



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Udvikling af modstandsdygtige betonrør til aggressive miljøer II

MUDP rapport

Maj 2020

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Katja Udbye Christensen, Teknologisk Institut

Martin Kaasgaard, Teknologisk Institut

Jack Anderson, Teknologisk Institut

Claus Pade, Teknologisk Institut

Ulla Hjorth Jakobsen, Teknologisk Institut

Projektgruppen:

Katja Udbye Christensen, Teknologisk institut

Martin Kaasgaard, Teknologisk Institut,

Jack Anderson, Teknologisk Institut

Claus Pade, Teknologisk Institut

Ulla Hjorth Jakobsen, Teknologisk Institut

Claus Olsen, RC Beton

Dieu Minh, RC Beton

Olav Bennike, Aalborg Kloak A/S

Mette Skov Hansen, DIN Forsyning A/S

Steen Hummelgaard, Hedensted Spildevand A/S

Jakob Rasmussen, Fredericia Spildevand og Energi A/S

Jane Møller Mortensen, Jammerbugt Forsyning A/S

ISBN: 978-87-7038-182-6

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse

Indhold

1.	Sammenfatning	4
2.	Indledning	6
3.	Baggrund	7
4.	Formål	9
5.	Opfølgning på rørprojekt 1	10
5.1	TV-inspektion af rørstrækning	10
5.2	Undersøgelse af udborede kerner	12
5.3	Undersøgelser af felteksponerede prøveemner	15
6.	Udvikling og optimering af betonrecepter	19
6.1	Materialer og metode	19
6.2	Resultater	23
7.	Produktion og dokumentation af kalkrør og kalkbrønde	36
7.1	Omfang	36
7.2	Recepter	36
7.3	Støbning af rør og brønde	36
7.4	Dokumentation af egenskaber	37
8.	Test af syreressistens ved felteksponering	40
8.1	Omfang	40
8.2	Felteksponering	40
9.	Eablering af rørstrækninger og brønde	45
9.1	Omfang	45
9.2	Eablerede strækning og brønde	46
10.	Opfølgning på projektet	52
11.	Konklusion	53
12.	Referencer	54
Bilag 1.	Dokumentation fra fuldskalaetableringer	49

1. Sammenfatning

Anvendelse af betonrørsystemer til transport af spildevand har en lang række tekniske, miljømæssige og samfundsøkonomiske fordele. Normalt er kloakvand svagt alkalisk og dermed uskadeligt for betonrør og -brønde, men på strækninger uden ilt kan bakterier under anaerobe forhold danne svovlbrinte. Når svovlbrinten kommer i kontakt med ilt, i de ikke fuldtløbende rørstrækninger, bliver svovlbrinten omdannet til svovlsyre/-syrling. Svovlsyren nedbryder den basiske cementpasta i betonrør over vandlinjen, hvilket kan medføre betragtelige reduktioner i levetiden.

Projektet beskrevet i nærværende rapport bygger videre på resultaterne fra udviklingsprojektet med titlen "Udvikling af modstandsdygtige betonrør til aggressive miljøer" under MUDP-ordningen, J.nr. NST-404-00147 udført i perioden 2012-2015 (herefter omtalt som "Rørprojekt I").

I Rørprojekt I, blev forskellige materialesammensætningers/teknologiers modstandsdygtighed overfor aggressive miljøer undersøgt ved laboratorieforsøg, felteksposering af prøveemner og etablering af en rørstrækning med udvalgte teknologier. Resultaterne fra projektet viste, at alle materialesammensætninger havde forbedret modstandsdygtighed i forhold til den traditionelle beton (referencen). Særligt materialesammensætningen, hvor en del af sandet blev erstattet med kalktilslag, gav lovende resultater. Det blev således besluttet at tage udgangspunkt i netop denne teknologi i nærværende projekt.

Formålet med projektet har været at optimere teknologien med henblik på at opnå en tilfredsstillende modstandsdygtighed overfor syrepåvirkning samt at vise at teknologien kan implementeres i den daglige produktion af betonrør og brøndgods, og dermed at produkter kan bringes på markedet som et alternativ til de traditionelle produkter.

Projektet har været opdelt i følgende aktiviteter:

1. Opfølgning på felteksposering og etableret rørstrækning fra rørprojekt I
2. Udvikling og optimering af materialesammensætning
3. Produktion af rør og brønde
4. Felteksposering af prøveemner
5. Etablering af rørstrækninger og brønde med den nye teknologi

Opfølgningen på rørprojekt I, viste fortsat lovende resultater for teknologien med kalktilslag. Der var ingen synlige tegn på syrepåvirkning i forbindelse med en udført tv-inspektion af rørstrækningen i Vårst, og udtaget borekerner viste kun en svag forvitring i overfladen. Tilstanden af de felteksposerede prøver i brønde i Sønderholm og Ellidshøj var god sammenlignet med tilstanden af referenceprøven.

I laboratoriet på Teknologisk Institut blev betydningen af doseringen af kalktilslag samt af kalktilslagets finhed på syreressistensen undersøgt. Syreressistensen blev vurderet ved 8 og 20 °C iht. en modificerede version af ASTM C267-01. Resultaterne viste et markant lavere massetab for prøveemnerne med kalktilslag i forhold til referencen. Mikrostrukturen af udvalgte prøveemner blev efter forsøgenes afslutning undersøgt for bl.a. thaumasitdannelse. Undersøgelserne gav ikke anledning til bekymring, og mikrostrukturen af emnerne med kalktilslag fremstod i bedre stand end referencebetonen.

På baggrund af laboratorieresultaterne blev det besluttet at arbejde videre med en recept indeholdende 600 kg/m³ 0/2 kalktilslag. De udviklede recepter blev efterfølgende indkøbt i produktionen hos RC Beton i Rødkærsbro, som producerede brønde og rør med kalktilslag til etablering af forsøgsstrækninger og - brønde hos Aalborg Kloak, DIN Forsyning, Fredericia Spildevand og Energi, Hedensted Spildevand og Jammerbugt Forsyning. Der blev i alt etableret 4 rørstrækninger (totalt 893 m) samt 25 brønde. Udover rørstrækninger og brønde blev der nedhængt prøveemner i to brønde med høj svovlbrintebelastning hos hhv. Aalborg Kloak og Hedensted Spildevand. Syrepåvirkningen af de etablerede rør og brønde, samt de nedhængte prøveemner, foregår løbende og det vil variere, hvornår der opstår synlige tegn på korrosion, alt efter miljøet betonen er eksponeret i. Derfor vil forsyningsselskaberne efter projektets afslutning løbende registrere udviklingen i tilstanden af de etablerede forsøgsstrækninger.

Resultaterne fra projektet har vist at der opnås en forbedret syreressistens for de udviklede materialesammensætninger med kalktilslag, sammenlignet med en traditionel materialesammensætning. Desuden har de udførte analyser ikke givet anledning til at særlig bekymring i relation til udfordringer med thaumasitdannelse i betonen med kalktilslag. Det kan på baggrund af resultaterne genereret ifm. Rørprojekt I samt nærværende projekt konkluderes, at betonrør og -brønde fremstillet med kalktilslag med god sandsynlighed vil have bedre langtidsholdbarhed overfor svovlbrinterelateret korrosion end produkter baseret på konventionel teknologi.

Der stilles i dag ikke krav til syreressistensen i standarderne for afløbsprodukter af beton. Dette forhold kan virke hæmmende for implementeringen af teknologien, idet der således mangler et incitament for producenterne til at anvende betonsammensætninger med god syreressistens. Det forventes, at materialeomkostningerne ved fremstilling af afløbsprodukter med kalktilslag vil være højere end for traditionelle afløbsprodukter, bl.a. fordi kalksten ikke er udbredt naturligt forekommende i Danmark. De højere materialeomkostninger retfærdiggøres dog set i en levetidsbetragtning af den forventede længere levetid i aggressive miljøer af produkter fremstillet med den nye materialesammensætning end levetiden for konventionelle afløbsprodukter i beton.

2. Indledning

Det er velkendt, at dannelse af svovlbrinte fra bakterievækst i afløbssystemer kan medføre korrosion af betonkloakrør. Siden første halvdel af 1900-tallet har dette fænomen været opfattet som et væsentligt problem på både nationalt og internationalt niveau, og gennem tiden har flere forskellige løsningsmodeller været afprøvet – indtil videre uden fuldt tilfredsstillende resultat [1].

Kommunalreformens gennemførelse i 2007 har betydet, at rensning af spildevand i stigende grad centraliseres. Det medfører lange tryklødnings og dermed længere opholdstid i fuldtløbende rør, hvor kloakvandet ikke tilføres ilt. Derudover separeres spildevand og regnvand i stigende grad med øget koncentrationen af diverse kemiske stoffer i spildevandet til følge. Både tendensen med stigende grad af centraliseret rensning og den øgede separering af spildevand og regnvand har den konsekvens, at dannelse af svovlbrinte fra anaerob bakterievækst fremmes [2][3].

Når den dannede svovlbrinte bringes i kontakt med ilt på strækninger med gravitationsrør, der ikke er fuldtløbende, vil den omdannes til svovlsyre/-syrling, som kan have en nedbrydende virkning på betonkloakrør. Det sker ved en korrosionsproces, hvor svovlsyren nedbryder den basiske cementpasta i betonrøret over vandlinjen. Den svovlbrinte-forårsagede korrosion kan medføre, at levetiden af betonrør reduceres kraftigt i de mest aggressive miljøer [4].

Det danske afløbssystem renoveres og udbygges for ca. 2 mia. kr. årligt [5], og en del af disse investeringer risikerer at gå tabt, hvis der ikke udvikles rør, der er modstandsdygtige over for svovlbrinte til brug i særligt aggressive miljøer. Følgende eksempler understreger problemets aktualitet:

- Aalborg Kommunes Kloakforsyning har gennemført udskiftninger af flere nyere kilometerlange betonledninger, idet der pga. af svovlbrintekorrosion var overhængende risiko for sammenstyrtnings. I 2005 oplevede forsyningsselskabet i Aalborg således flere brud på en betonledning fra 1979.
- I Københavns Energi A/S har man flere eksempler på svovlbrintekorrosion. Dette har givet anledning til indsivning af grundvand med øget pumpebelastning og tæring af pumpestationer til følge. I et andet tilfælde har det medført, at afdræningen gennem de utætte ledninger har trukket forurening fra et gammelt kemikaliedepot på Renseanlæg Damhusåen over i kældre under parcelhuse.

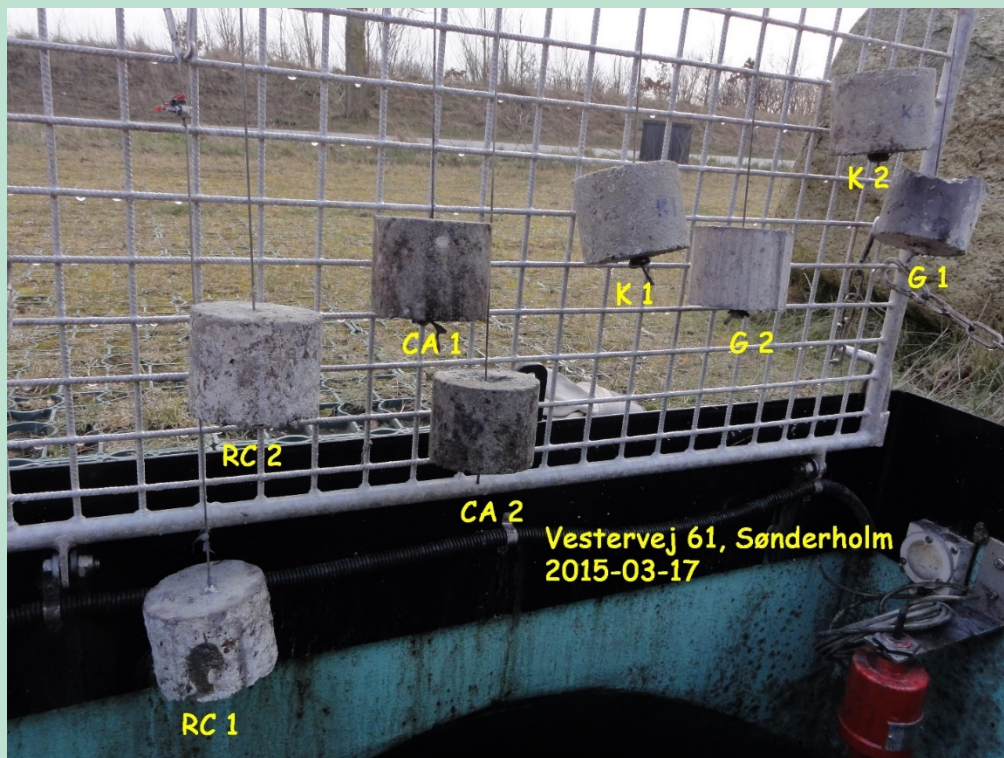
3. Baggrund

Med afsæt i udfordringerne med korrosion af betonkloakrør gennemførtes i perioden fra 2012 til 2015 et udviklingsprojekt med titlen "Udvikling af modstandsdygtige betonrør til aggressive miljøer" under MUDP-ordningen, J.nr. NST-404-00147 " [6] (herefter omtalt "Rørprojekt I"). Projektets hovedformål var at udvikle betonrør, med øget modstandsdygtighed og dermed også levetid i ekstremt aggressive miljøer. I Rørprojekt I blev fire forskellige teknologier til forbedring af betonrørs modstandsdygtighed afprøvet i laboratoriet, herunder:

1. Kalkstenstilslag, som delvis erstatning for traditionelle danske tilslagsmaterialer til beton. Kalkstenstilslaget fungerer som offermateriale, der neutraliserer syren, så angreb på cementpastaen reduceres.
2. Calcium Aluminat Cement, som giver et mere syreresistent hydratiseringsprodukt (aluminathydrat er stabilt ned til pH 3-4). Ved syrenedbrydning af calcium aluminathydrater dannes mere aluminathydrat, som fylder porerne.
3. Slaggecement, som giver en tættere mikrostruktur hvormed syreindtrængning reduceres.
4. Geopolymer (alkalisk aktiveret flyveaske/slagge) er en syreresistent binder som kan anvendes som erstatning for almindelig cementpasta.

For alle teknologierne blev der fremstillet prøveemner til bl.a. test af syrebestandighed i henhold til en modificeret udgave af standarden ASTM C267. Resultaterne fra laboratoriet viste, at alle de udviklede og testede teknologier forbedrer betonens modstandsdygtighed over for svovlsyre-påvirkning, og den teknologi, der klarede sig bedst i laboratorieforsøgene, var teknologi 1 (kalkstenstilslag som delvis erstatning for traditionelle tilslagsmaterialer).

Ud over laboratorieforsøgene blev der i projektet også gennemført afprøvning i felten af udvalgte teknologier. Betonrør med følgende materialesammensætninger blev således fremstillet og indbygget i en prøvestrækning på 225 meter ved Vårst i Nordjylland: Beton med fint kalkstenstilslag som delvis erstatning for traditionelle tilslagsmaterialer og beton baseret på slaggecement. Prøvestrækningen inkluderede desuden rør med coatet betonoverflade samt referencerør med traditionel betonsammensætning. Endelig blev afprøvningen af de fire teknologier i laboratoriet suppleret af felteksponeringsforsøg, hvor prøveemner med de forskellige betonsammensætninger blev nedhængt i kloakbrønde på to forskellige lokaliteter med høj svovlbrinteforekomst, jf. Figur 1.



FIGUR 1. Felteksponering af betonemner. RC=reference, CA=Calcium aluminat cement, K=kalktilslag, G=geopolymer.

Både etablering af prøvestrækningen og eksponering af prøveemner i kloakbrønde blev udført med den hensigt, at de forskellige teknologiers performance i deres "naturlige" omgivelser kan følges i en årrække.

4. Formål

I MUDP-projektet "Udvikling af modstandsdygtige betonrør til aggressive miljøer II" (2016-2019) videreførtes det arbejde, som blev påbegyndt i Rørprojekt I. Eftersom laboratorieforsøgene viste den bedste syreressistens for emnerne med kalktilslag som delvis erstatning for traditionelt tilslag, er der i projektet taget udgangspunkt i denne teknologi.

Det har været ambitionen med dette opfølgende projekt at videreudvikle og skabe det nødvendige dokumentationsgrundlag for betonrør med markant forbedret modstandsdygtighed over for svovlbrinte-forårsaget korrosion. Det er søgt opnået gennem optimering af betonsammensætning, optimerede produktionsmetoder og udvidede procedurer for kvalitetskontrol.

Projektet har været opdelt i følgende overordnede aktiviteter:

1. Opfølgning på tilstanden af rørstrækning og felteksponerede prøveemner fra tidligere projekt.
2. Udvikling og optimering af recepter med kalktilslag baseret på målt syreressistens iht. en modificeret udgave af ASTM C267.
3. Indkøring af recepter hos RC Beton A/S samt produktion og dokumentation af betonrør og -brønde med kalktilslag (også omtalt kalkrør og kalkbrønde i nærværende rapport) inklusive optimering af produktionsprocesser
4. Felteksponering af udvalgte prøveemner.
5. Etablering af fuldskalastrækninger hos de medvirkende forsyningsselskaber, herunder Aalborg Kloak A/S, DIN Forsyning A/S, Fredericia Spildevand og Energi A/S, Hedensted Spildevand A/S og Jammerbugt Forsyning A/S.

5. Opfølgning på rørprojekt 1

I rørprojekt I, blev der nedhængt betonprøver i to kloakbrønde og etableret en rørstrækning med udvalgte teknologier til reduktion af svovlbrinteforårsaget korrosion med henblik på at kunne monitorere teknologiernes holdbarhed over tid. I nærværende projektet, er der gennemført opfølgende undersøgelser af tilstanden af de eksponerede rør og prøveemner. Undersøgelserne omfatter:

- TV-inspektion af rørstrækning etableret i oktober 2014.
- Undersøgelse af udborede kerner fra kalkrør fra ovennævnte rørstrækning.
- Undersøgelse af prøver nedhængt i brønd i november 2013.

