



Feltekspanerings- pladser

Teknisk rapport, 2019

Grøn omstilling af cement- og
betonproduktion

Titel

Felteksporeringspladser

Projekt

Grøn omstilling af cement- og betonproduktion

Arbejdspakke

D2: Felteksporeringspladser til langtidsholdbarhed

Deltagere i arbejdsplan

Claus Vestergaard Nielsen og Peter Møller, Rambøll A/S

William Rosengaard, Sweco A/S

Ulf Jönsson, Femern A/S

Niels Højgaard Pedersen, Vejdirektoratet

Sergio Ferreira Garzón og Lasse Frølich Kristensen, Aalborg Portland A/S

Lars Nyholm Thrane, Claus Pade, Henrik Erndahl Sørensen, Ulla Hjort Jacobsen, Teknologisk Institut

Forfattere

Lars Nyholm Thrane, Claus Vestergaard Nielsen, Henrik Erndahl Sørensen, Ulla Hjort Jacobsen, Søren Lundsted Poulsen

Om Innovationskonsortiet

Innovationskonsortiets overordnede mål er at udvikle løsninger, som er med til at skabe et grundlag for fortsat grøn omstilling af cement- og betonproduktion i Danmark. Projektet gennemføres i perioden fra marts 2014 til marts 2019 og er medfinansieret af InnovationsFonden. Projektets hjemmeside er www.gronbeton.dk. Deltagerne i innovationskonsortiet er:

Aalborg Portland A/S

Femern A/S

MT Højgaard A/S

Energistyrelsen

Erhvervsakademiet Lillebælt

DTU Byg

Vejdirektoratet

Rambøll Danmark A/S

Unicon A/S

Københavns Erhvervsakademi

Via University College

Teknologisk Institut

(projektleder)

Banedanmark

Sweco A/S

Dansk Beton, Fabriks-

betonforeningen

Erhvervsakademi Sjælland

Center for Betonuddannelse

Contents

1.	Introduktion.....	4
2.	Baggrund	4
3.	Eksisterende felteksponeringspladser i Danmark.....	5
4.	Formål	7
5.	Udbygning af eksisterende felteksponeringspladser.....	7
6.	Etablering af ny felteksponeringsplads langs trafikeret vej	8
7.	Betonrecepter og placering af blokke	9
8.	Monitorering og fjernovervågning af betonblokke.....	11
9.	Støbninger.....	16
10.	Betonegenskaber.....	18
11.	Modenhedsudvikling.....	19
12.	Initialkarakterisering af betoner.....	19
13.	Placering af blokke.....	20
14.	1 års termin.....	23
15.	Sammenligning med data fra felteksponeringspladsen i Rødbyhavn	26
16.	Referencer.....	31
17.	Bilag A. Hirtshals Havns felteksponeringsplads	32
18.	Bilag B. Mikroskopisk undersøgelse af 1 år gamle beton-prøver eksponeret til havvand	33

1. Introduktion

Projektet "Grøn omstilling af cement- og betonproduktion" har arbejdet med udvikling og anvendelse af CO₂-reducerende cement- og bindersystemer. Denne rapport er udarbejdet som en del af delaktiviteten D22 "Etablering af felteksponeringspladser", hvor målet var at etablere felteksponeringspladser med eksponering af udvalgte betoner med forskellige cement- og bindersystemer.

2. Baggrund

Der stilles stadig højere krav til betonkonstruktioners levetid. Indenfor nyere tid blev der til både Storebælts- og Øresundsforbindelsen anvendt et defineret levetidskriterium på 100 år, og Femernforbindelsen er specificeret til 120 år. Viden om betons langtidsholdbarhed er afgørende for dels at kunne vurdere, om den ønskede levetid kan opnås, og dels at kunne kalibrere levetidsmodeller som fx fib Model Code for levetidsdesign [1].

Erfaringer fra eksisterende betonkonstruktioner er af uvurderlig betydning i forhold til at opnå denne viden. Således er en stor del af grundlaget for betonstandardernes nationale regler [2] og Vejdirektoratets krav og regler for beton til anlægskonstruktioner [3] baseret på observationer og erfaringer opnået fra holdbarhedsstudier af eksisterende betonkonstruktioner. Standarderne og de nationale regler foreskriver krav til valg af delmaterialer og sammensætning af beton for at sikre en høj sandsynlighed for, at der opnås en tilfredsstillende holdbarhed og den forventede designlevetid. Heri ligger der et grundlæggende forsigtighedsprincip, og med god grund, over de muligheder der tillades for valg af delmaterialer og sammensætning af beton til forskellige miljø-/eksponeringsklasser.

Men i takt med stigende pres på at bygge mere bæredygtigt betyder det også et pres på at optimere betoner i forhold til bl.a. CO₂-udledning. Det inkluderer bl.a. at se på mulighederne for at anvende nye delmaterialer og at udnytte delmaterialerne til grænsen uden at gå på kompromis med holdbarheden og kvaliteten. Den store udfordring og barriere for implementering af nye delmaterialer og nye betonsammensætninger, der ligger ud over den gængse erfaringsdatabase, er dog, at der ikke foreligger et tilpas langt historisk erfaringsgrundlag fra virkelighedens verden.

Eksponering af beton på felteksponeringspladser kan være med til at imødekomme dette behov. Her er der mulighed for at overvåge betoner i et realistisk eksponeringsmiljø. Det gælder både de fysiske og kemiske forhold, men også den tidsmæssige faktor, da mange nedbrydningsmekanismer kan være svære at accelerere på en realistisk måde i laboratoriet. Desuden er der ældningseffekter på kloridindtrængning, som det hidtil ikke har været muligt at modellere uden gode langtidsobservationer. Eksponeringspladser giver desuden mulighed for nemmere at overvåge betonernes tilstand over tid på distancen, da der kan installeres fjernmonitorering og trådløse sensorer, som kan tilgås på afstand. Det er nemmere at inkludere avanceret instrumentering og foretage destruktiv udtagning af borekerner, da prøveemnerne typisk ikke har nogen konstruktiv funktion.

Den kontinuerte overvågning af betonerne vil skabe ny viden om, hvordan og hvor hurtigt nedbrydningen foregår under realistiske betingelser. Denne grundlæggende information skal også bruges til at verificere og optimere komplekse fysisk-kemiske holdbarhedsmodeller udover mere praksisnære designregler for betons holdbarhed og levetid. Felteksponeringspladserne vil også give mere viden om relationen mellem nedbrydningen under virkelige forhold, og de resultater som opnås med accelererede prøvningsmetoder i laboratoriet til bestemmelse af fx kloridmigrationskoefficient og frostbestandighed. Eksempelvis har resultater fra projektet vist, at visse cement-og bindersystemer består frostkriteriet målt ved en luftporeanalyse, men ikke består en frost/tø-test. Her er spørgsmålet så, hvilken testmetode der bedst repræsenterer betoner med høj substitution af cementklinker. Det vil eksponeringspladserne give mulighed for at svare på.

3. Eksisterende felteksponeringspladser i Danmark

I Danmark findes der to marine felteksponeringspladser i henholdsvis Hirtshals havn og Rødby havn. Derudover findes "Kirkegården" hos Aalborg Portland, som ligger i nærheden af cementfabrikken i Aalborg Øst. Eksponeringspladsen i Hirtshals blev etableret af Aalborg Portland i 1983 og blev siden udbygget i 2002. Figur 1 viser billeder fra Hirtshals havn og eksponeringspladsen, som er placeret ved den ene havnemole, hvor den udsættes for noget af det mest barske vejr, som man kan udsætte armeret beton for i Danmark. Betonemnerne er placeret i en rig, der er monteret på kajkanten. Betonemnerne på 2 m x 1 m x 0,20 m er sænket delvist ned i vandet. Det giver mulighed for at følge nedbrydningen af betonen over og under vand samt i vandspejlszonen (splashzonen), hvor betonens armering ofte er særligt udsat for nedbrydning.

På tilsvarende vis etablerede Femern A/S i 2009 en felteksponeringsplads i Rødby havn med plads til 25 betonemner af samme størrelse som i Hirtshals (Figur 2). Formålet med denne eksponeringsplads var at skabe grundlag for opsamling af viden om fremtidens potentielle anlægsbetoner samt at dokumentere den betontechnologi for marine konstruktioner, der var oparbejdet i Danmark efter adskillige års erfaring med de nye Europæiske betonstandarder. Der blev i april 2010 eksponeret 15 forskellige betoner i Rødby Havn [4], som efterfølgende er blevet undersøgt efter hhv. ½, 2 og 5 års eksponering. Næste måling skal udføres i 2020 efter 10 års eksponering. Efter etableringen er der indhentet meget viden om de forskellige betoners holdbarhed i forhold til kloridindtrængning og korrosion. Der blev senere tilføjet 7 instrumenterede blokke i oktober 2010 og yderligere 2 ikke-instrumenterede blokke i 2016.

En anden felteksponeringsplads, der har leveret mange værdifulde data til analyse af betoners opførsel i eksponeringssituationer, der er sammenlignelige med danske forhold, er den svenske marine felteksponeringsplads i Träslövsläge på den svenske skærgårdskyst ud mod Kattegat i nærheden af Varberg. Denne felteksponeringsplads blev etableret i 1992.



Figur 1. Billeder fra Aalborg Portlands felteksponeringsplads i Hirtshals havn.



Figur 2. Billeder fra Femerns felteksponeringsplads i Rødby havn.

Til trods for at begge danske marine eksponeringspladser eksponerer betonemnerne for havvand, er der relativ stor forskel på de kemiske forhold. Nordsøen er væsentlig mere saltholdig end Femern Bælt (Østersøen), og dermed er eksponeringsmiljøet i Hirtshals mere aggressivt mht. armeringskorrosion forårsaget af kloridindtrængning.

Eksponeringspladsen "Kirkegården" hos Aalborg Portland blev etableret i 1983, hvor der på nuværende tidspunkt er eksponeret 29 forskellige betontyper placeret i henholdsvis 1983 [5] (16 emner), 2001 (8 emner) og 2003 (5 emner). Figur 3 viser billeder fra "Kirkegården". Senest blev der i 2016 placeret tre prøvestøbningsblokke fra demobro Lindholtvej ved Holstebro på pladsen ved Aalborg Portland.



Figur 3. Billede fra "Kirkegården" hos Aalborg Portland.

4. Formål

Formålet med dette delprojekt var at eksponere udvalgte betoner fra projektet for havvand og tørsalte samtidig med frost-tø påvirkninger i et aggressivt udendørs miljø. Eksponeringen skal foregå på forskellige felteksponeringspladser med løbende registreringer af klimadata, mv., således at de opnåede observationer og resultater kan anvendes til at vurdere betonernes langtidsholdbarhed. Dette skal skabe grundlag for en langvarig data- og erfaringsopsamling omkring holdbarheden af betoner med nye CO₂-reducerende cement- og bindersystemer i et aggressivt eksponeringsmiljø.

De specifikke mål var at:

- Udbygge felteksponeringspladsen i Rødby havn med 1-2 prøveemner af beton udviklet i dette projekt.
- Udbygge felteksponeringspladsen i Hirtshals med 2-4 udvalgte prøveemner af beton udviklet i dette projekt.
- Etablere en helt ny eksponeringsplads langs en trafikeret vej med plads til 5-10 betoner, hvor det er muligt at følge betoner, som er udsat for et saltholdigt vejmiljø.

5. Udbygning af eksisterende felteksponeringspladser

Som beskrevet ovenfor udnyttedes de to eksisterende pladser i Hirtshals og Rødby havn til at eksponere udvalgte betontyper fra projektet i et marint miljø.

I Hirtshals havn var der ved projektstart kun to ledige pladser i de fastmonterede prøveemneholdere. En gennemgang viste, at det var muligt at fjerne to af de oprindelige betoner i Hirtshals for at skabe plads til de fire nye betonemner fra dette projekt.

I Rødby havn var der fra projektstart en ledig plads reserveret til projektet. Projektet ønskede dog at eksponere to betontyper, og det blev besluttet, at imødekomme dette ønske ved at fremstille et betonemne med 2 forskellige betontyper.

6. Etablering af ny felteksponeringsplads langs trafikeret vej

I forhold til at etablere en ny eksponeringsplads langs en trafikeret vej med jævnlig tørsaltning lykkedes det at indgå en aftale med Høje-Taastrup kommune om etablering af en eksponeringsplads langs Hveens Boulevard, som er en af de mest trafikerede veje i Storkøbenhavn. Den tilladte hastighed på strækningen er 70 km/time.

Eksponeringspladsen er etableret i midterrabbatten bag autoværnet, hvor der er planeret og lagt stabilt grus ud som underlag (Figur 4).



Figur 4. Billede fra etablering af felteksponeringsplads langs Hveens Boulevard i Høje-Taastrup.

Derudover er der trukket nye elkabler, så der er strøm til rådighed for instrumentering. Der er forberedt plads til minimum 10 betonemner, som har dimensionerne 1 m x 1 m x 0,2 m. Prøveemnernes placering betyder, at de vil være udsat for hyppig opfugtning og udtørring samt i vinterhalvåret fra sprøjt med kloridholdigt vejevand og samtidig frost-tø påvirkning.

7. Betonrecepter og placering af blokke

På baggrund af udviklingsarbejdet i projektet og antallet af felteksporeringspladser blev det besluttet at udvælge 8 betontyper til felteksporeringspladserne. De udvalgte recepter er alle målrettet anlægskonstruktioner, og sammensætningen har taget udgangspunkt i projektets gennemgående referencebeton til anlægskonstruktioner - en E40 beton udvalgt af Unicon i forbindelse med støbning af brodæk til den første demobro for Lindholtvej ved Holstebro.

I forhold til referencebetonen er pasta- og tilslagsmængde, tilslagssammensætning og luftindhold holdt konstant. Den variable parameter er pastasammensætningen (cement- og bindersammensætning samt v/c-tal). Tabel 1 viser de udvalgte recepter og placeringen af betonemnerne. Markeringen "X" angiver, hvilke blokke der er instrumenteret (se afsnit 8). Det tilhørende bogstav ID er tildelt ud fra en fortløbende rækkefølge. Serien starter på "P", da de eksisterende betonblokke på eksporeringspladsen i Rødby havn er benævnt op til "O".

Recepterne "Q" (GB-1), "R" (GB-3) og "S" (GB-2) repræsenterer de betonkandidater, der blev arbejdet med i forbindelse med det første demonstrationsprojekt - en vejbro (Lindholtvej) for Vejdirektoratet i forbindelse med etablering af den nye motorvejsstrækning fra Herning til Holstebro.

Recepterne "U" (GB-9) og "V" (GB-5) repræsenterer de betonkandidater, der er blevet arbejdet med i forbindelse med de to efterfølgende demonstrationsbroer på Lolland for henholdsvis Vejdirektoratet og Banedanmark.

Pastasammensætningerne er udviklet baseret på det funktionsbaserede designkoncept på mørtelniveau, som er udviklet og anvendt i projektet. Formålet med det funktionsbaserede designkoncept er for udvalgte delmaterialer at optimere bindersammensætningen og vand-binderforholdet, så der opnås egenskaber ækvivalente med en referencesammensætning, samtidig med at CO₂-aftrykket bliver så lavt som muligt. Som grundlag for optimeringsproceduren blev der gennemført et mørtel-parameterstudie, hvor udvalgte egenskaber blev bestemt. I nærværende projekt blev det besluttet at benytte mørtelreferencens plastiske viskositet, trykstyrke og kloridmigrationskoefficient som referenceværdier. Under det videre udviklingsforløb på betonniveau viste det sig i nogle tilfælde nødvendigt at justere pastasammensætningerne med henblik på at bestå frost/tø-testen.

Til den første vejbro for Vejdirektoratet (Lindholtvej ved Holstebro) var der fokus på at udvikle og afprøve det funktionsbaserede designkoncept med udgangspunkt i anvendelsen

af rapidcement, flyveaske og kalkfiller. Det førte til receptforslag "Q" (GB-1 med flyveaske) og "S" (GB-2 med flyveaske og kalkfiller). Den efterfølgende betondokumentation i laboratoriet viste dog problemer med frost/tø-modstandsevnen målt ved en frost/tø-test, til trods for at betonerne bestod frostkriteriet målt på en luftporeanalyse. Derfor blev "R" (GB-3) foreslået og dokumenteret. GB-3 bestod frost/tø-testen og blev efterfølgende anvendt i den ene halvdel af brodækket i stedet for GB-1, mens den anden halvdel af brodækket blev støbt med referencebetonen "P" (E40-ref). GB-2 blev ikke anvendt i demobroen.

Til broerne på Lolland – hhv. Vejdirektoratet/Sund og Bælts demobro ved Rødby (Lundegårdsvej) og Banedanmarks demobro ved Holeby (Kærstrupvej) - var der fokus på anvendelse af nye uprøvede delmaterialer, og det funktionsbaserede design blev brugt til at foreslå en Portland-kompositcement sammensætning indeholdende kalcineret ler og kalkfiller. Det resulterede i en cementtype CEM II/A-M(Q-LL) i henhold til DS/EN 197-1, som Aalborg Portland producerede en testbatch af (35 tons). Denne cement er anvendt i både "U" (GB-9) og "V" (GB-5). Cementen blev leveret og indpumpet i en silo på Unicons fabrik i Herfølge, der var den tætteste Unicon fabrik i forhold til de to broer på Lolland.

Recept "V" (GB-5) er anvendt til demobroen Lundegårdsvej for Vejdirektoratet, hvor broen består af broelementer støbt ved siden af Sydmotorvejen få kilometer nord for Rødby. For recept "U" (GB-9) viste betondokumentationen, at den lige nøjagtig ikke bestod frost/tø-testen. Derfor blev der foreslået en justering af recepten (GB-9-2), hvor flyveaske/cementforholdet blev reduceret fra 0,29 til 0,15, hvorefter den bestod frost/tø-testen. Det var GB-9-2 som blev anvendt på Kærstrupvej demobroen. Da der var en plads til rådighed på felteksponeringspladsen på Hveens Boulevard i Høje-Taastrup, blev det dog besluttet at eksponere den først foreslåede variant af recept "U" (GB-9) for at få mere information om forholdet mellem frost/tø-testens negative resultat og frostbestandigheden under virkelige forhold.

Recepterne "T" (C+LL) og "W" (X3M) repræsenterer to alternative forslag udover dem, der er arbejdet med i forbindelse med demonstrationsprojekterne.

Recept "T" (C+LL) består af rapidcement sammen med et højt indhold af kalkfiller. Det svarer i princippet til en Portland-kalkstencement. Indholdet af kalkfiller på ca. 39% af binderen i henhold til DS/EN 197-1 er dog over det maksimalt tilladte i en CEM II/B-LL cement, som tillader et kalkfillerindhold op til 35% af bindersammensætningen.

Recepten "W" (X3M) er ligesom "U" (GB-9) og "V" (GB-5) en Portland-kompositcement med kalcineret ler og kalkfiller. Denne recept repræsenterer et forsøg på at gå til det "ekstreme" i forhold til at erstatte cementklinker med kalcineret ler og kalkfiller. Erstatningsgraden i "W" (X3M) er fastlagt ud fra en vurdering af, hvor meget der kan tilsættes, uden af betonen bliver så viskøs og klistret, at det praktisk set ikke længere er muligt at producere og støbe betonen. Således svarer bindersammensætningen til en Portland-kompositcement CEM II/B-M(Q-L), hvor indholdet af kalcineret ler og kalkfiller udgør 35 % af bindermængden, som er det maksimalt tilladte i henhold til DS/EN 197-1. Forholdet mellem tilsat kalcineret ler og kalkfiller er det samme (1,5) som Portland-kompositcementen anvendt i beton "U" (GB-9) og "V" (GB-5).

		P	Q	R	S	T	U	V	W
Materiale		E40-ref	GB-1	GB-3	GB-2	C+LL	GB-9	GB-5	X3M
CEM I 42,5 N -SR5 (EA)									
CEM I 52,5 N - (MS) (LA)									
CEM II/A - M(Q-LL)									
CEM II/B - M(Q-LL)									
Flyveaske									
Kalkfiller									
Lavalkalisulfatbestandig cem., C		390,0							
Rapidcement, C	kg/m ³		233,6	282,2	234,4	297,0	289,4	363,5	290,0
Kalcineret ler, Q	kg/m ³						29,5	37,1	77,1
Grå mikrofiller, LL	kg/m ³				82,0	160,5	19,7	24,7	51,4
Flyveaske, FA	kg/m ³	58,5	186,9	141,1	117,2		83,9		
Vand, V	kg/m ³	150,3	140,9	143,4	138,3	140,9	147,7	156,1	151,3
0/4 sand (Brejning)	kg/m ³	620,3	620,3	620,3	620,3	620,3	620,3	620,3	620,3
5/8 (Ansit)	kg/m ³	172,8	172,8	170,7	172,8	172,8	172,8	172,8	172,8
8/16 sten (Ansit)	kg/m ³	369,9	369,9	369,9	369,9	369,9	369,9	369,9	369,9
16/25 sten (Ansit)	kg/m ³	544	544	544	544	544	544	544	544
Conplast 316 AEA 1:5	kg/m ³	1,0	1,8	1,8	2,5	2,0	2,0	1,4	2,0
Conplast 212	kg/m ³	3,1	3,1	3,0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
Auramix 700 SW	kg/m ³	2,2	3,0	4,5	4,6	4,5	5,0	5,5	8,0
Tilstræbt luft	%	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Frit vand	kg/m ³	155,1	147,2	152,8	146,5	148,5	155,7	164,0	161,7
Densitet	kg/m ³	2312	2276	2281	2289	2315	2287	2298	2290
V/C (note 1)		0,37	0,45	0,43	0,50	0,500	0,47	0,45	0,56
V/C (note 2)		0,37	0,54	0,47	0,54	0,500	0,47	0,45	0,56
V/C (note 3)							0,41	0,39	0,39
FA/C		0,15	0,80	0,50	0,50		0,29		
Q/C							0,10	0,10	0,27
LL/C					0,35	0,54	0,68	0,68	0,18
Q/LL							1,50	1,50	1,50
C	%	87,0	55,6	66,7	54,1	64,9	68,5	85,5	69,3
FA	%	13,0	44,4	33,3	27,0		19,9		
Q	%						7,0	8,7	18,4
LL	%				18,9	35,1	4,7	5,8	12,3
Bindersammensætning i Portlandkomposit-cement i henhold til cementstandarden EN 197-1									
K	%					60,8	80,8	80,8	65,0
Q	%						9,1	9,1	19,0
LL	%					39,2	10,1	10,1	16,0
Vand-binder forhold		0,346	0,350	0,356	0,337	0,324	0,368	0,385	0,386
Ækv. Alkaliindhold, 60% mør.	kg/m ³	1,60	1,46	1,75	2,12	3,09	2,72	3,39	4,23
Max. kloridindhold (note 4)	%	0,03	0,04	0,04	0,11	0,17	0,07	0,07	0,11
Max. kloridindhold (note 5)	%	0,03	0,04	0,04	0,11	0,17	0,06	0,06	0,09
Pastavolumen	m ³	0,363	0,363	0,363	0,363	0,363	0,363	0,363	0,363
Tilslagsvolumen	m ³	0,637	0,637	0,637	0,637	0,637	0,637	0,637	0,637
Total volumen	m ³	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Rødby									
Hirtshals		X		X				X	X
Høje-Taastrup		X		X				X	X

Tabel 1. Udvalgte betonrecepter til felteksponeringspladser. Note 1. Vand-cementtal, hvor alt flyveaske er medtaget i beregningen med k-faktor på 0,5. Kalcineret ler og kalkfiller regnes ikke med. Note 2. Vand-cementtal beregnet efter DS/EN 206 DK NA, hvor der kun er indregnet en flyveaskemængde op 33% af cementmængden med k-faktor på 0,5. Kalcineret ler og kalkfiller regnes ikke med. Note 3. Vand-cementtal, når rapidcement, kalcineret ler og kalkfiller regnes som en Portland-kompositcement med en k-faktor på 1,0. Note 4: Bidrag fra kalcineret ler på 0,14% (aktuel batch). Note 5: Bidrag fra kalcineret ler på 0,02% (i fremtidig produktion). Placering af blokke er markeret med grå. Markeringen "X" angiver de blokke, som er instrumenteret.

8. Monitorering og fjernovervågning af betonblokke

Betons holdbarhed afhænger af betonens bestandighed overfor blandt andet frost/tø-cykler, kloridindtrængning, sulfatangreb, karbonatisering og alkali-kisel reaktioner. Blandt disse anses kloridinitieret korrosion af armeringen som værende den mest betydende

nedbrydningsmekanisme i aggressivt og ekstra aggressivt miljø. Kloridtærskelværdien beskriver den kloridkoncentration, der skal være i betonen omkring armeringen, for at den kan begynde at korrodere. Denne kloridtærskelværdi kan variere relativt meget afhængig af mange parametre, som f.eks. v/c-tal, cementtype og bindersammensætning.

Der findes i dag ikke accelererede laboratorietests, der kan give en pålidelig måling af kloridtærskelværdien. Overvågning af armeringen under virkelige eksponeringsbetingelser er den metode, der kommer tættest på at opnå denne viden. Hertil anvendes såkaldte anodetrapper, der i princippet er små armeringsstykker, som er placeret med forskellige afstande til den eksponerede betonoverflade. Anodetrapper er anvendt i tre af de eksisterende instrumenterede blokke i Rødby havn, og de er også anvendt på store anlægskonstruktioner som f.eks. Storebælts- og Øresundsforbindelsen.

