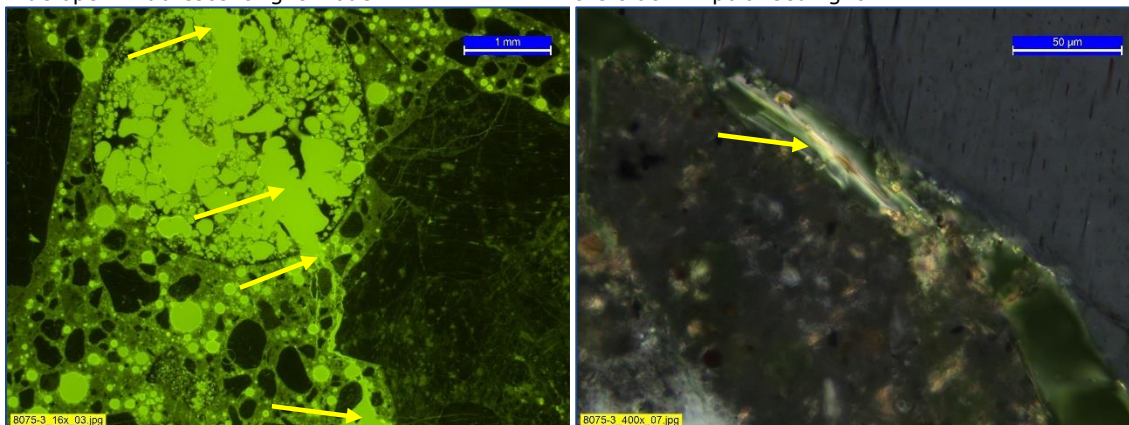
No sign of carbonation of the paste along the crack is observed and no sign of carbonate (calcite) precipitation within the crack is seen the examined section.

Occasionally a crystalline phase, of low birefringence, is observed within, but not filling the crack. This phase is, by SEM-EDX analysed to be monosulphate.



The crack at a depth around 85mm. The crack is wide open. Fluorescent light mode.

Monosulphate phases are occasionally observed in the crack. X-polarised light.



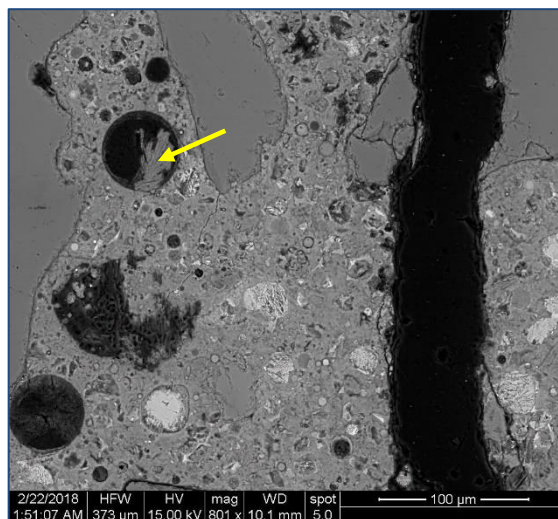
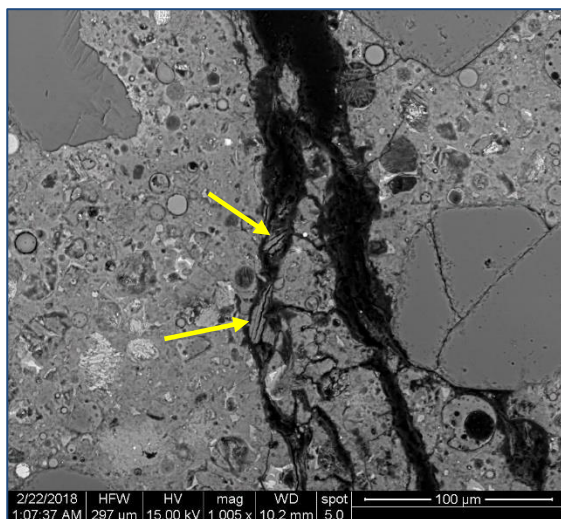
The crack at a depth of 130mm. The crack is wide open. Occasionally LECA balls are traversed.