5.1 TV-inspektion af rørstrækning

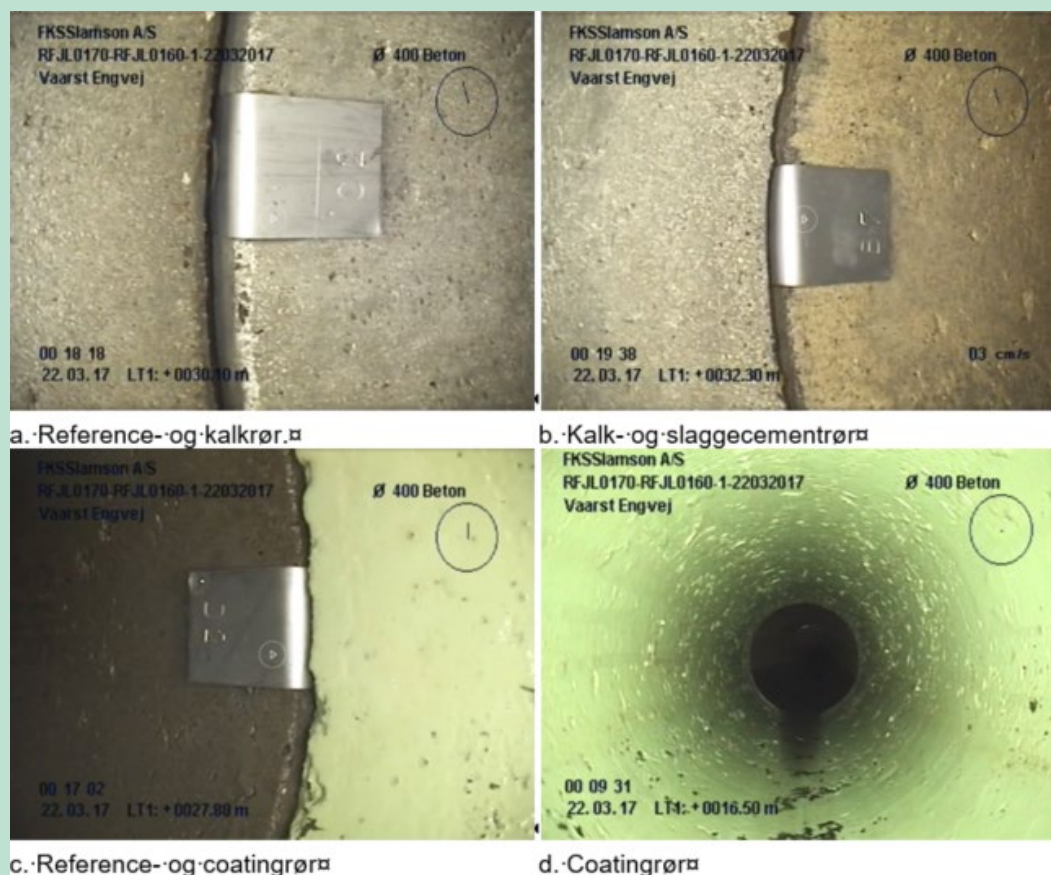
Rørstrækningen etableret i Rørprojekt I, bestod af i alt 4 teknologier, herunder:

- Almindelige betonrør som reference.
- Almindelige betonrør med coating.
- Betonrør med slaggecement (teknologi 3, jf. kapitel 3).
- Betonrør med fint kalktilslag (teknologi 1, jf. kapitel 3).

TV-inspektion af rørstrækningen blev udført i marts 2017, altså omkring 2,5 år efter etablering. I Figur 2 ses et billede fra tv-inspektionen. Hvert rør er forsynet med en ID-plade i rustfrit stål, som tillader identifikation af det enkelte rør og den anvendte teknologi. Umiddelbart kunne der ikke spores nogen begyndende nedbrydning af rørene, bortset fra rørene med coating, hvor der kunne konstateres afskalning af coating i bunden af rørene. Dette skyldes formegentlig ikke nedbrydning af coatingen i sig selv, men dårlig vedhæftning mellem betonrør og coating. Billeder fra tv-inspektionen fremgår af Figur 3.



FIGUR 2. Billeder fra TV-inspektion af rørstrækning udlagt ifm. rørprojekt I



FIGUR 3. Nærbilleder fra TV-inspektion af rørstrækning udlagt ifm. rørprojekt I.

5.2 Undersøgelse af udborede kerner

Der blev i september 2018 udboret 4 kerner fra et af de udlagte kalkrør til analyse i laboratoriet på Teknologisk Institut. 2 af kernerne blev udboret i toppen og 2 blev udboret i bunden. Udboringen kan ses på Figur 4. Der var i analysen særlig fokus på thaumasit, som i visse situationer kan dannes ved en reaktion mellem betonens cementpasta, sulfater og carbonater. Thaumasit kan forårsage store reduktioner i betonstyrken og forkorte levetiden markant.



FIGUR 4. Billede af udboring af kerner fra kalkrør etableret i rørprojekt I.

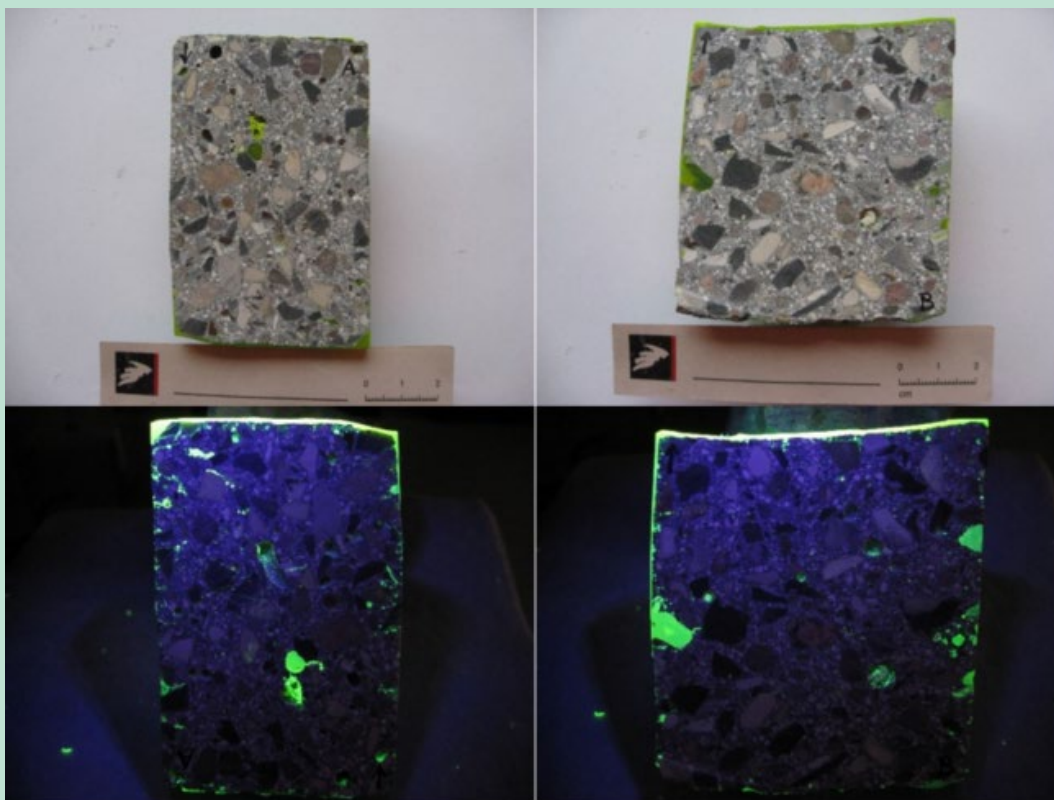
Der blev udført en petrografisk analyse og en SEM-EDX-analyse på en kerne fra toppen af røret (hvor betonen er mest udsat for svovlbrinte) og en kerne fra bunden af røret. Kernerne kan ses i Figur 5 og planslib kan ses Figur 6. Bemærk, at noget af overfladen af kernen fra toppen, er knækket af ifm. udboringen. Metoden for den petrografiske analyse og SEM-EDX-analysen er nærmere beskrevet i afsnit 6.1.5.



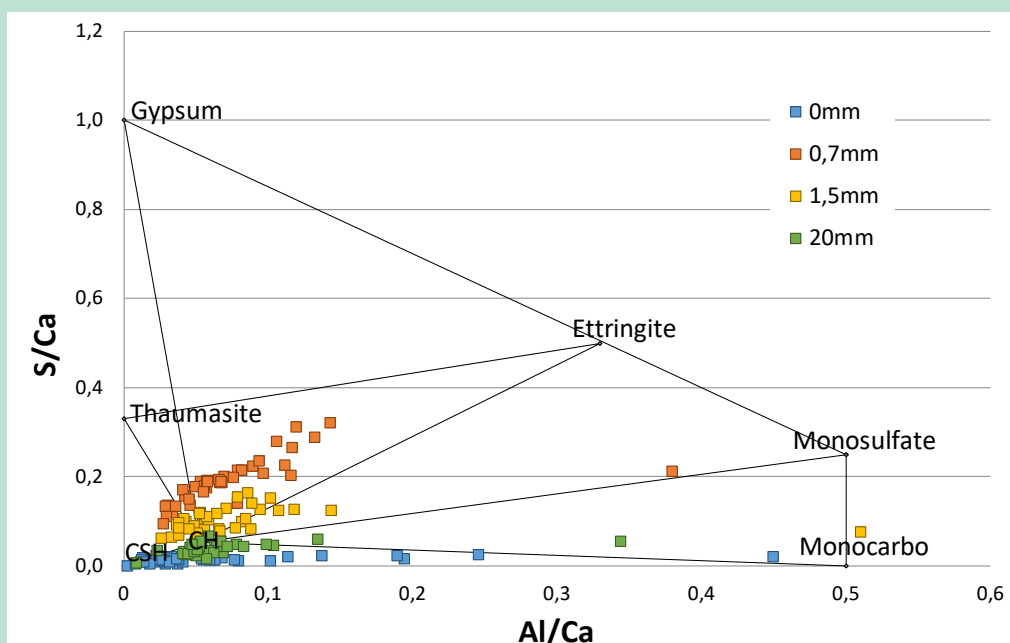
FIGUR 5. Udborede kerner fra kalkrør fra rørprojekt I. Pilen peger mod indersiden af røret. Til venstre: kerne fra toppen, til højre: kerne fra bunden.

Resultaterne fra den petrografiske analyse viste en svag forvitring i overfladen af kernen udtaget fra toppen af røret. Der var i ingen af kernerne tegn på afskalning eller omdannelse af betonoverfladen til gips, som typisk dannes når cementpastaen bliver syrepåvirket. Dog ses der på kernen udtaget i toppen af røret en gipsudfældning på overfladen.

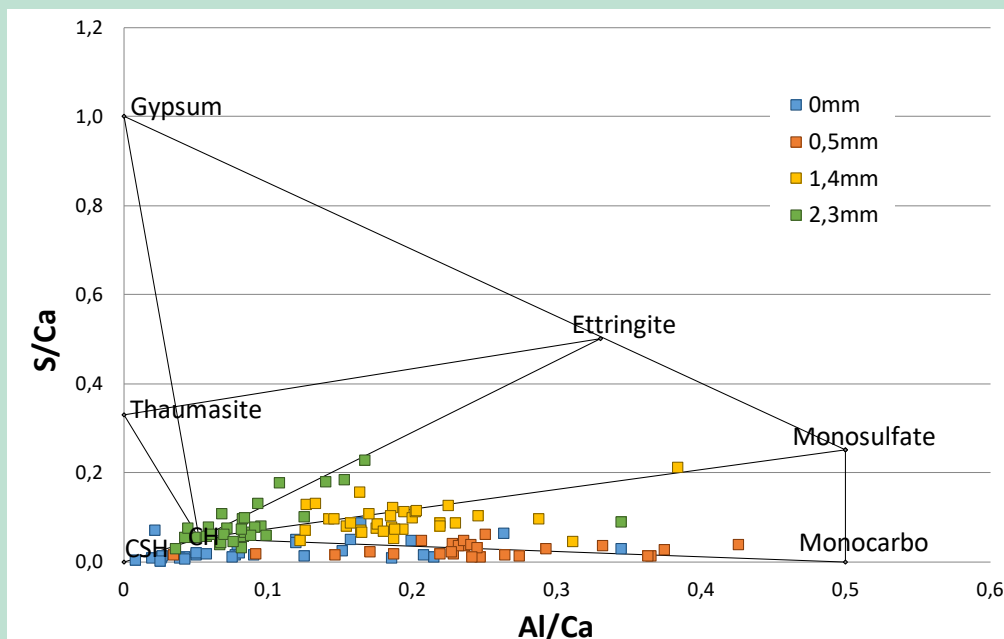
De mikroskopiske analyser viste ingen synlige tegn på dannelse af thaumasit. Fasediagrammerne fra SEM-EDX-analysen, jf. Figur 7 og Figur 8, kan imidlertid indikere, at der muligvis er thaumasit til stede i de yderste 0,7 mm af kernen udtaget fra toppen af røret. Fasediagrammerne viser forholdet mellem Al/Ca og S/Ca for analyserede punkter i prøveemnerne. I fasediagrammerne er Al/S forholdet for forskellige faser plottet ind. Målepunkternes placering i diagrammet angiver hvad pastaen det pågældende sted antageligt består af. Dermed kan diagrammerne bruges til at bestemme/vurdere omdannelser i pastaen. Målingerne er foretaget i forskellige afstande fra overfladen af prøveemnerne. For borekernen i toppen, ses i afstand 0,7 mm fra indvendig overflade en forskydning af målepunkterne mod enten gips og thaumasit eller mod gips alene. Eftersom thaumasit ikke er observeret i kernerne, er der ingen endegyldige tegn på thaumasit.



FIGUR 6. Epoxyimpregneret planslib af kerner udboret fra kalkrør, vist i almindeligt lys og fluorescerende lys. Til venstre: kerne fra toppen, til højre: kerne fra bunden.



FIGUR 7. Fasediagram for borekerne udtaget i toppen af kalkrøret.



FIGUR 8. Fasediagram for borekerne udtaget i bunden af kalkrøret.

5.3 Undersøgelser af felteksponerede prøveemner

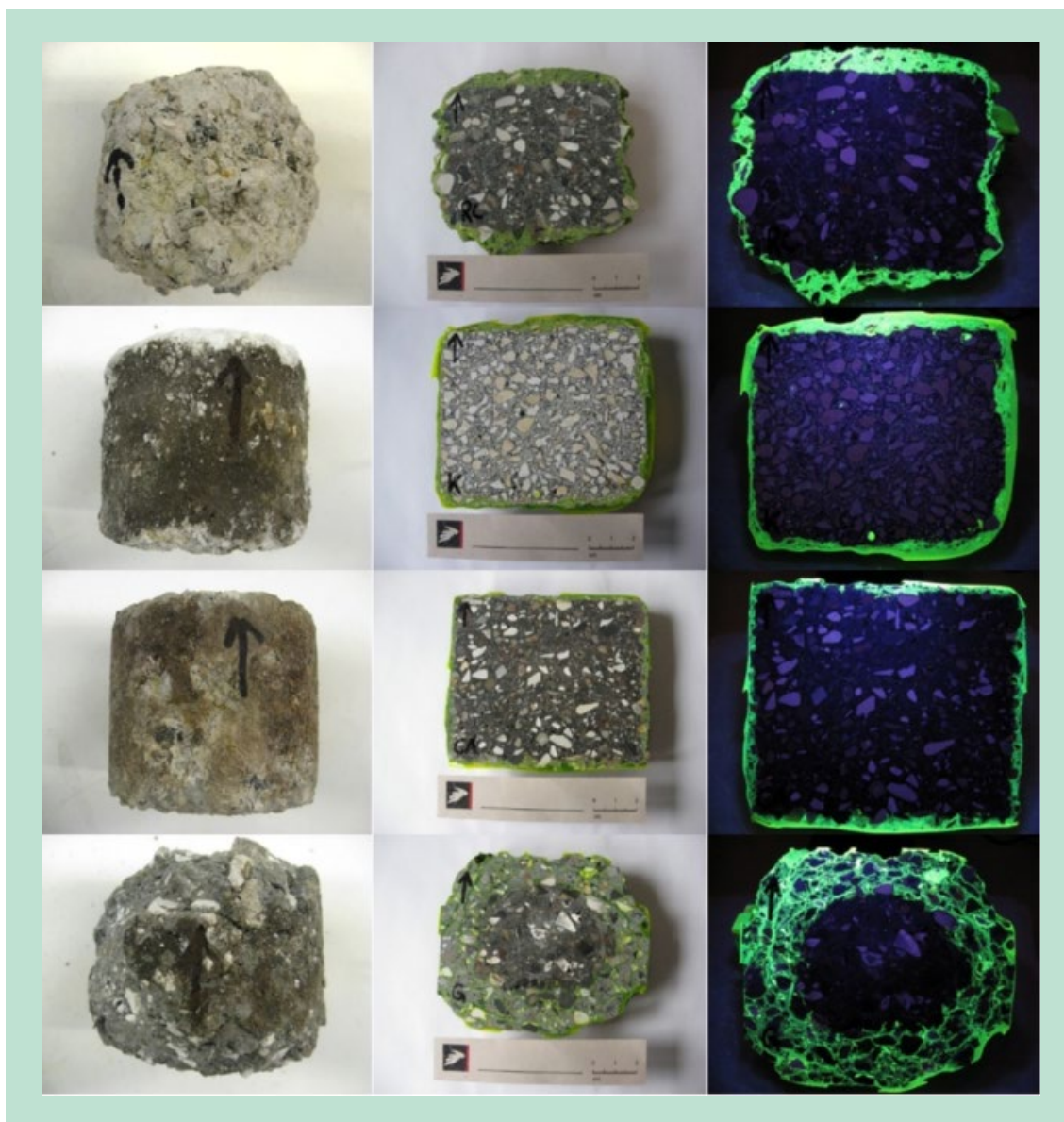
I Rørprojekt I blev der i november 2013 nedhængt prøveemner i to kloakbrønde, jf. Figur 1. Prøveemnerne var cylindriske prøver med en diameter på 100 mm og en højde på 80 mm produceret på en gyrokompaktor på Teknologisk Institut. Følgende betontyper blev nedhængt:

- Almindelig beton som reference
- Beton med kalkstenstilslag
- Beton med calcium aluminat cement
- Beton med geopolymert (alkalisk aktiveret flyveaske)

Prøverne blev hjemtaget til laboratoriet på Teknologisk Institut i januar 2017, altså efter omkring 3 års eksponering. Der blev foretaget en petrografisk analyse og en SEM-EDX-analyse på prøveemnerne. Emnerne kan ses af Figur 9 og Figur 10. Undersøgelserne viste, at reference- og geopolymertprøverne var markant reduceret i størrelse som resultat af nedbrydning og afskalning, hvor store dele af betonen var forsvundet. I alle prøveemner var der dannet en porøs zone. Den porøse zone var 2-3 mm i kalktilslagsbetonen og calciumaluminatbetonen, 8 mm i referencebetonen og omkring 20 mm i geopolymertbetonen, i hvilken der også var betydelig revnedannelse, jf. planslibene vist i Figur 10. Prøverne med kalktilslag og calcium aluminat cement er på trods af omdannelsen af det yderste lag beton, relativt intakte. Bemærk at der på prøven med kalktilslag, er et overskydende lag af epoxy på ydersiden af kernen.