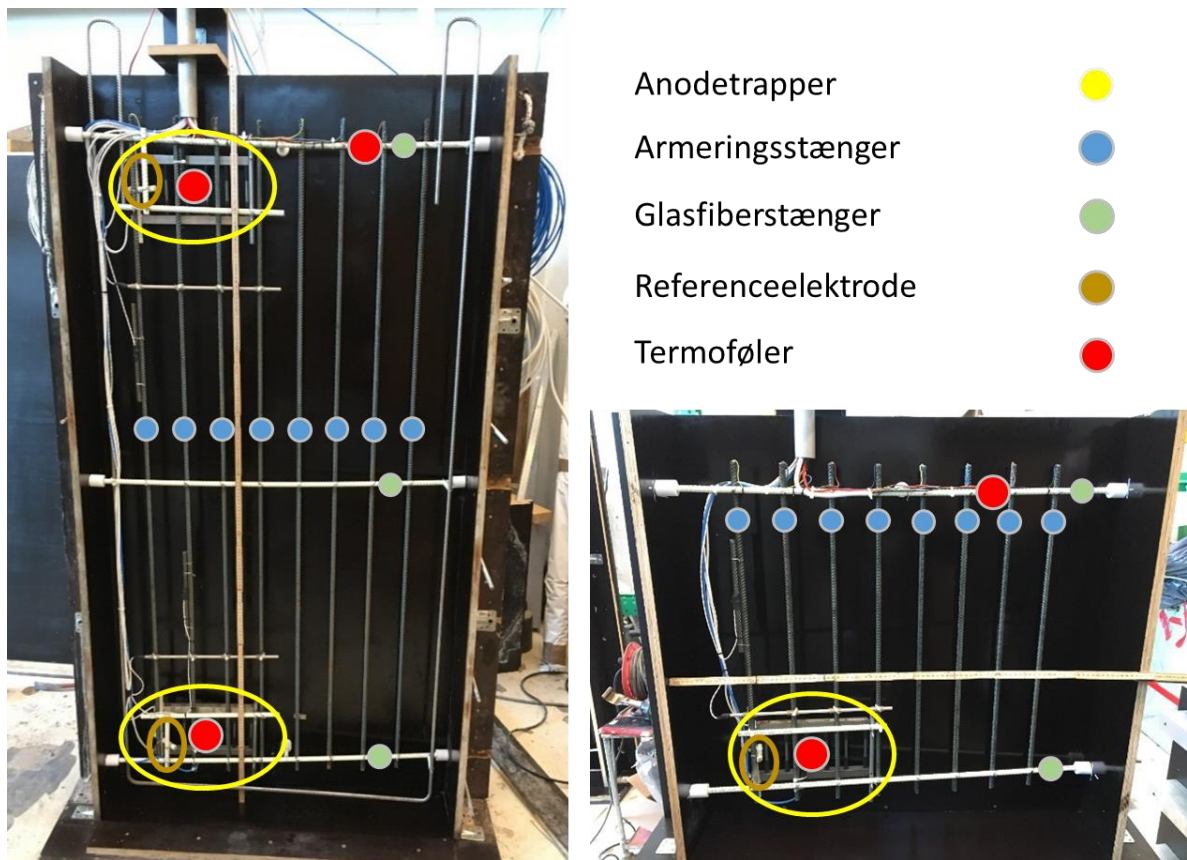
Ved kontinuerligt at måle spændingsforskellen mellem en referenceelektrode og de enkelte armeringsstykker på anodetrapperne opnås præcis information om tidspunktet for initiering af korrosion på armeringsstykkerne. Når der er observeret korrosionsaktivitet, udtages der borekerner til måling af kloridkoncentrationens variation igennem dæklaget (kloridprofiler) og dermed kan kloridtærskelværdien bestemmes. Derudover giver denne overvågning mulighed for at planlægge borekerneudtagning mere optimalt, hvilket gør det lettere og billigere at følge op på blokkene, også efter projektets afslutning. Indenfor projektets budgetramme blev det besluttet at instrumentere 8 ud af 13 blokke med anodetrapper, dvs. 4 blokke i henholdsvis Hirtshals og i Høje-Taastrup.

I de store blokke til Hirtshals havn (2,0 m x 1,0 m x 0,2 m) er der placeret to anodetrapper i henholdsvis top og bund af blokkene (10 cm fra kant) for at opnå viden om korrosionsforholdene over og under vandspejlet. I de små blokke til Hveens Boulevard i Høje Taastrup (2,0 m x 1,0 m x 0,2 m) er der placeret en anodetrappe i bunden af blokken. Hver anodetrappe indeholder seks stålstænger, der har en blank og glat overflade. Disse er placeret med dæklag på henholdsvis 15mm, 20mm, 25mm, 30mm, 35mm og 40mm. Den varierende dæklagstykkelse giver mulighed for at opnå de første resultater forholdsvist hurtigt samtidig med, at det giver information om dæklagstykkelsens indflydelse på kloridtærskelværdien.

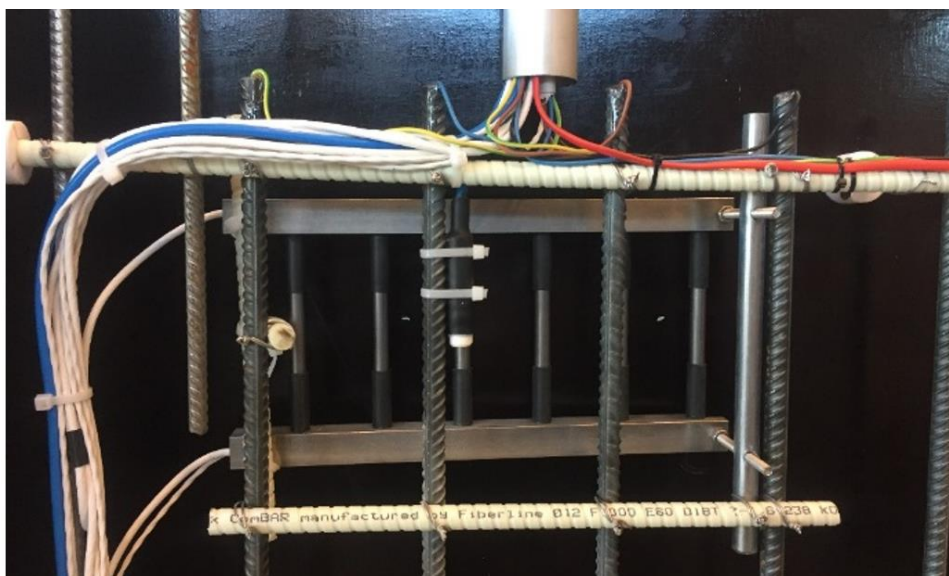
Udover de små lokalt placerede anodetrapper er der etableret et net af traditionel armering, som også er placeret med forskellige dæklagstykkelser på henholdsvis 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm, 70mm, 80mm og 90mm. Den elektriske spændingsforskel (potentialet) bliver målt mellem referenceelektroden og hver enkelt af disse traditionelle armeringsstænger. I modsætning til de små anodetrapper er de enkelte armeringsstænger gennemgående fra bund til top af blokkene. Formålet med denne opstilling er at have mulighed for at korrelere målinger og observationer fra anodetrapperne op imod korrosionsaktivitet på de traditionelle armeringsstænger. Derudover er det muligt at undersøge, hvor korrosion initieres først på de lodrette traditionelle armeringsstænger. Dette kan undersøges med EKP (Elektro-Kemisk Potentiale-måling), når blokkene er oppe af vandet. Armeringsstænger og måleudstyr er monteret på glasfiberstænger, der dels holder armeringen på plads i formen og dels fikserer temperaturfølerne i korrekt position. Glasfiberstængerne er elektrisk isolerende og korrosionsbestandige. Data sendes løbende til en central server på Teknologisk Institut.

Derudover er alle blokke instrumenteret med termofølere ved hver anodetrappe og yderligere en termoføler placeret 50 mm fra forside til overvågning af modenheden i perioden lige efter udstøbningen af betonen.

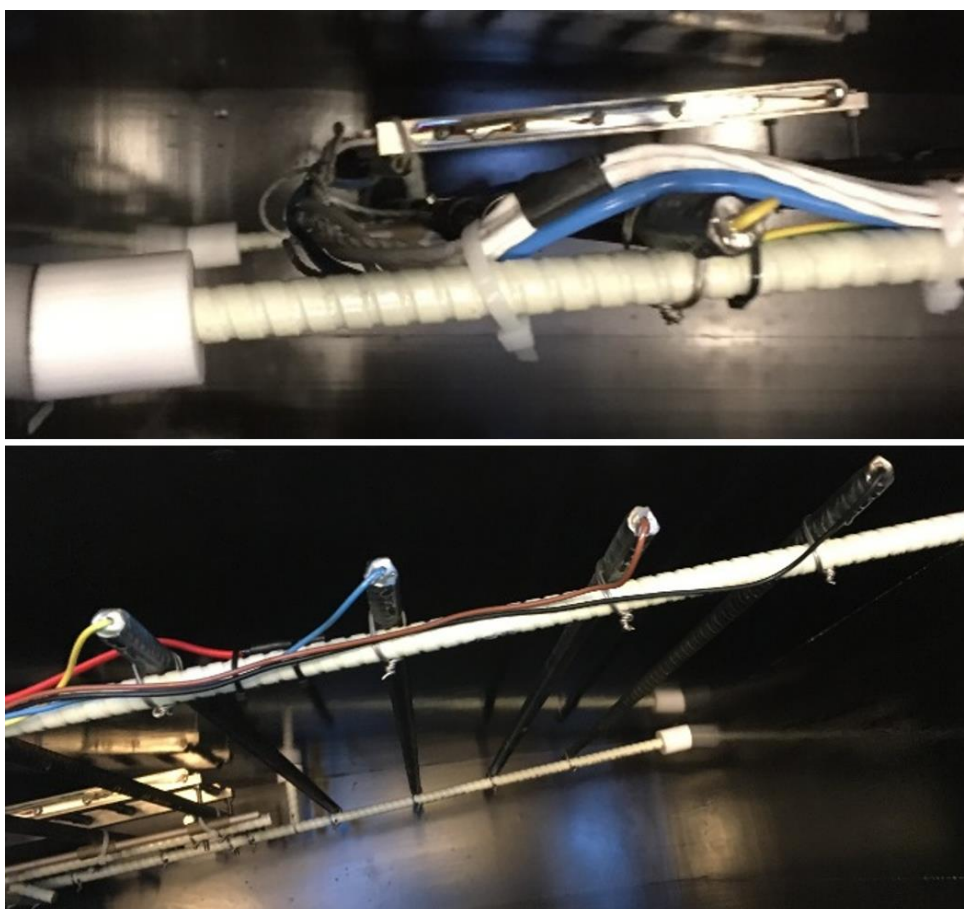
Figur 5 til 7 viser billeder af de instrumenterede blokke samt placering af instrumenteringsdelene.



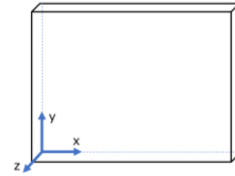
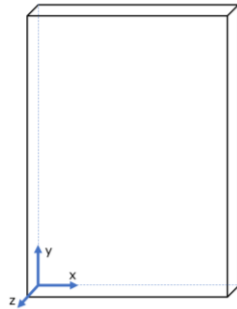
Figur 5. Instrumentering i store (til venstre) og små blokke (til højre).



Figur 6. Figur 6. Instrumentering i store blokke. Øverste anodetrappe.



Figur 7. Instrumentering i små blokke. Øverst: Anodetrappe med dæklag på 15, 20, 25, 30, 35, og 40 mm. Nederst: Traditionel armering med dæklag på 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 og 90 mm.



	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
Trappe top						
Anode 1	410	1730-1775	15			
Anode 2	360	1730-1775	20			
Anode 3	310	1730-1775	25			
Anode 4	260	1730-1775	30			
Anode 5	210	1730-1775	35			
Anode 6	160	1730-1775	40			
Katodestang	120-500	1500	70-105			
Armeringskontakt ERE20	135 265	1175-1430 1750	95 80			
Trappe bund						
Anode 1	410	180-225	15	410	180-225	15
Anode 2	360	180-225	20	360	180-225	20
Anode 3	310	180-225	25	310	180-225	25
Anode 4	260	180-225	30	260	180-225	30
Anode 5	210	180-225	35	210	180-225	35
Anode 6	160	180-225	40	160	180-225	40
Katodestang	120-500	450	70-105	100-420	355	70-105
Armeringskontakt ERE20	240 260	480-730 190	90 80	130 260	480-730 190	90 80
Armeringsstænger						
K2	850	95-1895	20	850	100-900	20
K3	750	95-1895	30	750	100-900	30
K4	650	95-1895	40	650	100-900	40
K5	550	95-1895	50	550	100-900	50
K6	450	95-1895	60	450	100-900	60
K7	350	95-1895	70	350	100-900	70
K8	250	95-1895	80	250	100-900	80
K9	150	95-1895	9	150	100-900	90
Termoføler	710	1840	50	710	850	50

Tabel 2. Nominel placering af instrumenteringsdele.

9. Støbninger

I Tabel 3 nedenfor ses en oversigt over de udførte støbninger, der blev gennemført i perioden december 2017 til marts 2018. Alle betoner er blandet på Teknologisk Instituts industrielle blandeanlæg. Der er blandet en sats til støbning af de små blokke (200 liter) og to satse til støbning af de store blokke. I forhold til kontrol af fugtindholdet i tilslaget er der benyttet den procedure, som blev udviklet og anvendt i forbindelse med støbning af blokke til Femerns eksponeringsplads i Rødby Havn i 2009. Alle tilslag afvejes på vejebåndet og der udtages 3 prøver til fugtmåling.

Støbningerne er gennemført med betonspand ved at udlægge betonen lagvis af ca. 30cm's tykkelse. Hvert lag er vibreret i 3 nedstikspunkter, hvor stavvibratoren er holdt konstant i en fast tidsperiode afhængig af betonens egenskaber (6-12 sek). Vibreringstiden er fastlagt ved at observere luftporernes opadrettede bevægelse gennem den transparente forside. Ved støbning af de store blokke er der en kort pause på ca. 15 min mellem de to satse. Formen er dækket af med plastic mellem de to støbninger. Efter afformning blev alle emner pakket ind i plastik.

Udover blokkene til eksponeringspladserne blev der af hver betonrecept støbt en ekstra blok, der er anvendt til initialkarakterisering og til senere opfølgning. Disse blokke opbevares hos Teknologisk Institut.

Dato	Recept ID	Satse	Blok	Instrumenteret	Placering
29.11.2017	R GB-3	1	Lille	X	Høje Taastrup
29.11.2017	R GB-3	2	Stor	X	Hirtshals
29.11.2017	R GB-3	1	Lille		Teknologisk Institut
04.12.2017	P E40-ref	1	Lille		Teknologisk Institut
06.12.2017	P E40-ref	1	Lille	X	Høje Taastrup
06.12.2017	P E40-ref	2	Stor	X	Hirtshals
11.12.2017	V GB-5	1	Lille		Teknologisk Institut
12.12.2017	V GB-5	1	Lille	X	Høje Taastrup
12.12.2017	V GB-5	2	Stor	X	Hirtshals
14.12.2017	Q GB-1	1	Lille		Teknologisk Institut
18.12.2017	U GB-9	1	Lille		Høje Taastrup
19.12.2017	W X3M	1	Lille	X	Høje Taastrup
20.12.2017	W X3M	2	Stor	X	Hirtshals
20.12.2017	Q GB-1	1	Lille		Høje Taastrup
08.01.2018	S GB-2	1	Lille		Teknologisk Institut
15.01.2018	S GB-2	1	Lille		Høje Taastrup
16.01.2018	T C+LL	1	Lille		Høje Taastrup
13.03.2018	T C+LL	1	Lille		Teknologisk Institut
14.03.2018	U GB-9	1	Lille		Teknologisk Institut
19.03.2018	W X3M	1	Lille		Teknologisk Institut
20.03.2018	P E40-ref	1	Stor		Rødby
21.03.2018	W X3M	1	Stor		Rødby

Tabel 3. Oversigt over gennemførte støbninger. Blokke støbt til Teknologisk Institut er anvendt til initialkarakterisering af betonerne vha. borekerner. Disse blokke opbevares hos Teknologisk Institut til opfølgende undersøgelser.



Figur 8. Billeder fra støbning af en stor blok. Der støbes med transparent formside.



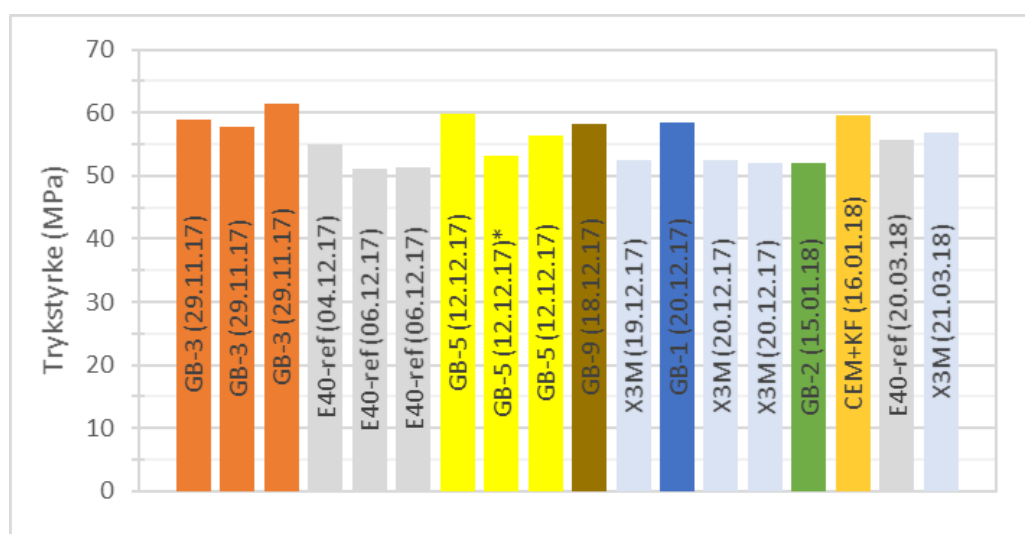
Figur 9. Det unikke Recept-ID er markeret på alle blokke.

10. Betonegenskaber

Ved hver støbning er der målt egenskaber af frisk beton (sætmål og luftindhold) og støbt cylindre, som er vandlagrede ved 20°C til bestemmelse af trykstyrke efter 28 modenhedsdøgn (3 cylindre $\varnothing 150 \times 300$ mm). Desuden er der støbt 5 ekstra cylindre til DTU i forbindelse med videre forskningsundersøgelser. Tabel 3 viser resultaterne (værdier for densitet og trykstyrke er gennemsnit af tre prøveemner).

Dato	Receipt ID	Satse	Sætmål (mm)	Luft (%)	Densitet (kg/m ³)	Trykstyrke 28d (MPa)
29.11.2017	R GB-3	1	140	5,5	-	-
29.11.2017	R GB-3	2	230	5,1	2347	59,0
29.11.2017	R GB-3	1	180	5,5	2337	61,5
04.12.2017	P E40-ref	1	130	4,5	-	-
06.12.2017	P E40-ref	1	200	4,6	2360	55,1
06.12.2017	P E40-ref	2	190	5,5	2337	51,1
06.12.2017	P E40-ref	2	180	5,9	2333	51,4
11.12.2017	V GB-5	1	240	6,2	-	-
12.12.2017	V GB-5	1	210	5,5	2340	59,9
12.12.2017	V GB-5	2	210	5,4	2330	53,2*
12.12.2017	V GB-5	2	210	5,4	2337	56,3
14.12.2017	Q GB-1	1	220	4,6	-	-
18.12.2017	U GB-9	1	200	4,6	2340	58,1
19.12.2017	W X3M	1	210	6,1	2337	52,4
20.12.2017	Q GB-1	1	200	4,9	2367	58,4
20.12.2017	W X3M	2	220	5,3	2313	52,4
20.12.2017	W X3M	2	220	4,9	2327	52,1
08.01.2018	S GB-2	1	240	5,0	-	-
15.01.2018	S GB-2	1	220	6,3	2300	52,0
16.01.2018	T CEM+KF	1	200	5,6	2347	59,5
13.03.2018	T CEM+KF	1	200	5,7	-	-
14.03.2018	U GB-9	1	220	5,7	-	-
19.03.2018	W X3M	1	200	5,1	-	-
20.03.2018	P E40-ref	1	180	6,8	2330	55,6
21.03.2018	W X3M	1	200	5,1	2343	56,9

Tabel 4. Værdier for sætmål, luftindhold, densitet og trykstyrke. Note *: Dårlig udstøbt cylinder gav lav styrke.



Figur 10. Trykstyrker (28d) for betoner til eksponeringspladser. Gennemsnit af 3 prøveemner.

11. Modenhedsudvikling

Alle blokke blev monteret med termofølere for at overvåge modenheden. Modenheden er beregnet efter Freieslebens modenhedsmodel [6]. Det blev besluttet at styre efter at opnå en modenhed ved eksponeringstidspunktet på mellem 43 og 50 modenhedsdøgn. Det svarer til den modenhed, der er anvendt på de tidligere Femern-blokke, der blev eksponeret i 2010 i Rødby havn. Dette er en vigtig forudsætning for en eventuel sammenligning af betonerne. Tabel 5 viser den præcise modenhed for de enkelte blokke ved eksponeringstidspunktet. Figur 11 viser billeder af blokkene i hærdeperioden.

Recept-ID		Høje Taastrup		Hirtshals Havn		Rødby	
		Modenhed	Eksponering	Modenhed	Eksponering	Modenhed	Eksponering
P	E40-ref	48	14-02-2018	50	28-02-2018	45	04-05-2018
R	GB-3	46	14-02-2018	48	28-02-2018		
V	GB-5	46	14-02-2018	48	28-02-2018		
W	X3M	46	14-02-2018	48	28-02-2018	46	04-05-2018
Q	GB-1	46	14-02-2018				
U	GB-9	46	14-02-2018				
S	GB-2	47	12-03-2018				
T	C+LL	48	12-03-2018				

Tabel 5. Modenhed ved tidspunkt for eksponering af de enkelte betonblokke i Høje Taastrup og Hirtshals.



Figur 11. Styring af modenhed. Venstre: Blokke pakket ind og opbevaret i laboratoriet. Højre: Blokke pakket ind og opbevaret udenfor for at forsinke modenhedsudviklingen.

12. Initialkarakterisering af betoner

Til senere sammenligning med udtagne borekerner er alle betonernes initiale tilstand dokumenteret. Der er fremstillet tyndslib og planslib til petrografisk analyse i henhold til

DS 423.41, 423.42, 423.43 og 423.44. Derudover er der forberedt en prøve til en eventuel senere SEM-analyse. Endelig er der målt kloridmigrationskoefficient i henhold til NT Build 492 og foretaget luftporeanalyse i henhold til DS/EN 480-11. Alle præparater er baseret på borekerner udtaget af de ekstra blokke, som opbevares på Teknologisk Institut. Kloridmigration i Tabel 5 er middelværdi af tre skiver skåret ud fra den samme borekerne for hver betontype. Luftporeanalyse er foretaget på planslib fra støbt ø150 mm cylinder for hver betontype.

Trykstyrker er målt på støbte cylindre som beskrevet i afsnit 10.

Prøvning af kloridmigration samt fremstilling af tynd- og planslib blev gennemført så tæt på 70 døgn som muligt. Nedenstående tabeller samler resultater og observationer fra initialkarakteriseringen.

Recept-ID	Navn	Alder [døgn]	Estimeret modenhed [døgn]	NT Build 492	Luftporeanalyse, DS/EN 480-11		
				Kloridmigration [10^{-12} m ² /s]	Afstandsfaktor [mm]	Specific overflade [mm ⁻¹]	Luftindhold [%]
P	E40-ref	78	78	6,6	0,123	47,97	3,56
R	GB-3	83	83	2,6	0,151	38,63	3,73
V	GB-5	73	73	5,6	0,105	46,75	5,36
W	X3M	66	66	5,0	0,129	42,41	4,21
Q	GB-1	70	70	4,5	0,128	41,57	4,51
U	GB-9	71	71	2,2	0,118	44,76	4,59
S	GB-2	71	71	2,7	0,126	38,07	5,65
T	C+LL	72	72	4,4	0,112	41,53	6,03

Tabel 6. Initialkarakterisering. Målte værdier for kloridmigration og luftporeanalyse. Kloridmigration er målt på prøveemner med en alder på mellem 66 og 83 døgn.

Recept-ID	Navn	Intern stabilitet	Pasta-homogenitet	Pasta-revner	Vedhæftningsrevner
P	E40-ref	0	0	0,1	0,3
R	GB-3	0	0	0,1	0,3
V	GB-5	0	0	0,3	0,1
W	X3M	0	0	0,2	0,3
Q	GB-1	0	0	0,1	0,1
U	GB-9	0	0	0,1	0,2
S	GB-2	0	0	0,1	0,1
T	C+LL	0	0	0,2	0,1

Tabel 7. Initialkarakterisering ved petrografisk analyse iht. DS 423.41-44. Der blev ikke fundet fine og grove revner i prøverne, og analyserne har ikke givet anledning til yderligere bemærkninger.

13. Placering af blokke

Alle betonblokkene er monterede med løfteankre og er løftet på plads med kran. Nedenstående figurer viser billeder fra placeringen af blokkene i Høje Taastrup, Hirtshals og Rødby.

Til eksponeringspladsen i Høje Taastrup langs trafikeret vej er blokkene monteret med fødder i form af aluminiumsprofiler. Blokkene er hævet til samme højde et par centimeter over terræn for at skabe så identiske eksponeringsbetingelser som muligt over tid. Hveens

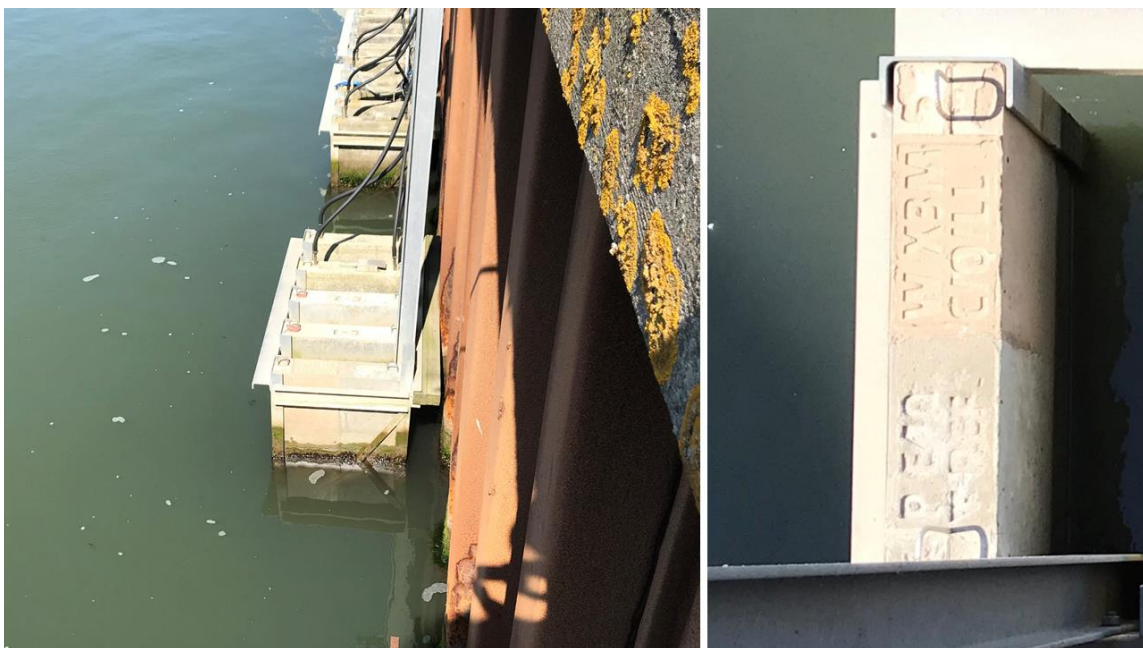
Boulevard er tosporet og forløber i retning nord-syd ved felteksponeringspladsen. Blokkene er placeret ca. 0,5 m bag ved autoværnet i midterrabatten og vender ud imod det nordgående hurtige spor.



Figur 12. Blokke installeret på Hveens Boulevard i Høje Taastrup. P: Referencen, Q: GB-1, R: GB-3, S: GB-2, T: C+LL, U: GB-9, V: GB-5 og W: X3M. Kabler føres fra de monitorerede blokke til et samleskab med strømforsyning og modem, der løbende sender måledata til Teknologisk Instituts server.



Figur 13. Installering af blokke i Hirtshals Havn. P: Referencen, R: GB-3, V: GB-5 og W: X3M.