Monosulphate phases are occasionally observed in the crack. X-polarised light.

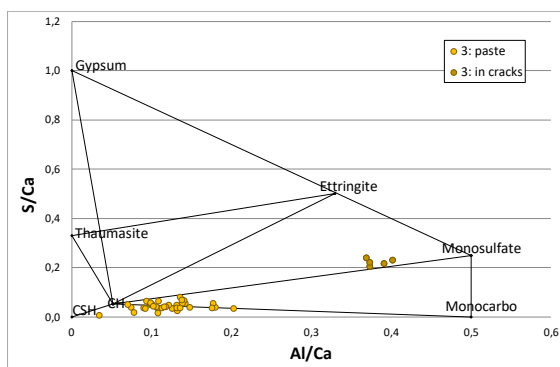
25. april 2019
UHJ/uhj

Microanalysis: SEM-EDX

Object:	Concrete Core	Project No.	2006146
Sample ID	3	Lab ID:	8075-3
		Position:	85-130mm



Few parts of the crack contains crystals, consisting of Al, S and Ca. The same phase is observede within voids near the crack.



Phase diagram showing the phase assemblages in cracks and the paste. Generally, the concrete does not contain ettringite. The cement paste consists of a mixture of CH and a monocarboaluninate hydrate phase.

25. april 2019
UHJ/uhj

Microanalysis

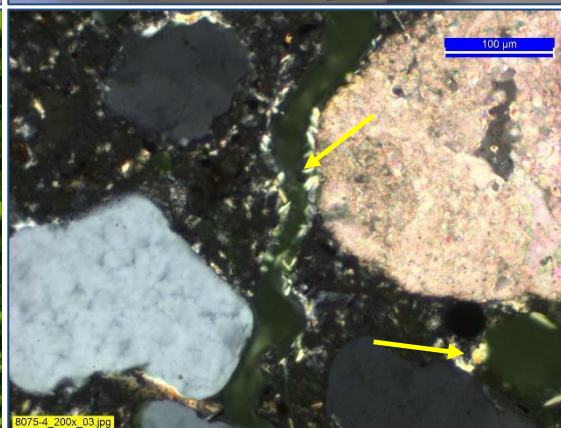
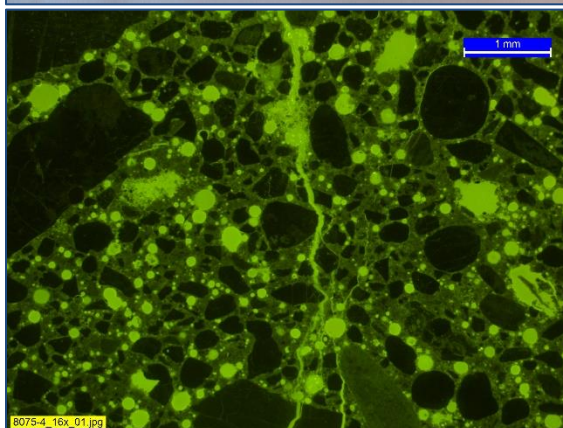
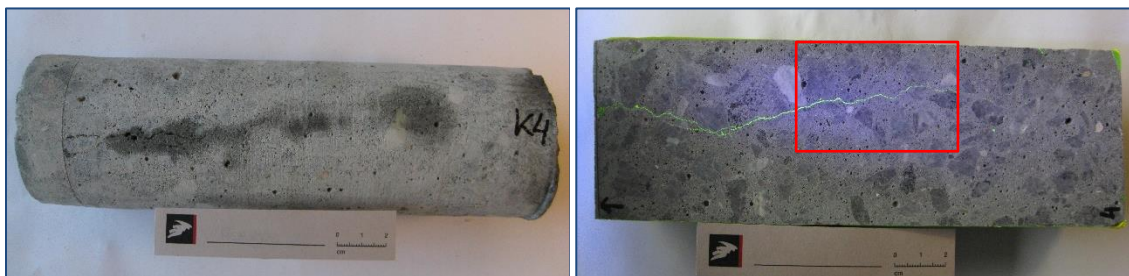
Object:	Concrete Core	Project No.	2006146
Sample ID	4	Lab ID:	8075-4
		Position:	100-145mm

The concrete consists of a relatively coarse grained Portland cement with fly ash. The coarse aggregate fraction is grey granitic rock and the sand fraction mainly quartz. The concrete is air entrained. The section contains the lowermost part of the crack at a depth from 100-145mm.