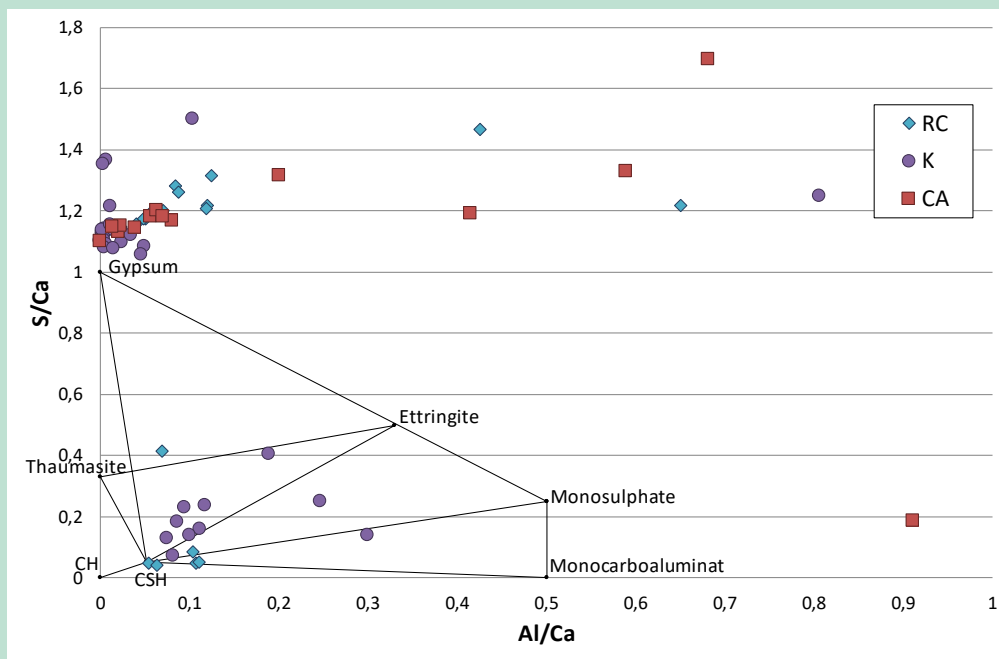


FIGUR 9. Felteksporerede prøver fra rørprojekt I.



FIGUR 10. Planslib af feltekspionerede prøver fra rørprojekt I. Fra toppen: Reference, kalktilslag, calcium aluminat cement og geopolymers.

Fasediagrammerne for referencen, prøven med kalktilslag og prøven med calcium aluminat cement er vist i Figur 11. Målepunkterne for prøveemnet med geopolymers falder udenfor diagrammet og er derfor ikke inkluderet. Det skyldes den særlige bindertype, som giver en Ca-fattig pasta. I fasediagrammet ses det tydeligt, at der er dannet gips (angivet som "gypsum" i diagrammet) i alle emner. Der er ingen umiddelbare tegn på dannelse af thaumasit, hvilket heller ikke blev observeret i forbindelse med de optiske mikroskopanalyser.



FIGUR 11. Fasediagram for feltekspnærede prøver fra rørprojekt I. RC=reference, K= kalktilslag, CA=calcium aluminat cement.

6. Udvikling og optimering af betonrecepter

6.1 Materialer og metode

6.1.1 Omfang

Når betonrør med kalktilslag bliver svovlsyrepåvirket, omdannes kalken til gips og fungerer således som et offermateriale der samtidig neutraliserer syren og dermed hæmmer korrosion af cementpastaen. Der er i projektet udviklet 5 recepter med kalktilslag til rør og 1 recept med kalktilslag til brønde på baggrund af reference recepter fra RC Beton. Indhold og kornstørrelse af det anvendte kalktilslag er væsentlig for rørenes syreressistens, derfor er recepterne tilsat forskellige mængder kalktilslag samt kalktilslag i forskellig kornstørrelse med henblik på at udvikle og optimere en recept med tilfredsstillende syreressistens.

De udviklede rørrcepter inkl. referencen omfatter:

- REF: Reference rørrcept fra RC Beton
- K300: Sandet er delvist erstattet med 300 kg/m³ 0/2 kalktilslag
- K450: Sandet er delvist erstattet med 450 kg/m³ 0/2 kalktilslag
- K600: Sandet er delvist erstattet med 600 kg/m³ 0/2 kalktilslag
- K1/3: Sandet er delvist erstattet med 600 kg/m³ 1/3 kalktilslag
- K100%: Alt tilslag er erstattet af kalktilslag i fraktionerne 0/2, 1/3 og 7/12.

De udviklede brøndrecepter inkl. referencen omfatter:

- BREF: Reference brøndrecept fra RC Beton
- B-K600: Sandet er erstattet med 600 kg/m³ 0/2 kalktilslag

Alle rørrcepter har samme pastaindhold og v/c-tal. Det samme gælder for brøndrecepterne. Recepterne fremgår af Tabel 1 og Tabel 2.

Rørprøveemnernes syreressistens er testet i en 1% svovlsyreopløsning ved 20 og 8 °C iht. en modificeret udgave af ASTM C267-01 i 126 døgn. Efter 126 døgn er emnerne placeret i demineraliseret vand. Prøvningsprogrammet skal belyse, hvordan temperatur samt ændrede miljøbetingelser har indflydelse på korrosionen med særlig fokus på dannelsen af thaumasit. Der er udtaget et prøveemne af REF og K600 til petrografisk- og SEM-EDX-analyse efter 126 dages eksponering i en 1% svovlsyreopløsning efterfulgt af 149 dages eksponering i demineraliseret vand. Derudover er der udtaget et prøveemne af K600 efter 126 dages eksponering i en 1% svovlsyreopløsning efterfulgt af 337 dages eksponering i demineraliseret vand.

Brøndprøveemnernes syreressistens er testet i en 1% svovlsyreopløsning i 126 døgn ved 8 °C iht. en modificeret udgave af ASTM C267-01.

6.1.2 Materiale og recepter

I projektet er der taget udgangspunkt i to referencerecepter fra RC Beton, herunder en tørbeton til fremstilling af rør og en selvkompakterende beton til fremstilling af brønde. Der er ikke anvendt tilsætningsstoffer i rørrcepterne ifm. laboratorieforsøgene.

For rørrcepterne er en del eller alt tilslag i referencerecepten udskiftet med kalktilslag i forskellige substitutionsgrader og kornstørrelse. Kalktilslaget er vist i Figur 12 og recepterne er gengivet i Tabel 1. Den blå firkant markerer de steder i recepterne, hvor der er foretaget ændringer.



FIGUR 12. De anvendte kalkfraktioner, fra venstre 0/2, 1/3 og 7/12.

TABEL 1. Oversigt over recepter til rør anvendt til laboratorieforsøg angivet i kg/m³ VOT.

Delmateriale	Densitet [kg/m ³]	Absorption [%]	REF	K300	K450	K600	K1/3	K100%
CEM I 52,5 R (IS/HA<2)	3125		224	224	224	224	224	224
CEM I 52,5 N SR3 LA	3200		105	105	105	105	105	105
Flyveaske	2300		42	42	42	42	42	42
Sand 0/4 E	2625	0,2	914	602	446	290	760	0
Sand 2/4 P	2500	2,0	184	184	184	184	0	0
Sten 2/8 P	2445	2,8	736	736	736	736	446	0
Kalk 0/2	2520	4,2	0	300	450	600	0	820
Kalk 1/3	2440	5,2	0	0	0	0	600	180
Kalk 7/12	2440	5,2	0	0	0	0	0	793
Vand	1000		122,5	122,5	122,5	112,5	122,5	122,5
Total			2328	2316	2310	2304	2300	2287
v/c			0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35

På baggrund af resultaterne fra forsøg med rørrcepterne, blev der for brøndrecepterne kun valgt en kornstørrelse og substitutionsgrad. Recepterne er gengivet i Tabel 2.

TABEL 2. Oversigt over recepter til brønde anvendt til laboratorieforsøg angivet i kg/m³ VOT.

Delmateriale	Densitet [kg/m ³]	Absorption [%]	Vandindhold [%]	B-REF	B-K600
CEM I 52,5 R (IS/HA<2)	3160			328	328
CEM I 52,5 N SR3 LA	3210			72	72
Sand 0/2 E	2620	0,1		735	110
Sten 8/16 A	2630	0,8		995	995
Kalk 0/2	2520	4,2			600
Superplastificerende	1060		75	2,5	3,1
Luftindblanding	1000		98	0,9	0,9
Vand	1000			151,2	150,8
Total				2285	2260
v/c				0,385	0,385

6.1.3 Støbning af prøveemner

For hver rørrecept er der blandet tilstrækkeligt materiale til fremstilling af 10 cylindriske prøveemner med en diameter på 100 mm og en højde 90 mm. Prøverne er fremstillet ved kompaktering i en ICT kompaktor, jf. Figur 13, som kompakterer emnerne med en kombination af tryk og rotationer. Der er ved hver støbning, afvejet den mængde materialer der skal til, for at opnå densiteterne angivet i Tabel 1 og en højde af prøveemnet på 90 mm. Røremnerne er efter støbning blevet indpakket i en plastikpose og opbevaret ved 20 °C i 1 døgn, hvorefter de er blevet vandlagret ved 20 °C.

**FIGUR 13.** ICT kompaktor anvendt til støbning af rørprøvemener.

Brøndrecepterne er selvkompakterende og er derfor støbt i Ø100 cylindere. Der er støbt 3 cylindere af hver blanding, som efterfølgende er blevet placeret ved 20 °C. Efter 1 døgn er emnerne afformet og vandlagret ved 20 °C. Da prøverne havde opnået en tilstrækkelig styrke, blev de skåret over på midten til 2 cylindere med en højde og diameter på 100 mm.

6.1.4 Test af syreressistens

Der er foretaget test af syreressistensen af de støbte prøvemener iht. en modificeret udgave af ASTM C267-01. Prøveemnerne er 28 døgn efter støbning taget op af vandbadet, overskydende vand er tørret af og masserne af de enkelte prøveemner registreret, hvorefter prøverne er blevet eksponeret i en 1% svovlsyreopløsning i plastkasser. Hver kasse indeholder 9 liter af opløsningen og 6 prøveemner, herunder 3 prøver fra 2 forskellige recepter, jf. Figur 14 (på nær kassen med brøndemnerne).



FIGUR 14. Kasse med prøveemner eksponeret i 1% svovlsyreopløsning.

Kasser med identisk indhold er placeret henholdsvis i laboratoriet ved 20 °C og i køleskab ved 8 °C (på nær brøndemnerne, som kun er testet ved 8 °C). Foruden at skulle simulere temperaturen i en rørstrækning, er de 8 °C også valgt, for at undersøge eventuelle dannelser af thaumasit, som typisk dannes ved lave temperaturer.

Nedenfor ses en oversigt over kasser og prøver:

- 2 kasser, hver indeholdende 3 REF og 3 K1/3 eksponeret ved 20 og 8 °C.
- 2 kasser, hver indeholdende 3 K450 og 3 K600 eksponeret ved 20 og 8 °C.
- 2 kasser, hver indeholdende 3 K300 og 3 K100% eksponeret 20 og 8 °C.
- 1 kasse indeholdende 2 BREF og 2 B-K600 eksponeret ved 8 °C.

Efter 14, 28, 42, 70 og 126 døgns eksponering i svovlsyreopløsningen, er prøverne taget op af kasserne og skyllet/renset under vandhane for at fjerne løst materiale. Efterfølgende er overskydende vand tørret af og massen af det enkelte prøveemne registreret. Prøverne er derefter blevet eksponeret i en frisk svovlsyreopløsning.

Efter 126 døgns eksponering er røremnerne blevet eksponeret i demineraliseret vand ved de samme temperaturer, for at undersøge om en ændring i eksponeringsbetingelserne, med særlig fokus på thaumasitdannelse, kan forårsage skader på emnerne med kalktilslag. Emnerne har været eksponeret i vand i op til 570 døgn. Der er i perioden foretaget løbende registreringer af masserne.

6.1.5 Petrografisk- og SEM-EDX-analyse

Der er foretaget makroskopisk og mikroskopisk undersøgelse på fluorescensimprægneret planslib, fluorescensimprægneret tyndslib og polerprøver. Planslibene dækker et tværsnit af hele cylinderen; tyndslib og polerprøver er placeret langs cylindersiden, inkluderende 45 mm af denne og ca. 30 mm af den indre beton.

Planslib er fremstillet ved først at omstøbe cylinderen med fluorescerende epoxy og derefter gennemskæring og polering. Planslibet er undersøgt i stereomikroskop i almindelig og UV-lys. Tyndslib fremstilles af udsavede betonprøver, 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. 45 mm x 30 mm. Tyndslib analyseres i polarisations- og fluorescensmikroskop. Polerprøven fremstilles af bagklodsen fra tyndslibspræparationen. Prøven er poleret. Analysen er foretaget på et Quanta 400 fra FEI. Prøverne blev analyseret i høj vakuum mode ved 15 KV, 60 Pa og en spot size 5. Prøven er kulbedampet.

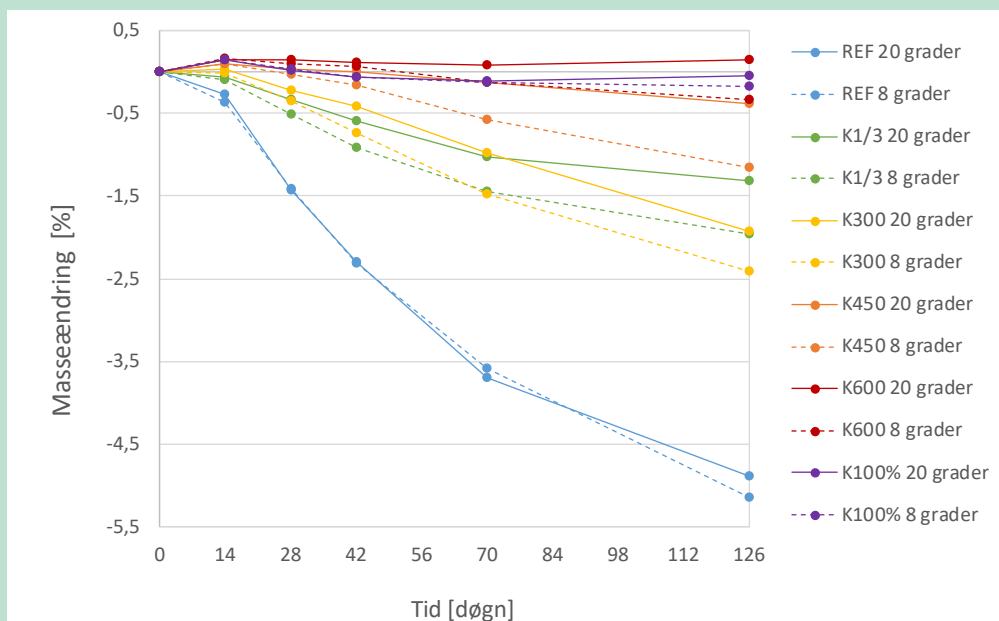
Analyserne er foretaget på:

- 1 REF og 1 K600 efter eksponering i 1% svovlsyreopløsning i 126 døgn efterfulgt af 149 døgn i demineraliseret vand ved 8 °C
- 1 K600 efter eksponering i 1% svovlsyreopløsning i 126 døgn ved 8 °C efterfulgt af 337 døgn i demineraliseret vand ved 8 °C

6.2 Resultater

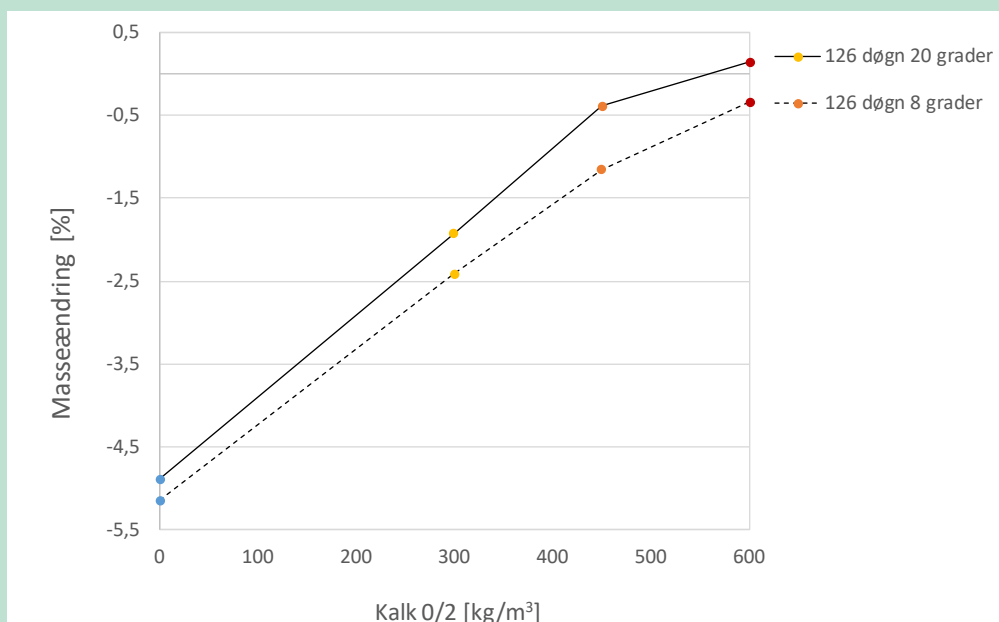
6.2.1 Syreresistens af rørprøveemner

Af Figur 15 fremgår de registrerede masseændringer for alle røremner ved både 8 og 20 °C i perioden, hvor emnerne har været eksponeret i svovlsyreopløsningen. Alle resultater er et gennemsnit af masseregistreringer udført på 3 prøveemner. Af graferne ses det, at referencerecepten har langt den største masseændring og dermed også den laveste syreresistens iht. anvendte prøvningsmetode. I Figur 16 og Figur 17 er udvalgte resultater gengivet, for at synliggøre relevante tendenser.