Figur 14. Blok installeret i Rødby havn. P: Referencen og W: X3M.

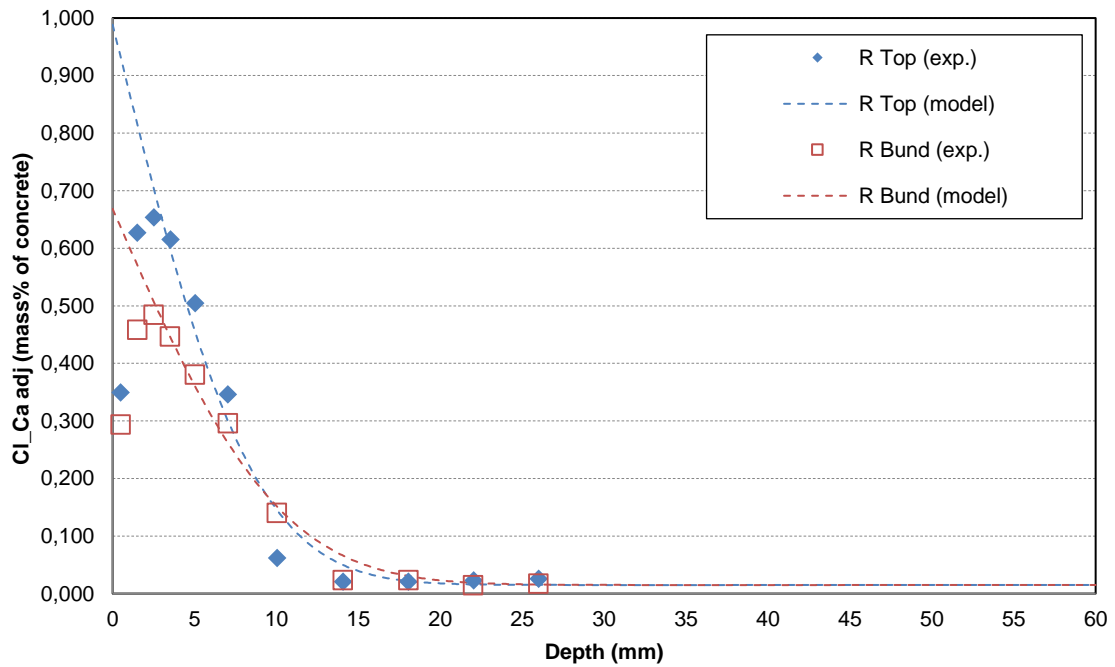
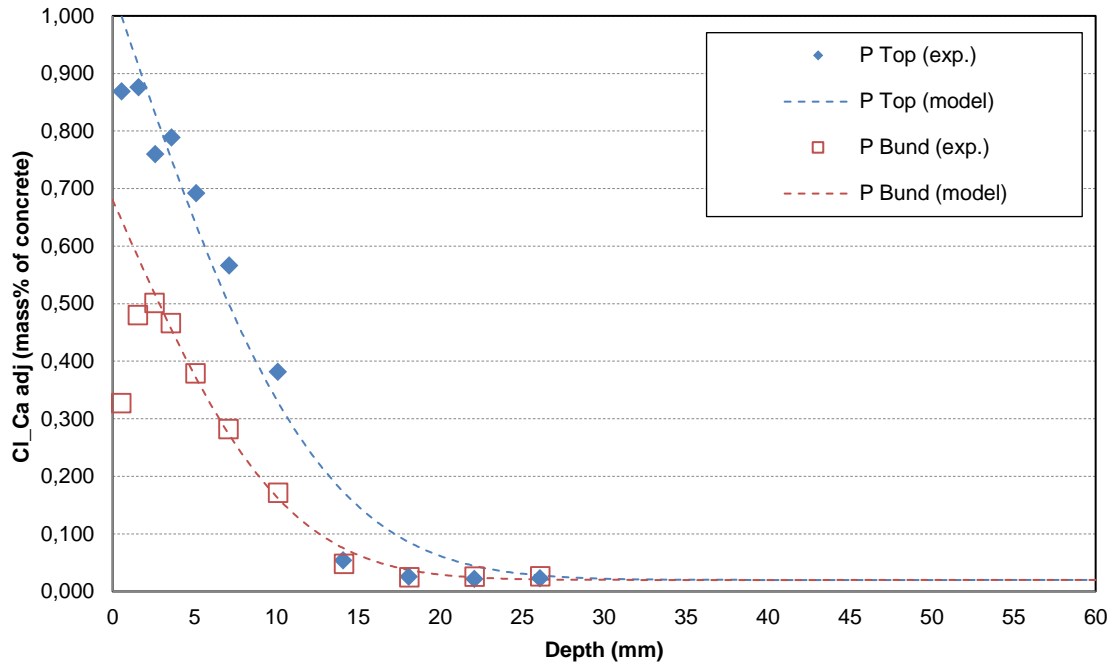
14. 1 års termin

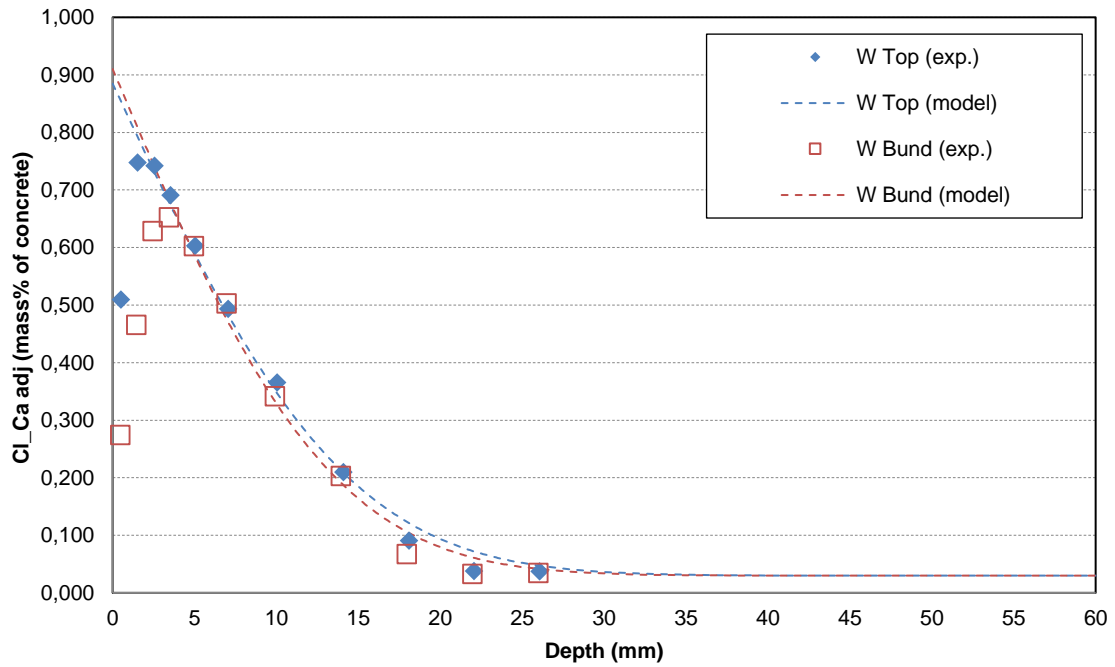
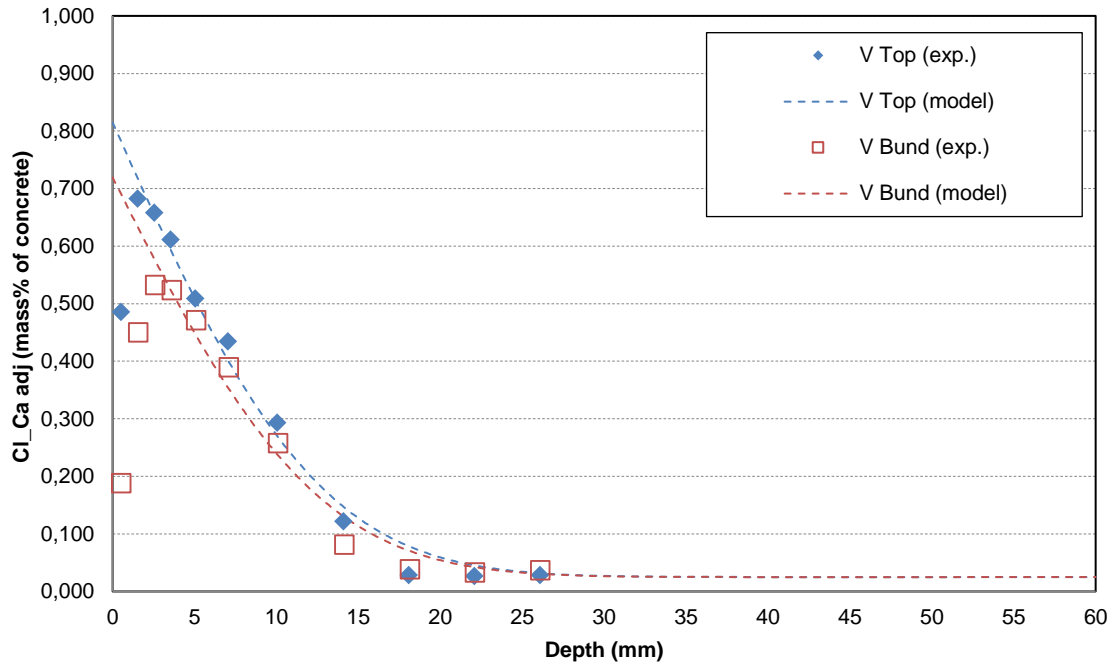
Efter ca. 1 års eksponering blev der udtaget borekerner fra de fire betoner placeret i Hirtshals havn for at måle kloridprofiler og udføre mikroanalyser (P: E40-ref, R: GB-3, V: GB-5 og W: X3M). Der er udtaget 2 borekerner fra hver blok placeret henholdsvis ca. 25 cm fra top og bund og ca. 40 cm fra den ene side. Figur 15 viser billeder fra udtagning af borekernerne den 10. januar 2019. Efterfølgende er hullerne fyldt ud med en epoxymørtel, og emnerne er placeret i riggen igen den 22. januar 2019.



Figur 15. Udtagning af borekerner fra de fire blokke i Hirtshals havn efter ca. 1 års eksponering. P: Reference, R: GB-3, V: GB-5 og W: X3M.

Kloridprofiler er bestemt efter principperne ved "profile grinding"-teknikken. Der er også målt calciumindhold for at korrigere for evt. forskelle i pastaindhold. Figur 16 viser kloridprofilerne, inputparametre og beregnede transportparametre.





Core no.	Cs _{co}	Cs _{bi}	Ci _{co}	De	K0.05	
	mass %, CO	mass %, BI	mass %	10-12 m ² /s	10-6 m/s ^{1/2}	mm/year ^{1/2}
P Top	1,045	5,385	0,020	1,7	4,1	23
P Bund	0,680	3,506	0,020	1,2	3,1	17

Cs _{co}	Boundary condition at the exposed surface in weight% of concrete
Cs _{bi}	Boundary condition at the exposed surface in weight% of binder
Ci _{co}	Initial chloride concentration in weight% of concrete
De	Effective chloride transport coefficient
K0.05	Penetration parameter
Cr	A reference concentration of Cr = 0.05% is applied in the calculation of K0.05

Figur 16. Kloridprofiler efter ca. 1 års eksponering (316 dage). P: Reference, R: GB-3, V: GB-5 og W: X3M. Tabelværdier viser inputparametre til beregning af kloridprofiler (C_{s,co}; C_{s,bi}; C_{i,co} og C_r) samt beregning af transportparametrene (D_e og K_{0.05}).

Derudover er der for de fire borekerner i bunden af hver blok fremstillet et tyndslib og en såkaldt polerklods til SEM analyse. Mikroskopanalysen er præsenteret i Bilag B.

Endelig er der udtaget borekerner efter ca. 1,5 år fra fem af blokkene placeret udendørs på Teknologisk Institut til måling af kloridmigrationskoefficienter. Det svarer til en modenhed på ca. 250 døgn. Der er udtaget kerner fra referencen, GB-5, GB-9, C+LL og X3M. Kloridmigrationen i Tabel 8 er en middelværdi af tre skiver skåret ud fra den samme borekerne for hver betontype.

Recept-ID	Navn	Alder [døgn]	Estimeret modenhed [døgn]	NT Build 492	Alder [døgn]	Estimeret modenhed [døgn]	NT Build 492
				Kloridmigration [10 ⁻¹² m ² /s]			Kloridmigration [10 ⁻¹² m ² /s]
P	E40-ref	78	78	6,6	566	283	2,6
V	GB-5	73	73	5,6	554	277	4,1
W	X3M	66	66	5,0	463	232	3,6
U	GB-9	71	71	2,2	470	235	0,8
T	C+LL	72	72	4,4	463	232	3,3

Tabel 8. Målte værdier for kloridmigration efter ca. 1 års eksponering udenfor på Teknologisk Institut. Sammenlignet med værdier fra første måling efter ca. 70 døgn.

15. Sammenligning med data fra felteksponeringspladsen i Rødbyhavn

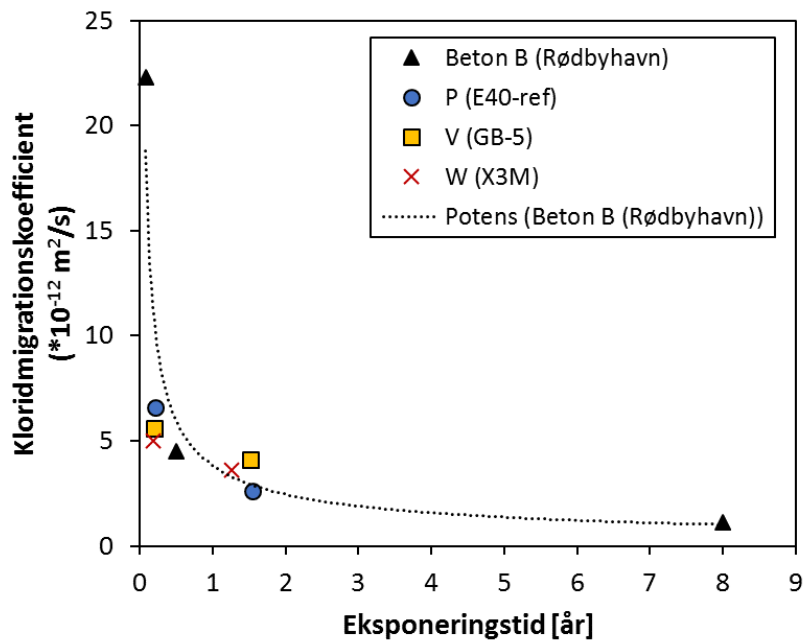
Ved Femern A/S' marine felteksponeringsplads i Rødbyhavn blev en serie af betonblokke med femten forskellige betonsammensætninger første gang eksponeret for havvand tilbage i 2010 [4,7]. Efterfølgende er der efter 0,5 år, 2 år og 5 år udtaget borekerner fra disse blokke med henblik på blandt andet at følge udviklingen i kloridindtrængning over tid for de forskellige betoner. Det synes derfor oplagt at sammenligne relevante data fra Rødbyhavn med de opnåede resultater fra eksponeringspladsen i Hirtshals.

Den såkaldte 'Beton B' fra serien af betoner fra Rødbyhavn har en sammensætning (binder af 85% lavalkali Portland cement + 15% flyveaske samt ækv. v/c-forhold på 0,40 [4]), som er sammenlignelig med referencebetonen P (E40-ref). I det følgende sammenlignes netop denne beton fra Rødbyhavn derfor med Beton P med hensyn til kloridindtrængning. I Figur 17, 18 og 19 sammenlignes Beton B og Beton P således med hensyn til henholdsvis kloridmigrationskoefficienter, målte kloridprofiler og beregnede transport-parametre (D_a og C_s). Data for Beton R (GB-3), V (GB-5) og W (X3M) er ligeledes plottet i disse figurer. Det bør i den sammenhæng nævnes, at med kloridprofiler fra kun én tidlig termin for Beton P (og R, V og W), så er grundlaget for en sammenligning med kloriddata for Beton B (hvor der haves data fra flere terminer) relativt spinkelt og behæftet med en vis grad usikkerhed.

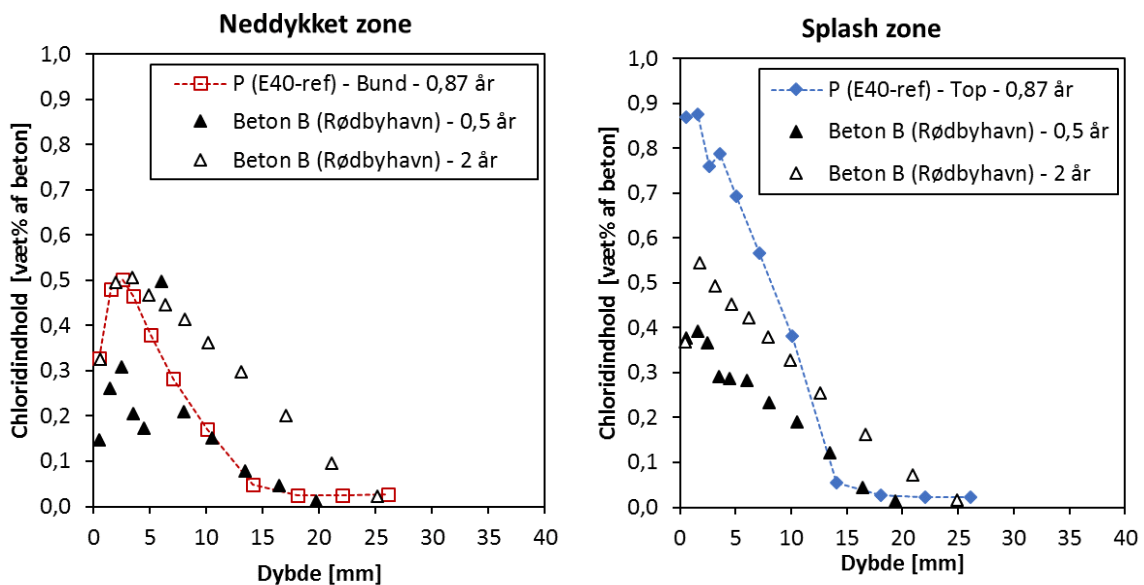
Det fremgår af Figur 17, at de to målte kloridmigrationskoefficienter for Beton P har værdier ($6,6 \cdot 10^{-12}$ m²/s ved 78 døgn og $2,6 \cdot 10^{-12}$ m²/s ved 566 døgn), som placerer sig ganske tæt på den beregnede tendenslinje for den tidlige udvikling af kloridmigrationskoefficienten for Beton B. Det indikerer umiddelbart, at tætheden over for kloridindtrængning er på et sammenligneligt niveau for Beton P og Beton B.

De målte kloridprofiler – og de deraf beregnede transportparametre (D_a og C_s) – viser imidlertid, at kloridindtrængningen ser ud til at forløbe markant forskelligt i Beton B og i Beton P. Normalt observeres der en stigning af C_s -værdien som funktion af eksponeringstiden – i det mindste i løbet af de første 5 til 10 års eksponering [7]. I det perspektiv synes det bemærkelsesværdigt, at C_s -værdien for Beton P allerede efter 0,87 års eksponering i den neddykkede zone har nået et niveau svarende til C_s -værdien opnået i Beton B efter 2 års eksponering. I splash zonen for Beton P antager C_s allerede efter 0,87 år en værdi, som er markant højere, end hvad der ses for Beton B selv efter 2 års eksponering. Også for Beton R, V og W gælder det generelt, at C_s -værdierne efter 0,87 år i neddykket zone er mindst lige så høje som C_s -værdien for Beton B efter 2 år, og i splash zonen er C_s -værdierne for både R, V og W allerede efter 0,87 år højere end C_s -værdien i Beton B efter 2 år.

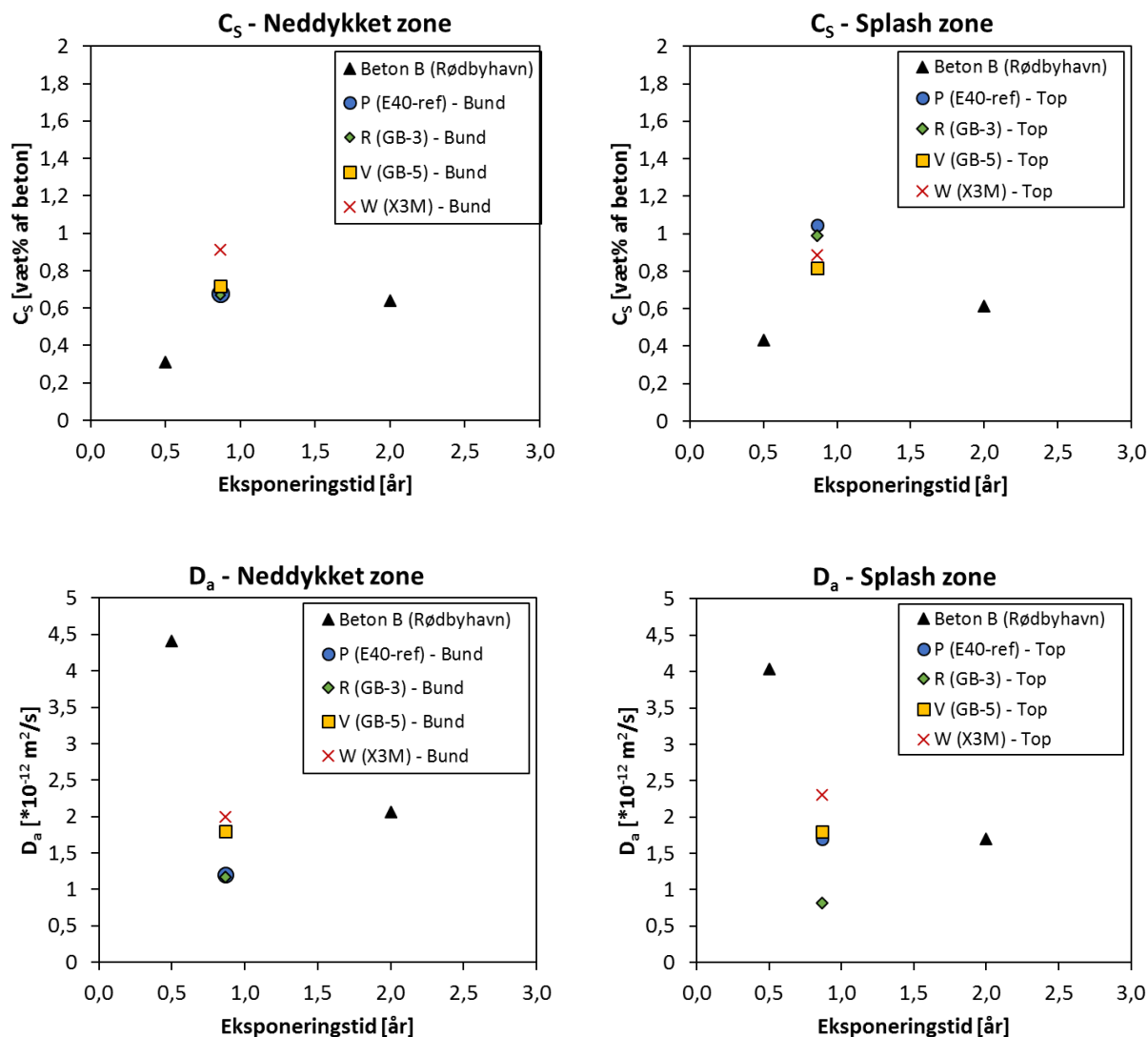
Ligeledes adskiller de beregnede værdier af den tilsyneladende kloriddiffusionskoefficient (D_a) for Beton P sig fra D_a -værdierne for Beton B – både når det gælder neddykket zone og splash zone. Normalt kan en betydelig reduktion af D_a observeres som en funktion af eksponeringstiden, særligt i løbet af de først 5 til 10 års eksponering [7]. For Beton B ses fx en fald fra $4,4 \cdot 10^{-12}$ m²/s efter 0,5 år til $2,1 \cdot 10^{-12}$ m²/s efter 2 år i neddykket zone. For Beton P antager D_a imidlertid en værdi på $1,2 \cdot 10^{-12}$ m²/s efter blot 0,87 år i neddykket zone, og i splash zonen har Beton P opnået en D_a -værdi på $1,7 \cdot 10^{-12}$ m²/s efter 0,87 år, hvilket svarer til det niveau for D_a , som først ses i Beton B efter 2 års eksponering. Også for Beton R, V og W ligger de opnåede D_a -værdier efter 0,87 år generelt på et lavere niveau, end hvad den tidlige udvikling af D_a for Beton B indikerer at være efter 0,87 år.



Figur 17. Sammenligning af kloridmigrationskoefficienter målt for Beton P, V, W og for Beton B fra Rødbyhavn [4]. Den stiplede linje er en tendenslinje ($y = 3,84 \cdot x^{-0,64}$) beregnet på basis af de tre datapunkter for Beton B.



Figur 18. Sammenligning af kloridprofiler målt for Beton P (E40-ref) efter 316 døgn (= 0,87 år) eksponering og Beton B fra Femern A/S' marine felteksponeringsplads i Rødbyhavn efter 0,5 og 2 års eksponering.

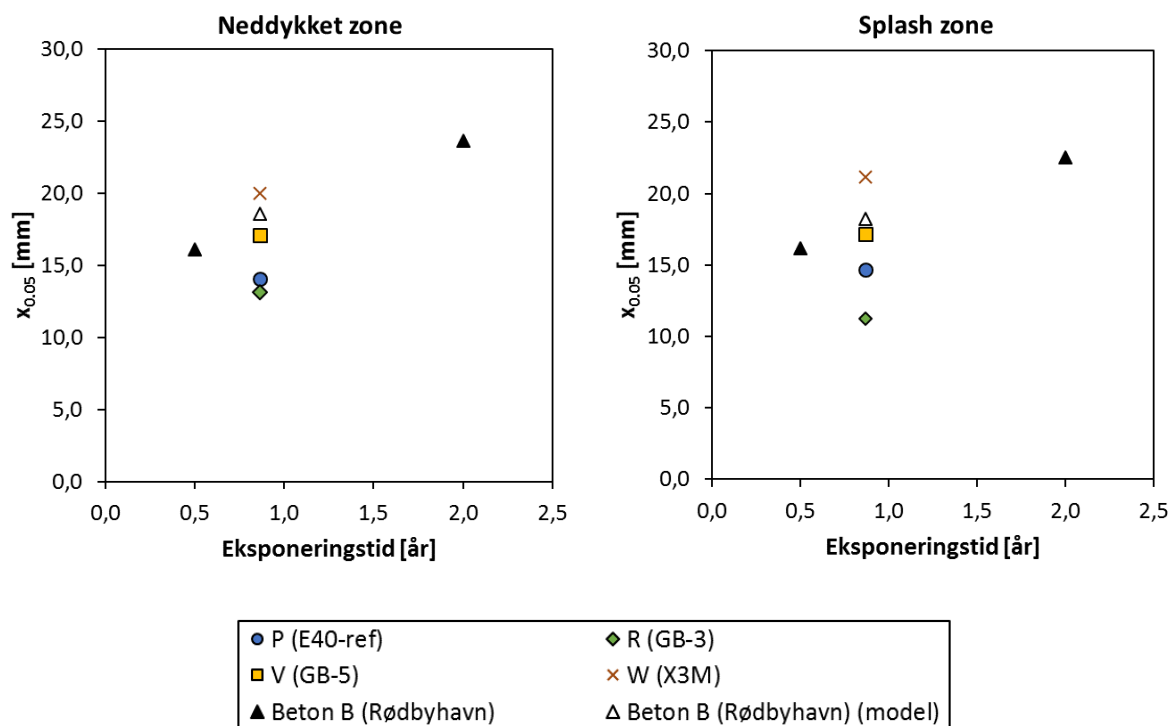


Figur 19. Afbildning af transportparametrene D_a og C_s , som er beregnet på baggrund af kloridprofiler målt for Beton B fra Femern A/S' marine feltexponeringsplads i Rødbyhavn og de fire betoner fra eksponeringspladsen i Hirtshals.