The crack is generally open from the surface of the core to about 150mm. The crack is oriented vertical to the surface with minor branching along the patch of the crack. The crack traverses mainly paste.

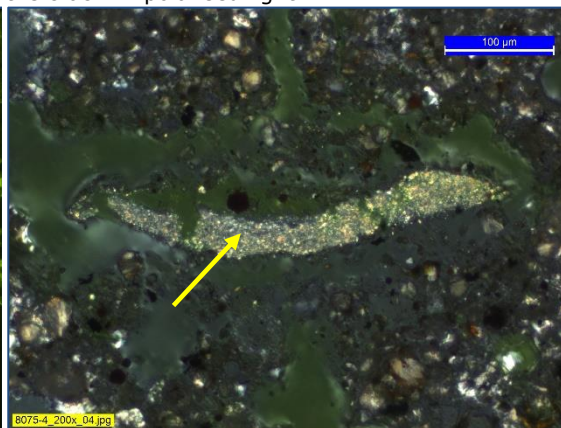
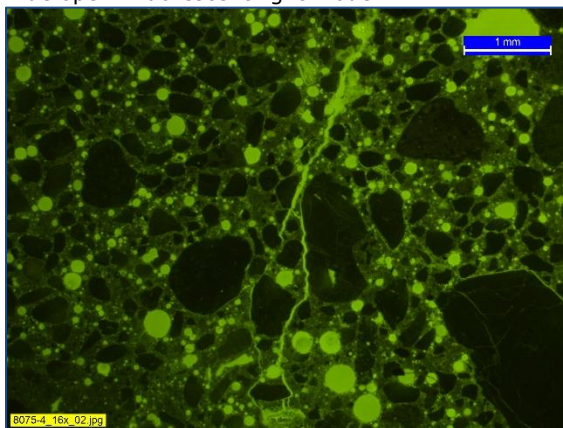
No sign of carbonation of the paste along the crack is observed and no sign of carbonate (calcite) precipitation within the crack is seen the examined section.

Occasionally a crystalline phase, of low birefringence, is observed within, but not filling the crack. This phase is, by SEM-EDX analysed to be monosulphate.



The crack at a depth around 100mm. The crack is wide open. Fluorescent light mode.

Monosulphate phases are occasionally observed in the crack. X-polarised light.



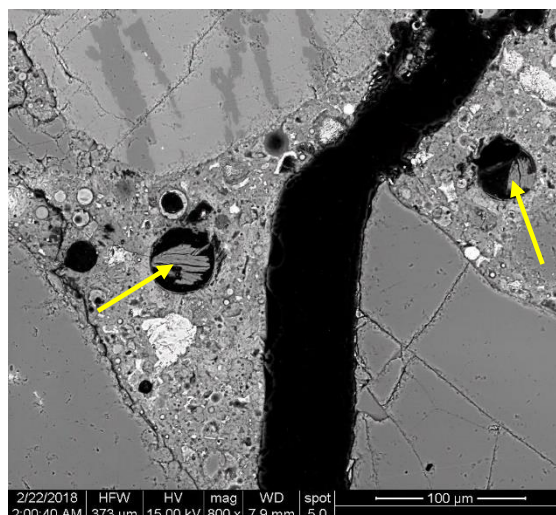
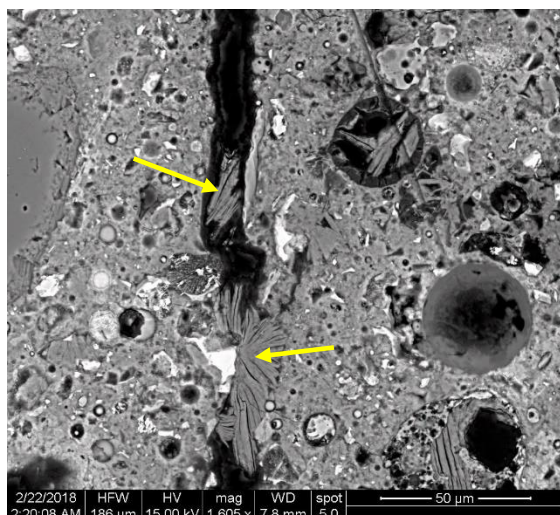
The crack at a depth of 145mm. The crack is wide open.