FIGUR 15. Masseændringen af alle røremner som funktion af døgn eksponeret i 1% svovlsyreopløsning.

I Figur 16 er masseændringen efter 126 døgn eksponering i syreopløsning som funktion af doseringen af 0/2 kalktilslag illustreret ved 8 og 20 °C. Der ses en klar tendens til faldende massetab ved stigende doseringer af kalk. Desuden ses et højere massetab ved 8 °C end for 20 °C.

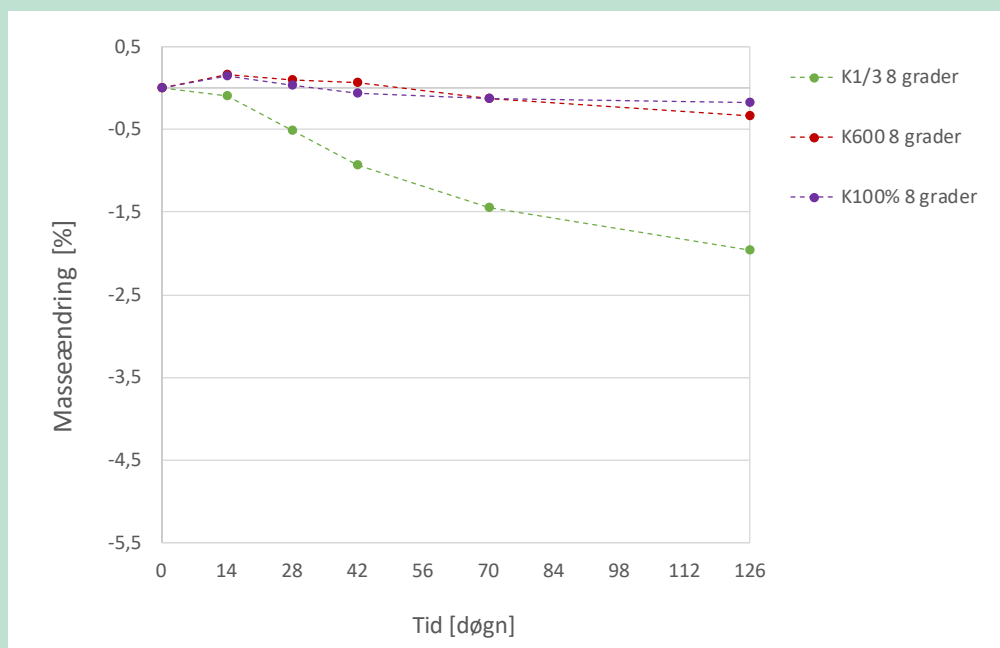


FIGUR 16. Masseændring af kalkemner efter 126 døgn eksponering i 1% svovlsyreopløsning som funktion af dosering af kalktilslag.

Masseændringen af K600, K1/3 og K100% ved 8 °C er gengivet i Figur 17. Selvom K600 og K1/3 indeholder samme mængde af kalktilslag, har K1/3 en langt større masseændring end K600. Det kan forklares af de forskellige kornstørrelser, der er anvendt i recepterne. I K600 er

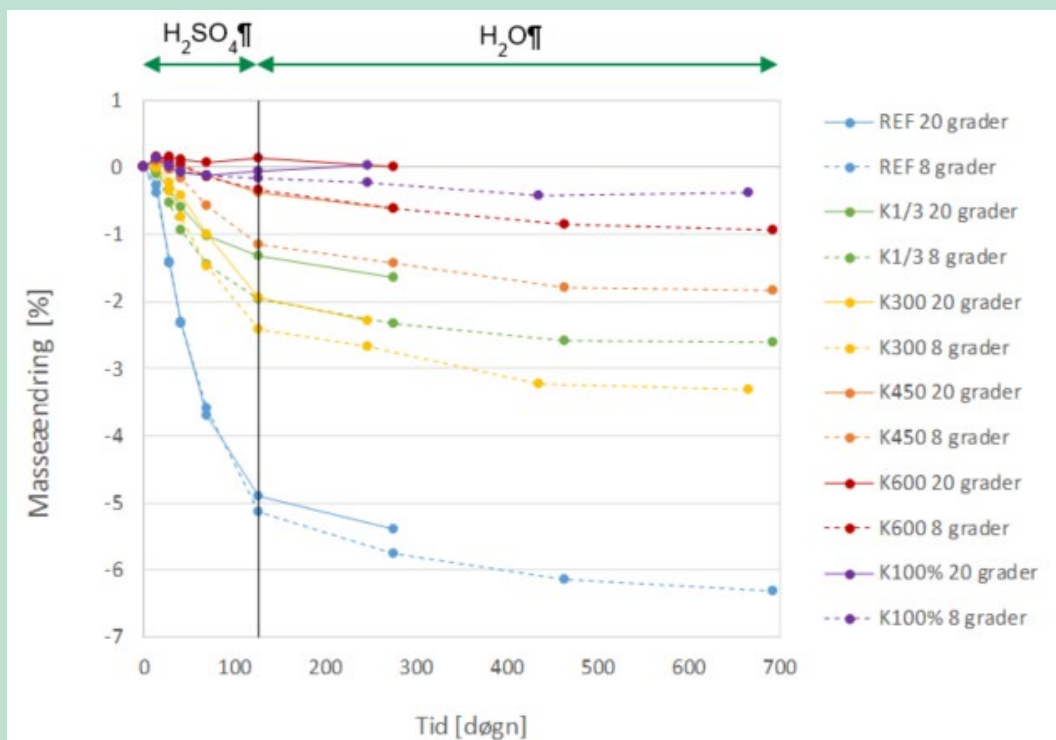
der anvendt en fraktion 0/2 og i K1/3 er der anvendt en fraktion 1/3. Kalktilslaget i K600 har således en finere kornstørrelse og dermed også et højere overfladeareal, som kan reagere med syren og dermed sænke korrosionen. Samtidig betyder en finere kornstørrelse også, at tilslaget er mere jævnt fordelt i betonen.

Sammenlignes resultaterne for K600 og K100% er masseændringerne efter 126 døgn eksponering forholdsvis ens. Der fremgår af laboratorieforsøgene altså at være en relativ lille eller ingen gevinst ved at erstattet alt tilslaget med kalktilslag i forhold til syrerestistensen kontra kun at erstatte 600 kg/m³ af tilslaget.



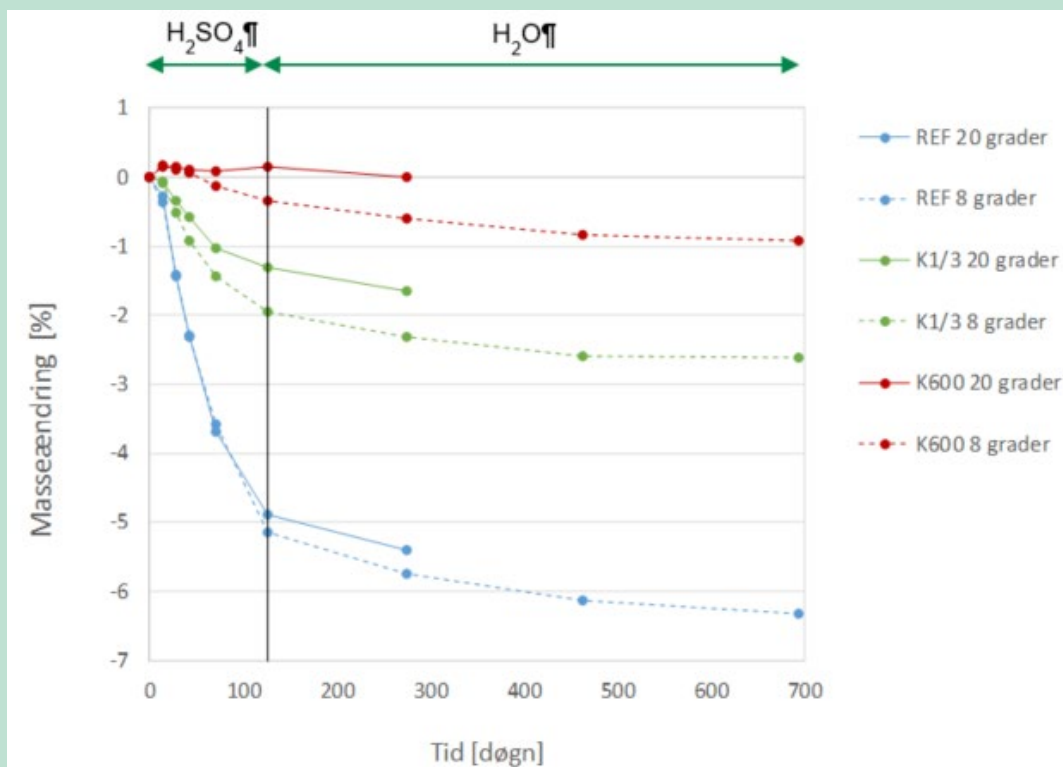
FIGUR 17. Masseændringen af K600, K1/3 og K100% som funktion af døgn eksponeret i 1% svovlsyreopløsning.

Efter 126 døgn eksponering i svovlsyreopløsningen, blev røremnerne eksponeret i demineraliseret vand. Resultaterne at vist i Figur 18. Der ses for alle prøveserier, bortset fra K100% eksponeret ved 20 °C, fortsat en reduktion i massen. Udvalgte data er gengivet i Figur 19.



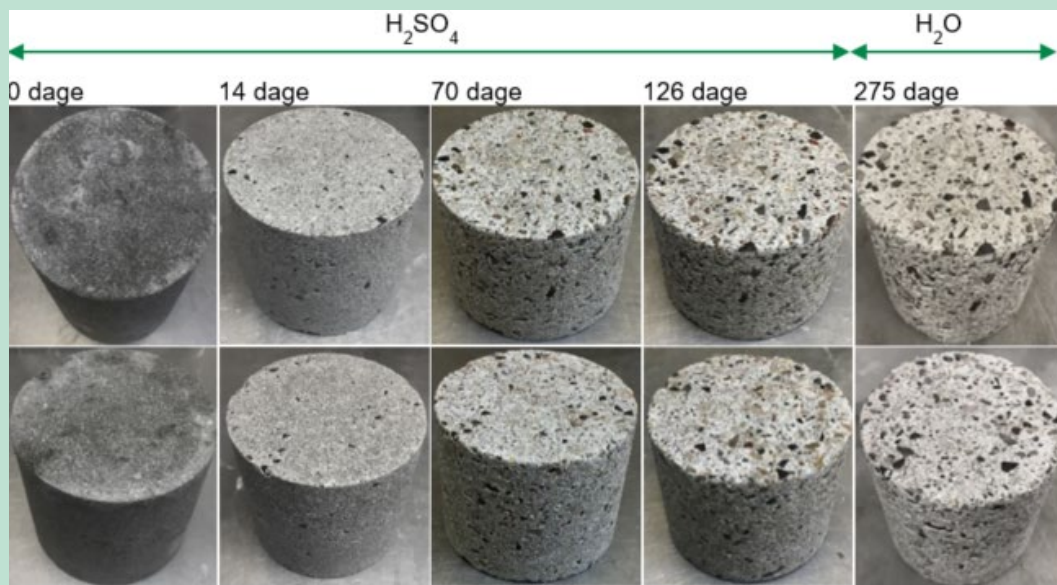
FIGUR 18. Masseændringer af rørprøveemner i svovlsyreopløsning og efterfølgende demineraliseret vand som funktion af eksponeringstiden.

Masseændringen for K600, K1/3 og REF før og efter eksponering i demineraliseret vand er gengivet i Figur 19. Den relative masseændring efter eksponering i vand er forholdsvis ens for emnerne eksponeret ved 8 og 20 °C. Der ses både en massereduktion i referencen og prøverne med kalktilslag. Det er muligt, at masseændringen skyldes udludning.



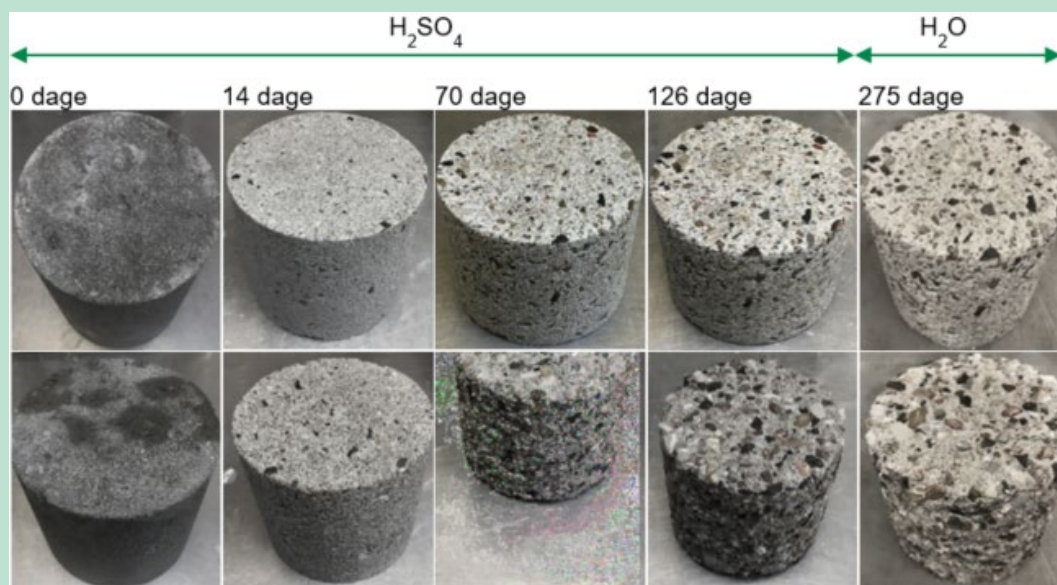
FIGUR 19. Masseændringen af K600, K1/3 og REF efter eksponering af 1% svovlsyreopløsning og efterfølgende demineraliseret vand som funktion af eksponeringstiden.

Billeder af K600 til forskellige terminer eksponeret ved henholdsvis 8 og 20 °C er vist i Figur 20. Der ses en lille forskel i tilstanden, hvor der umiddelbart er lidt flere synlige stentilslag i prøven eksponeret ved 8 °C. Det stemmer fint overens med de registrerede masseændringer, hvor prøverne eksponeret ved 8 °C har et lidt højere massetab. Bemærk at K600 ved eksponering i 20 °C har en positiv masseændring efter 126 døgns eksponering, dvs. at massen af prøveemnerne er steget. Af billederne i Figur 20 fremgår det dog, at flere og flere tilslag bliver synlige under eksponeringen.



FIGUR 20. Billeder af K600 efter eksponering i 1% svovlsyreopløsning (termin 0-126 døgn) efterfulgt af eksponering i demineraliseret vand (termin 126-275 døgn). Øverst: prøver eksponeret ved 8 °C. Nederst: prøveemner eksponeret ved 20 °C.

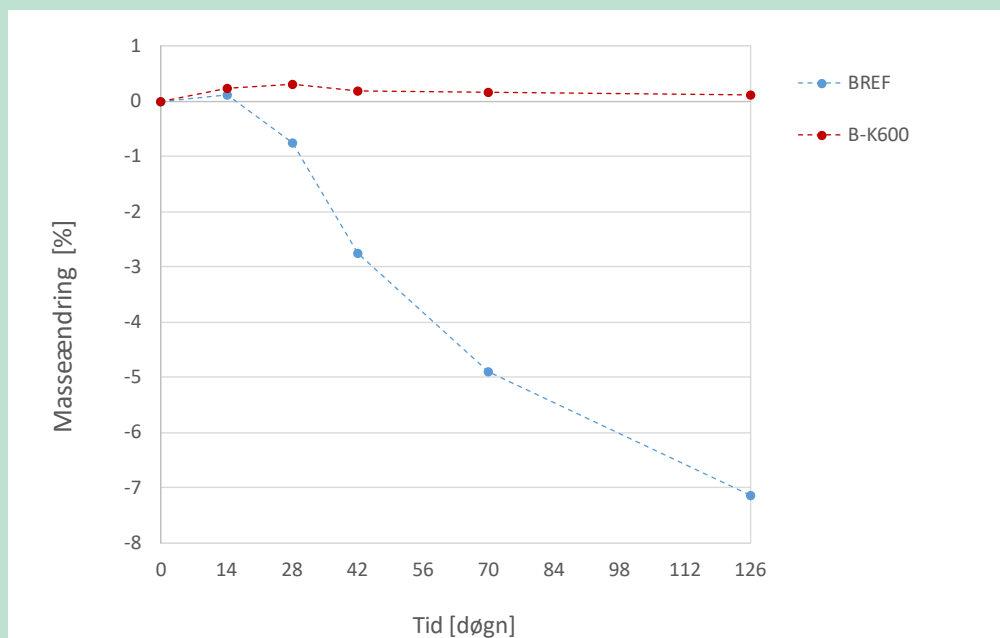
I Figur 21 er der vist billeder af REF og K600 ved forskellige terminer ved eksponering ved 8 °C. Det ses tydeligt, at referencen har det største massetab.



FIGUR 21. Billeder af prøveemner efter eksponering i 1% svovlsyreopløsning (termin 0-126 døgn) efterfulgt af eksponering i demineraliseret vand (termin 126-275 døgn) ved 8 °C. Øverst: K600. Nederst: REF.