En del af forklaringen på ovennævnte observationer med hensyn til forskellene på C_s og D_a for Beton P og Beton B kan være, at eksponeringsforholdene ved Hirtshals og Rødbyhavn ikke er helt ens. Fx er saltholdigheden i havvandet betydeligt højere ved Hirtshals (ca. 30‰ [8]) end ved eksponeringspladsen i Rødbyhavn (12‰ [9]), og også forskelle med hensyn til fx tidevandsbevægelser og mængden af luftbårne klorider kan forventes at give anledning til forskellige eksponeringsbetingelser i splash zonen. Derudover kan forskellene med hensyn til kloridindtrængning i Beton P og Beton B måske også være delvist forårsaget af det forhold, at indholdet af cement ikke er det samme i de to betoner. Cementindholdet er 390 kg/m³ og 322 kg/m³ i henholdsvis Beton P og Beton B, og dette kan måske delvist forklare den store forskel med hensyn til C_s -værdierne, da

det højere cementindhold i Beton P må forventes at give anledning til et højere potentiale for kloridbinding i cementpastaen.

I Figur 20 er indtrængningsdybden af en referencekoncentration på 0,05% klorid af betonvægt ($x_{0,05}$) plottet som funktion af eksponeringstiden for Beton P, R, V og W samt for Beton B. De to plots i Figur 20 er fremstillet med henblik på at kunne vurdere og sammenligne de forskellige betoners tæthed overfor kloridindtrængning.



Beton ID	Eksponeringsmiljø	Eksponeringstid [år]	$x_{0,05}$ [mm]
P (E40-ref)	Neddykket zone	0,87	14,0
R (GB-3)	Neddykket zone	0,87	13,1
V (GB-5)	Neddykket zone	0,87	17,1
W (X3M)	Neddykket zone	0,87	20,0
Beton B (Rødbyhavn)	Neddykket zone	0,50	16,1
Beton B (Rødbyhavn)	Neddykket zone	2,00	23,6
P (E40-ref)	Splash zone	0,87	14,7
R (GB-3)	Splash zone	0,87	11,2
V (GB-5)	Splash zone	0,87	17,2
W (X3M)	Splash zone	0,87	21,1
Beton B (Rødbyhavn)	Splash zone	0,50	16,2
Beton B (Rødbyhavn)	Splash zone	2,00	22,5

Figur 20. Indtrængningsdybder for en referencekoncentration på 0,05% klorid af betonvægt ($x_{0,05}$) plottet som funktion af eksponeringstid. Værdierne for $x_{0,05}$ er desuden vist på tabelform. Både plottet for 'neddykket zone' og plottet 'splash zone' inkluderer data for de fire betoner fra Hirtshals (P, R, V og W) samt Beton B fra felteksponeringspladsen i Rødbyhavn.

Værdierne for $x_{0,05}$ er uddraget fra de målte kloridprofiler ved lineær interpolation mellem de to punkter i det enkelte kloridprofil, som ligger umiddelbart over og under en kloridkoncentration på 0,05%. Et beregnet datapunkt for Beton B til tiden 0,87 år er desuden inkluderet i hver af de to plots for bedre at kunne sammenligne med data for betonerne fra Hirtshals. Beregningerne for disse to datapunkter er foretaget ved hjælp af følgende ligninger, hvor eksponeringstiden (t) er sat til 0,87 år:

- Neddykket zone for Beton B: $x_{0,05} = 7,51 \cdot (t^{0,5}) + 11,56 = 18,6$ mm
- Splash zonen for Beton B: $x_{0,05} = 9,05 \cdot (t^{0,5}) + 9,76 = 18,2$ mm

Nærmere detaljer vedrørende fremgangsmåden og den teoretiske baggrund for udledning af disse formler kan findes i [7].

Det fremgår af de præsenterede data i Figur 20, at $x_{0,05}$ for Beton P ved eksponeringstiden $t = 0,87$ år er 4,6 mm og 3,5 mm mindre end $x_{0,05}$ ved samme eksponeringstid for Beton B i henholdsvis neddykket zone og splash zonen. For Beton V derimod antager $x_{0,05}$ værdier ved $t = 0,87$ år, som både for neddykket zone og splash zonen er sammenlignelige med $x_{0,05}$ for Beton B ved samme eksponeringstid, mens $x_{0,05}$ -værdierne for Beton W ligger en smule højere end tilfældet er for Beton B. Både i plottet for neddykket zone og i plottet for splash zonen viser Beton R den lavest af alle viste indtrængningsdybder med henholdsvis $x_{0,05} = 13,1$ mm og $x_{0,05} = 11,2$ mm.

16. Referencer

- [1] Fib, Model Code for Service Life Design, Bulletin no 34, 2006.
- [2] DS/EN 206-1 og DS 2426.
- [3] Betonbro – Beton – AAB & SAB-P, Vejdirektoratet, juli 2018
- [4] Informationer om betontyper og materialedata findes på www.concreteexpertcentre.dk
- [5] Rasmussen, T.H., "Long-Term Durability of Concrete", Nordic Concrete Research, No. 4, 1984.
- [6] Freiesleben Hansen, P. & Pedersen, E.J. (1999), Vinterstøbning af Beton, Teknologisk Institut.
- [7] Poulsen, S.L., Sørensen, H.E., Jönsson, U., "Chloride ingress in concrete blocks at the Rødbyhavn marine exposure site – Status after 5 years", Proceedings of "4th International Conference on Service Life Design for Infrastructures (SLD4)", 27-30 August 2018, Delft, Netherlands, pp. 192-203.
- [9] Madsen, S. "Hav- og fiskeribiologi", ISBN 87-90749-08-1, 2008.
- [8] Andersen, I., 'Salt- og temperaturforhold i de indre danske farvande (Salt and temperature conditions in the inner Danish waters)', Danish Meteorological Institute, Copenhagen, Technical Report No. 94-4, 1994.

17. Bilag A. Hirtshals Havns felteksponeringsplads

Oversigt over betoner eksponeret i Hirtshals havn siden 1983 inklusive udvidelser i henholdsvis 2001, 2004 og 2018. I 1983 blev de første 10 blokke eksponeret. I 2001 blev 4 betonemner indeholdende kalkfillercement inkluderet. I 2004 blev 4 betonemner med hvid cement inkluderet. I 2018 blev de 4 blokke fra dette projekt inkluderet.

Oversigt over emner i Hirtshals Havn 2018



18. Bilag B. Mikroskopisk undersøgelse af 1 år gamle betonprøver eksponeret til havvand

Hirtshals Eksponeringsplads

Mikroskopisk undersøgelse af 1 år gamle betonprøver eksponeret til havvand



Titel:

Hirtshals Eksponeringsplads
Mikroskopisk undersøgelse af 1 år gamle betonprøver eksponeret til havvand

Rekvirent:

Lars Nyholm Trane
Teknologisk Institut

Udarbejdet af:

Teknologisk Institut
Gregersensvej 4
2630 Taastrup
Tlf. 7220 2000

Byggeri og Anlæg
Beton
Ulla Hjorth Jakobsen

Kvalitetssikring:

Sagsansvarlig: Ulla Hjorth Jakobsen, tlf. 7220 2198, uhj@teknologisk.dk
Godkendt af: UHJ

Opgavenr.: 2003135-08

Versionsnr.: 001

Dato: 9. april 2019

Indhold

1.	Baggrund	4
2.	Formål	4
3.	Data og modtagne informationer	4
4.	Analyse- og målemetoder	4
5.	Vurderingsgrundlag/Sammenfatning	4
5.1.	Opgavens omfang	4
5.2.	Resultater	4
6.	Petrografisk analyse	10

1. Baggrund

I forbindelse med Grøn Beton II projektet blev betoner med forskellig pastasammensætning støbt i laboratoriet. Disse betoner blev initialkarakteriseret (forår 2018) før de blev eksponeret til havvand ved eksponeringspladsen i Hirtshals. Efter 1 års eksponering er kerner udtaget til videre undersøgelse.

2. Formål

Formålet med undersøgelsen er, ud fra en mikroskopisk undersøgelse, at vurdere ændringer i mikrostrukturen og overfladekemi i de laboratoriestøbte betoner efter 1 års eksponering til havvand.

3. Data og modtagne informationer

Rekvirenten har oplyst følgende:

xxxxx.

4. Analyse- og målemetoder

For beskrivelse af de anvendte metoder, henvises der til dokumentationsafsnittet.

5. Vurderingsgrundlag/Sammenfatning

5.1. Opgavens omfang

Der er udført følgende undersøgelse:

- Petrografisk analyse af 4 kerner, alle udtaget under vand.

Prøverne har følgende ID:

Prøve Nr.	Mix ID	Tyndslib Nr.	Støbedato	Cement	FA%	Q% calc.ler	LL%
P	E40 (ref)	8213-P	4/12/17	CEMI 42,5N-SR5	13	-	-
R	GB-3	8213-R	29/11/17	CEMI 52,5R	33	-	-
V	GB-5	8213-V	11/12/17	CEMI 52,5R	-	8	6
W	X3M	8213-W	19/3/18	CEMI 52,5R	-	18	12

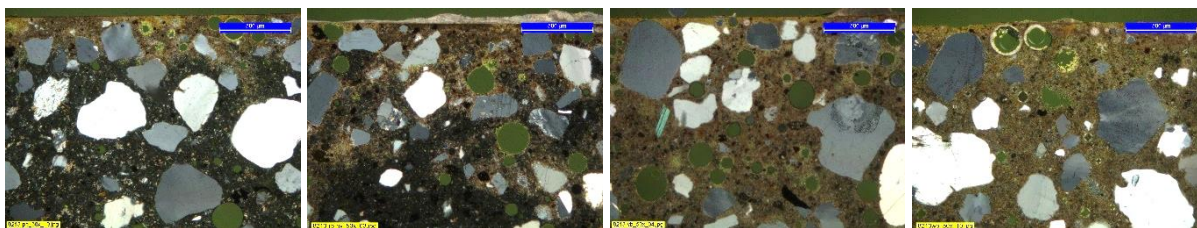
5.2. Resultater

Følgende kan sammenfattes i forbindelse med undersøgelsen af kernerne:

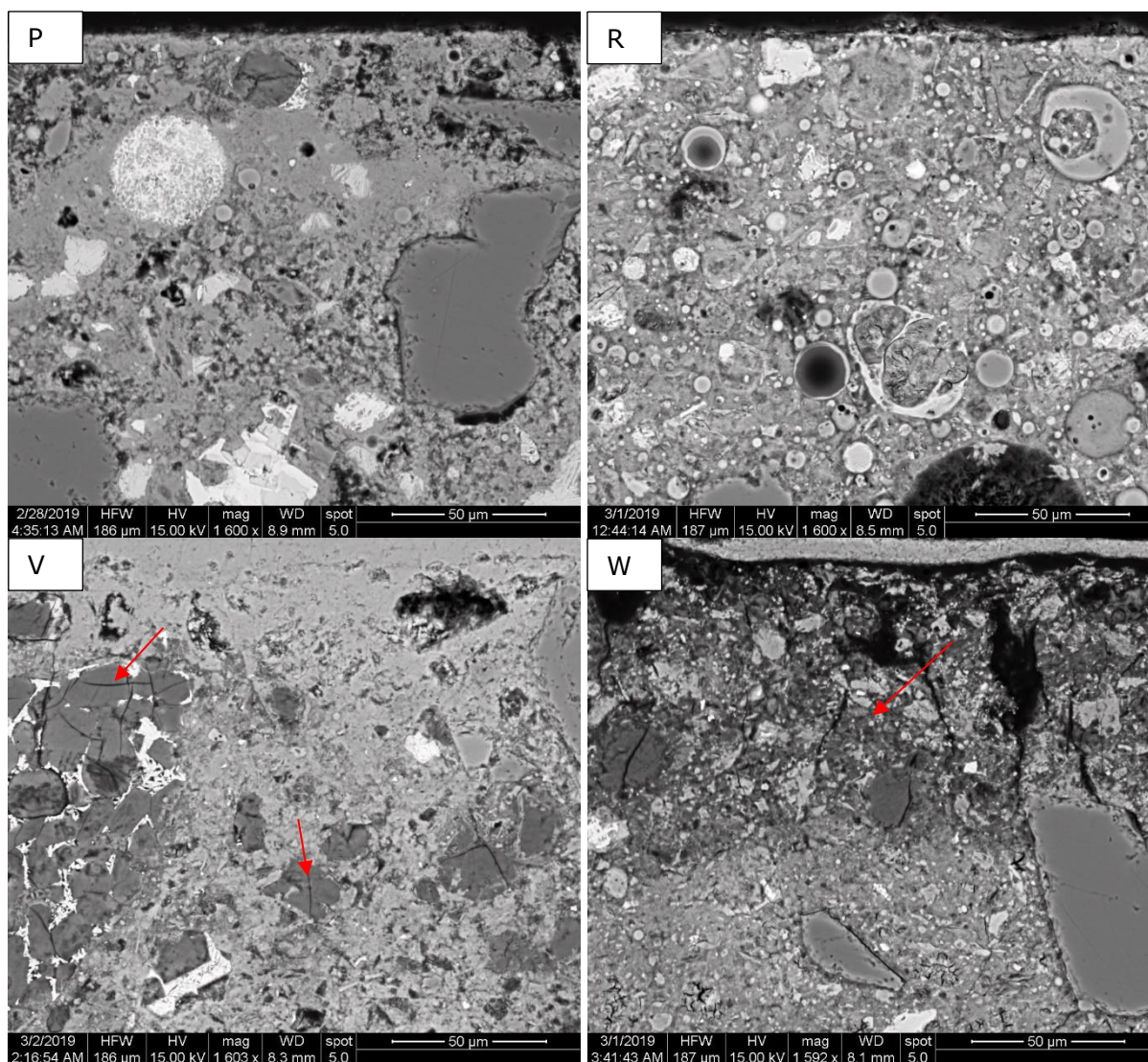
De undersøgte betoner er alle taget under vand og ved modtagelse dækket af diverse biologisk kalkvækst. Under denne vækst ses samtlige overflader at fremstår helt intakte uden nogen form for afskalning.

Cementpastaen i overfladen af alle betoner er karbonatiseret, men strukturen og dybden af den karbonatiserede pasta er forskellig (Figur 1). Den karbonatiserede pasta ses tyde-

ligst i betonerne P og R uden kalcineret ler og kalkfiller, i de andre betoner er karbonatiseret pasta svær at bedømme. Den mest intense karbonatisering af pastaen vurderes umiddelbart at forekomme i beton P og V (Figur 1 og 2).



Figur 1: Overfladen af betonerne (P, R, V og W) set i X-polariseret lys. Pastaen er karbonatiseret i overfladen af alle prøver med strukturen og dybden af karbonatisering er forskellig.

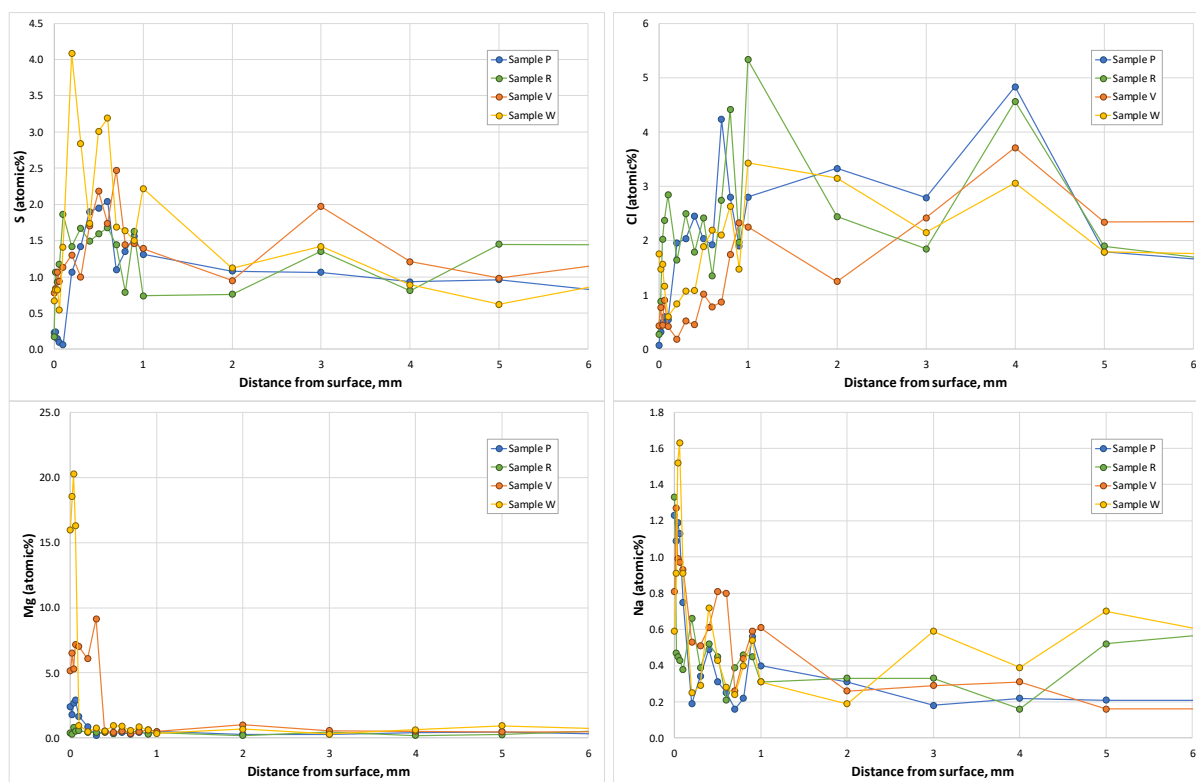


Figur 2: Overfladen af de 4 betoner set i backscatter mode. Der ses tegn på indtrængning af Mg i nogle af betonerne, iform af mørkfarvning af cementkorn i prøve V og mørkfarvning af selve overfladen i prøve W. Betonoverfladen i kerne P og V er tydeligt karbonatiseret (lysegrå "masse").

I betoner med kalcineret ler og kalkfiller, ses tegn på Mg indtrængning i betonoverfladen (Figur 2 og 3). Cementkornene i overfladen er udludt for Ca og beriget i Mg og fremstår i backscatter mode mørkegrå. I beton W med det højeste ler- og kalk-indhold, fremstår selve overfladen mørkegrå og beriget med Mg. Faseanalyser af pastaen (Figur 4) viser at de Mg-rige faser er magnesium-silikat-hydrat (MSH). Brucit ($MgOH_2$) er ikke observeret i

pasta men observeret i luftporer nær overfladen i betonerne P, V og W; mest tydeligt dog i de 2 betoner med ler og kalk.

Figur 3 viser fordelingen af S, Cl, Mg og Na ind igennem betonoverfladerne. Generelt ses Na at være forhøjet i selve betonoverfladen, S at være forhøjet i de yderste ca. 1mm, og Cl forhøjet fra 1-5mm. Mg er som nævnt tydeligt forhøjet i beton V og W til en dybde af maks. ca. 300µm. Svag Magnesium berigelse ses og i beton P, mens Mg ikke synes at trænge ind i beton R (Rapid+høj FA). Størst S-indhold ses i beton W, mens der ikke er signifikant forskel mellem de øvrige betoner. Cl-indholdet synes umiddelbart at være højt lige under overfladen i betonerne P og R, mest der først ses en ophobning af Cl i en dybde af 1mm i betonerne V og W.



Figur 3: Linie-travers visende elementvariationen fra overfladen og 6mm ind i betonen.

Faseanalyse (Figur 4) af pastaen i 3 dybde indikerer at en del af det observerede Cl, sidder i Friedelssalt og i betonerne R, V og W også i CSH'en. I beton W ses i en dybde af 4mm faser med Cl som er meget rig på Al. Plottet tyder ikke på at der er tale om en specifik fase (se bilag) og det er derfor usikkert hvad dette er.

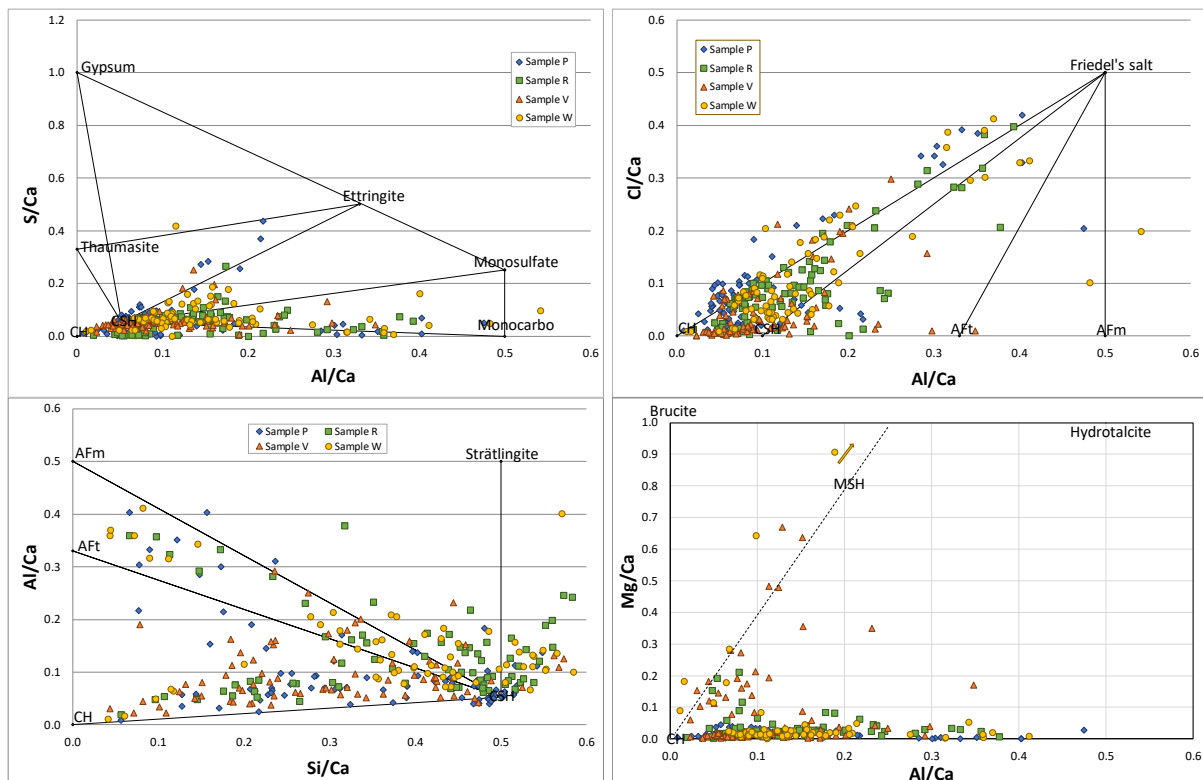
Faseanalysen viser endvidere at pastaen i de samme 3 betoner primært udgøres af monocarboaluminat-hydrat.

Monosulfat er mest dominerende i beton R.

I beton P synes de primære faser at være CH, CSH og ettringit. Beton R med højt flyveaske indhold, ses at indeholde faser rige på Al og Si.

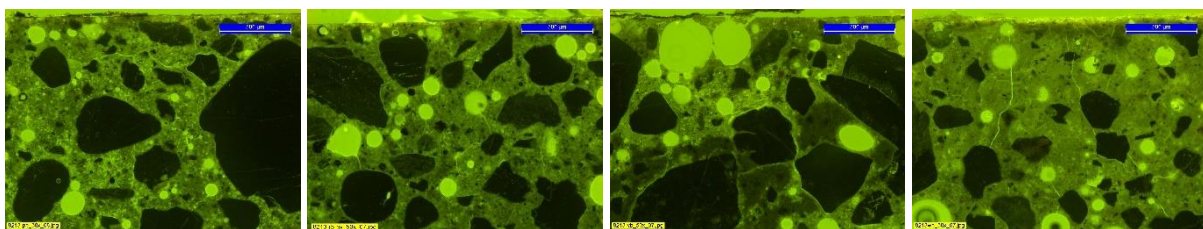
Generelt er beton W fattig på calciumhydroxid, CH.

Detaljer vedrørende faseændringen igennem betonerne kan ses i bilag.



Figur 4: Fasesammensætningen af pastaen i de 4 betoner. Analyserne repræsenterer pastaen i overfladen, i ca. 400µm's og i 4mm's dybde. Detaljer findes i bilag.

Undersøgelsen af pastahomogenitet og revner i fluorescerende lys ses i Figur 5. Generelt fremstår pastaen i alle betoner homogene, dog med nogen inhomogenitet i overfladen af beton V og W. Der er observeret sprøde mikrorevner pastaen i beton R, V og W, mest intenst dog i beton W, hvor også den Mg-rige overflade er krakeleret (Figur 2). Kun enkelte revner ses i overfladen af beton P.



Figur 5: Overfladen af betonerne (P, R, V og W) set i fluorescerende lys. Pastaen porøsitet varierer fra prøve til prøve, mest inhomogen pasta ses i overfladen af prøve V. En del mikrorevner ses i prøve R og især i prøve W.

Der ses forskellige faser udfældet i luftporene nær betonernes overflade. Mest iøjnefaldende udfældning af calcit, brucit og ettringit ses i betonerne V og W.

Luftporestrukturen er noget forskellig i de 4 betoner, se bilag.

Detaljeret beskrivelse findes i Dokumentations Bilag.

Teknologisk Institut, Byggeri



Ulla Hjorth Jakobsen
Ph.D., Geolog, Seniorkonsulent

Dokumentation

6. Petrografisk analyse

Udført

Der er i januar 2019 modtaget 4 prøver til analyse. Makrobeskrivelse af prøverne er udført samme dag, mikro-analyse er udført i marts 2019 af Ulla Hjorth Jakobsen.

Metode

Makroanalysen er udført ved visuel betragtning og ved brug af stereomikroskop.

Mikroanalysen er udført på 1 tyndslib fra hver kerner. Tyndslib fremstilles af udsavede prøver, der imprægneres med epoxy, tilsat et fluorescerende farvestof og nedslibes til en tykkelse på ca. 0,02 mm. Et tyndslib dækker et areal på ca. 30x45 mm, inklusiv den eksponerede overflade. Tyndslib analyseres i polarisations- og fluorescensmikroskop.