Lumps of finegrained material is frequent in the paste. X-polarised light.

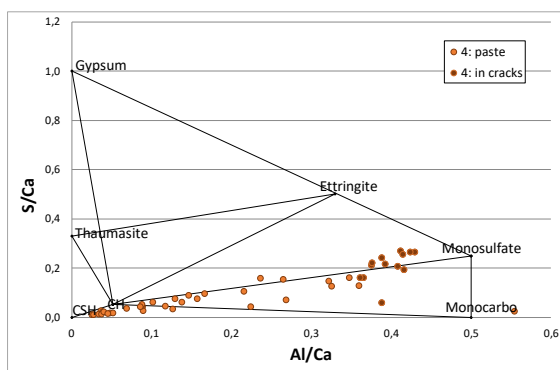
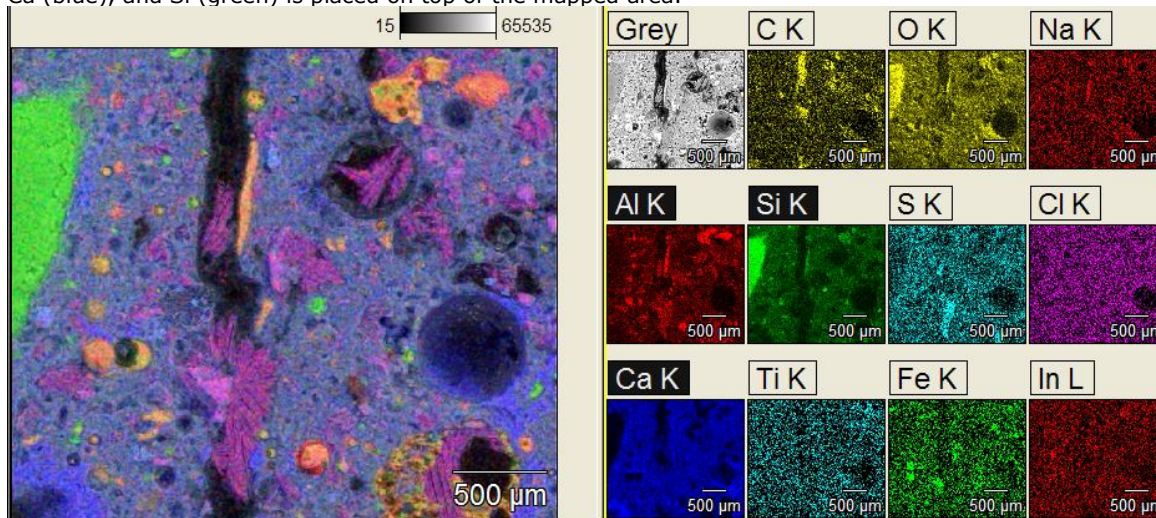
25. april 2019
UHJ/uhj

Microanalysis: SEM-EDX

Object:	Concrete Core	Project No.	2006146
Sample ID	4	Lab ID:	8075-4
		Position:	100-145mm



Few parts of the crack as well as air voids along the crack contains crystals, consisting of Al, S and Ca. Below is X-ray maps visualizing the distribution of the phases in the mapped area. The maps of Al (red) Ca (blue), and Si (green) is placed on top of the mapped area.



Phase diagram showing the phase assemblages in cracks and the paste. Generally, the concrete does not contain ettringite. The cement paste consists of a mixture of CSH, CH and a monocarboalunate hydrate/monosulphate phase.