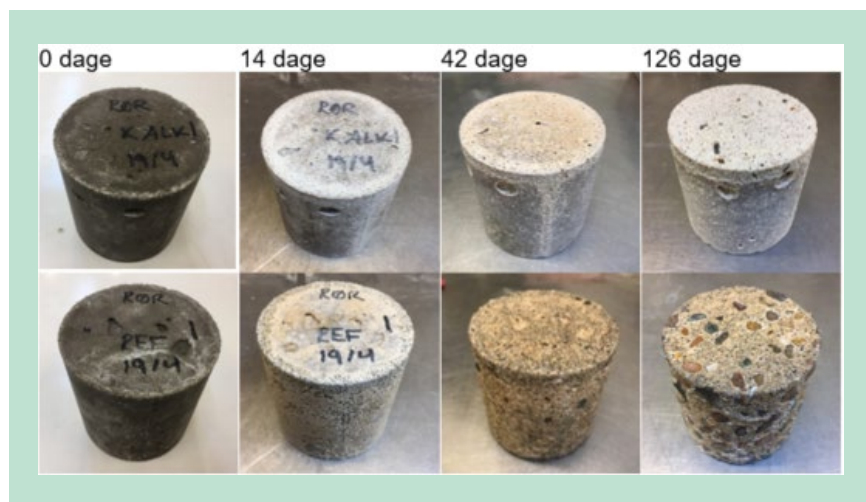
6.2.2 Syreressistens af brøndprøveemner

Af Figur 22 fremgår de registrerede masseændringer for alle brøndemner eksponeret ved 8 °C. Alle resultater er et gennemsnit af masseregistreringer udført på 2 prøveemner. Af graferne ses det, at referencerecepten har langt større masseændring end emnet med kalktilslag, som har en mindre positiv masseændring.



FIGUR 22. Masseændring af brøndemner efter eksponering i 1% svovlsyreopløsning som funktion af eksponeringstiden.

I Figur 23 er der vist billeder af BREF og B-K600 ved forskellige terminer. Det er tydeligt, at referencen er mere korroderet end B-K600. Desuden ses dannelsen af gipslag tydeligt på B-K600, som også viser tegn på korrosion.



FIGUR 23. Billeder af brøndprøveemner efter eksponering i 1% svovlsyreopløsning ved 8 °C. Øverst: B-K600. Nederst: B-REF.

6.2.3 Petrografisk og SEM-EDX-analyse

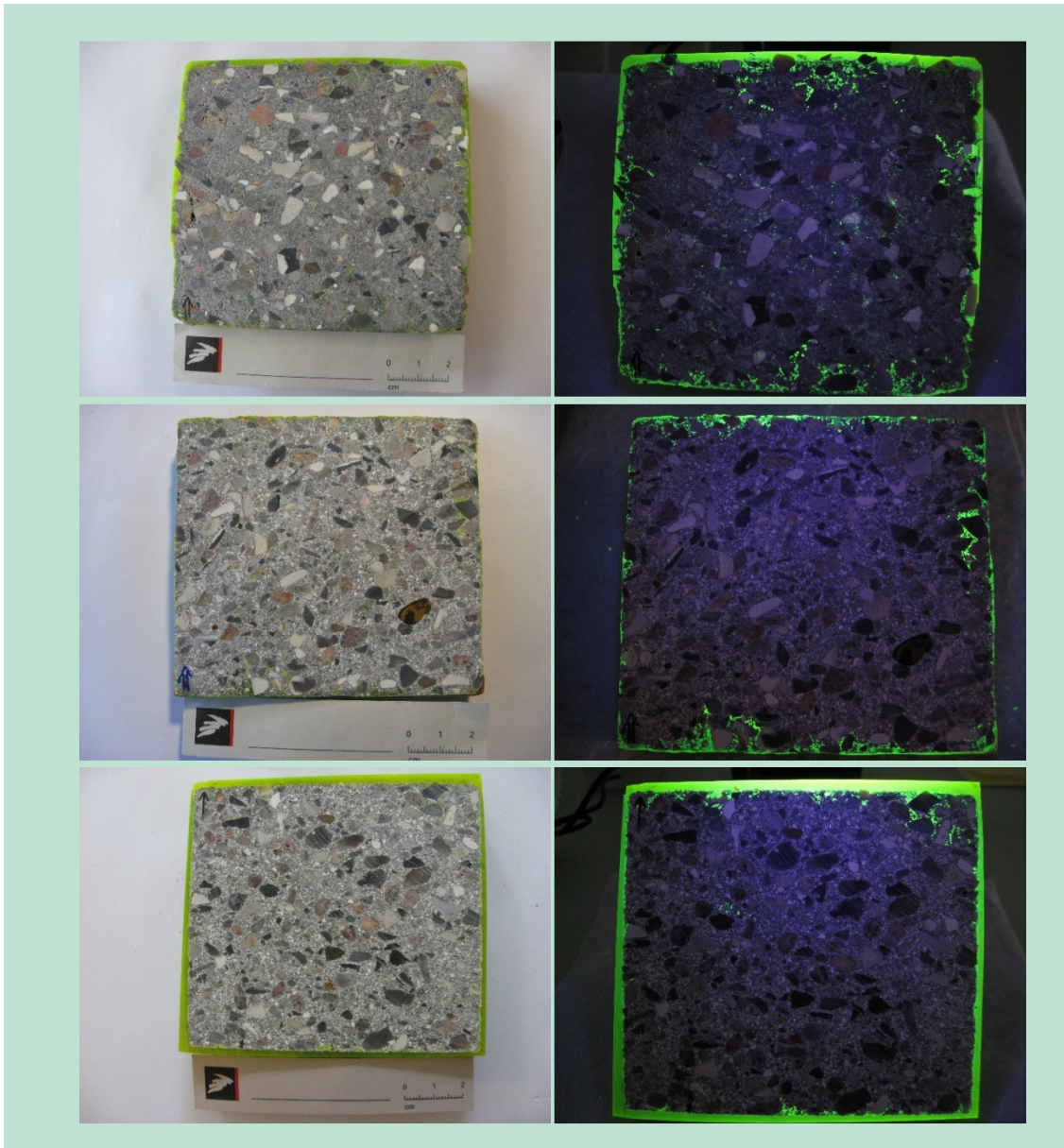
Den petrografiske analyse og SEM-EDX-analysen er udført på to K600 prøveemner efter 126 døgns eksponering i en syreopløsning efterfulgt af eksponering i demineraliseret vand i henholdsvis 149 og 337 døgn, samt et REF prøveemne efter 126 døgns eksponering i syreopløsning efterfulgt af eksponering i demineraliseret vand i 149 døgn.

Alle undersøgte prøveemner viste tegn på syrepåvirkning i form af afskalning og dannelse af en porøs zone langs de eksponerede overflader. Planslib af prøveemnerne er vist i Figur 24.

Overfladen af REF eksponeret i syre og efterfølgende i vand i 149 døgn, er ujævn og kraftigt forvitret med tydeligt eksponerede tilslag. Pastaporositeten er markant højere i den forvitrede overflade sammenlignet med pastaen i midten af prøveemnet. Det yderste af pastaen er omdannet til gips. Der er observeret thaumasit i luftporer til en dybde af 3 mm samt enkelte steder i pastaen til en dybde af 2 mm, jf. Figur 25. Bemærk, at det yderste lag pasta i REF, er korroderet væk i forbindelse med laboratorieforsøgene. Afstanden fra overfladen er således ikke i forhold til den oprindelige overflade af prøveemnet.

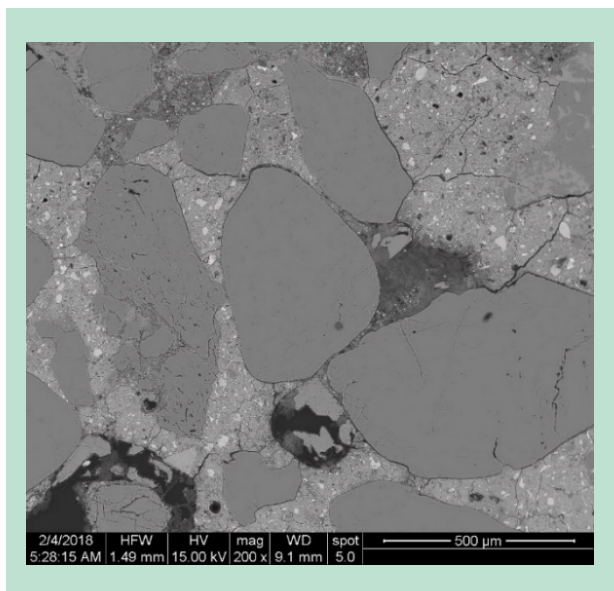
Overfladen af K600 eksponeret i syre og efterfølgende i vand i 149 døgn, er svagt forvitret men med hård overflade. Både kalktilslag og pasta i den påvirkede overflade er omdannet til gips og der er svag afskalning langs den omdannede zone. Der er observeret thaumasit i luftpore og pasta til en dybde på 4 mm fra overfladen, jf. Figur 26.

Tilstanden af K600 eksponeret i syre og efterfølgende i vand i 337 døgn minder om tilstanden af K600 i eksponeret i 149 døgn. En forskel er dog, at thaumasit ses i luftporer til en større dybde (6 mm). Dette synes dog udelukkende at kunne henføres til selve luftporesystemet, dvs. jo mere sammenhængende poresystemet er, jo dybere ses thaumasit (og gips). Zonen kan opdeles i en ydre zone hvor thaumasit ses mere massivt i randen af luftporene og med gips i centrum, og en indre zone hvor thaumasit ses i små porøse bundter. Thaumasit er ikke umiddelbart observeret i pasta i det pågældende emne, jf. Figur 27.

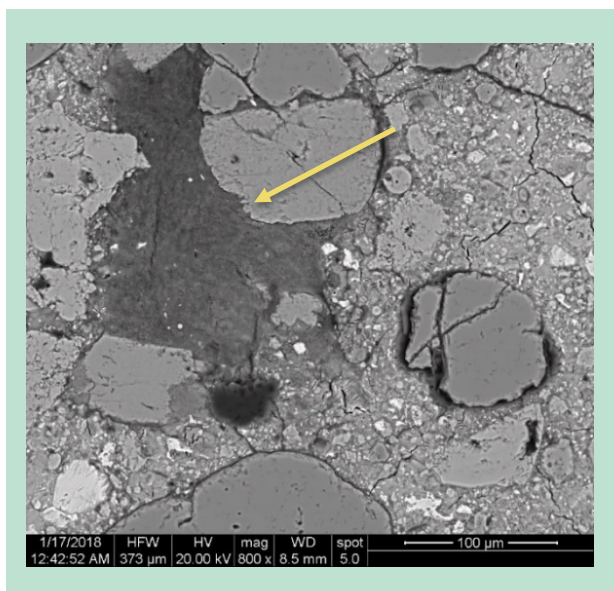


FIGUR 24. Epoxyimpregneret planslib af prøveemner. Fra toppen: REF og K600 begge eksponeret i syre og efterfølgende i vand i 149 døgn og K600 eksponeret i syre efterfulgt af 337 døgn i vand.

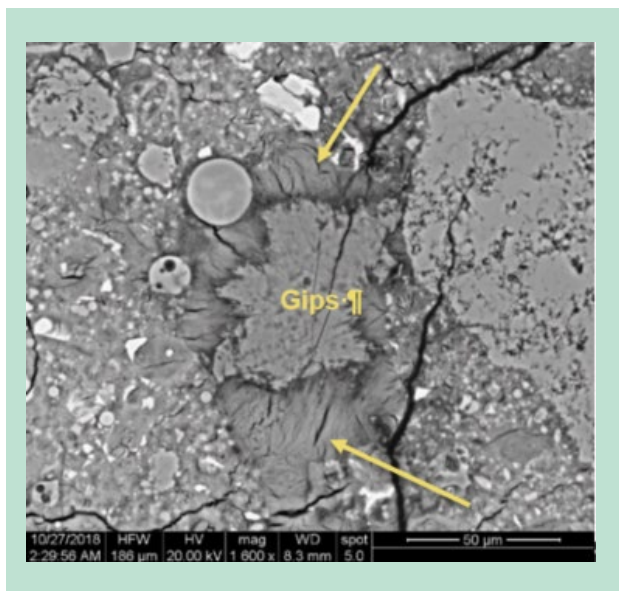




FIGUR 25. Thaumasit observeret i pastaen 1,5 mm fra overfladen i REF eksponeret i syreopløsning efterfulgt af 149 døgn i demineraliseret vand.



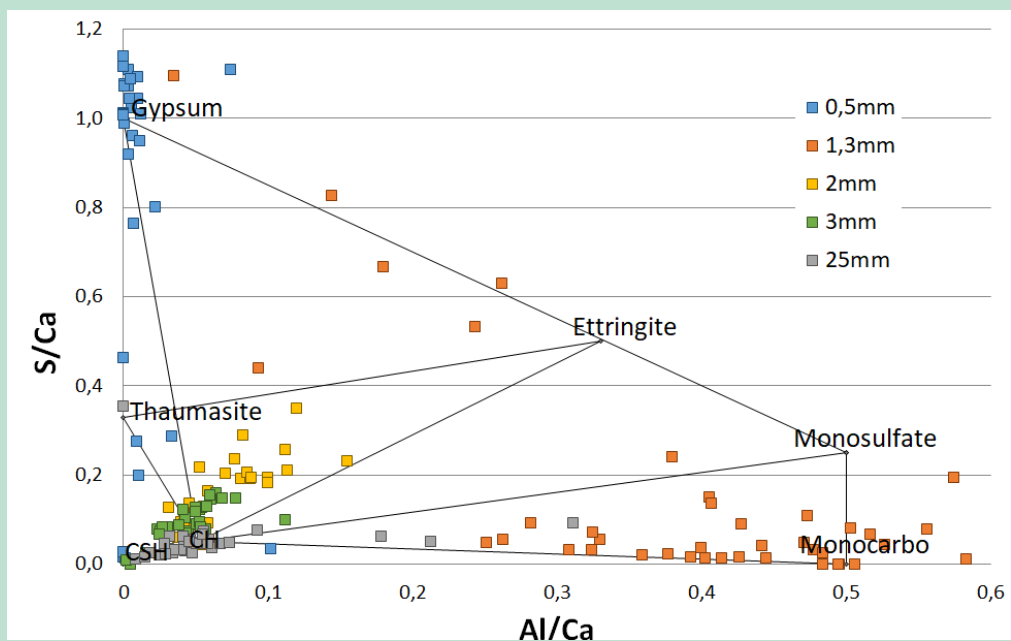
FIGUR 26. Thaumasit observeret i pastaen 2 mm fra overfladen i K600 eksponeret i syreopløsning efterfulgt af 149 døgn i demineraliseret vand.



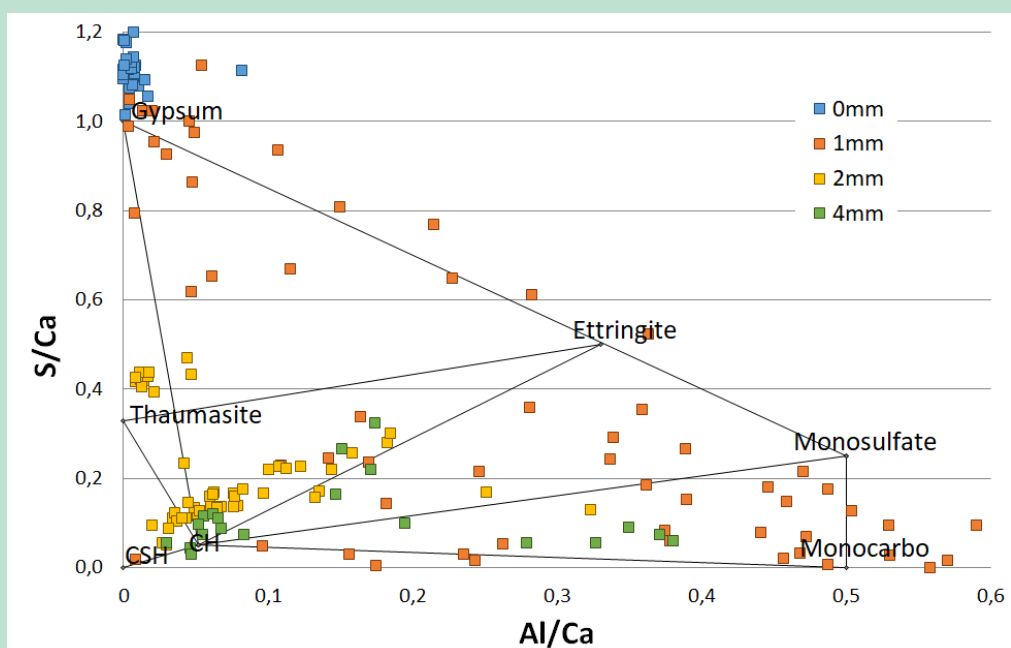
FIGUR 27. Thaumasit og gips observeret i luftpore 6 mm fra overfladen i K600 eksponeret i syreopløsning efterfulgt af 337 døgn i demineraliseret vand.

Fasediagrammerne vist i Figur 28, Figur 29 og Figur 30, viser forholdet mellem Al/Ca og S/Ca for målepunkter i de 3 prøveemner. I fasediagrammerne er Al/S forholdet for forskellige faser plottet ind. Målepunkternes placering i diagrammet angiver hvad pastaen det pågældende sted, består af. Dermed kan diagrammerne bruges til at bestemme/vurdere omdannelser i pasta-fasen. Målingerne er foretaget i forskellige afstande fra overfladen af prøveemnerne.