SEM-EDX analysen er udført på polerprøver vha. et Quanta 400 fra FEI. Analyserne er kørt ved 15 KeV, en spot størrelse på 5 og en arbejdsafstand på omkring 10 mm. Data er Proza korrigerede. Analyserne er lavet under højt vakuum på kulbedampede prøver. Der er fremstillet 1 polerprøve af hver prøve, inkluderende den eksponerede overflade.

Omfang

Der er foretaget petrografisk analyse af 4 prøver, alle udtaget under vand.

Prøve Nr.	Mix ID	Tyndslib Nr.	Støbedato	Cement	FA%	Q% calc.ler	LL%
P	E40 (ref)	8213-PB	4/12/17	CEMI 42,5N-SR5	13		
R	GB-3	8213-RB	29/11/17	CEMI 52,5R	33		
V	GB-5	8213-VB	11/12/17	CEMI 52,5R	-	8	6
W	X3M	8213-WB	19/3/18	CEMI 52,5R	-	18	12

Definitioner brugt i tekst

Mikrorevner: Revnevidde <10µm
 Fine revne: Revnevidde fra 10-100µm
 Grove revner: Revnevidde fra 10-100µm

Opalin pasta: Pastaen fremstår i X-polariseret lys, uskarp.

Mikroanalyse

Objekt:	Kernestykke, CEMI SR, FA	Ordre Nr.	2003135-8	
Prøve ID	PB (E40ref) Slib nr.:	8213-PB	Areal	45x30mm

Beskrivelse:

Sten: Kantafrundet granit

Sand: Kantafrundet, primært kvarts, lidt feldspat, granit og flint.

Pasta: Indeholder en relativ grovkornet Portlandcement med flyveaske. Pastaen fremstår homogen.

Luftindhold: Der ses en del runde, store luftporer i betonen. Luftporene fremstår noget agglomererede. Indholdet vurderes til 5-6vol%.

v/c forhold: Vurderet lav til omkring 0,40.

Karboniseringsdybde: Overfladen af betonen er ujævnt karboniseret fra 0,2-0,8mm. Karboniseret pasta ses ned langs små revner i overfladen til maks. 1,5mm. Foran karboniseringsfronten, ses i X-polariseret lys, en ca. 0,6mm tyk sort zone med lavt indhold af calciumhydroxid.

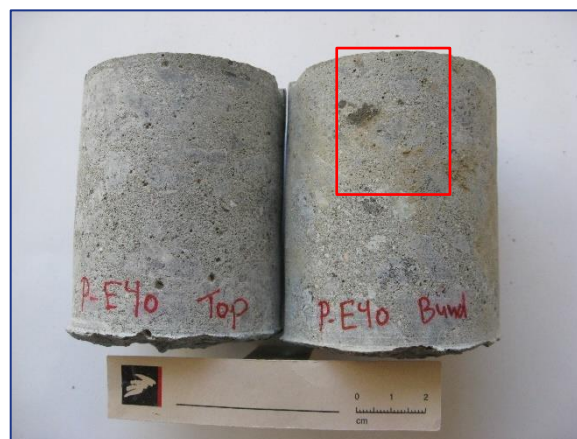
Udfældninger: Generelt ses ingen tydelige udfældninger i luftporer og revner. Meget små ettringitnåle kan dog anses i porer nær overfladen. Enkelte luftporer indeholder lidt calcite.

Revner: Små korte, sprøde revner ses enkelte steder lige under overfladen og enkelte steder inde i betonen. Nogle dels bløde plastiske, dels sprøde revner ses fra overfladen til en maks. dybde af 10mm. Disse revner løber typisk igennem agglomererede luftansamlinger.

Overflade: Fremstår intakt og plan.



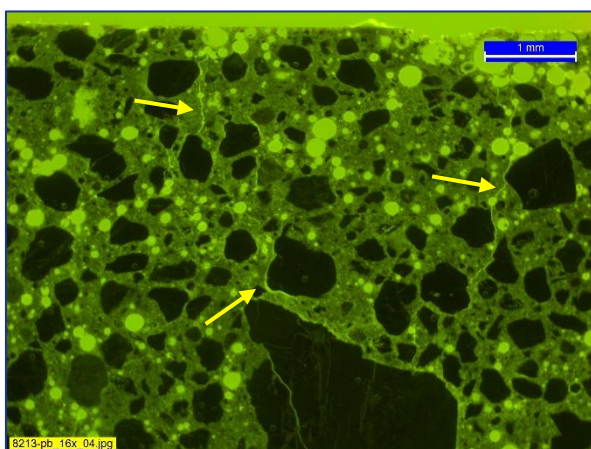
Til venstre ses overfladen af kernen udtaget over vand; til højre undervand.



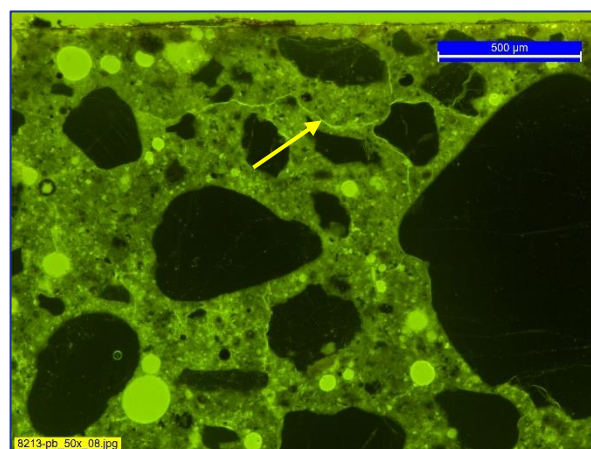
Kernesider. Kernen til højre som er udtaget under vand, er udtaget til analyse. Pastaen fremstår grå. Position af slib er markeret.

Mikroanalyse - fotodokumentation

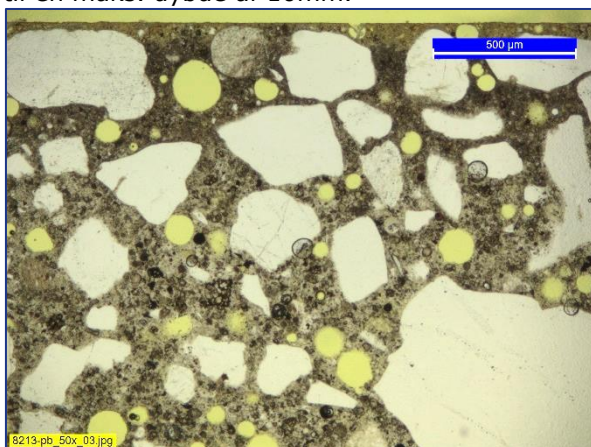
Objekt:	Kernestykke, CEMI SR, FA	Ordre Nr.	2003135-8
Prøve ID	PB (E40ref) Slib nr.:	8213-PB	Areal 45x30mm



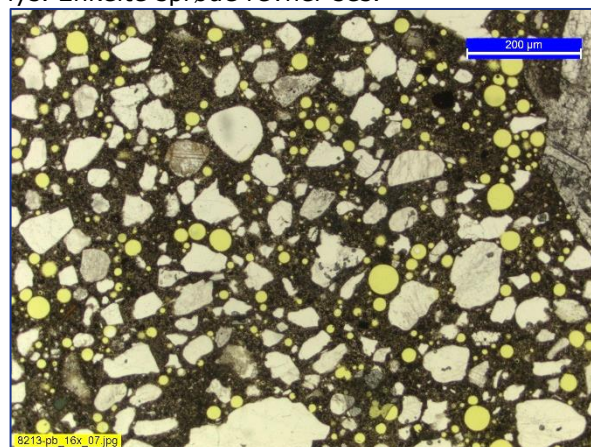
Plan intakt overflade. Der ses flere fine revner til en maks. dybde af 10mm.



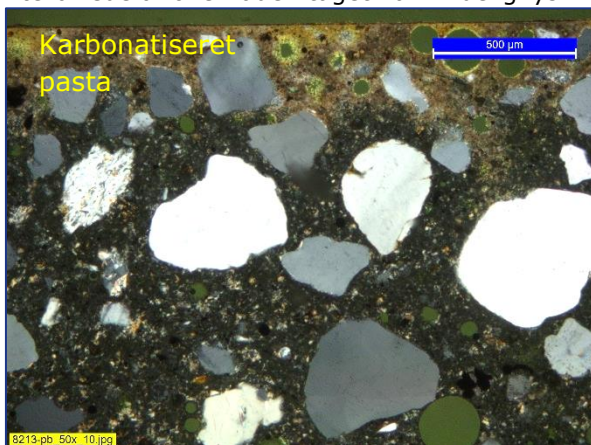
Nærbillede af overfladen taget i fluorescerende lys. Enkelte sprøde revner ses.



Nærbillede af overfladen taget i almindelig lys.



Generel luftporestruktur i betonen.

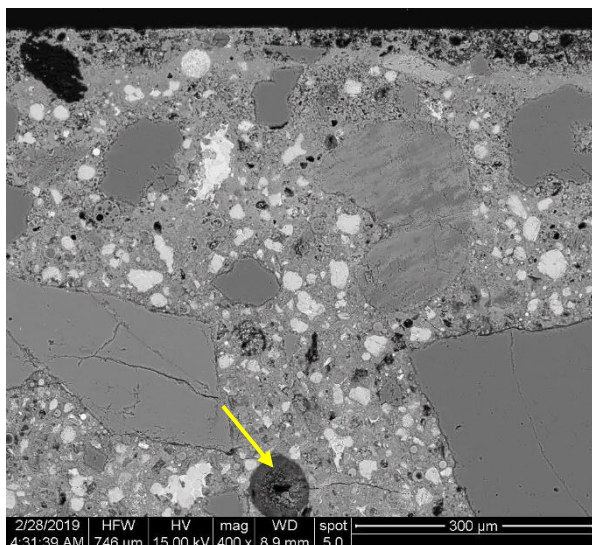


Overfladen af betonen er karbonatiseret fra 0,2 til 0,8mm. Der ses kalkskallede begrøninger på betonens overflade. X-polariseret lys.

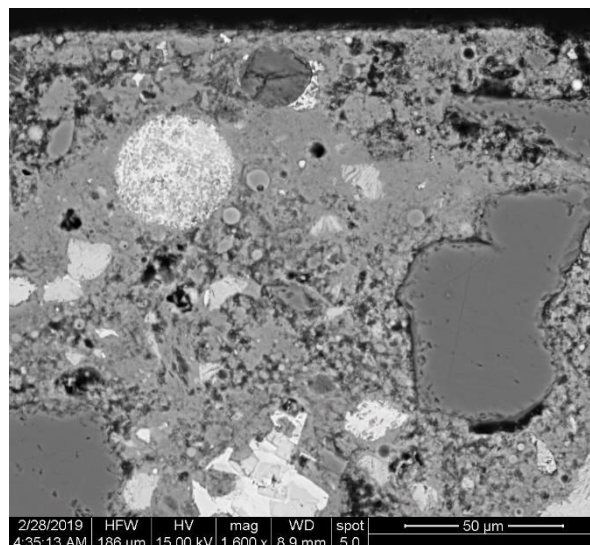


SEM-EDX - fotodokumentation

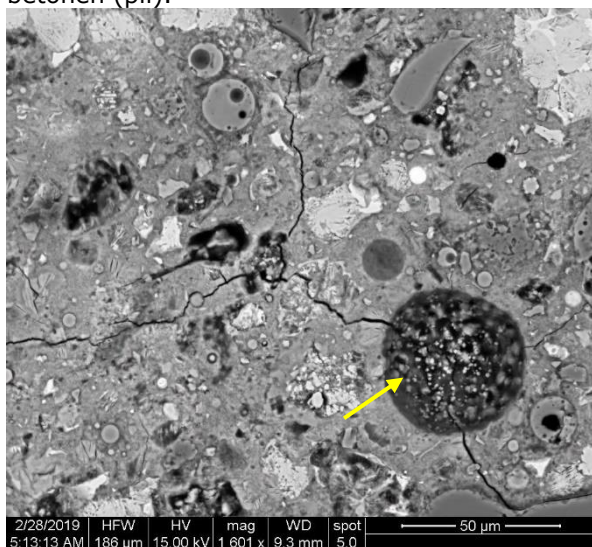
Objekt:	Kernestykke, CEMI SR, FA	Ordre Nr.	2003135-8
Prøve ID	PB (E40ref) Slib nr.:	8213-PB	Areal 45x30mm



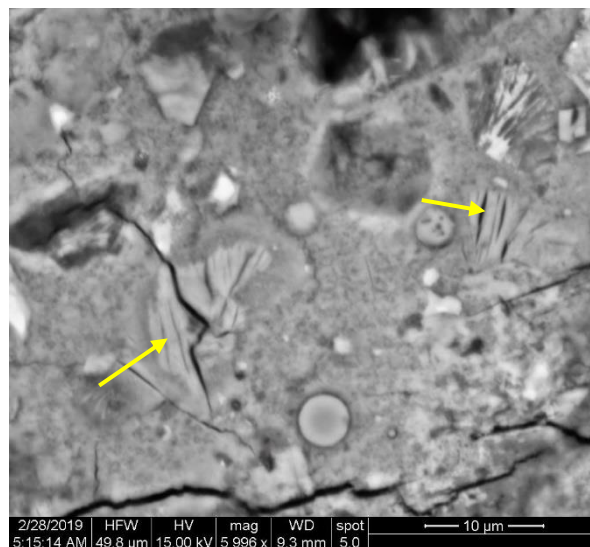
Backscatter foto visende den ydre del af betonen. Selve overfladen fremstår porøs. Ettringit ses i luftporer i den yderste del af betonen (pil).



Under den porøse overflade ses en overvejende lysegrå, karboniseret pasta. Flyveaske partikler ses tydeligt.



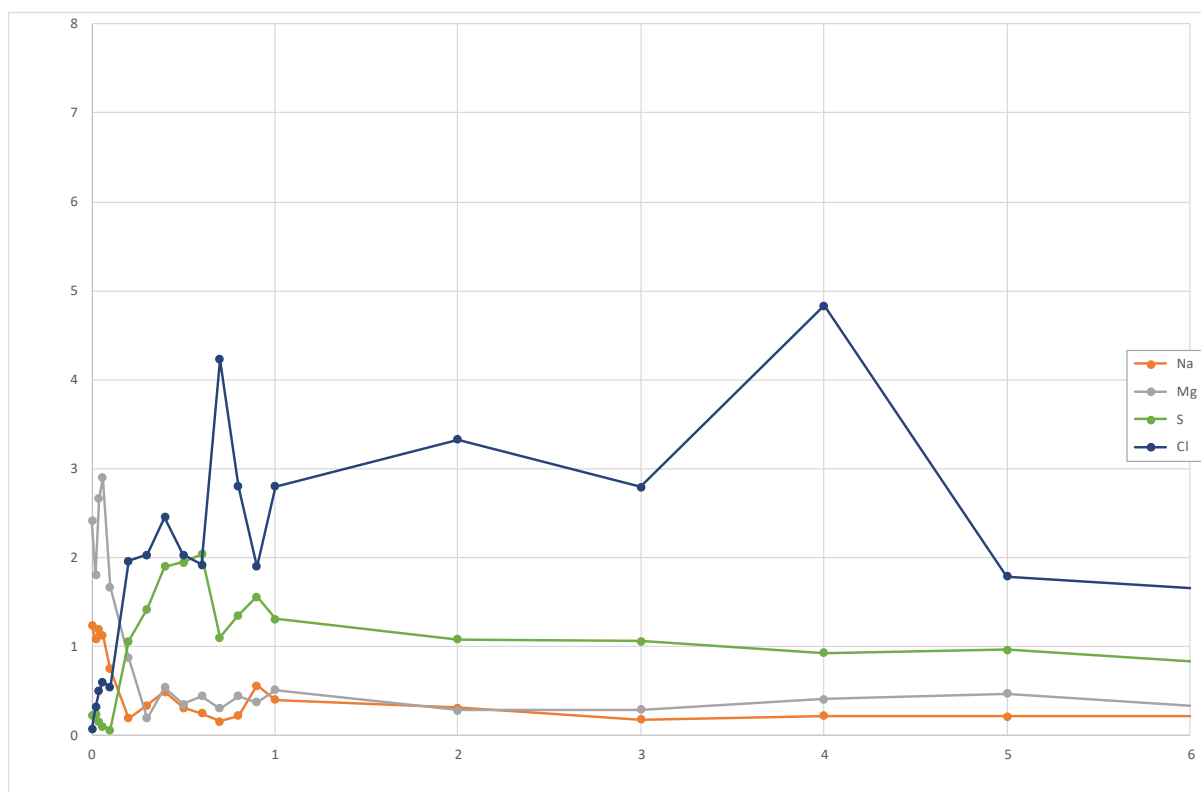
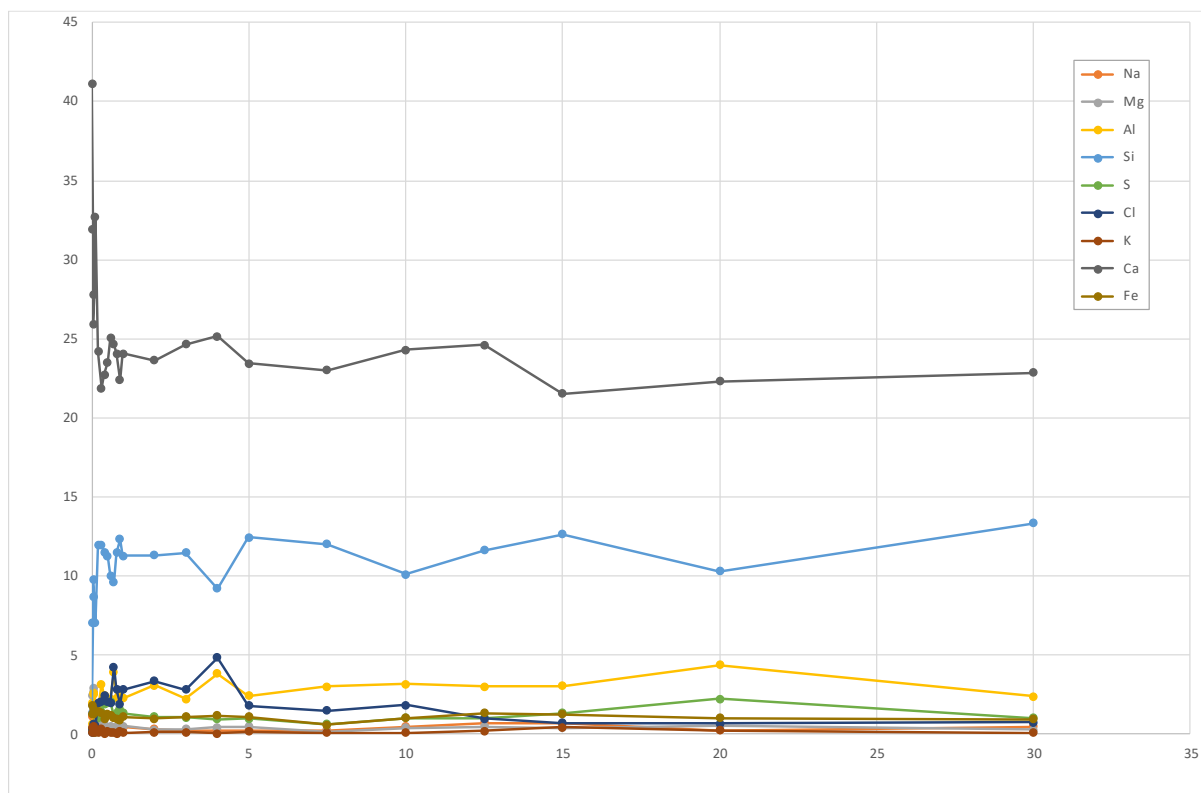
Nærbillede af betonen i en dybde af ca. 400µm. Ettringit ses i luftporer (pil), og Friedelssalt ses i pasta.



Nærbillede af pastaen i 4mm's dybde. Der ses en del Friedelssalt i relicts efter hydratiserede cementkorn (pil).

SEM-EDX - Travers

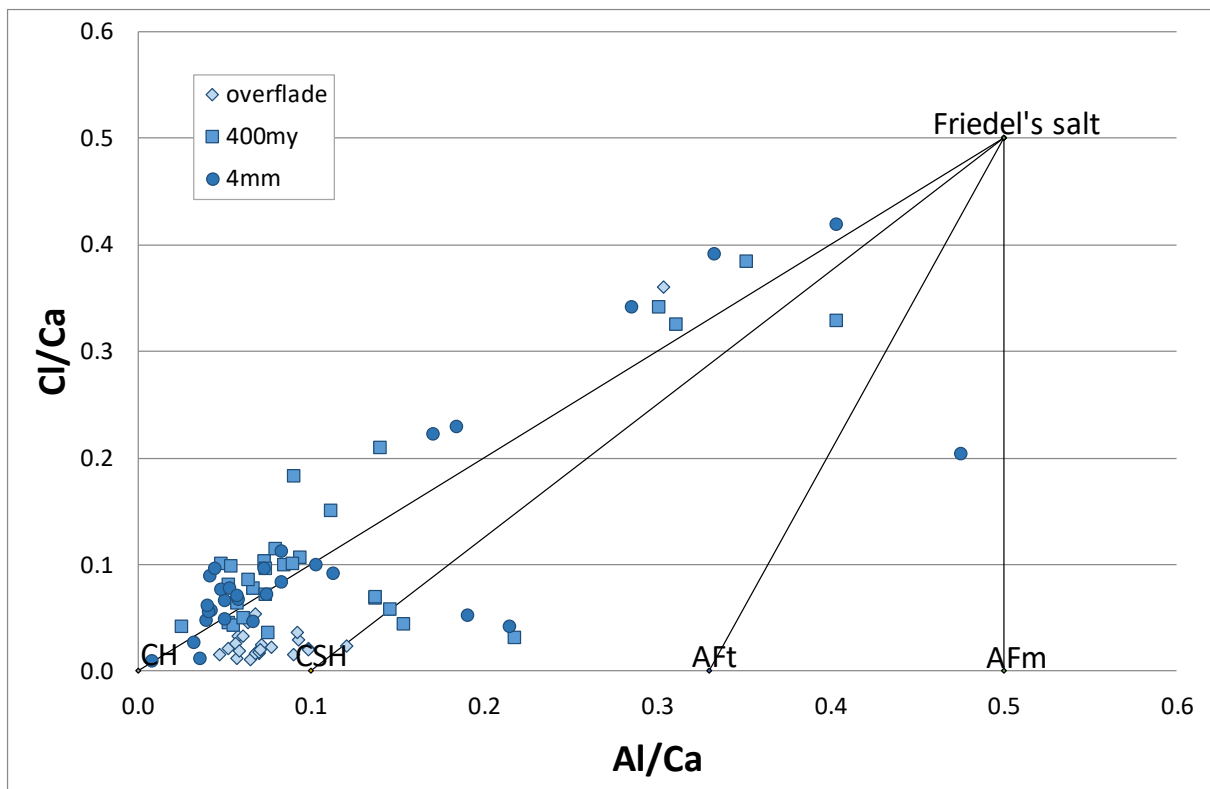
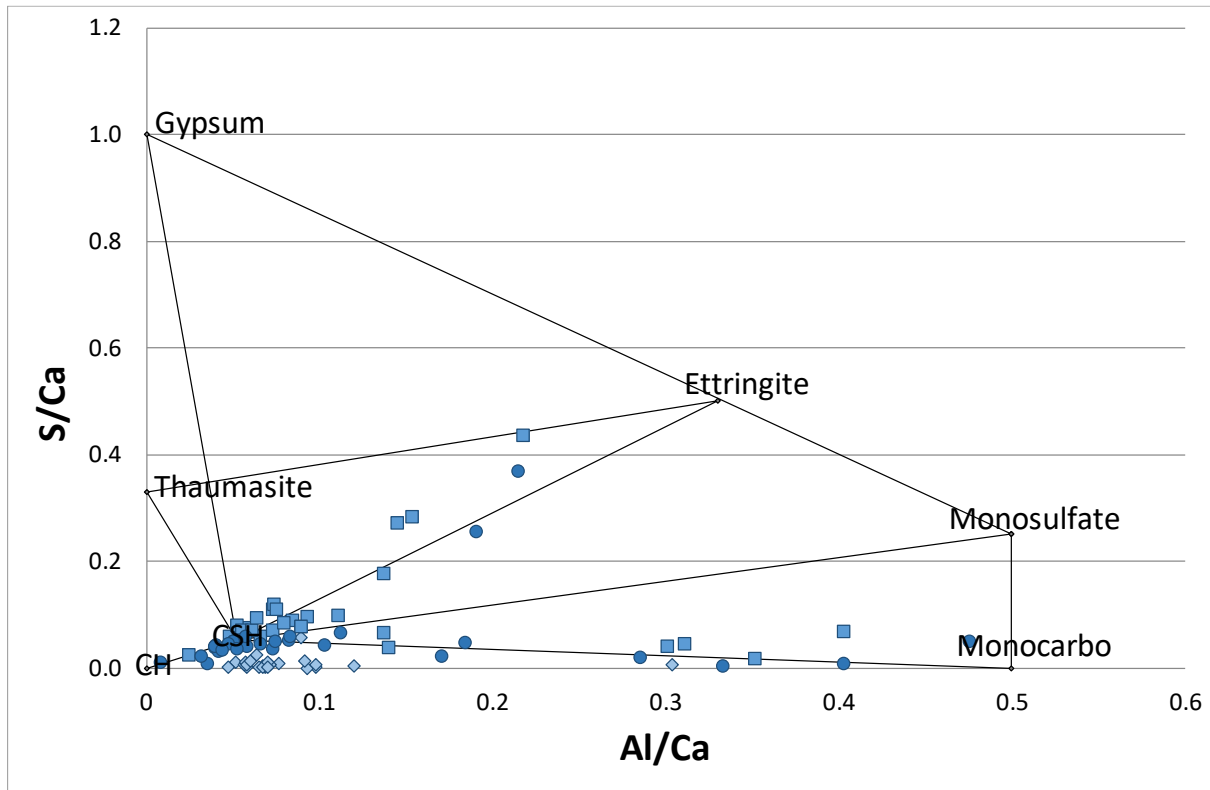
Objekt:	Kernestykke, CEMI SR, FA	Ordre Nr.	2003135-8
Prøve ID	PB (E40ref) Slib nr.:	8213-PB	Areal 45x30mm



Elementvariation, i atom%, i relation til dybden fra overfladen, i mm. Nederst ses udvalgte elementer.

SEM-EDX - Faseanalyse

Objekt:	Kernestykke, CEMI SR, FA	Ordre Nr.	2003135-8
Prøve ID	PB (E40ref) Slib nr.:	8213-PB	Areal 45x30mm



Fasesammensætning i systemet.

Mikroanalyse

Objekt:	Kernestykke, CEMI rapid, FA	Ordre Nr.	2003135-8
Prøve ID	RB (GB3)	Slib nr.:	8213-RB
		Areal	45x30mm

Beskrivelse:

Sten: Kantafrundet granit

Sand: Kantafrundet, primært kvarts, lidt feldspat, granit og flint.

Pasta: Indeholder en relativ finkornet Portlandcement med flyveaske. Pastaen fremstår noget inhomogen men med velfordelt, finkornet CH. I X-polariseret lys ses pastaen at være noget opalin.

Luftindhold: Der ses en del runde luftporer i betonen. Luftporene synes ikke velfordelt. Indholdet vurderes til 4-5vol%.

v/c forhold: Vurderet lav til omkring 0,40.

Karbonatiseringsdybde: Overfladen af betonen er relativt jævnt karbonatiseret fra 0,2-0,4mm. Karbonatiseret pasta ses ned langs små revner i overfladen til maks. 3mm. Foran karbonatiseringsfronten ses i X-polariseret lys en 1-2mm tyk sort zone med lavt indhold af calciumhydroxid.

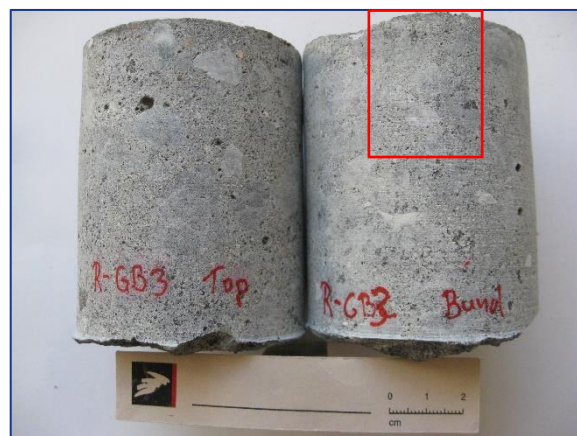
Udfældninger: Der ses nåleformede ettringit belægninger i de fleste luftporer i de yderste 6mm af betonen. I den inderste del ses kun meget lidt ettringit i porer.

Revner: Der ses enkelte, sprøde fine revner fra overfladen, orienteret vinkelret ned i betonen. Maks dybde af revner er 3mm. Nogle mikrorevner ses i pastaen i hele det undersøgte areal. Revnerne er orienteret vinkelret på tilslagskornene.

Overflade: Fremstår intakt og plan.



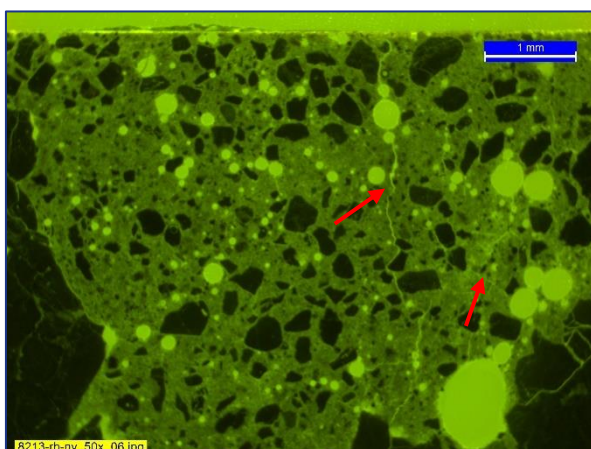
Til venstre ses overfladen af kernen udtaget over vand; til højre undervand.



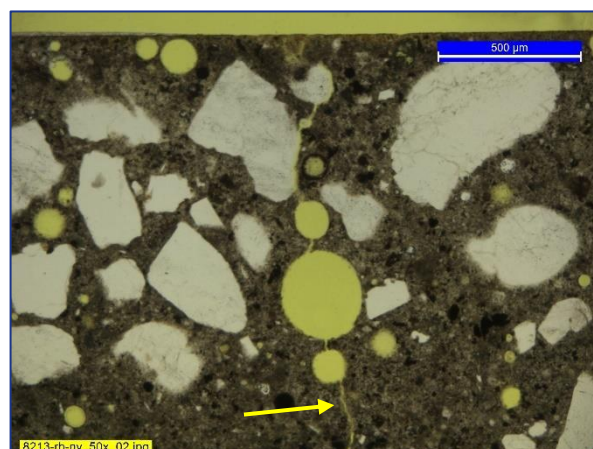
Kernesider. Kernen til højre som er udtaget under vand, er udtaget til analyse. Pastaen fremstår grå. Position af slib er markeret.

Mikroanalyse - fotodokumentation

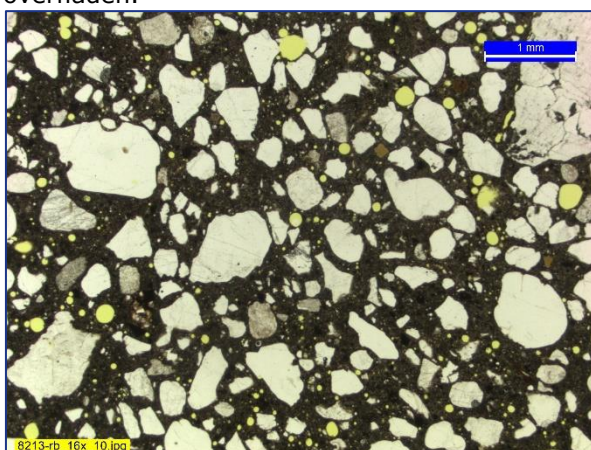
Objekt:	Kernestykke, CEMI rapid, FA	Ordre Nr.	2003135-8	
Prøve ID	RB (GB3) Slib nr.:	8213-RB	Areal	45x30mm



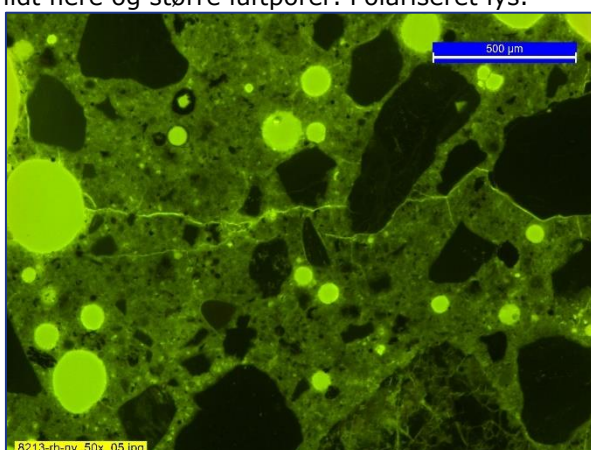
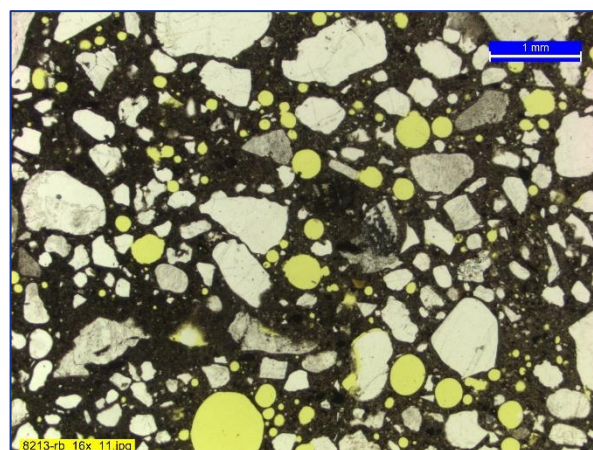
Plan intakt overflade. Der ses flere sprøde mikrorevner i cementpastaen og fine revner i overfladen.



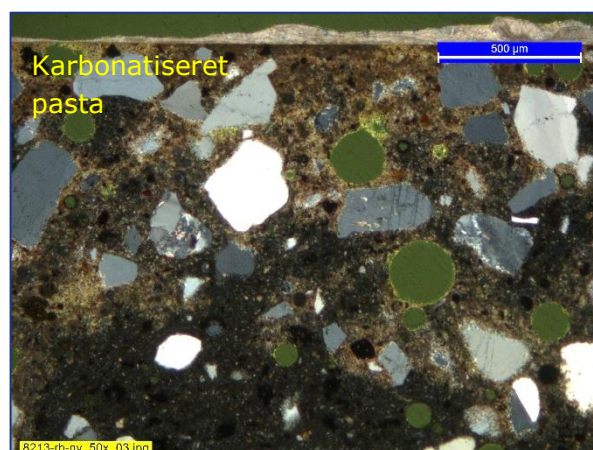
Nærbillede af overfladen taget i fluorescerende lys. Fin revne ses til ca. 2,8mm's dybde.



Luftporene i betonen er meget uens fordelt; i nogle områder få og kun små luftporer, i andre ses lidt flere og større luftporer. Polariseret lys.



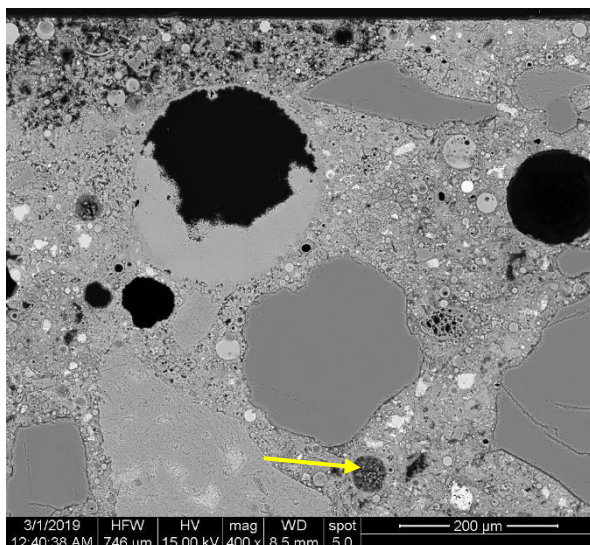
Generelt ses små sprøde mikrorevner i pastaen i hele det undersøgte areal.



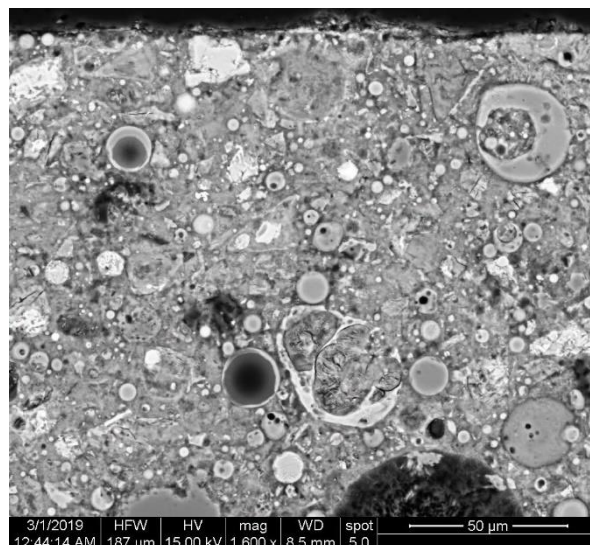
Overfladen af betonen er karbonatiseret til en varierende dybde af 0,2 til 0,4mm.

SEM-EDX - fotodokumentation

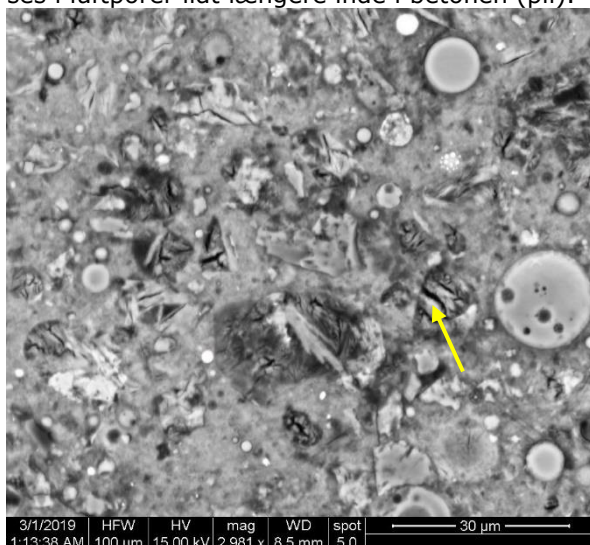
Objekt:	Kernestykke, CEMI rapid, FA	Ordre Nr.	2003135-8	
Prøve ID	RB (GB3) Slib nr.:	8213-RB	Areal	45x30mm



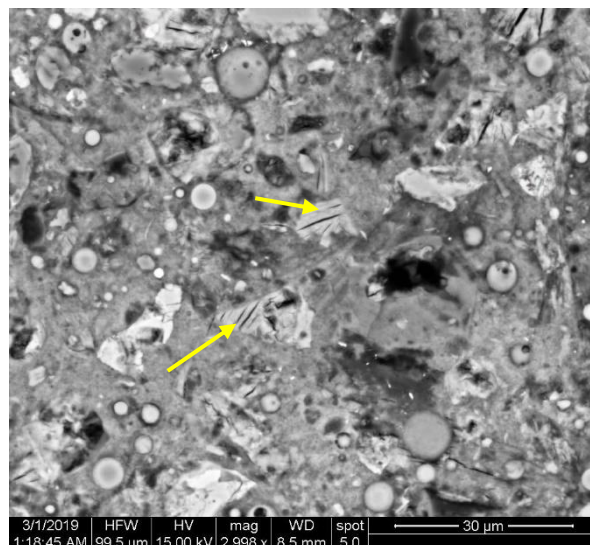
Backscatter foto visende den ydre del af betonen. Dele af overfladen fremstår porøs. Calcit ses i luftporer nær overfladen, ettringit ses i luftporer lidt længere inde i betonen (pil).



Nærbillede af den tættere del af overfladen. Flyveaskepartikler ses tydeligt i pastaen.



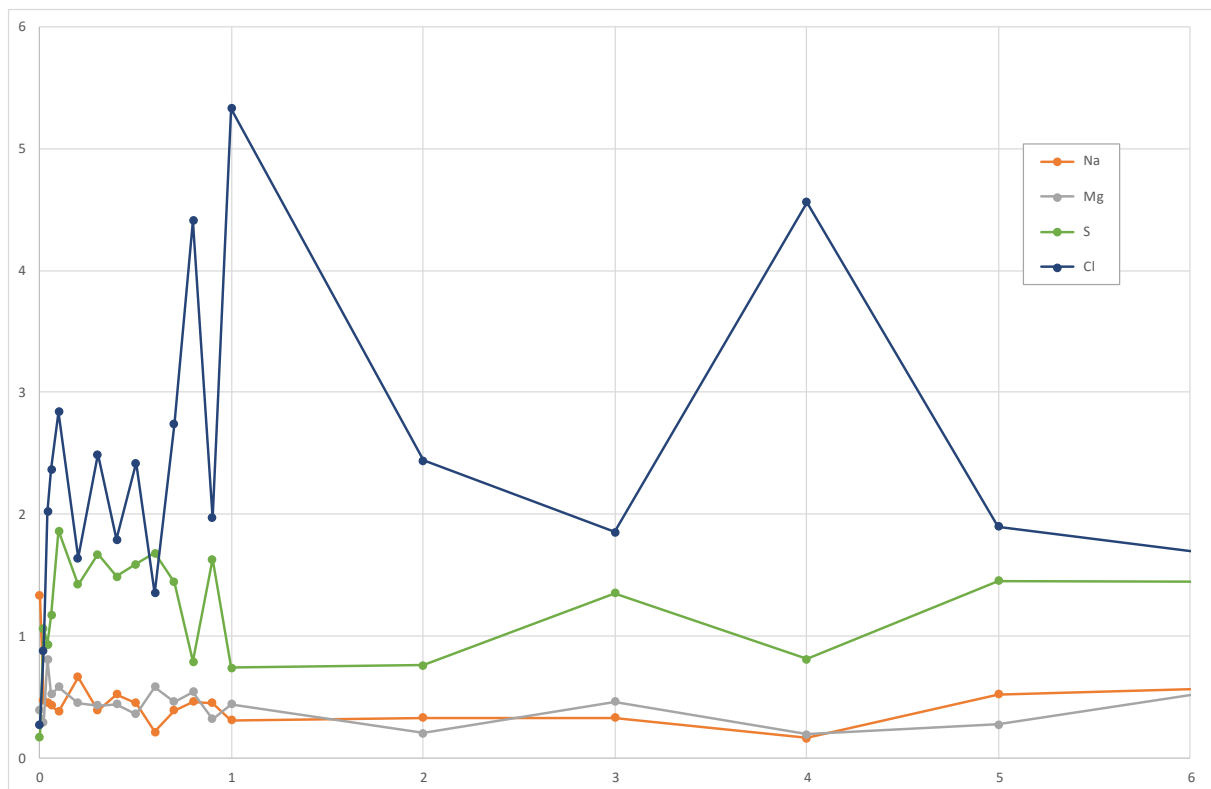
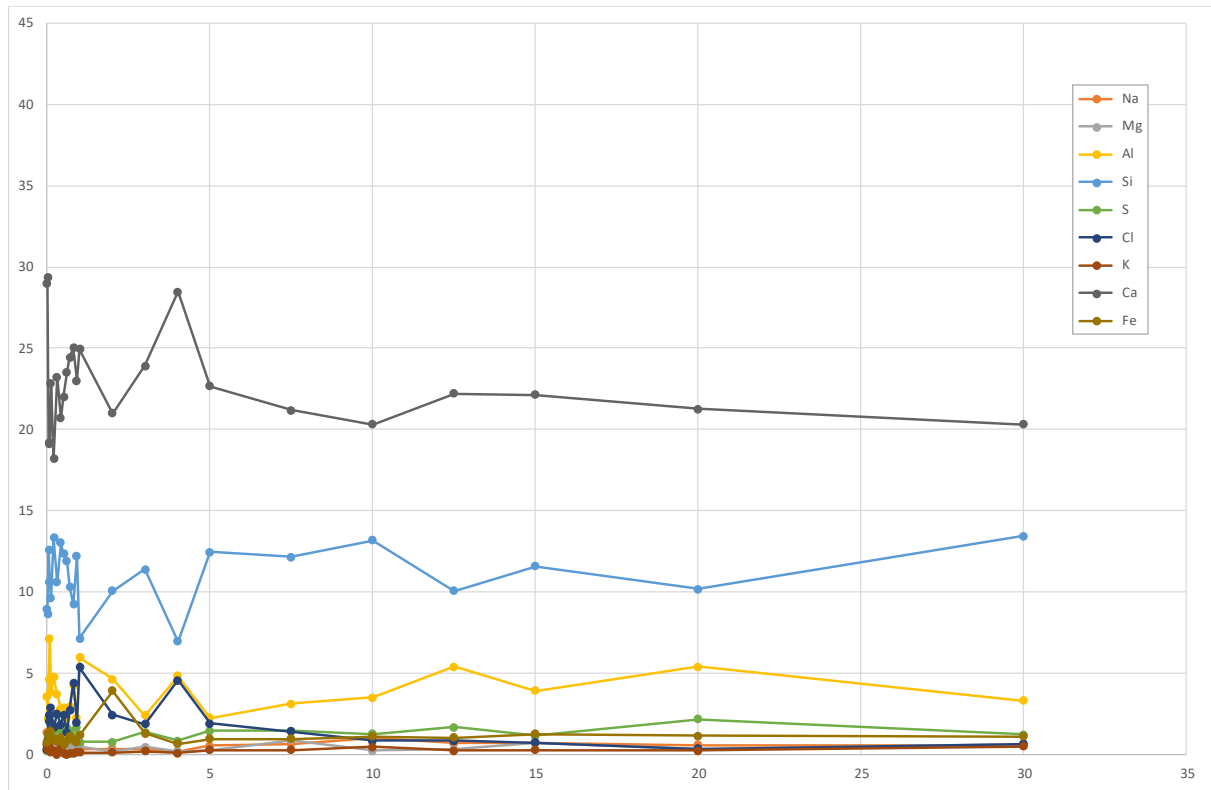
Nærbillede af betonen i en dybde af ca. 400µm. Ettringit (pil) og Friedelssalt ses i relicts efter hydratiserede cementkorn.



Nærbillede af pastaen i 4mm's dybde. Der ses en del Friedelssalt i relicts efter hydratiserede cementkorn (pil).

SEM-EDX - Travers

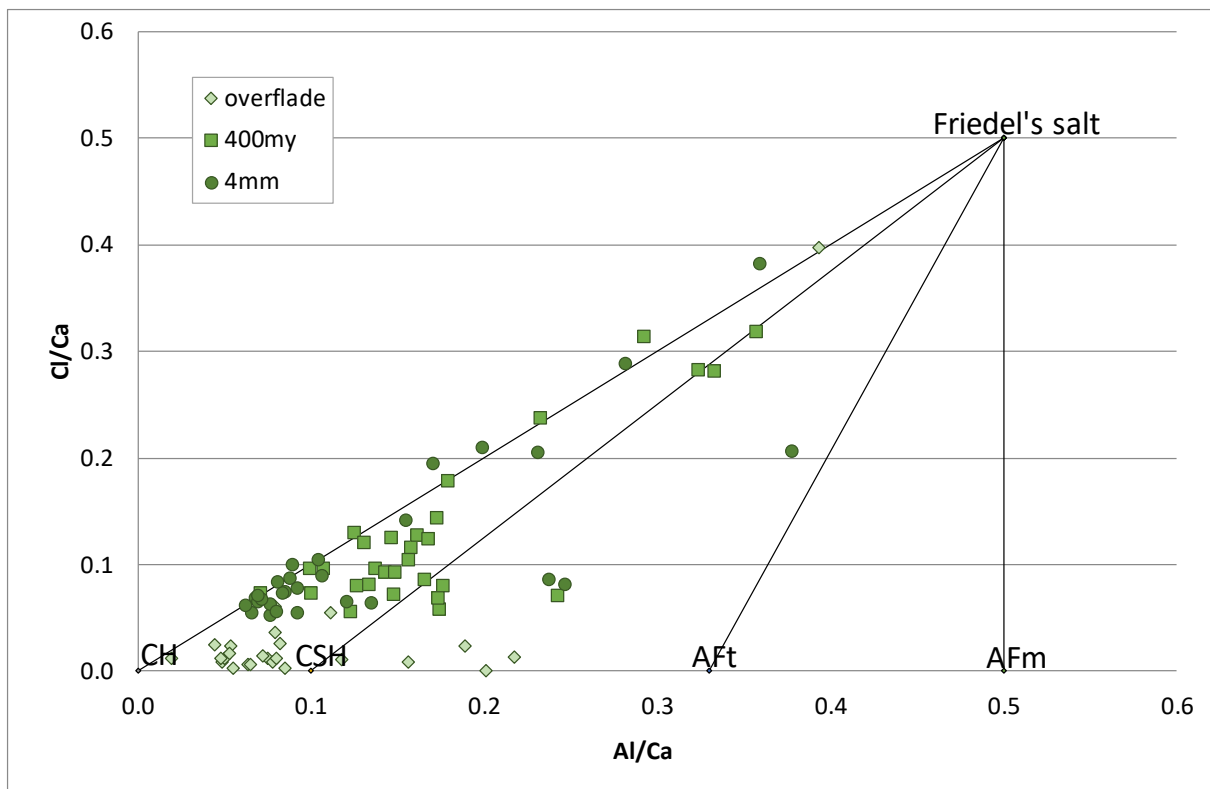
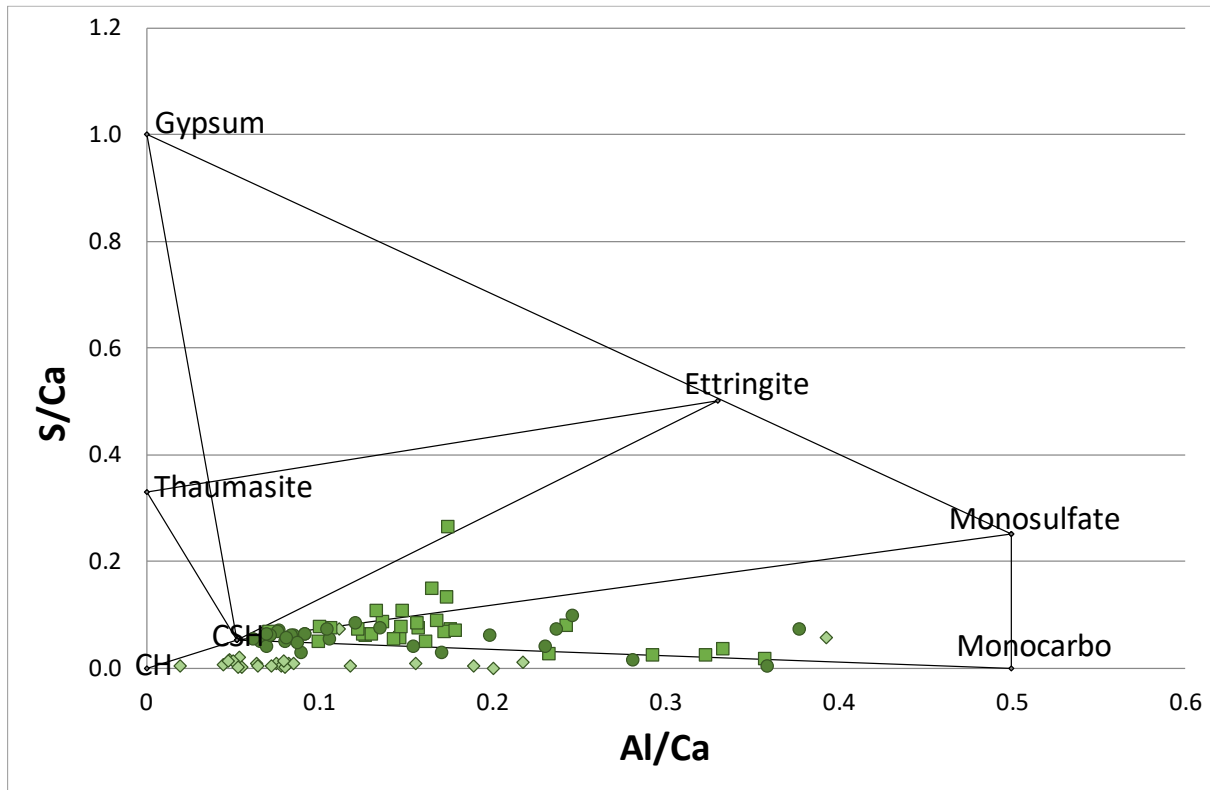
Objekt:	Kernestykke, CEMI rapid, FA	Ordre Nr.	2003135-8
Prøve ID	RB (GB3)	Slib nr.:	8213-RB
		Areal	45x30mm



Elementvariation, i atom%, i relation til dybden fra overfladen, i mm. Nederst ses udvalgte elementer.

SEM-EDX - Faseanalyse

Objekt:	Kernestykke, CEMI rapid, FA	Ordre Nr.	2003135-8
Prøve ID	RB (GB3)	Slib nr.:	8213-RB
		Areal	45x30mm



Fasesammensætningen i systemet.

Mikroanalyse

Objekt:	Kernestykke, CEMI rapid, Q, LL	Ordre Nr.	2003135-8
Prøve ID	VB (GB5) Slib nr.:	Areal	45x30mm
	8213-VB		

Beskrivelse:

Sten: Kantafrundet granit

Sand: Kantafrundet, primært kvarts, lidt feldspat, granit og flint.

Pasta: Indeholder en relativ finkornet Portlandcement med finkornet brunlig kalcineret ler (Q) og meget fint kalkfiller (LL). Pastaen fremstår generelt homogen og tæt, men nær overfladen i den karbonatiseret pasta ses en noget varierende kapillarporøsitet. Der er ikke pga. farvning fra ler og kalkfiller muligt at vurdere f.eks. CH i pastaen.

Luftindhold: Der ses en del runde, velfordelte luftporer i betonen. Indholdet vurderes til 5-6vol%.

v/c forhold: Vurderet lav til omkring 0,40-0,45.

Karbonatiseringsdybde: Overfladen af betonen er generelt jævnt karbonatiseret til 2,5mm, men mest intens karbonatisering ses i de øverste 0,4mm. Overgangen mellem karbonatiseret og ukarboniseret pasta synes jævn men pga. pastaens indhold af ler og kalk er bestemmelse lidt usikker.

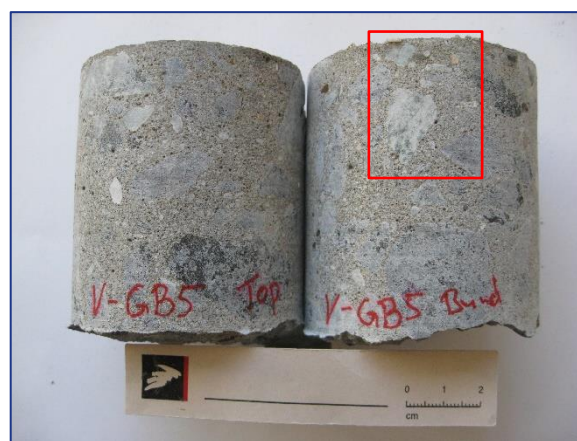
Udfældninger: Nær betonens overflade ses nogle udfældninger i luftporerne. Helt oppe i overfladen, typisk i bristede luftporer, ses porerne at være fyldt med calcit. Herunder ses i den karbonatiserede zone en ettringit-lignende og gel-lignende fase i porerne. I resten af slibet ses fine ettringit-nåle i samtlige luftporer. Der er ikke observeret udfældninger i revner.

Revner: Der ses en enkelt fin, sprød revne fra overfladen, orienteret vinkelret ned i betonen. Maks dybde af revne er 2mm. En del sprøde mikrorevner ses i pastaen i hele det undersøgte areal. Revnerne er orienteret vinkelret på tilslagskornene. Nogle orienterede vedhæftningsdefekter, fyldt med calciumhydroxid, ses langs korngrænser.

Overflade: Fremstår intakt og plan.



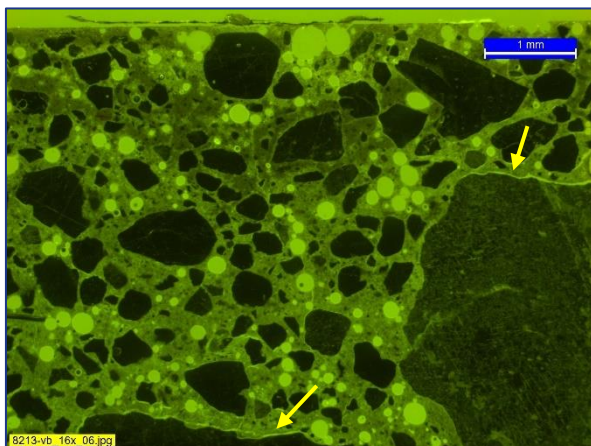
Til venstre ses overfladen af kernen udtaget over vand; til højre undervand.



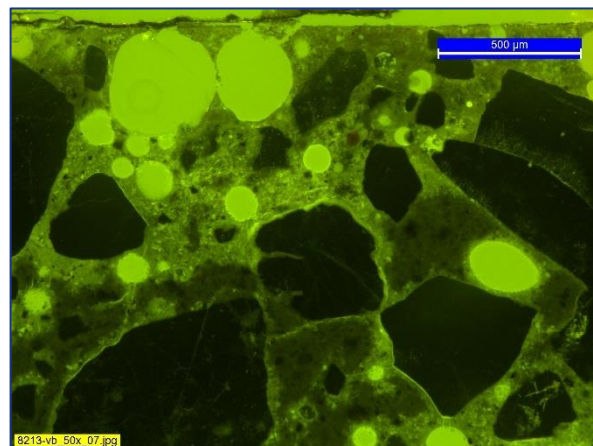
Kernesider. Kernen til højre som er udtaget under vand, er udtaget til analyse. Pastaen fremstår brunlig. Position af slib er markeret.

Mikroanalyse - fotodokumentation

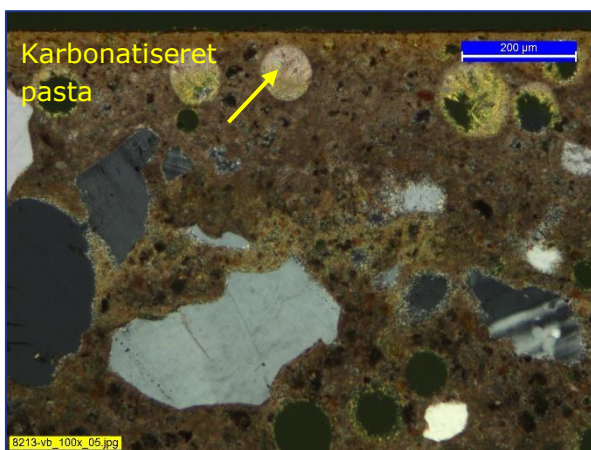
Objekt:	Kernestykke, CEMI rapid, Q, LL	Ordre Nr.	2003135-8
Prøve ID	VB (GB5)	Slib nr.:	8213-VB
		Areal	45x30mm



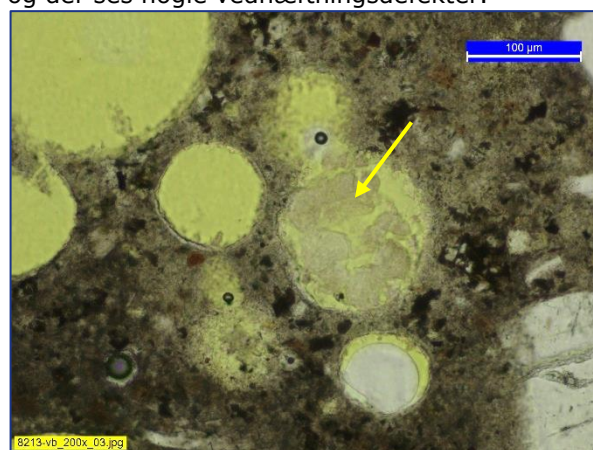
Plan intakt overflade. Der ses nogle vedhæftningsdefekter langs tilslagskorn (pile).



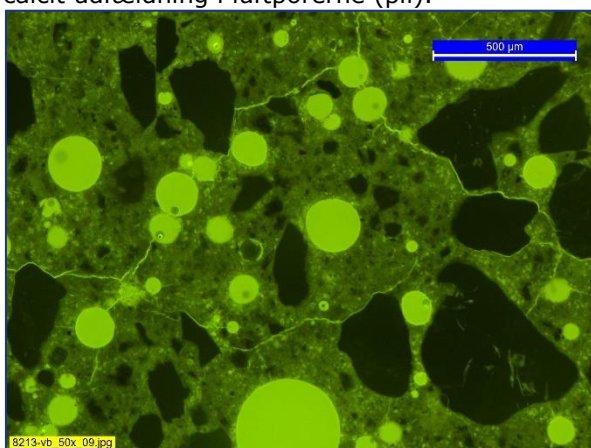
Nærbillede af overfladen taget i fluorescerende lys. Kapillarporøsiteten varierer nær overfladen og der ses nogle vedhæftningsdefekter.



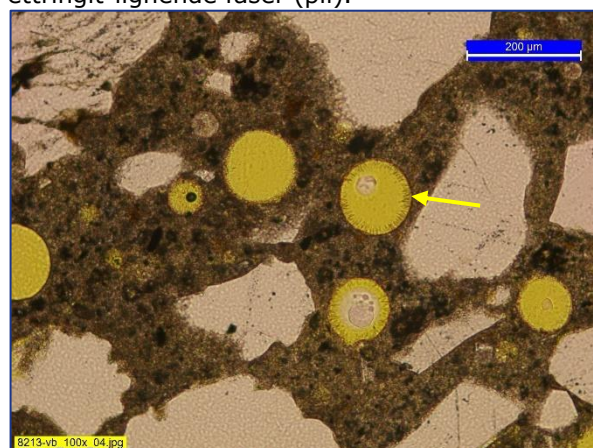
Ved overfladen, i karboniseret pasta, ses calcit udfældning i luftporerne (pil).



Luftporerne nær overfladen, indeholder ettringit-lignende faser (pil).



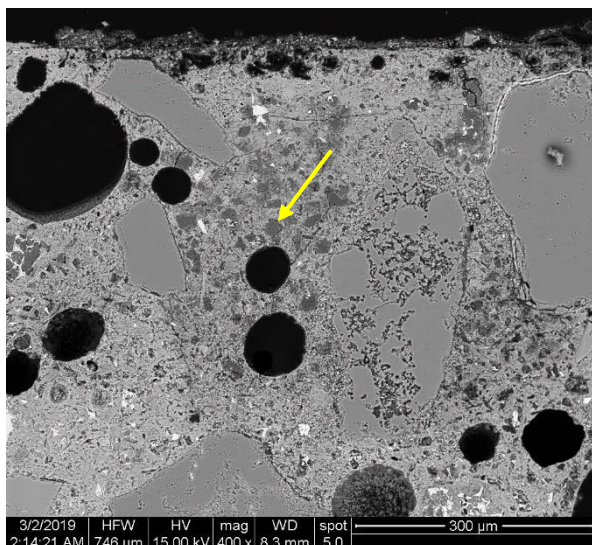
Generel ses en del sprøde mikrorevner i pastaen.



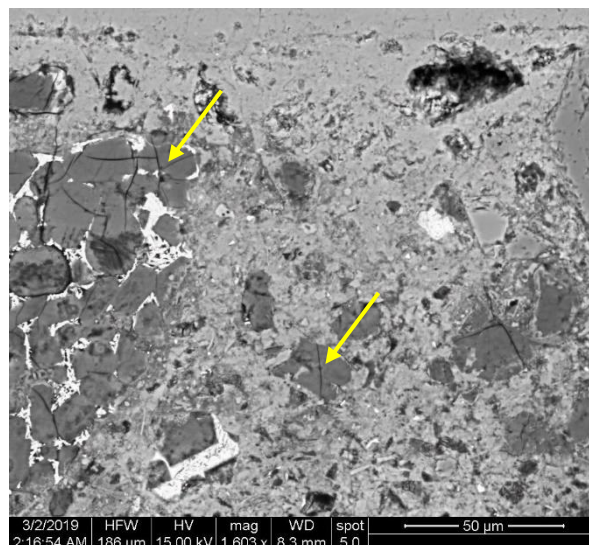
Små ettringitnåle ses i de fleste luftporer inde i betonen.

SEM-EDX - fotodokumentation

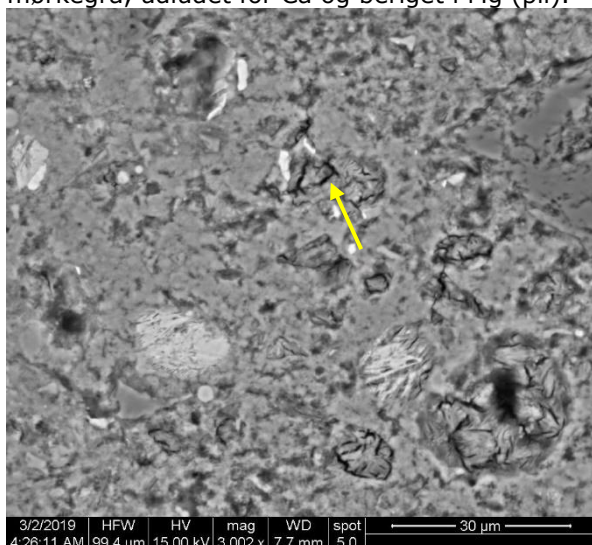
Objekt:	Kernestykke, CEMI rapid, Q, LL	Ordre Nr.	2003135-8
Prøve ID	VB (GB5)	Slib nr.:	8213-VB
		Areal	45x30mm



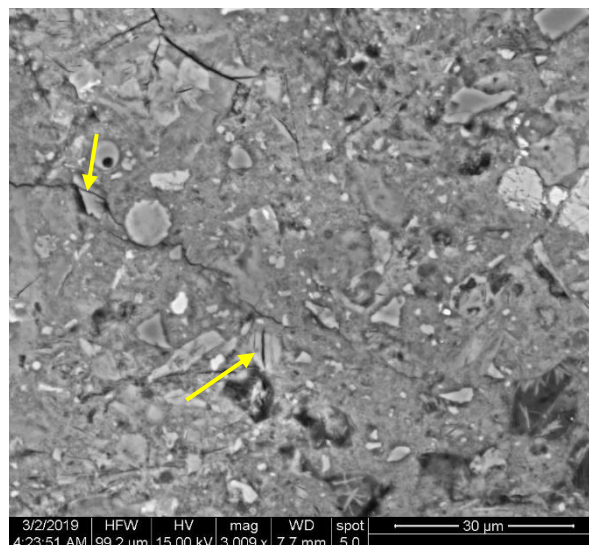
Backscatter foto visende den ydre del af betonen. Dele af overfladen fremstår porøs. Cementkornene nær overfladen fremstår mørkegrå, udludet for Ca og beriget i Mg (pil).



Nærbillede af en ensartet lysegrå, karbonatiseret overflade med cementkorn beriget i Mg.



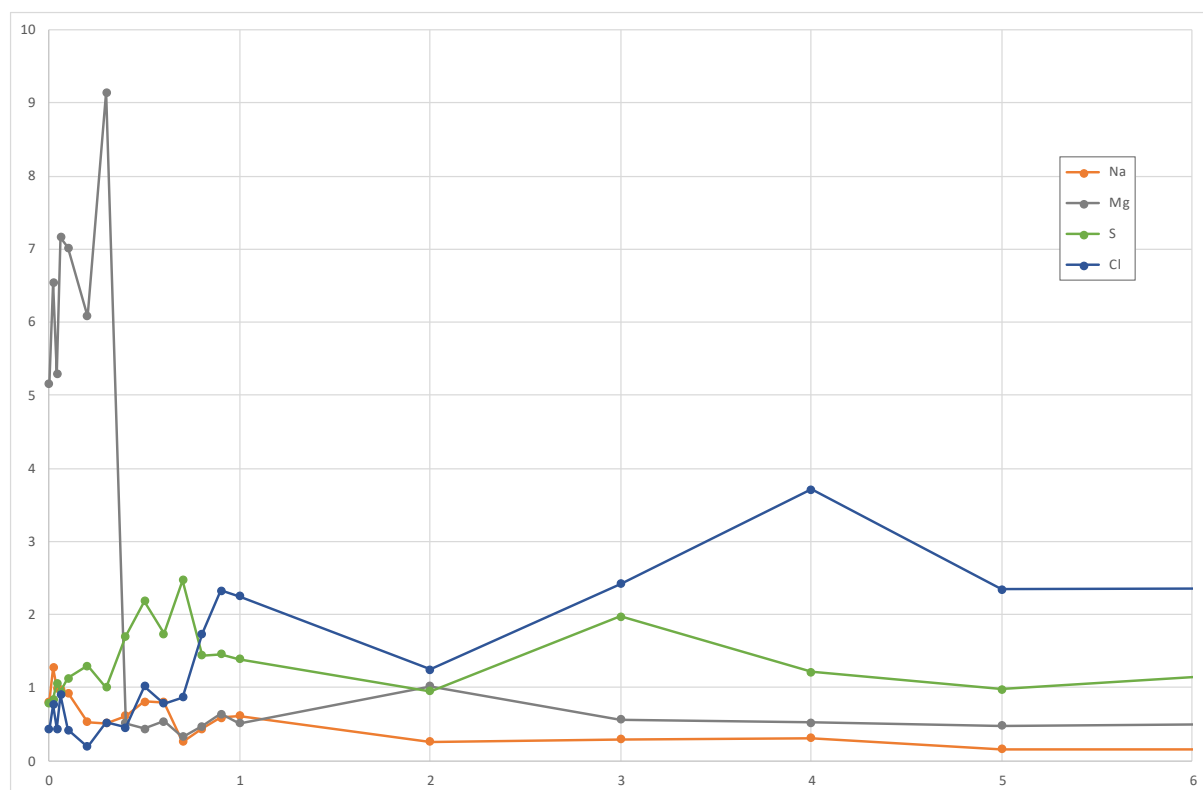
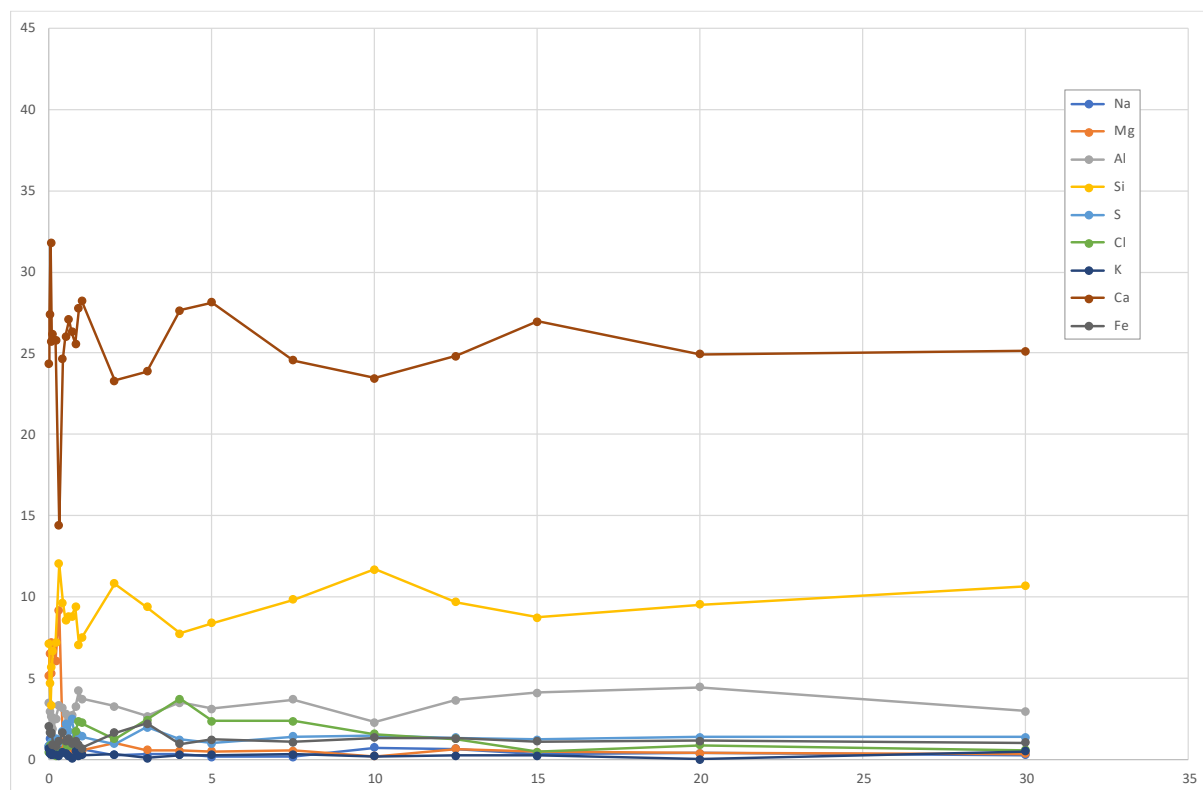
Nærbillede af betonen i en dybde af ca. 400μm. Ettringit (pil) og Friedelssalt ses i relicts efter hydratiserede cementkorn.



Nærbillede af pastaen i 4mm's dybde. Der ses noget Friedelssalt i relicts efter hydratiserede cementkorn (pil).

SEM-EDX - Travers

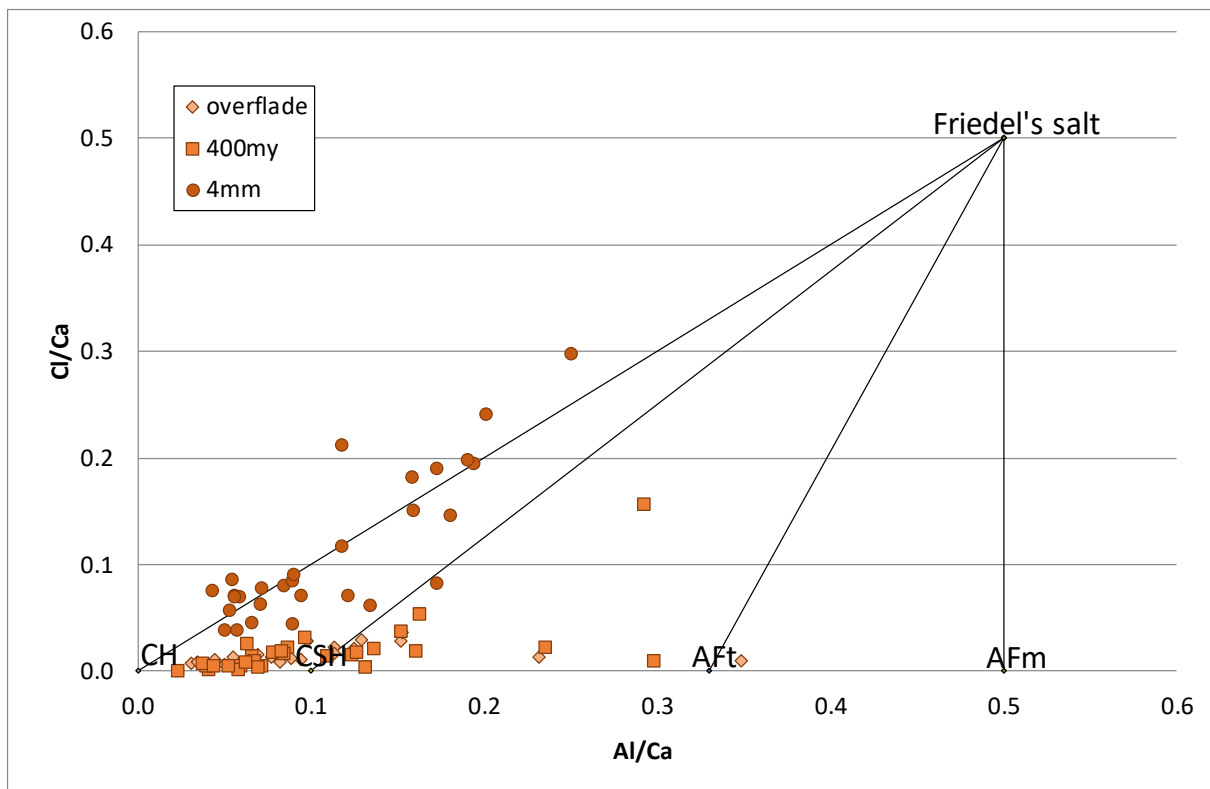
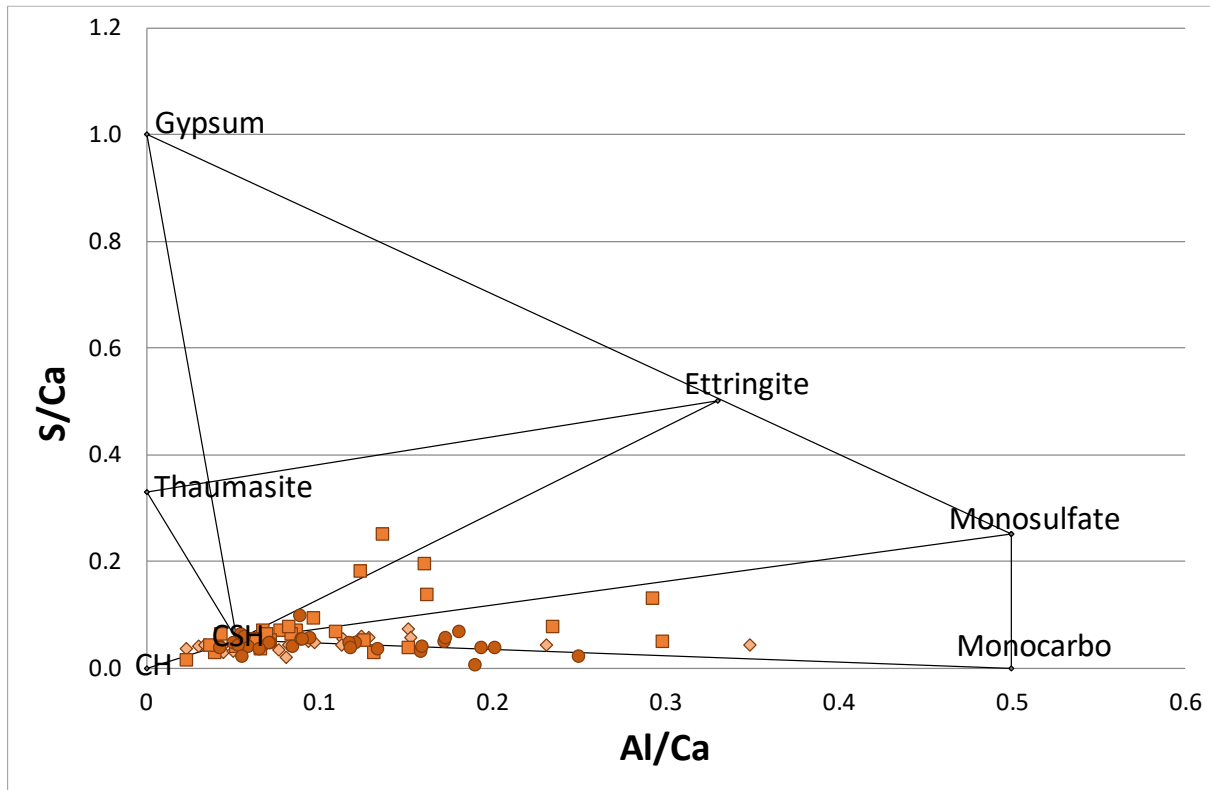
Objekt:	Kernestykke, CEMI rapid, Q, LL	Ordre Nr.	2003135-8
Prøve ID	VB (GB5)	Slib nr.:	8213-VB
		Areal	45x30mm



Elementvariation, i atom%, i relation til dybden fra overfladen, i mm. Nederst ses udvalgte elementer.

SEM-EDX - Faseanalyse

Objekt:	Kernestykke, CEMI rapid, Q, LL	Ordre Nr.	2003135-8
Prøve ID	VB (GB5)	Slib nr.:	8213-VB
		Areal	45x30mm



Fasesammensætningen i systemet.

Mikroanalyse

Objekt:	Kernestykke, CEMI rapid, Q, LL	Ordre Nr.	2003135-8	
Prøve ID	WB (X3M) Slib nr.:	8213-WB	Areal	45x30mm

Beskrivelse:

Sten: Kantafrundet granit

Sand: Kantafrundet, primært kvarts, lidt feldspat, granit og flint.

Pasta: Indeholder en relativ finkornet Portlandcement med finkornet brunlig kalcineret ler (Q) og meget fint kalkfiller (LL). Pastaen fremstår homogen og tæt. Der er ikke pga. farvning fra ler og kalkfiller muligt at vurdere f.eks. CH i pastaen.