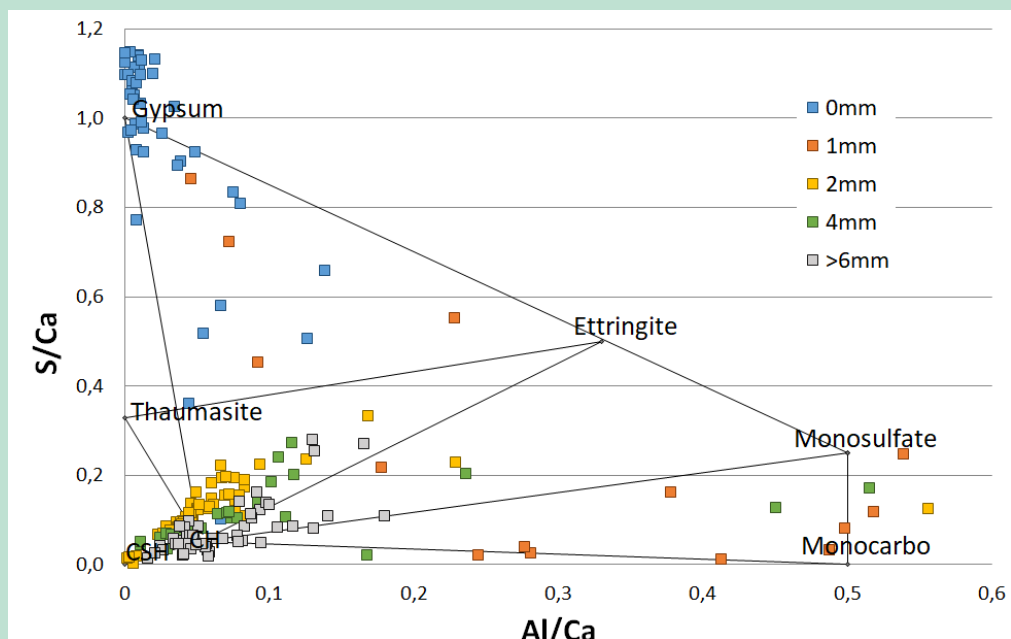
Alle fasediagrammer viser tydeligt en omdannelse af det yderste lag pasta til gips (de blå målepunkter i diagrammerne), og der ses generelt en forskydning mod gips (og muligvis thaumasit) for alle diagrammerne. Der bemærkes i øvrigt ikke den store forskel på diagrammerne for REF og K600 efter 149 døgn i demineraliseret vand på nær enkelte gule målepunkter i K600, som kan indikere tilstedeværelse af thaumasit. Faseanalysen af pastaen kan ikke umiddelbart bruges til at sige noget om mængden af thaumasit i pastaen.



FIGUR 28. Fasediagram for REF efter eksponering i syreopløsning efterfulgt af 149 døgn i demineraliseret vand.



FIGUR 29. Fasediagram for K600 efter eksponering i syreopløsning efterfulgt af 149 døgn i demineraliseret vand.



FIGUR 30. Fasediagram for K600 efter eksponeret i syreopløsning efterfulgt af 337 døgn i demineraliseret vand.

Der er i begge betontyper konstateret thaumasit i luftporer ifm. den optiske mikroskopering i cirka samme afstand fra overfladen (3-4mm) efter 149 døgn. Thaumasit i pasta er ligeledes observeret i et begrænset omfang i begge prøver. Eksponering af et K600 prøveemne i demineraliseret vand i 337 døgn, viste tilstedeværelsen af thaumasit i luftporerne til en dybde af 6 mm, hvilket er 2 mm mere i forhold til i den samme prøve efter 149 døgn. Det bemærkes, at laboratorieforsøgene er udført efter en accelereret prøvningsmetode, som har andre eksponeringsbetingelser end dem der findes i rørstrækninger og brønde. Der er i forsøgene således øjensynligt skabt betingelserne for dannelse af thaumasit i både referencen (hvilket ikke var forventet) og i prøverne med kalktilslag.

7. Produktion og dokumentation af kalkrør og kalkbrønde

7.1 Omfang

For at kunne udføre en fuldskalastrækning med rør og brønde med kalktilslag, er det nødvendigt at få recepterne indkørt hos afløbsproducenten, hvor de optimale produktionsbetingelser fastlægges og kvaliteten dokumenteres gennem typeprøvning. Indkøringen samt den efterfølgende proces- og færdigvareprøvning, skal sikre, at de producerede rør og brønde har et ensartet kvalitetsniveau.

Der er på baggrund af resultaterne fra receptudviklingen og optimeringen taget udgangspunkt i to recepter, herunder en rørrecept og en brøndrecept begge med et indhold på 600 kg/m^3 0/2 kalktilslag.

RC Beton har på de producerede rør og brønde udført typeprøvning, proces- og færdigvareprøvning. Der er derudover udført en prøvning af kemikalieresistensen af brudstykker fra et referencerør samt for et rør med kalktilslag (også omtalt som kalkrør) ved 8°C iht. en modificeret udgave af ASTM C267-01. De 8°C svarer cirka til temperaturen i udlagte rørstrækninger og har samtidig vist en større syrepåvirkning end prøvning udført ved 20°C , jf. afsnit 6.2.

7.2 Recepter

På baggrund af resultaterne i afsnittet om udvikling og optimering af betonrecepter, blev det for rørproduktionen besluttet at tage udgangspunkt i recepten med 600 kg/m^3 0/2 kalktilslag (K600). Syreresistensen efter 126 døgn eksponering for K600 og K100% var forholdsvis ens, og derfor blev det vurderet, at gevinsten ved anvendelse af 100 % kalktilslag i recepterne ikke svarede til den omkostning det ville være at erstatte alt tilslaget, samt de udfordringer der ville være med siloplads.

For brøndene blev den selvkompakterende recept med 600 kg/m^3 0/2 kalktilslag (B-K600) i første omgang anvendt. Det viste sig dog i forbindelse med receptindkørslen, at kalktilslagets påvirkning af de friske egenskaber var for stor. Derfor blev der i stedet anvendt en tørbeton med samme mængde kalktilslag til fremstilling af brønde.

7.3 Støbning af rør og brønde

Alle rør og brønde er støbt hos RC Beton på deres produktionssted i Rødkærsbro. Der er anvendt samme blande- og støbeprocedurer, som for deres almindelige produktion. Det var desuden muligt at producere rør og brønde på samme produktionsudstyr som den traditionelle produktion uden større omstilling. I Figur 31 ses et billede fra indkøringen af rørrecepterne med kalktilslag.



FIGUR 31. Rør med kalktilslag støbt i forbindelse med receptindkøringen hos RC Beton.

Alle producerede rør med kalktilslag har en indstøbt indikationspind, som kan bruges til at vurdere omfanget af korrosion ved en tv-inspektion. Rørene er desuden forsynet med en ID-plade i rustfrit stål med et unikt nummer, således at hver enkelt rør kan identificeres ved en tv-inspektion, jf. Figur 32.



FIGUR 32. Billede af ID-plade og indstøbt indikationspind i et produceret rør.

7.4 Dokumentation af egenskaber

RC Beton har stået for dokumentation af egenskaberne af de producerede rør og brønde i forbindelse med typeprøvning, proceskontrol og færdigvareprøvning. Der var i projektet udarbejdet en inspektionsplan iht. kravene i gældende standarder, som skulle sikre, at der efterfølgende ikke kunne stilles spørgsmål ved produkternes kvalitet. Planen har imidlertid ikke været fulgt fuldt ud, bl.a. grundet skiftende personale hos producenten.

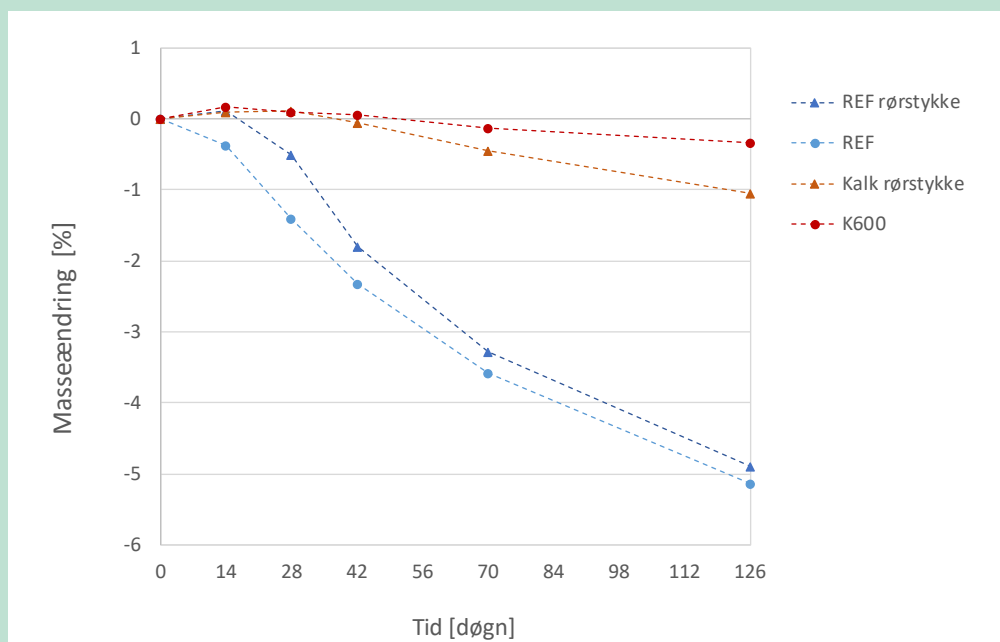
I Tabel 3 er antallet af produktionsdage fordelt på år gengivet. RC Beton står inde for produkternes kvalitet.

TABEL 3. Antal af produktionsdage fordelt på år for de 3 produkttyper.

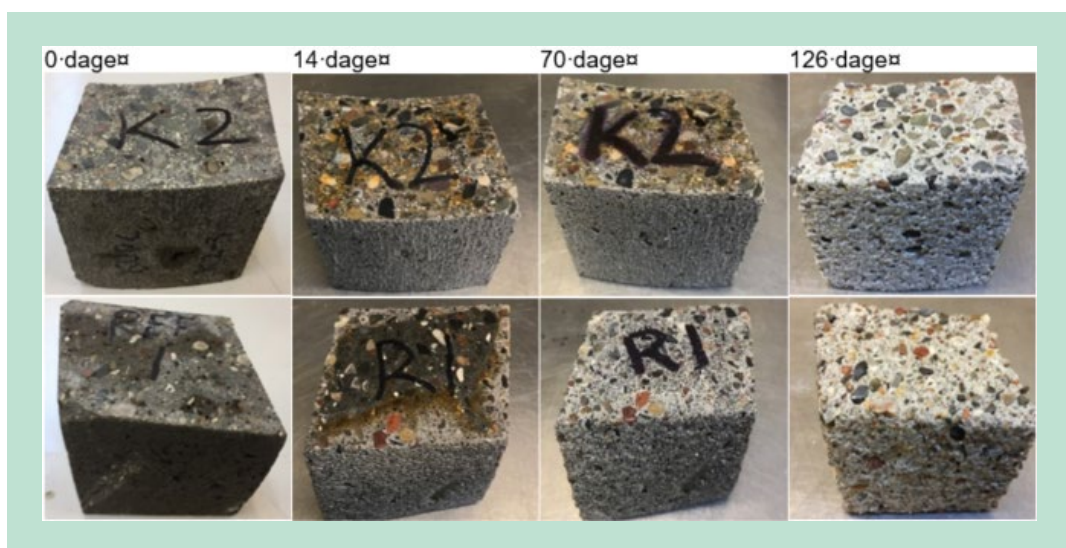
Produkt	2017	2018	2019
Ø400 kalkrør	1 produktionsdag	5 produktionsdage	2 produktionsdage
Ø300 kalkrør	-	6 produktionsdage	-
Kalkbrønde	-	1 produktionsdag	-

Foruden den almindelige dokumentation, er der foretaget test af syreressistensen af brudstykker fra trykprøvede rør ved 8 °C iht. metoden beskrevet i afsnit 6.1.4. Prøveemnerne er eksponeret cirka 6 måneder efter støbning. Resultaterne fremgår af Figur 33 sammen med målingerne fra samme recepter støbt og testet i laboratoriet (K600 og REF), jf. afsnit 6.2.1. Målingerne på rørstykkerne er et gennemsnit af to værdier.

Af resultaterne ses det, at masseændringen for rørstykkerne er størst for referencerøret, hvilket stemmer fint overens med tidligere observationer. Masseændringen for kalk rørstykket er lidt større end for det laboratoriestøbte emne, K600. Den omvendte tendens er gældende for reference rørstykket. Forskellen i masseændring for kalkprøveemnerne, kan skyldes kalktilsætnings høje absorption, som kan give udfordringer i produktionen.

**FIGUR 33.** Masseændring af rørstykker samt REF og K600 efter eksponering i 1% svovlsyreopløsning som funktion af eksponeringstiden.

Billeder af rørstykkerne til forskellige terminer er vist i Figur 34. Sammenlignes kalk rørstykket med K600 prøveemnet vist i Figur 23, ses det tydeligt at korrosionen er større for rørstykket end for det laboratoriestøbte prøveemne.



FIGUR 34. Billeder af rørstykker efter eksponering i 1% svovlsyreopløsning ved 8 °C. Øverst: kalk rørstykke. Nederst: Reference rørstykke.

8. Test af syreresistens ved felteksponering

8.1 Omfang

Med henblik på at teste recepterne under mere virkelighedsnære eksponeringsbetingelser end i laboratoriet, er prøveemner støbt i laboratoriet samt rørstykker fra rør produceret ved RC Beton nedhængt i brønde hos Aalborg Kloak og Hedensted Spildevand.

Prøverne er placeret i stålbure med 6 prøver i hver. Burene skal sikre, at prøveemnerne ikke forsvinder, når de begynder at korrodere. Alle stålbure er udført i rustfrit stål (A4) og nedhængt med rustfrie stålkæder (A4).

Hos Aalborg Kloak er der blevet nedhængt 2 bure i 2 forskellige brønde, dvs. 4 bure i alt, herunder i en brønd på Holmegårdsvej i Ellidshøj og en brønd på Vestervej i Sønderholm. Alle bure er identiske og består af prøver af REF, K1/3, K600, K450, K300 og K100% støbt i laboratoriet på Teknologisk Institut, jf. afsnit 6.1.3.

Hos Hedensted Spildevand er der blevet nedhængt 1 bur i 2 forskellige brønde, dvs. 2 bure i alt, herunder i Juelsminde renseanlæg og en oppumpningsbrød i Hedensted. Begge bure er identiske og består af 1 prøve af BREF, 1 prøve af B-K600, 2 rørstykker fra et referencerør og 2 rørstykker fra et kalkrør.

8.2 Felteksponering

8.2.1 Aalborg Kloak A/S

I Figur 35 ses prøveemnerne nedhængt i en brønd på Holmegårdsvej i Ellidshøj og i Figur 36 ses prøveemnerne nedhængt i en brønd på Vestervej i Sønderholm. Billederne er taget efter 1 års eksponering og efter 2 års eksponering.

Alle prøverne nedhængt ved Holmegårdsvej fremstår fortsat i en god tilstand og der er kun få tegn på begyndende nedbrydning. Der er derimod tydelige tegn på nedbrydning af prøverne nedhængt ved Vestervej.



FIGUR 35. Prøver eksponeret i brønd ved Holmgårdsvej 58 i Ellidshøj. Øverst: 16-08-2017 (start eksponering). I midten: 13-08-2018. Nederst: 20-08-2019.

I Figur 37 og Figur 38 ses nærbilleder af Vestervej-prøverne taget efter 2 års eksponering. I det venstre bur (Figur 37) fremstår alle prøver på nær K100% til at være kraftigt syrepåvirket. Prøverne K300, K450, K1/3 og REF har store revnedannelser og/eller afskalninger, og særligt REF er i dårlig tilstand. K600 fremstår med hvad der ligner kraftig udfældning, som kan være et gipslag. Prøverne i buret til højre (Figur 38) viser samme tendens som dem i buret til venstre, dog fremstår K600 mindre syrepåvirket. Bemærk, at prøveemnerne eksponeret i syreopløsning i laboratoriet og prøverne eksponeret i luft har fået markant anderledes udseende som følge af syrepåvirkning.



FIGUR 36. Prøver eksponeret i brønd ved Vestervej 61 i Sønderholm. Øverst: 16-08-2017 (start eksponering). I midten: 13-08-2018. Nederst: 20-08-2019.



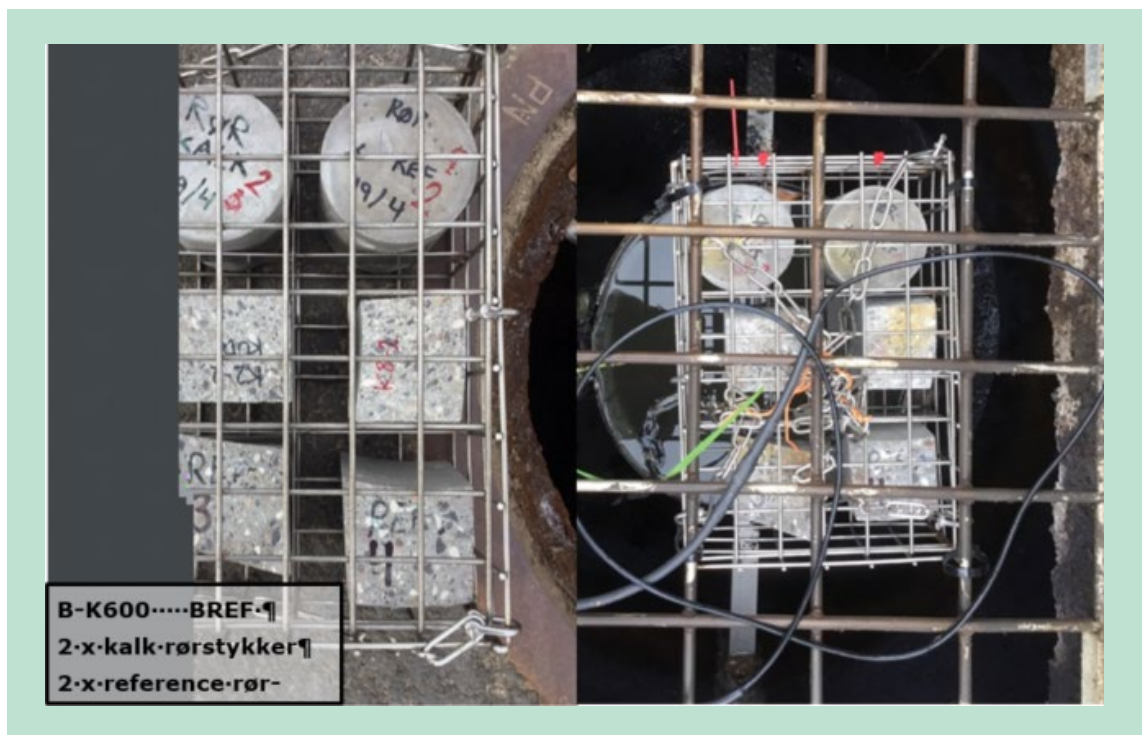
FIGUR 37. Nærbillede af buret til venstre, jf. Figur 36, med prøver nedhængt i brønd ved Vestervej i Sønderholm efter 2 års eksponering (20-08-2019).



FIGUR 38. Nærbillede af buret til højre, jf. Figur 36, med prøver nedhængt i brønd ved Vestervej i Sønderholm efter 2 års eksponering (20-08-2019).

8.2.2 Hedensted Spildevand A/S

I Figur 39 ses prøveemnerne nedhængt i en oppumpningsbrønd ved Dalbyvej i Hedensted og i Figur 40 ses prøveemnerne nedhængt i en brønd i Juelsminde renseanlæg. Billederne er taget ved start eksponering og efter lidt over et års eksponering. Prøverne viser ingen tydelige tegn på syrepåvirkning.



FIGUR 39. Prøver eksponeret i oppumpningsbrønd i Tørring. Til venstre: 07-08-2018 (start eksponering). Til højre: 02-10-2019.



FIGUR 40. Prøver eksponeret i Juelsminde renseanlæg. Til venstre: 29-08-2019 (start eksponering). Til højre: 02-10-2019.

9. Etablering af rørstrækninger og brønde

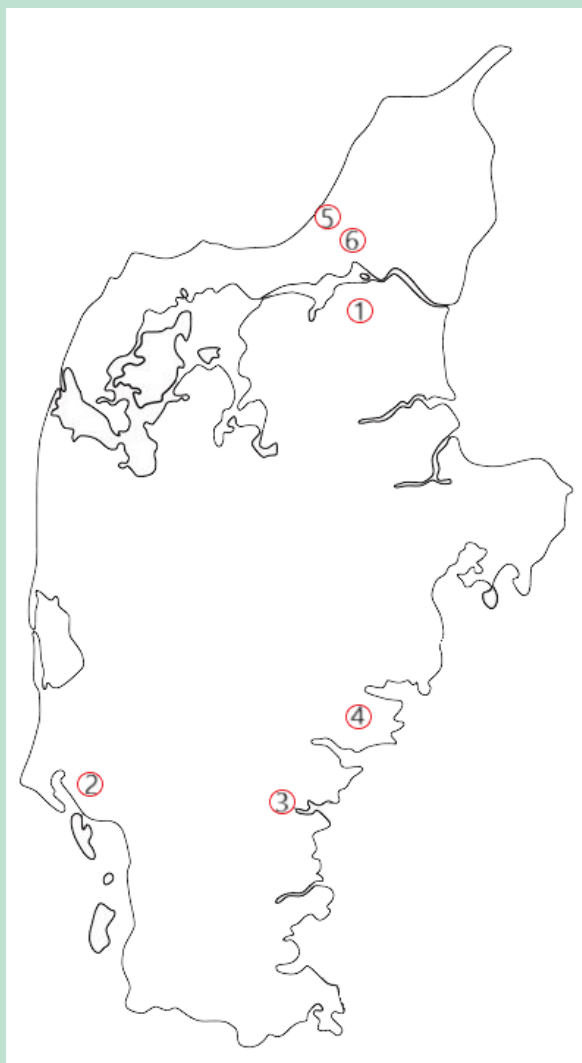
9.1 Omfang

I projektet er der udført en række fuldskalastrækninger med de udviklede kalkrør og kalkbrønde hos de medvirkende forsyningsselskaber, med henblik på at afprøve teknologien i forskellige kloakmiljøer med høj svovlbrintekonzentration. Billeder fra udlægning af rørene ses i Figur 41.



FIGUR 41. Etablering af rørstrækning med kalkrør hos Aalborg Kloak.

Der er udvalgt i alt 4 rørstrækninger til fuldskalaetablering, som samlet har en længde på 893 m. Foruden etablering af kalkrør, er der etableret 14 kalkbrønde i forbindelse med de udlagte rørstrækninger og 11 separat placerede brønde. Den geografiske placering af rørstrækninger og brønde fremgår af Figur 42.



- 1) 282 m Ø400 rørstrækning inkl. 2 Ø1000 brønde etableret i Frejlev
- 2) 4 Ø1250 brønde etableret i Esbjerg og omegn
- 3) 392 m Ø400 rørstrækning inkl. 6 Ø1000 brønde etableret i Fredericia
- 4) 130 m Ø300 rørstrækning inkl. 3 Ø1000 brønde etableret i Bjerre
- 5) 89 m Ø400 rørstrækning inkl. 3 Ø1000 brønde etableret i Hune
- 6) 7 Ø1000 brønde etableret i Aabybro

FIGUR 42. Geografisk placering af rørstrækninger og brønde.

9.2 Etablerede strækning og brønde

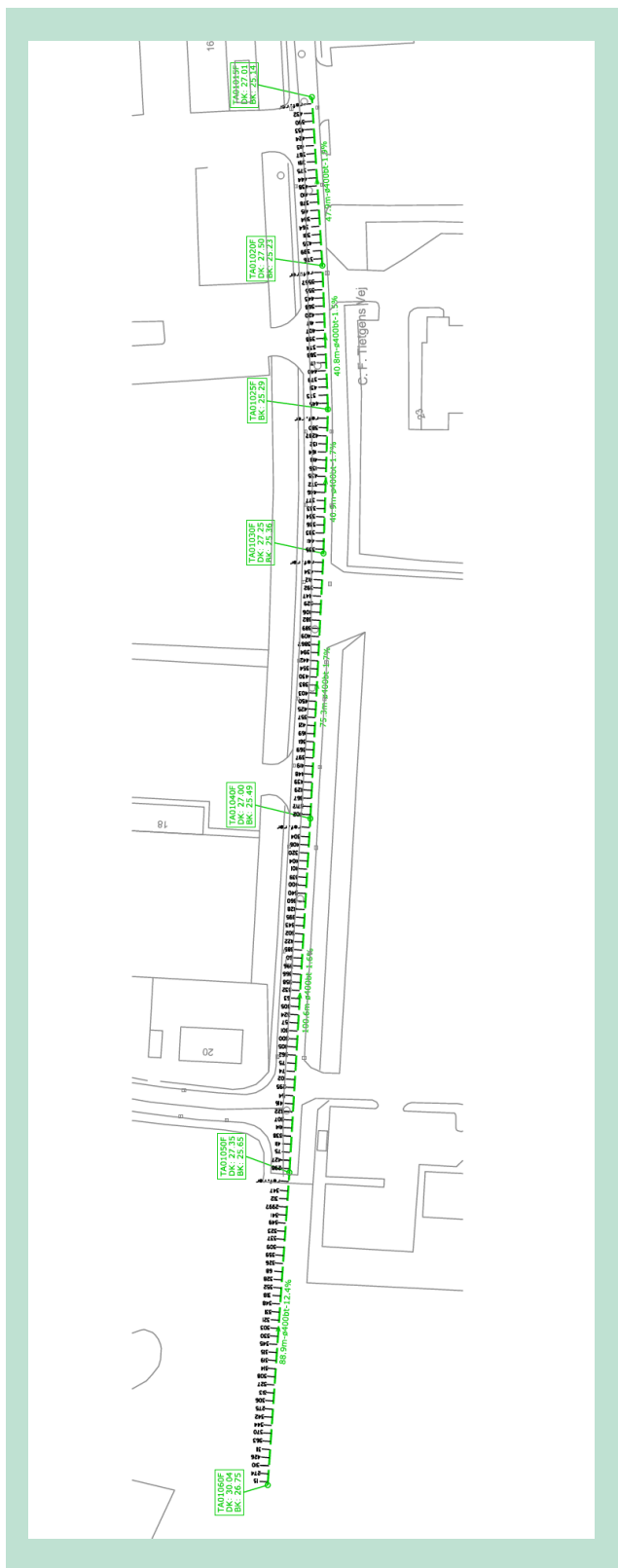
9.2.1 Aalborg Kloak A/S

Aalborg Kloak etablerede i efteråret 2018 en 282 meter rørstrækning med Ø400 kalkrør og 2 Ø1000 kalkbrønde i Frejlev. Første rør opstrøms er et almindeligt betonrør udlagt som en reference, til vurdering af modstandsdygtigheden af de udviklede kalkrør. Ledningsplanen er illustreret i Figur 43. Svovlbrintemålinger samt billeder af de gamle rør fremgår af Bilag 1.1.

og Toftnæsvej i Aslev. Svovlbrintemålinger samt billeder af de gamle brønde fremgår af Bilag 1.2.

9.2.3 Fredericia Spildevand og Energi A/S

Fredericia Spildevand og Energi etablerede i foråret/sommeren 2019 i Fredericia en 392 meter rørstrækning med Ø400 kalkrør og 6 Ø1000 kalkbrønde. Første rør opstrøms er et almindeligt betonrør udlagt som en reference, til vurdering af modstandsdygtigheden af de udviklede kalkrør. Ledningsplanen er illustreret i Figur 44. Svovlbrintemålinger samt billeder af et gammelt rør og brønd fremgår af Bilag 1.3.



FIGUR 44. Ledningsplan for rørstrækning inkl. brønde etableret i Fredericia.

9.2.4 Hedensted Spildevand A/S

Hedensted Spildevand etablerede i januar 2019 i Bjerre en 130 meter rørstrækning med Ø300 kalkrør og 3 Ø1000 kalkbrønde. Grenrørene er udlagt som almindelige betonrør og fungerer som reference til vurdering af modstandsdygtigheden af de udviklede kalkrør. Grenrørene er

[illegible]

9.2.5 Jammerbugt Spildevand A/S

Jammerbugt Spildevand etablerede i foråret 2019 i Hune en 89 meter rørstrækning med Ø400 kalkrør og 3 Ø1000 kalkbrønde samt 7 Ø1000 kalkbrønde i Aabybro. Første rør nedstrøms for de to vestlige brønde i Hune er et almindeligt betonrør udlagt som en reference til vurdering af modstandsdygtigheden af de udviklede kalkrør. Ledningsplanerne for strækningen i Hune er illustreret i Figur 46. Svovlbrintemålinger samt billeder af en gamle brønd fremgår af Bilag 1.5.



FIGUR 46. Ledningsplan for rørstrækning i Hune.

10. Opfølgning på projektet

Der er i samarbejde med projektpartnerne udarbejdet en monitoreringsplan for rørstrækninger og brønde, der skal sikre, at der fortsat følges op på tilstanden af forsøgstrækningerne efter projekts afslutning. Den indsamlede data skal således danne baggrund for vurdering af modstandsdygtigheden af de udviklede rør og brønde efter længere tids eksponering i de udvalgte aggressive miljøer.

Eftersom det ikke er muligt at etablere referencebrønde til vurdering af holdbarheden af de etablerede kalkbrønde, hvor der samtidig er sammenlignelig miljøpåvirkning, er der i 5 udvalgte kalkbrønde (1 hos hvert forsyningsselskab) nedhægt et referenceprøveemne og et kalkprøveemne støbt af RC Beton fra betonblandinger anvendt til støbning af brøndene. Prøveemnerne skal fungere som basis for sammenligning af den traditionelle brøndrecept og recepten med kalk. Hyppighed for inspektion/dokumentation af tilstand samt metode fremgår af Tabel 4.

TABEL 4. Plan for monitorering af felteksponerede prøver og etablerede rørstrækninger og brønde.

Produkt	Hyppighed for inspektion	Metode
Gamle brønde (konventionel beton)	Inden udskiftning	Billeder der tydeligt viser brøndens tilstand – oversigtsbillede og nærbilleder af evt. skader
Kalkbrønde	Hvert 2. år	Billeder der tydeligt viser brøndens tilstand – oversigtsbillede og nærbilleder af evt. skader
Prøveemner nedhængt i brønde	Hvert 2. år	Billeder af emner og evt. registrering af masseændring (aftales med Teknologisk Institut)
Rør	Efter 6 år og derefter vurderes behov	TV-inspektion af rørstrækningen
Monitorering af svovlbrinte	Lige inden eller efter etablering og derefter vurderes behov løbende af forsyningsselskab	Den metode, som forsyningsselskabet normalt anvender

11. Konklusion

Laboratorietests udført i projektet har vist at erstatning af traditionelt fint tilslag med fint kalktilslag kan forbedre syrebestandigheden af beton til produktion af kloakrør og -brønde. Erstatningsgrader op til 600 kg/m³ har vist markant stigning i syrebestandigheden i de udførte forsøg. Dette er eftervist både ved 20 og 8 grader, dog med en lidt mindre effekt ved 8 grader.

På basis af laboratorieforsøgene blev det valgt at arbejde videre med en betonrecept med 600 kg/m³ 0/2 kalktilslag til produktion af kloakrør og -brønde i fuldskala hos RC Beton. Betonrecepten kunne umiddelbart indkøres i produktionen uden større tilpasninger og med tilfredsstillende kvalitet af de producerede rør og brønde.

Hos RC Beton er der efterfølgende produceret rør og brønde til etablering af forsøgsstrækninger hos de 5 deltagende forsyningsselskaber. Forsøgsstrækningerne er blevet etableret i efteråret 2018 frem til sommeren 2019. Der er udarbejdet en monitoreringsplan, således der kan følges op på tilstanden af rør og brønde efter projektets afslutning.

Samlet set kan det på baggrund af resultaterne fra projektet samt det tidligere Rørprojekt I konkluderes at perspektiverne for betonkloakrør med kalktilslag er gode. Syrebestandigheden for prøver testet i laboratoriet samt prøver nedhængt i kloak er bedre end for referencebeton og produktionsteknisk er der ikke de store udfordringer. Der mangler dog stadig langtidsdokumentation af teknologien, hvilket løbende opfølgning på forsøgsstrækningerne etableret i de 2 projekter bør kunne give.

Derudover er der behov for, at der stilles krav om syrebestandighed af kloakrør, således der vil være et incitament for producenter til at producere rør med kalktilslag, eller andre teknologier der giver forbedret holdbarhed.

Der vil i Danmark være en øget udgift forbundet med produktion af rør med kalktilslag, som således også vil have en merpris sammenlignet med traditionelle rør, men med en forventet længere levetid bør dette ikke være en hindring for implementering af teknologien.

12. Referencer

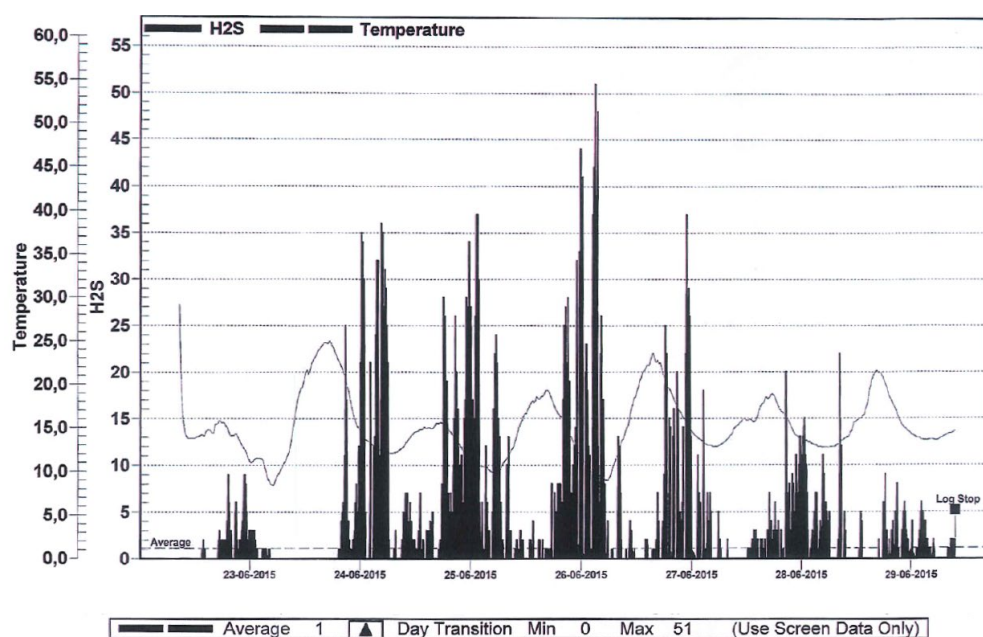
- [1] "Afløbssystemets levetid og renovering". Miljøstyrelsen, Miljøprojekt 1065/2006.
- [2] "Til kamp mod svovlbrinte". Artikler i DanskVand nr. 8 – oktober 2003.
- [3] M.B. Rasmussen: "Modellering af pH i spildevand - Bestemmelse af betydende buffersystemer og processer". Afgangprojekt fra Aalborg Universitet, 2011.
- [4] W. Yang og H. Hjuler: "Svovlbrinte i kloakker". Stads- og havneingeniøren, 2005.
- [5] R. D. A/S: "State of the nation". Foreningen af rådgivende Ingeniører - FRI, København, 2016.
- [6] J. Anderson og M. Kaasgaard: "Udvikling af modstandsdygtige betonrør til aggressive miljøer". Miljø- og Fødevareministeriet, 2015.