Luftindhold: Der ses en del runde, velfordelte luftporer i betonen. Indholdet vurderes til 5-6vol%.

v/c forhold: Vurderet lav til omkring 0,40-0,45.

Karboniseringsdybde: Overfladen af betonen er relativt jævnt karboniseret til 0,4mm. Overgangen mellem karboniseret og ukarboniseret pasta synes jævn men pga. pastaens indhold af ler og kalk er bestemmelse lidt usikker.

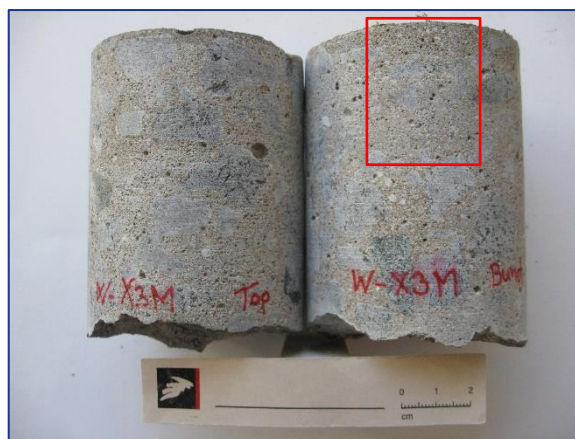
Udfældninger: Nær betonens overflade ses flere forskellige udfældninger i luftporerne. Nær overfladen ses porerne fyldt med en blanding af grovkornet calcit og brucit. Derefter følger til en dybde af ca. 2mm en zone hvor porerne typisk er belagt med en massiv bræmme af ettringit og thaumasit-lignende faser. En enkel luftpore i denne zone indeholder noget som ligner gips. Længere inde i betonen ses små fine ettringite i næsten alle luftporer. Der er ikke observeret udfældninger i revner.

Revner: Pastaen i den karboniserede overflade fremstår krakeleret. En del mikrorevner ses i pastaen i hele det undersøgte areal. Revnerne er orienteret vinkelret på tilslagskornene.

Overflade: Fremstår intakt og plan.



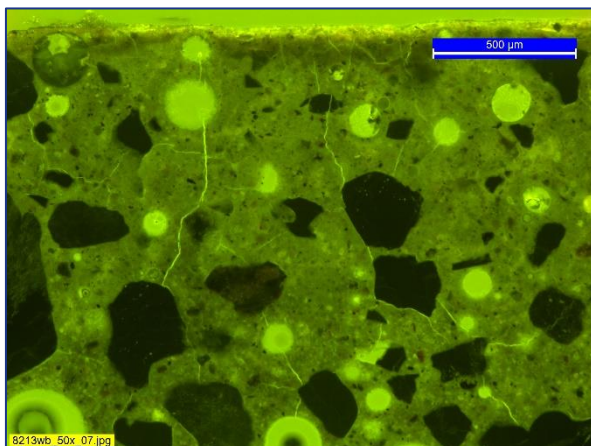
Til venstre ses overfladen af kernen udtaget over vand; til højre undervand.



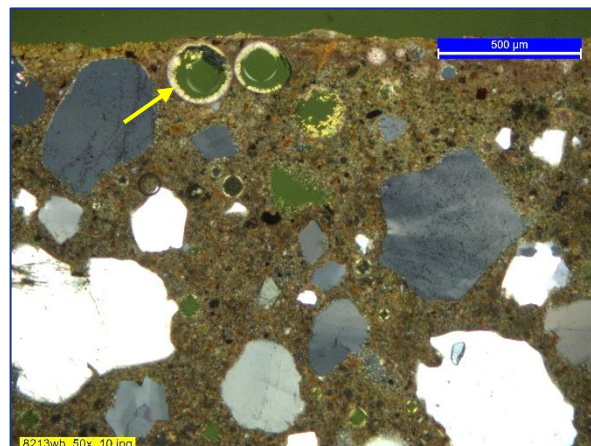
Kernesider. Kernen til højre som er udtaget under vand, er udtaget til analyse. Pastaen fremstår brunlig. Position af slib er markeret.

Mikroanalyse - fotodokumentation

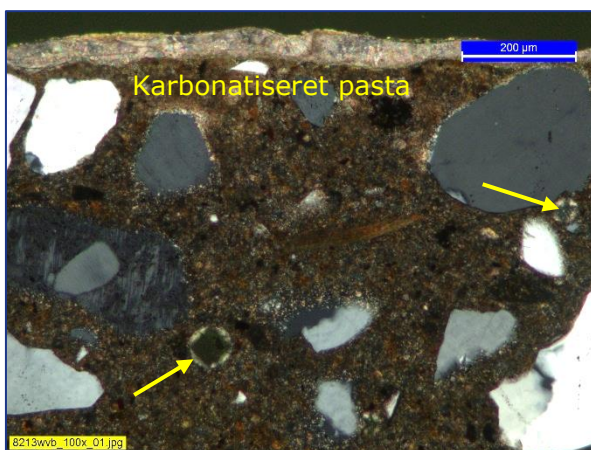
Objekt:	Kernestykke, CEMI rapid, Q, LL	Ordre Nr.	2003135-8
Prøve ID	WB (X3M)	Slib nr.:	8213-WB
		Areal	45x30mm



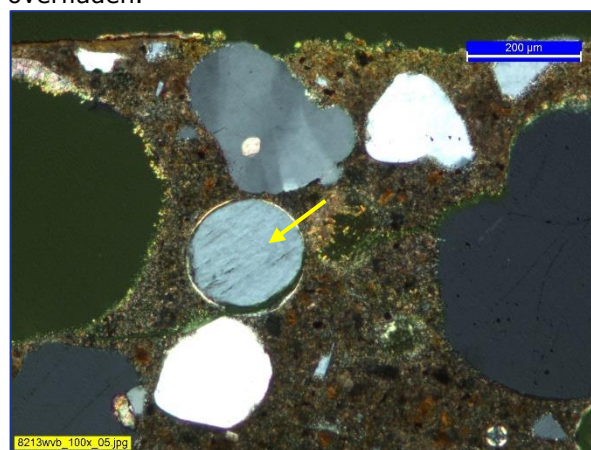
Plan intakt overflade. Pastaen i overfladen er krakeleret. Fluorescerende lys.



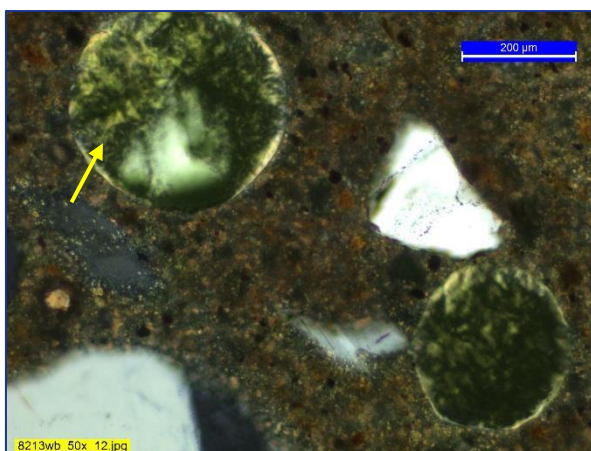
Nærbillede af overfladen taget i X-polariseret lys. Der ses calcit udfældninger i luftporer ved overfladen.



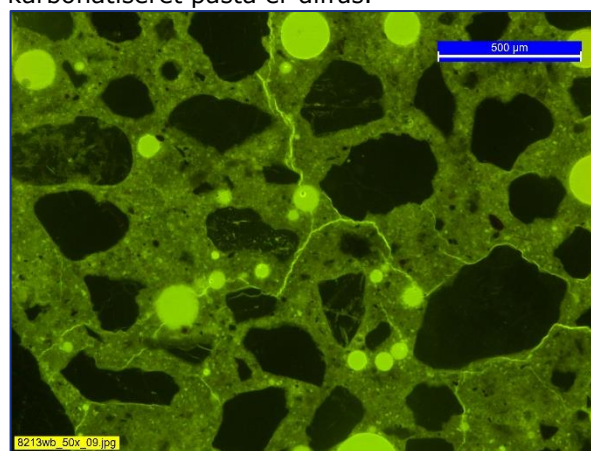
Calcitbelægning ses på den intakte overflade. Udfældninger ses i luftporer.



En gips-lignende fase ses i en luftpore nær overfladen; thaumasit ses på porekanten. Overgangen mellem karbonatiseret og ikke karbonatiseret pasta er diffus.



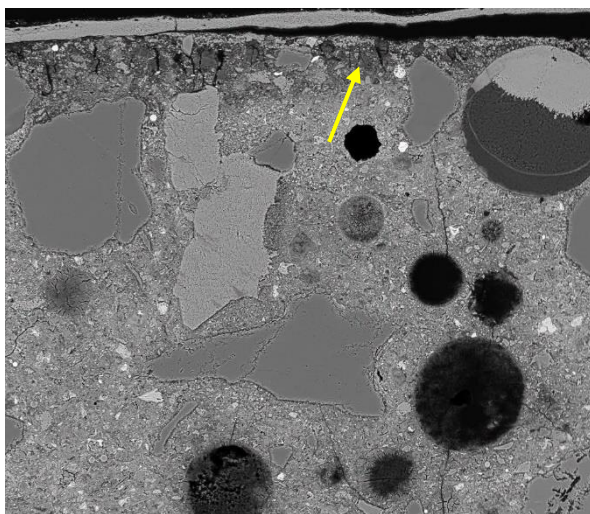
Thaumasit-lignende faser ses i luftporer nær betonoverfladen.



Der ses generelt en del sprøde mikrorevner i pastaen. Fluorescerende lys.

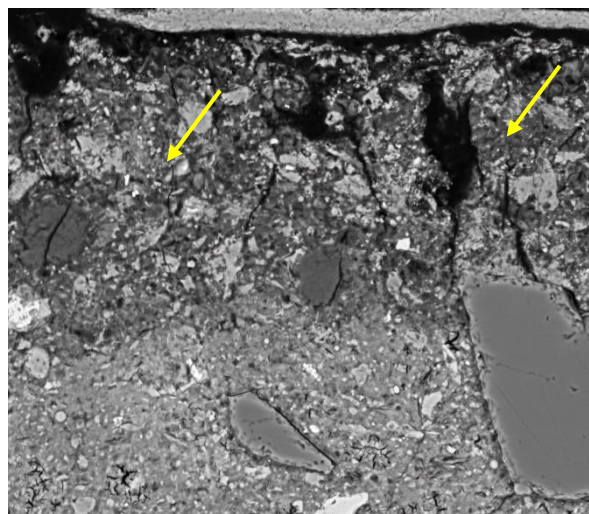
SEM-EDX - fotodokumentation

Objekt:	Kernestykke, CEMI rapid, Q, LL	Ordre Nr.	2003135-8
Prøve ID	WB (X3M)	Slib nr.:	8213-WB
		Areal	45x30mm



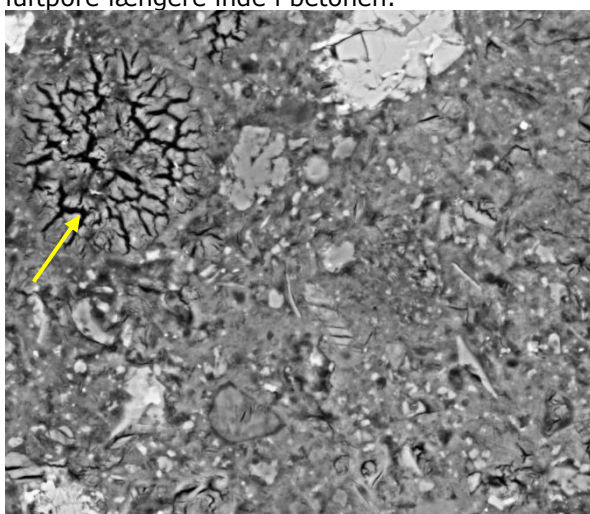
3/1/2019 HFW HV mag WD spot 300 µm
3:39:24 AM 746 µm 15.00 kV 400 x 8.0 mm 5.0

Backscatter foto visende den ydre del af betonen. Overfladen fremstår mørkegrå, udludet for Ca og beriget i Mg (pil). Nær overfladen ses en stor luftpore med calcit udfyldning øverst, nederst brucit. Ettringit ses i luftpore længere inde i betonen.



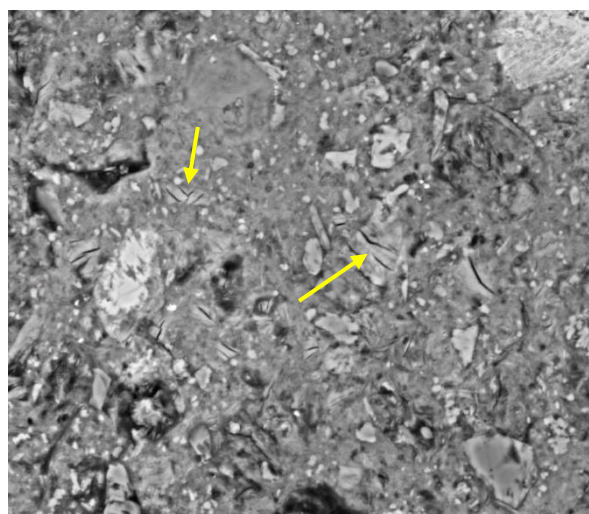
3/1/2019 HFW HV mag WD spot 50 µm
3:41:43 AM 187 µm 15.00 kV 1 592 x 8.1 mm 5.0

Nærbillede af en revnet overflade beriget i Mg. Pletvist ses calcium carbonat i den Mg-rige overflade.



3/1/2019 HFW HV mag WD spot 30 µm
5:06:42 AM 99.4 µm 15.00 kV 3 003 x 8.3 mm 5.0

Nærbillede af betonen i en dybde af ca. 400µm. Ettringit (pil) ses i luftporer og sammenmed Friedelssalt i relicts efter hydratiserede cementkorn.

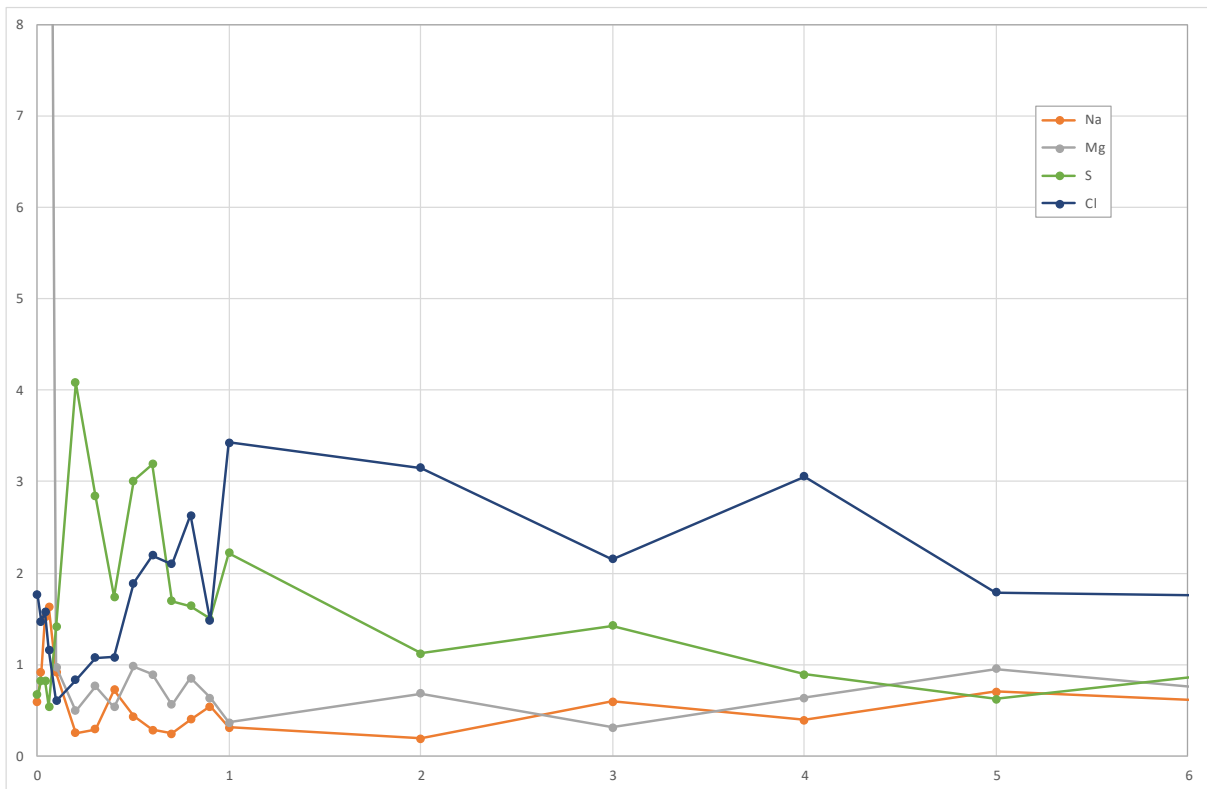
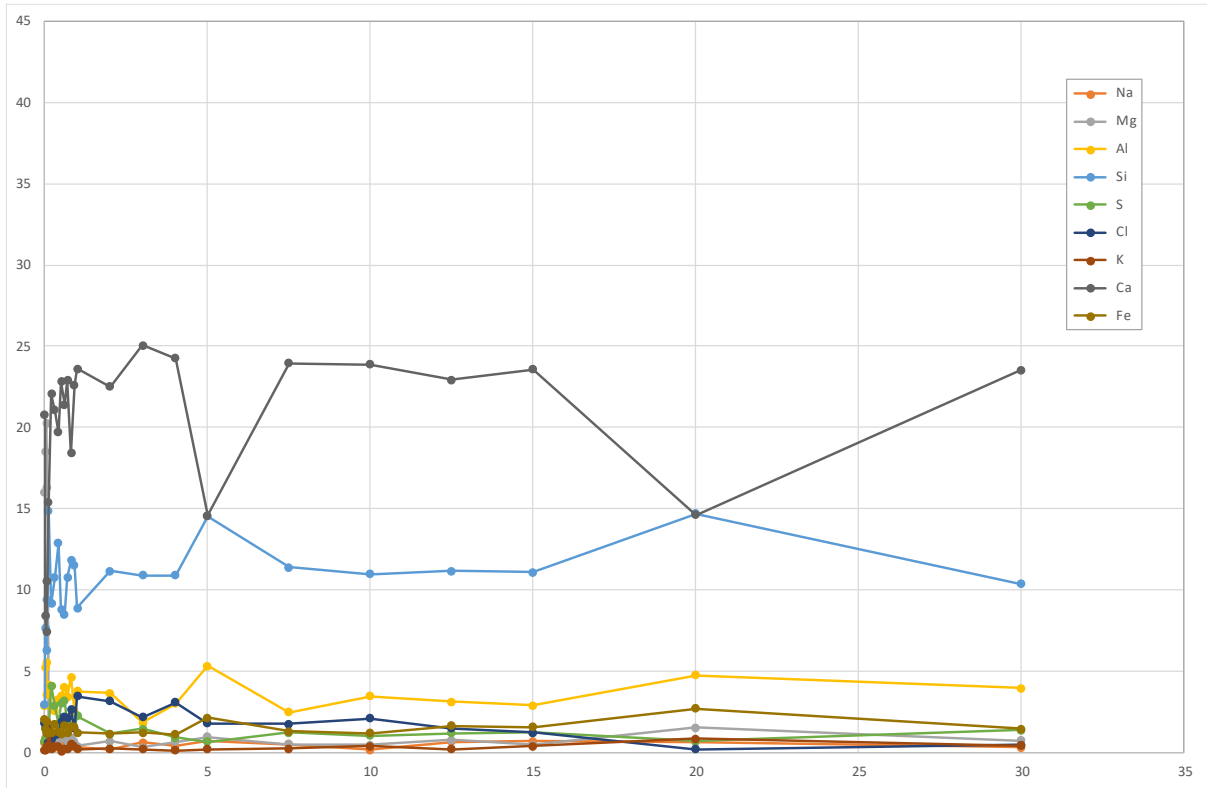


3/1/2019 HFW HV mag WD spot 30 µm
5:09:37 AM 99.3 µm 15.00 kV 3 005 x 8.2 mm 5.0

Nærbillede af pastaen i 4mm's dybde. Der ses en del Friedelssalt i relicts efter hydratiserede cementkorn (pil).

SEM-EDX - Travers

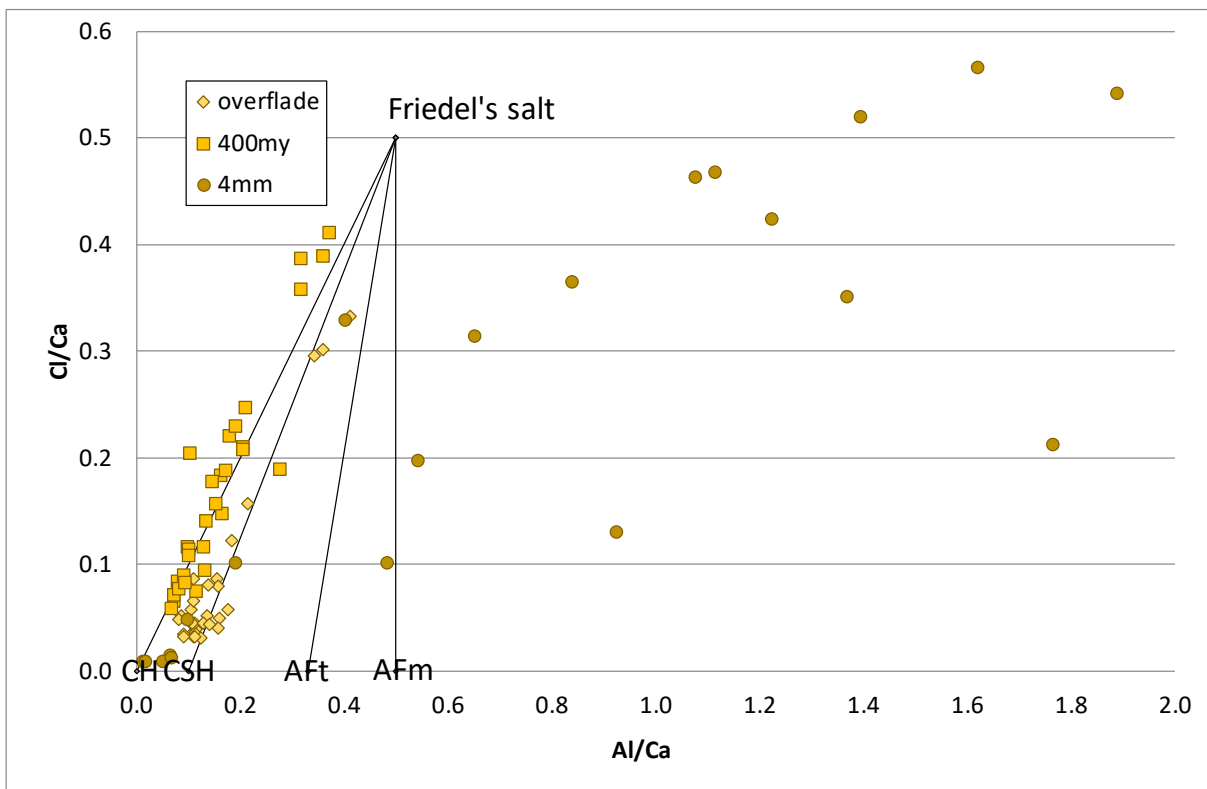
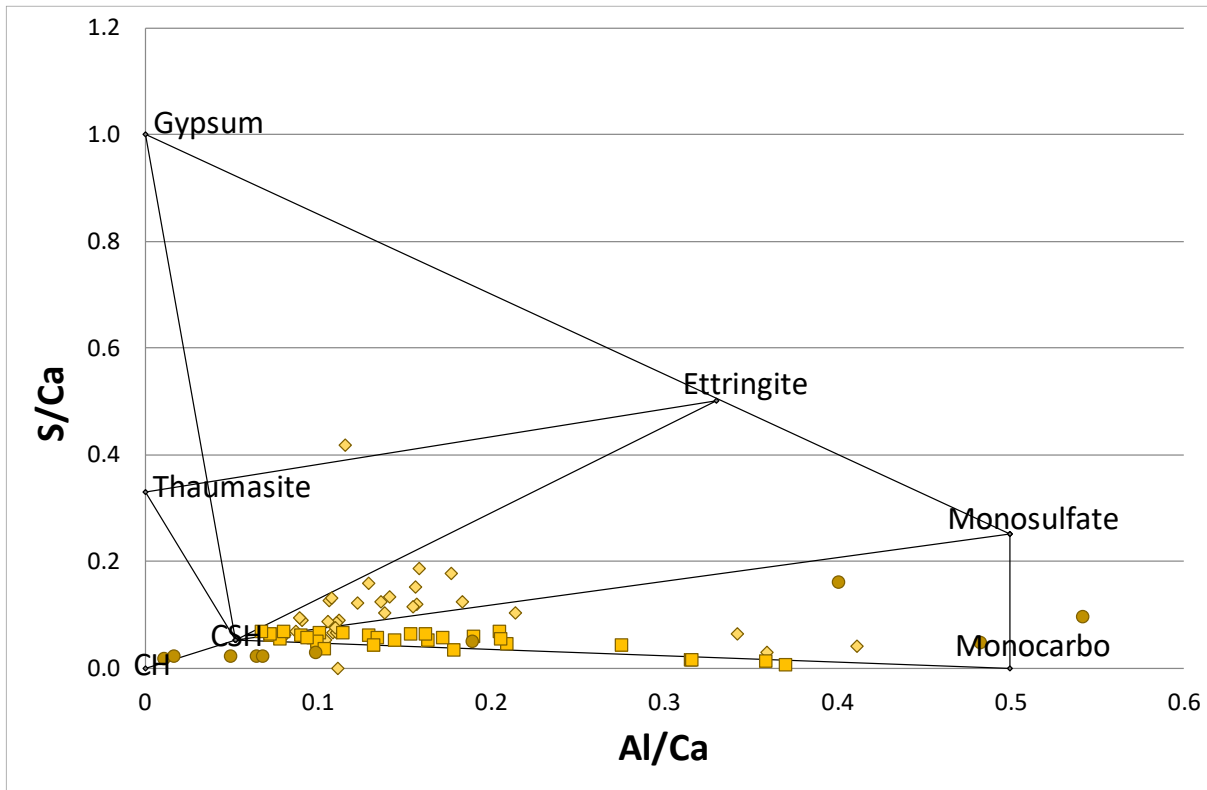
Objekt:	Kernestykke, CEMI rapid, Q, LL	Ordre Nr.	2003135-8
Prøve ID	WB (X3M)	Slib nr.:	8213-WB
		Areal	45x30mm



Elementvariation, i atom%, i relation til dybden fra overfladen, i mm. Nederst ses udvalgte elementer.

SEM-EDX - Faseanalyse

Objekt:	Kernestykke, CEMI rapid, Q, LL	Ordre Nr.	2003135-8
Prøve ID	WB (X3M)	Slib nr.:	8213-WB
		Areal	45x30mm



Fasesammensætningen i systemet.