Bilag 1. Dokumentation fra fuldskalaetableringer

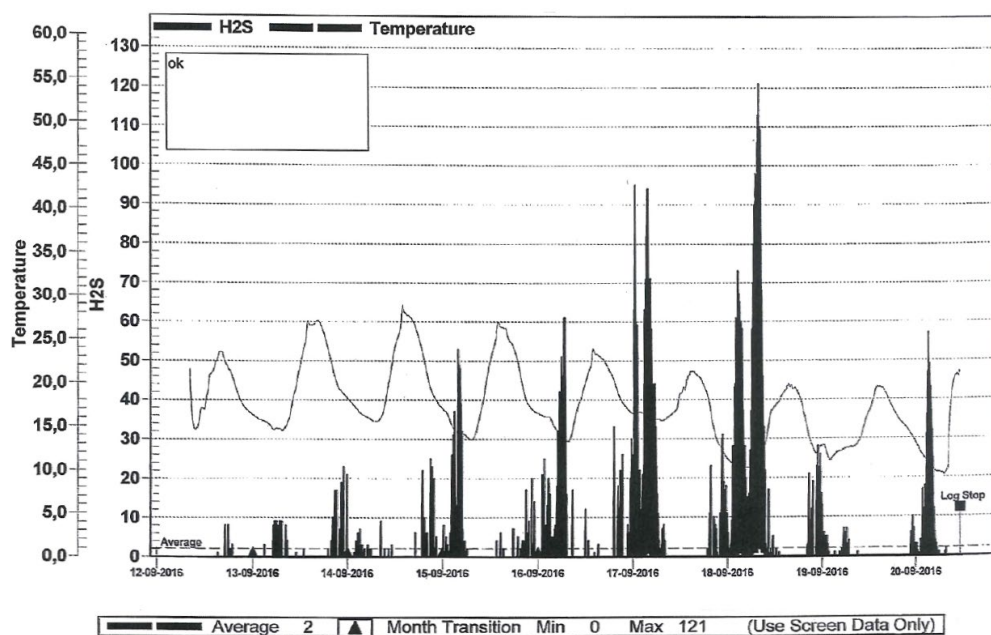
Svovlbrintemålinger foretaget på de forskellige forsøgstrækninger og -brønde fremgår af nærværende bilag. Udvalgte billeder af de gamle rør og brønde er også inkluderet.

Bilag 1.1 Aalborg Kloak A/S

Der er foretaget to svovlbrintemålinger i rørstrækningen hos Aalborg Kloak, i juni 2015 og i september 2016. Resultaterne cirka viser en maksimal svovlbrintekonzentration på henholdsvis 50 ppm og 120 ppm, jf. Figur 47 og Figur 48.



Figur 47. Svovlbrintemålinger i rørstrækning i Frejlev foretaget i juni 2015.



Figur 48. Svovlbrintemålinger i rørstrækning i Frejlev foretaget i september 2016.

Den oprindelig rørstrækning blev anlagt i 1980. Billeder af de gamle rør er vist i Figur 49 og Figur 50. Der ses tegn på korrosion og synlige stenstillag.



Figur 49. Billeder af gammelt rør fra rørstrækning anlagt i Frejlev i 1980.

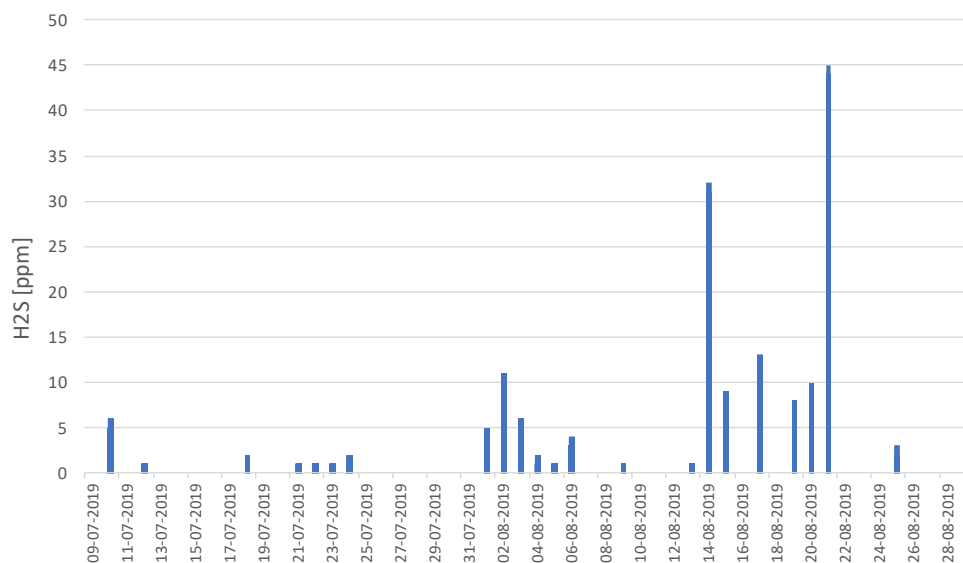


Figur 50. Billeder af gammelt rør fra rørstrækning anlagt i Frejlev i 1980.

Bilag 1.2 DIN Forsyning A/S

Guldager Stationsvej

Der er udført svovlbrintemålinger i brønden på Guldager Stationsvej i perioden juli 2019 til og med august 2019. Målingerne viser en maksimal værdi på 45 ppm, jf. Figur 51.



Figur 51. Svovlbrintemålinger fra brønd på Guldager Stationsvej foretaget i perioden juli 2019-august 2019.

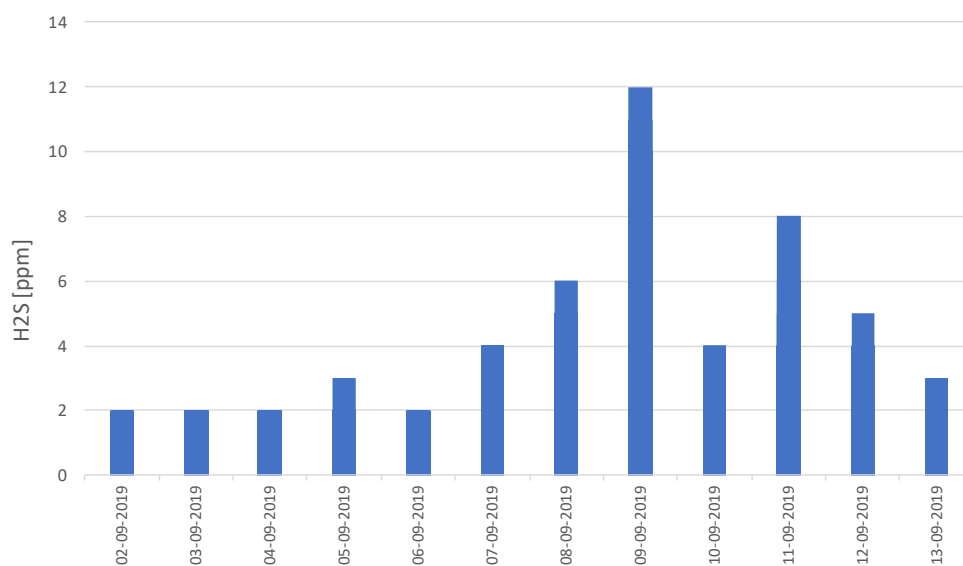
Den gamle brønd på Guldager Stationsvej blev etableret for cirka 10-15 år siden. I Figur 52 ses billeder af brønden inden etablering af den nye kalkbrønd. Der er tegn på korrosion og synlige stentilslag på siderne af brønden.



Figur 52. Billeder af gammel brønd på Guldager Stationsvej, cirka 10-15 år gammel ved udskiftning.

Porsholtparken

Der er udført svovlbrintemålinger i brønden på Porsholtparken i september 2019. Målingerne viser en maksimal værdi på omkring 12 ppm, jf. Figur 53.



Figur 53. Svovlbrintemålinger fra brønd på Porsholtparken foretaget i september 2019.

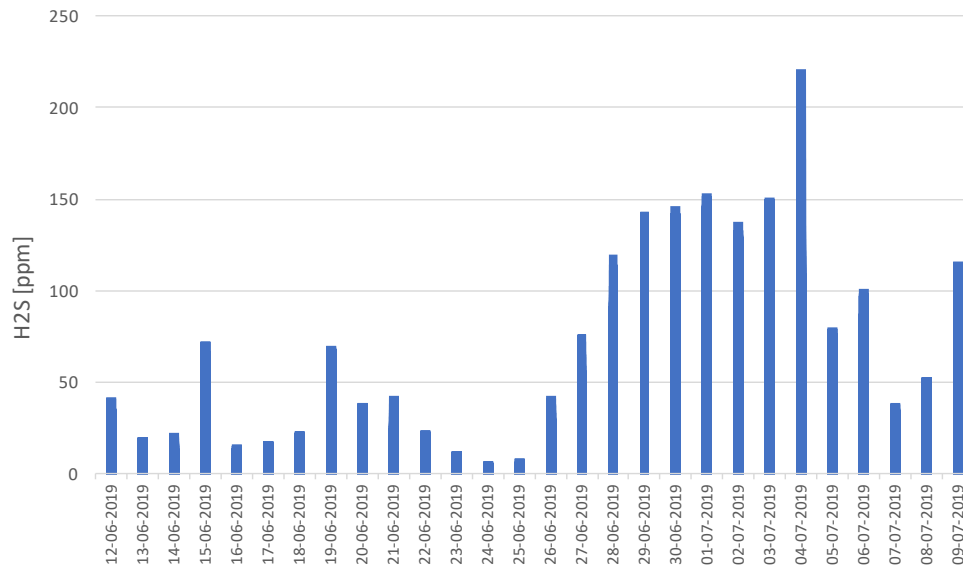
Alderen af den gamle brønd på Porsholtparken er ukendt. I Figur 54 ses et billede af brønden inden udskiftning. Der er registreret en lav grad af korrosion i brøndringene og en kraftig korrosion af bunden og overgangen mellem bund og brøndring, hvor betonen stedvist næsten er tæret væk.



Figur 54. Billede af gammel brønd på Porsholtparken. Alderen ved udskiftning er ukendt.

Tjæreborgvej

Der er udført svovlbrintemålinger i brønden på Tjæreborgvej i perioden juni 2019 til juli 2019. Målingerne viser en maksimal værdi på omkring 220 ppm, jf. Figur 55.



Figur 55. Svovlbrintemålinger fra brønd på Tjæreborgvej foretaget i perioden juli 2019-august 2019.

Den gamle brønd på Tjæreborgvej blev etableret for cirka 15 år siden. I Figur 56 ses billeder af brønden inden etablering af den nye kalkbrønd. Der er tydelige tegn på korrosion og betonen fremstår meget porøs på trods af, at brønden kun er 15 år ved udskiftning. Den kraftige korrosion på relativt få år, stemmer fint overens med de høje svovlbrintekonzentrationer der er målt, jf. Figur 55.



Figur 56. Billeder af gammel brønd på Tjæreborgvej, cirka 15 år gammel ved udskiftning.

Toftnæsvej

Svovlbrintemålinger af brønden foregår og var ikke tilgængelig inden projektafslutningen.

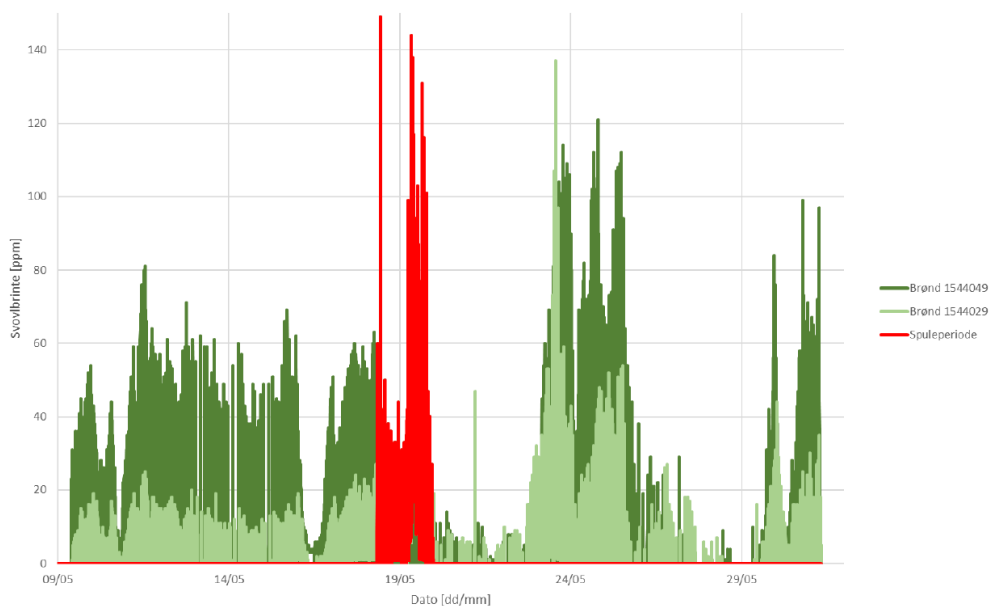
Den oprindelig brønd på Toftnæsvej blev etableret i 1980. I Figur 57 ses billeder af brønden inden etablering af den nye kalkbrønd. Der er et tydeligt tegn på korrosion og de yderste 2 cm af betonen er svært porøs.



Figur 57. Billeder af gammel brønd på Toftnæsvej anlagt i 1980.

Bilag 1.3 Fredericia Spildevand og Energi A/S

Svovlbrintemålinger er foretaget i to brønde ifm. den etablerede rørstrækning i maj 2018. Resultaterne fremgår af Figur 58. Målingerne markeret med rødt er registreret i en periode, hvor røret er blevet spulet, hvorfor der skal ses bort fra disse målinger. Den maksimale registrerede svovlbrintekonzentration er således omkring 135 ppm.



Figur 58. Svovlbrintemålinger foretaget i C.F. Tietgensvej, maj 2018.

Den oprindelig rørstrækning blev anlagt i 1989. I Figur 59 ses et billede af et gammelt rør fra strækningen og i Figur 60 ses et billede af en gammel brønd. Der ses tydelige tegn på korrosion i form af synlige stenstillag i oversiden af røret samt afskalninger i bunden af brønden.



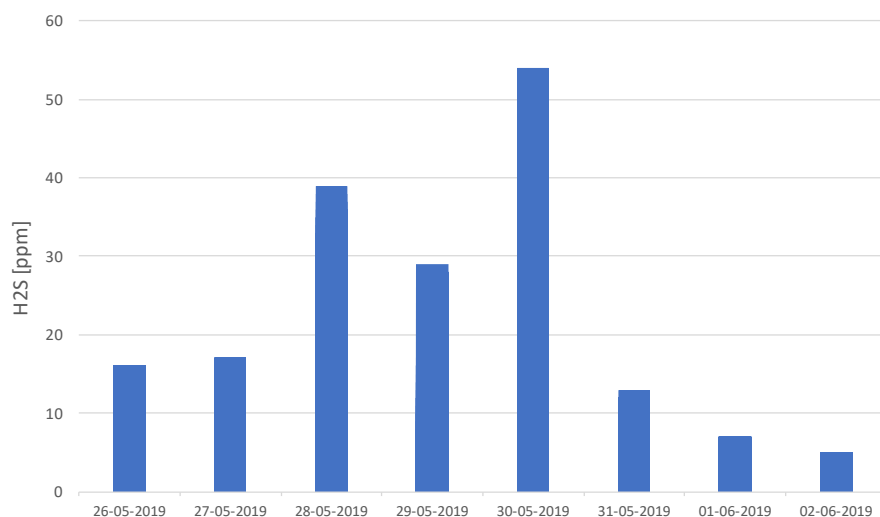
Figur 59. Billede af gammelt rør fra rørstrækning anlagt i Fredericia.



Figur 60. Billeder af gammel brønd fra rørstrækning anlagt i Fredericia.

Bilag 1.4 Hedensted Spildevand A/S

Der er foretaget svovlbrintemålinger i den etablerede rørstrækning i maj og juni 2019. Resultaterne viser en maksimal svovlbrintekonzentration på lidt over 50 ppm, jf. Figur 61.



Figur 61. Svovlbrintemåling i ledningstrækning i Bjerre udført i maj og juni 2019.

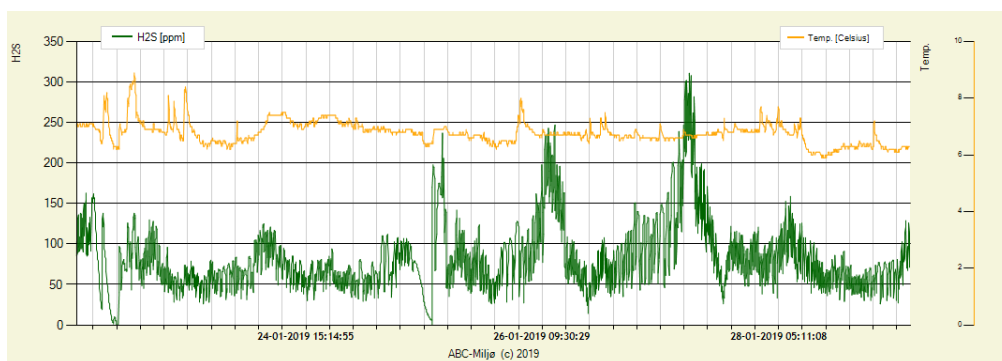
Den oprindelig rørstrækning blev anlagt i 1967. I Figur 62 ses et billede af et gammelt rør fra strækningen samt en gammel brønd. Der ses tegn på korrosion i form af synlige tilslag i både rør og brønd.



Figur 62. Billede af gammel rør og brønd fra rørstrækning i Bjerre etableret i 1967.

Bilag 1.5 Jammerbugt Forsyning A/S

Der er foretaget svovlbrintemålinger i en oppumpningsbrønd i Aabybro i januar 2019. Resultaterne fremgår af Figur 63. Den maksimale registrerede svovlbrintekonzentration er omkring 300 ppm.



Figur 63. Svovlbrintemåling foretaget i oppumpningsbrønd i Aabybro.

De oprindelige brønde blev etableret i 1978 og den oprindelige rørstrækning i Hune blev etableret i 1975. Et billede af en gamle brønd er vist i Figur 64. Der er tydelige tegn på syrepåvirkning og indersiden af brønden er så porøs, at den kan fjernes med en skovl.



Figur 64. Billeder af gammel brønd i Aabybro etableret i 1978.

Udvikling af modstandsdygtige betonrør til aggressive miljøer II

I MUDP-projektet "Udvikling af modstandsdygtige betonrør til aggressive miljøer II" er en ny teknologi til at producere betonrør med længere levetid i aggressive spildevandsmiljøer end traditionelt producerede udviklet og afprøvet. Der mangler dog stadig langtidsdokumentation af teknologien, hvilket løbende opfølgning på forsøgsstrækningerne etableret i de 2 projekter bør kunne give.

Det konkluderes, at der produktionsteknisk ikke er de store udfordringer ved at anvende den udviklede teknologi, men at materialeomkostningerne ved fremstilling i Danmark af afløbsprodukter med kalktilslag må forventes at være højere end for traditionelle afløbsprodukter. De højere materialeomkostninger vurderes dog at kunne retfærdiggøres set i en levetidsbetragtning af den forventede længere levetid i aggressive miljøer.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk