

# Udvikling af modstandsdygtige betonrør til aggressive miljøer

August 2015



**Titel: Udvikling af modstandsdygtige betonrør til aggressive miljøer**

**Projektgruppe:**

Teknologisk Institut (projektleder)  
RC Betonvarer A/S  
Aalborg Forsyning A/S  
HOFOR A/S

**Udgiver:**

Naturstyrelsen  
Haraldsgade 53  
2100 København Ø

**Redaktion [evt. fotos og illustrationer]:**

Jack Anderson  
Martin Kaasgaard

[www.nst.dk](http://www.nst.dk)

**År:**

2015

**ISBN nr.** 978-87-7175-505-3

**Ansvarsfraskrivelse:**

Naturstyrelsen offentliggør rapporter inden for vandteknologi, medfinansieret af Miljø- og Fødevareministeriet. Offentliggørelsen betyder, at Naturstyrelsen finder indholdet af væsentlig betydning for en bredere kreds. Naturstyrelsen deler dog ikke nødvendigvis de synspunkter, der kommer til udtryk i rapporterne.

Må citeres med kildeangivelse.

# Indhold

<b>Forord.....</b>	<b>4</b>
<b>Sammenfatning.....</b>	<b>5</b>
<b>Summary.....</b>	<b>7</b>
<b>1. Indledning .....</b>	<b>9</b>
<b>2. Indhold .....</b>	<b>12</b>
<b>3. Konklusion.....</b>	<b>22</b>
<b>Litteratur .....</b>	<b>23</b>

# Forord

Denne rapport er udarbejdet på baggrund af projektet ”Udvikling af modstandsdygtige betonrør til aggressive miljøer”, der er gennemført i projektperioden 1. januar 2013 til 1. august 2015 med tilskud fra Miljøministeriet.

Projektgruppen har bestået af:  
Teknologisk Institut –projektleder  
RC Betonvarer A/S  
Aalborg Forsyning, Kloak A/S  
HOFOR

I følgegruppen har, ud over projektgruppen, også Naturstyrelsen deltaget v/Helle Mirjam Petersen, Afløbsgruppen v/Martin Rosendahl, Grindsted Betonvarefabrik, Rørcentret, Teknologisk Institut v/Per Hemmingsen.

# Sammenfatning

Projektet ”Udvikling af modstandsdygtige betonrør til aggressive miljøer” kom til, fordi der forelå et synligt behov.

Det danske afløbssystem, der omfatter et ca. 50.000 km offentligt ledningsnet, renoveres og udbygges på årsbasis for ca. 1 mia. kr.

Anvendelsen af betonrørssystemer til transport af spildevand har en lang række tekniske, miljømæssige og samfundsøkonomiske fordele, men betonen nedbrydes i de ekstremt aggressive spildevandsmiljøer med risici for bl.a. grundvandsforurening fra utætte betonrørssystemer.

Rensning af spildevand centraliseres i stigende grad. Det betyder lange trykledninger og dermed længere opholdstid i fuldtløbende rør, hvor der ikke sker nogen tilførsel af ilt. Det fremmer dannelsen af stoffet svovlbrinte - det kendes fra lugtproblemer i spildevand, gylle og organisk affald. Svovlbrinte virker korrosivt på beton og kan gøre stor skade på beton.

Ofte er betonrør udskiftet efter blot få år på trods af en langt længere forventet levetid.

Hvis problemet ikke løses, vil det kun være et spørgsmål om tid, før de betonrør, som transporterer en betydelig andel af dansk spildevand, er nedbrudt.

## Projektets hovedmål

Projektets hovedformål var at udvikle betonrør, der er så modstandsdygtige, at deres levetid i de ekstremt aggressive miljøer, som i dag hersker i de danske spildevandsledninger, generelt kan forventes at være 50-100 år.

## Metode

Projektets hovedformål er nået gennem opfyldelse af en række delmål, herunder:

- Udvikling og afprøvning af forskellige potentielle teknologier til opnåelse af større modstandsdygtighed af betonrør på laboratorieniveau.
- Optimering af produktionsmetoder, så de udviklede og udvalgte teknologier kan skaleres op i fuldskala.
- Afprøvning af nyudviklede teknologier i en fuldskala ledningsentreprise.

I alt 4 teknologier er afprøvet, herunder kalkstenstilslag som delvis erstatning for traditionelle danske tilslagsmaterialer til beton.

De fire teknologierne, der er testet i laboratoriet er:

- Kalkstenstilslag – offermateriale, neutraliserer syren så angreb på cementpastaen reduceres.
- Calcium Aluminate Cement – mere syrerestistent hydratiseringsprodukt (aluminathydrat er stabilt ned til pH 3-4). Ved syrenedbrydning af calcium aluminatehydrater dannes mere aluminathydrat, som fylder porerne.
- Slaggecement – tættere mikrostruktur, syreindtrængning reduceres.
- Geopolymer (alkalisk aktiveret flyveaske/slagge) – syrerestistent binder som erstatning for cementpasta.

Produkterne fremstillet på baggrund af de udviklede recepter er blevet testet for syrebestandighed. Der er taget udgangspunkt i en standardrecept til tørbeton. Ud fra standardrecepten er der designet sammenlignelige recepter for de forskellige teknologier. For alle teknologierne er der fremstillet prøveemner til bl.a. syretest iht. ASTM C267

### **Resultater**

Projektets resultater, efter udvikling og afprøvning af forskellige teknologier, har givet stærke forventninger om, at der på eksisterende produktionsanlæg vil kunne produceres betonrør med en markant længere levetid i de aggressive spildevandsmiljøer.

Rapportens hovedkonklusion er, at der ud fra laboratorietest er dokumentation for, at de udviklede og testede teknologier alle forbedrer betonens modstandsdygtighed over for svovlsyrepåvirkning og at den teknologi, der performer bedst, nemlig kalkstenstilslag som delvis erstatning for traditionelle tilslagsmaterialer til beton, er lige til at implementere i produktionen, uden at det forventes at få nævneværdig betydning for produktionsomkostningerne. Der vil dog være behov for lidt receptoptimering.

### **Perspektiver**

Med resultaterne fra denne rapport er der basis for, at der i en årrække foretages inspektion og tilstandsvurdering af fuldskala ledningsentreprisen, samt af prøveemner ophængt i kloak med henblik på at opnå langtidserfaringer med den nye rørtype udlagt i det "virkelige" spildevandsmiljø.

Der vil blive rettet henvendelse til Afløbsgruppen under Dansk Beton for at høre om gruppens interesse og muligheder for at finansiere den efterfølgende inspektion og tilstandsvurdering.

Det er en barriere for implementering af den nye teknologi, at der hverken i lovgivningen eller i den harmoniserede standard EN 1916 for afløbsrør ikke er krav til betonrørs syrebestandighed og det vil være vanskeligt for udbudsgiver ved anskaffelse af afløbsrør at begrunde krav om den nye rørtype, idet der primært haves resultater efter laboratorietest og der mangler langtidserfaringer med den nye rørtype. Der vil blive rettet henvendelse til det danske standardiseringsudvalg S-472, Betonvarer for nærmere afklaring af mulighederne for at lave en dansk henvendelse til teknisk komité CEN/TC 165 om at tage forholdet op i forbindelse med den igangværende revision af standarden.

# Summary

The project "Development of resistant concrete pipes for aggressive environments" arose due to a clear need for innovation.

Every year, the Danish draining system, consisting of approximately 50.000 km of public pipelines, is renovated and expanded for around 1 billion DKK.

There are numerous technical, environmental and socioeconomic advantages in using concrete pipes for transport of wastewater. However, the extremely aggressive wastewater environment degrades the concrete with the risk of groundwater contamination from, among other, the leaking pipe systems.

Treatment of wastewater is increasingly centralized. This means long pressure pipes and by that, longer time in completely wastewater filled pipes where no oxygen is added. This increases the formation of hydrogen sulphide, known from the smell of wastewater, manure and organic waste. The hydrogen sulphide is corrosive for concrete and can therefore cause severe damage to concrete pipes.

Concrete pipes are often replaced after just a few years despite a far longer service life expectancy.

Unless the problem is solved, it will merely be a matter of time before the concrete pipes, which transports a significant part of the Danish wastewater, are degraded.

## **The main objectives of the project**

The main purpose of the project was to develop a resistant concrete pipe with an expected service life in extreme aggressive environments, such as the environments in the Danish wastewater pipelines, of 50-100 years.

## **Method**

The main objective of the project was reached through fulfilling of a number of milestones, including:

- Development and testing of various potential technologies to achieve a higher resistance of the concrete pipes on laboratory scale.
- Optimization of the method of production, so that the developed and chosen technologies are suitable for full-scale production.
- Testing of the newly developed technologies in a full-scale pipe enterprise.

A total of four technologies were tested, including limestone aggregate as a partly substitute for the traditional aggregates used for concrete in Denmark.

The products developed based on these mix designs were tested for their resistance against acid. For each technology, comparable mix designs have been developed based on a standard mix design for dry concrete. From all mix designs based on the developed technologies, test specimens were cast for, among others, acid testing according to ASTM C267.

The four technologies that have been tested in the laboratory are:

- Limestone aggregate as substitute for part of the traditional Danish aggregate. The limestone acts as a sacrificial material by neutralizing the acid and hereby reducing the acid attack on the cement paste.

- Calcium aluminate cement. Calcium aluminate cement forms more acid resistant hydration product (alumina hydrate is stable down to pH 3-4). By acid decomposition of calcium aluminate hydrate, more aluminate hydrate is formed that fills the pores.
- Blast furnace slag cement. Blast furnace slag cement forms a closer microstructure that reduces acid penetration.
- Geo polymer (alkaline activated fly ash / slag). Geo polymer forms an acid-resistant binder as a substitute for the cement paste.

## **Results**

The results of the project, have strongly indicated that it will be possible to produce concrete pipes on the existing productions facilities with a significant longer service life in the aggressive wastewater environments.

From the laboratory tests, it is documented, that the developed technologies all improve the resistance of the concrete to hydrogen sulphide exposure. The best preforming technology has proved to be limestone aggregate as a partly substitute for the traditional aggregate. It is expected that this method can be implemented in production without any significant effect on the production costs. However, it will be necessary to optimize the mix design.

## **Perspectives**

With the results from this report, a basis is created for conducting an inspection and condition assessment of the full-scale pipe enterprise for several years to come. Furthermore, the condition of specimens suspended in the sewer in order to achieve long-term experience with the new type of pipe laid out in the "real" wastewater environment can be followed.

Contact will be made to the Drainage Group under Dansk Beton in order to clarify the interest and ability of the group to finance the subsequent inspection and condition assessment.

It is a barrier for implementation of the new technology, that neither the regulations nor the harmonized standard, EN 1916 for drainage pipes, sets requirements to acid resistance of the concrete pipes. It will be difficult for the tender offers on the purchase of drainpipes to justify demands for the new type of pipe with only results from laboratory tests and as there is a lack of long-term experience with the new type of pipe. The Danish Standardization Committees S-472, Concrete Items, will be approached in order to clarify the possibilities of making a Danish contact to the Technical Committee CEN / TC 165 to consider the conditions in the context of the ongoing revision of the standard.



# 1. Indledning

Kommunalreformen i 2007 i Danmark har medført, at rensning af spildevand i stigende grad centraliseres. Det betyder lange trykledninger og dermed længere opholdstid i fuldt løbende rør, hvor der ikke sker nogen tilførsel af ilt. Samtidig separeres spildevand og regnvand i stigende grad, hvorved koncentrationen af diverse kemiske stoffer i spildevandet øges. Begge disse ændringer fremmer dannelsen af svovlbrinte, dvs. accelererer nedbrydning af betonrør [1][2].

Korrosion af betondele i afløbssystemer har siden første halvdel af det 20'ende århundrede været opfattet som et væsentligt problem både nationalt og internationalt. Der har i tidens løb været forsøgt flere forskellige løsningsmodeller, som ikke har ført til fuldt tilfredsstillende resultat [3].

Korrosionen er forårsaget af svovlsur nedbrydning af spildevandsledningernes beton, som følge af svovlbrinte dannet ved anaerob bakterievækst i spildevandet. Ofte er betonrør udskiftet efter blot få år på trods af en langt længere forventet levetid. Således kan svovlbrintenedbrydningen reducere levetiden af et betonrør med op til 70 % [4].

Alene Aalborg Kommunes Kloakforsyning har gennemført udskiftninger af flere nyere kilometerlange betonledninger, efter at rørene var så medtagede af svovlbrintekorrosion, at det blev vurderet, at der var overhængende risiko for sammenstyrtning. I 2005 oplevede kloakforsyningen i Aalborg et brud på en nyere betonledning.

I Københavns Energi A/S har man flere eksempler på svovlbrintekorrosion i afskærende ledninger med pumpede spildevandsstrømme og i spildevandsledninger under kote nul, fx på Avedøre Holme. Svovlbrintekorrosionen har ifølge Københavns Energi A/S været en stærkt medvirkende årsag til porøsitet og utætheder, særlig ved samlinger og i brønde. Dette har givet anledning til indsvivning af grundvand med øget pumpebelastning og tæring af pumpestationer til følge. I et andet tilfælde (Strandbovej, Hvidovre) har Københavns Energi A/S oplevet, at afdræningen gennem de utætte ledninger har trukket forurening fra et gammelt kemikalie-depot på Renseanlæg Damhusåen over i kældre under parcelhuse.

Hvis problemerne med svovlbrinte i kloaknettet ikke løses, vil det kun være et spørgsmål om tid, før svovlbrinten ender med at nedbryde de betonkloakrør, som transporterer en betydelig andel af dansk spildevand [5].

Det danske afløbssystem, der omfatter et ca. 50.000 km offentligt ledningsnet, renoveres og udbygges på årsbasis for ca. 1 mia. kr. [5]. Der forefindes imidlertid ikke et samlet bud på udgifterne forbundet med renovering og fornyelse af svovlbrintekorroderede rørledninger. Visse steder i udlandet er der dog gjort forsøg på at estimere tabet, og specielt tallet for Flandern (ca. 6 millioner indbyggere) i Belgien, hvor det i 2002 blev vurderet, at den samlede årlige svovlbrintekorrosion i delstaten udgjorde et værditab på ca. 40 mio. d.kr. pr. år viser, at der med overvejende sandsynlighed også i Danmark forekommer et stort årligt værditab som følge af svovlbrintekorrosion af betonrør.

## **Beton og plastrør**

I Danmark produceres afløbsrør stort set kun af to materialer, beton og plast. Derfor er det naturligt, at der ofte foretages sammenligninger mellem disse.

De to produkter koster stort set det samme, men de to rørtyper har vidt forskellige egenskaber.

Plastrør fremstilles næsten 100 % af udenlandske råvarer, nemlig af PVC-granulat produceret af ethylen- og chlogas. PVC-granulatet blandes på plastrørsfabrikkerne med antioxidanter, stabilisatorer, farve- og fyldstoffer. De sidstnævnte stoffer udgør ca. 10 % af det færdige rør [6]. Forekomsten af tilsætningsstofferne (fx tungmetaller, blødgørere og bromerede flamme-hæmmere) er uønskede ud fra et miljømæssigt synspunkt. Med tiden vil der være en risiko for, at stofferne frigives til jord og grundvand [7].

Betonrør fremstilles af vand, sand og sten, der bindes sammen af cement, som fremstilles af sand og kridt, naturlige materialer som er mange millioner år gamle. Ved betonrørsproduktion fremstilles både råvarer og produktionsudstyr næsten 100 % i Danmark. Beregninger viser, at dette sammenholdt med den lidt mere mandskabskrævende betonrørsproduktion betyder, at der beskæftiges 2-3 gange så mange danskere pr. meter betonrør som pr. meter plastrør. Det er indlysende god samfundsøkonomi [8].

Energiforbruget til fremstilling er ca. 2600 MJ/m for betonrør og 14200 MJ/m for plastrør.

Betonrør har stærke rørstammer og samlinger, tåler store punktbelastninger, er retlinede og har god stabilitet i rørgraven. Det gør det let for entreprenøren at lave en velkomprimeret rørgrav, som sikrer god bæreevne for en overliggende vej samt et afløbssystem med god hydraulik, tæthed og lang levetid. Ved „Institutionen för Teknisk Vattenresurslära“ ved Lunds Universitet i Sverige er der i '93 -'94 foretaget en større undersøgelse af afløbsledningers tilstand i forbindelse med et projekt om nedbrydningsforløbet for afløbsledninger. Undersøgelsen er foretaget på toårige afløbsledninger, og der er undersøgt 9,9 km betonledninger (Ø225-Ø1200) og 8,9 km plastledninger (Ø160-Ø315). I det følgende er der sammenlignet rør i dimensionerne: plast: Ø200-Ø315 og beton: Ø225-Ø400.

Målinger af afvigelserne fra længdeprofilen viser, at ca. 19 % af plastrørsnettet har mere end 40 mm afvigelser, mens det for betonrør er knap 8 %. Med hensyn til deformationer viser undersøgelsen, at ca. 5 % af plastrørene har deformationer større end 8 %. Der er ikke målt deformationer på betonrørene, da disse er formfaste. En anden svensk undersøgelse af toårige afløbsledninger viser, at 76 % af betonledningerne kan godkendes med hensyn til retningsafvigelser, mens kun 11 % af plastledningerne er i orden [9].

Når der skal vælges rørtype til et afløbsprojekt med store rør (rør med en indvendig diameter på 700 mm eller mere), står valget kun mellem to rørtyper - stive (beton) eller fleksible (plast) rør. De to rørtyper har vidt forskellige egenskaber. Betonrør er i høj grad en selv bærende konstruktion, mens plastrør kræver støtte fra den omgivende jord.

De store betonrør er meget forskellige fra de mindre (cirkulære) rør. For det første er de udstyret med en „fod“ for at sikre en optimal understøtning. Inden for betonrør opereres der ikke med stivhedsklasser som for plastrør, men en beregning viser, at store betonrør har en ringstivhed af størrelsesordenen 5.000 kN/m<sup>2</sup>. For det andet har plastrør typisk en ringstivhed på enten 2, 4 eller 8 kN/m<sup>2</sup> (stivhedsklasse Lav, Normal eller Høj). Stivheden af betonrør er således utrolig stor sammenlignet med stivheden af plastrør.

Et betonrør har en meget høj bæreevne. Brudlasten for et Ø1400 mm betonrør på 2 m's længde er eksempelvis over 450 kN, hvilket svarer til vægten af 4-5 busser.

Bæreevnen og stivheden kombineret med betonrørets fod og høje egenvægt resulterer i et rør, der ikke er særlig følsomt over for udsving i kvaliteten af lægningen (understøtning, komprimering, omkringfyldens sammensætning, vandspejl mv.).

Ved komprimering umiddelbart over et plastrør risikerer man for store deformationer. Hvis plastrør deformerer, bliver selvrensningsevnen forringet.

Når der udgraves for at arbejde på de forskellige kabler og installationer, der ligger i jorden eller i forbindelse med et byggeri, sker det ofte i nærheden af afløbsrør. Udgraves der i umiddelbar nærhed af et afløbs-

rør, mister det sidestøtten. Det har kun mindre betydning for betonrør. Da der ofte arbejdes under vanskelige forhold, kan det endvidere være vanskeligt at få reableret udgravningen, så forholdene er tilstrækkeligt gode. Her er betonrørens styrke, stivhed og vægt en afgørende fordel, da rørene som nævnt er mindre følsomme over for ændringer i omkringfylden mv. [10].

Det er et dog et faktum, at rørvæggen er mere ru i betonrør end i plastrør. Et afløbssystems opgave er at lede vand samt urenheder til rensningsanlæg eller recipient, og evnen til at gøre dette afhænger af systemets hydrauliske egenskaber. De mere ru overflader af betonrør kunne derfor tale imod anvendelsen af betonrør. Flere undersøgelser har dog vist, at kvaliteten af lægningsarbejdet, udformningen af afløbssystemet og anlæggets driftstilstand er alt afgørende for systemets hydrauliske egenskaber (driftsruheden) snarere end selve røroverfladens ruhed [8].

Der er derfor både et samfundsøkonomisk, miljø- og markedsfølsomt incitament til at løse problematikken med nedbrydningen af betonrørene som følge af svovlbrinteangreb.

## 2. Indhold

### Formål

Hovedformålet med projektet har været at udvikle betonrør, der er modstandsdygtige over for svovlbrinte-angreb i en sådan grad, at deres levetid i de ekstremt aggressive miljøer, som i dag hersker i de danske spildevandsledninger, generelt kan forventes at være 50-100 år.

Derudover er projektets nedenstående delmål søgt opfyldt:

- Udvikling og laboratorieafprøvning af teknologi til fremstilling af betonrør, der modstår svovlbrinte.
- Udvikling og optimering af produktionsmetoder.
- Formidling og udarbejdelse af vejledning.

Delprojekterne har inkluderet nedenstående:

### Projektaktiviteter og projektleverancer

For at sikre at målsætningen for projektet blev opfyldt, blev projektaktiviteterne nedbrudt i følgende delprojekter:

DP1: Udvikling og laboratorieprøvning af teknologi

Formål: opstilling, afprøvning og videreudvikling af hypoteser for opnåelse af minimum 75 års holdbarhed af spildevandspåvirkede betonrør.

- Vidensøgning inden for eksisterende teknologier til opnåelse af syrebestandig beton.
- Opstilling af kravspecifikation (delmaterialer, produktion, udførelse, drift/vedligehold, holdbarhed, miljøaspekter).
- Opstilling af hypoteser for opnåelse af forbedret syrebestandighed af betonrør.
- Gennemførelse af forsøg for validering af hypoteser.
- Videreudvikling og yderligere afprøvning af empirisk begrundede hypoteser, herunder fremstilling af prøveemner og dokumentation af holdbarhedsmæssige egenskaber (syrebestandighed, frostbestandighed, chloridindtrængning, karbonatisering).
- Eksponering af prøveemner for fortyndet svovlsyre og visuel/mikroskopisk vurdering.

DP2: Udvikling og optimering af produktionsmetoder

Formål: udvikling og optimering af produktionsmetoder for udvalgte teknologier fra DP1 så de kan skales op i fuld skala og implementeres hos producent.

- Implementering af udvalgte teknologier i produktionen hos producent.
- Videreudvikling af udvalgte teknologier og dokumentation af egnethed i henhold til standarder.
- Etablering af rørstrækninger for demonstration af nyudviklede betonrør i ekstremt aggressive miljøer.
- Løbende tilstandsvurdering af betonrør, også efter projektafslutning.
- Udsendelse af pressemeddelelse i forbindelse med demonstrationsprojektet.

DP3: Formidling og udarbejdelse af vejledning

Formål: projektets resultater skal formidles til alle relevante interessenter, således at der opnås maksimal udnyttelse i både virksomhedsmæssig og samfundsmæssig sammenhæng.

- Udarbejdelse af vejledning for produktion, design og anvendelse af betonrør efter den udviklede teknologi.

- Pressemeddelelser ved projektets start og i forbindelse med demonstrationsprojekt.
- 4-5 populærvidenskabelige artikler udarbejdes undervejs i projektet.
- 1 artikel i internationalt videnskabeligt tidsskrift.
- 2-3 foredrag på relevante konferencer og årsmøder.
- 5-10 omtaler på relevante hjemmesider.
- Præsentation og udstilling på Rørcenterdagene på Teknologisk Institut.

## Teknologier

Vidensøgningen under DP1 førte til følgende mulige teknologier, som er blevet testet i laboratoriet:

De fire teknologierne, der er testet i laboratoriet er:

- Kalkstenstilslag – offermateriale, neutraliserer syren så angreb på cementpastaen reduceres.
- Calcium Aluminate Cement – mere syrerestistent hydratiseringsprodukt (aluminathydrat er stabilt ned til pH 3-4). Ved syrenedbrydning af calcium aluminathydrater dannes mere aluminathydrat, som fylder porerne.
- Slaggecement – tættere mikrostruktur, syreindtrængning reduceres.
- Geopolymer (alkalisk aktiveret flyveaske/slagge) – syrerestistent binder som erstatning for cementpasta.

## Recepter

Teknologierne nævnt ovenfor er blevet testet for syrebestandighed. Der er taget udgangspunkt i en standardrecept til tørbeton, som fremgår af tabel 1. Ud fra standardrecepten er der designet recepter for de forskellige teknologier med identiske pastaindhold, som ligeledes fremgår af tabel 1. Referencerecepten er testet både med HH cement og Lavalkali cement. Desuden er der testet en plastisk beton baseret på referencerecepten med HH cement, men med højere pastaindhold.

TABEL 1 RECEPTER TIL TØRBETON

	Reference	Kalksten tilslag	Calcium aluminat cement	Slagge cement	Geopolymer
Portland cement	332	332			
Calcium aluminat cement			400		
Slaggecement				385	
Flyveaske	74	74			380
0/4 mm sand	709		709	709	709
2/4 mm grus	250		250	250	250
2/8 mm sten	750		750	750	750
0/2 mm kalksten		700			
2/12 mm kalksten		1020			
Vand	127	127	137	132	
Natriumsilikat opløsning					96
Natriumhydroxid opløsning					44
Total	2242	2253	2246	2226	2229

## Prøvefremstilling – kompaktor

For alle teknologierne er der fremstillet cylindriske prøveemner med diameter 100 mm og højde 80 mm. Materialer blev afvejet i henhold til recepterne i tabel 1 og derefter blandet i en Hobart mixer. Prøveemner blev fremstillet med kompaktor (se figur 1), hvor det færdigblandede materiale blev kompakteret mellem 2 excentrisk roterende stempelhoveder ved et tryk på 4 bar til den ønskede densitet.



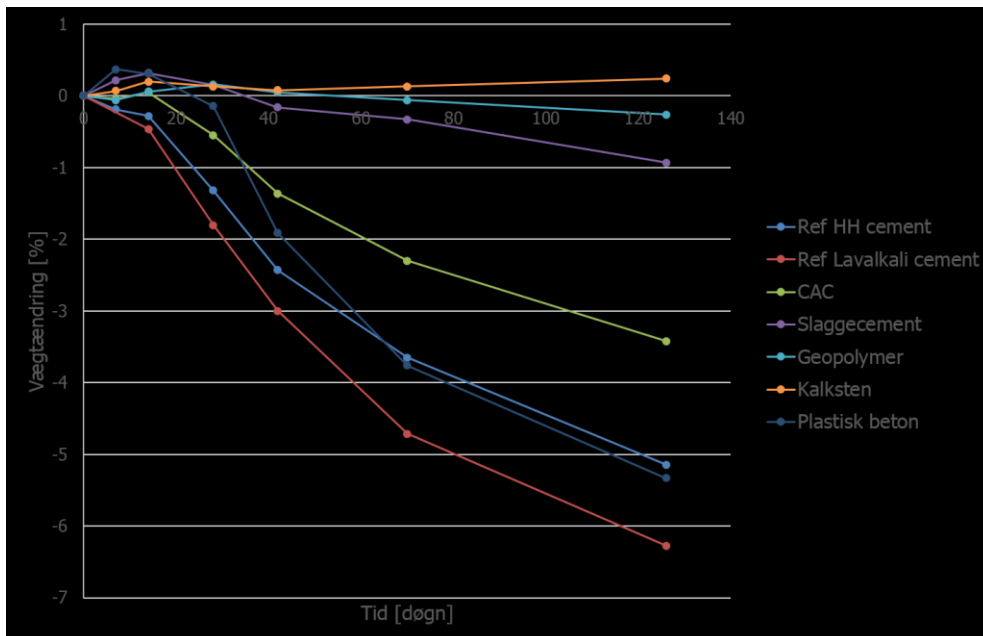
FIGUR 1 KOMPAKTOR TIL FREMSTILLING AF PRØVEMENER AF TØRBETON

### Syretest – procedure og resultater

Den anvendte procedure til syretesten er baseret på ASTM C267 og var som følger:

- Prøvemner lagres i vand ved 20 grader i 28 døgn.
- Prøvemner eksponeres til en 1 vægt% svovlsyreopløsning (pH~1), 6 prøvemner af hvert mix design eksponeres i separate kasser med 9 liter svovlsyreopløsning.
- Prøvemner vejes (VOT) og fotograferes efter 0, 7, 14, 28, 42, 70 og 126 døgn.
- Svovlsyreopløsningen udskiftes ved hver inspektion af prøvemnerne.

Vægtændring over tid for de testede teknologier fremgår af figur 2 og billede af prøvemner efter syretesten er vist i figur 3.



FIGUR 2 VÆGTÆNDRING OVER TID FOR PRØVEEMNER EKSPONERET TIL SVOVLISYRE.



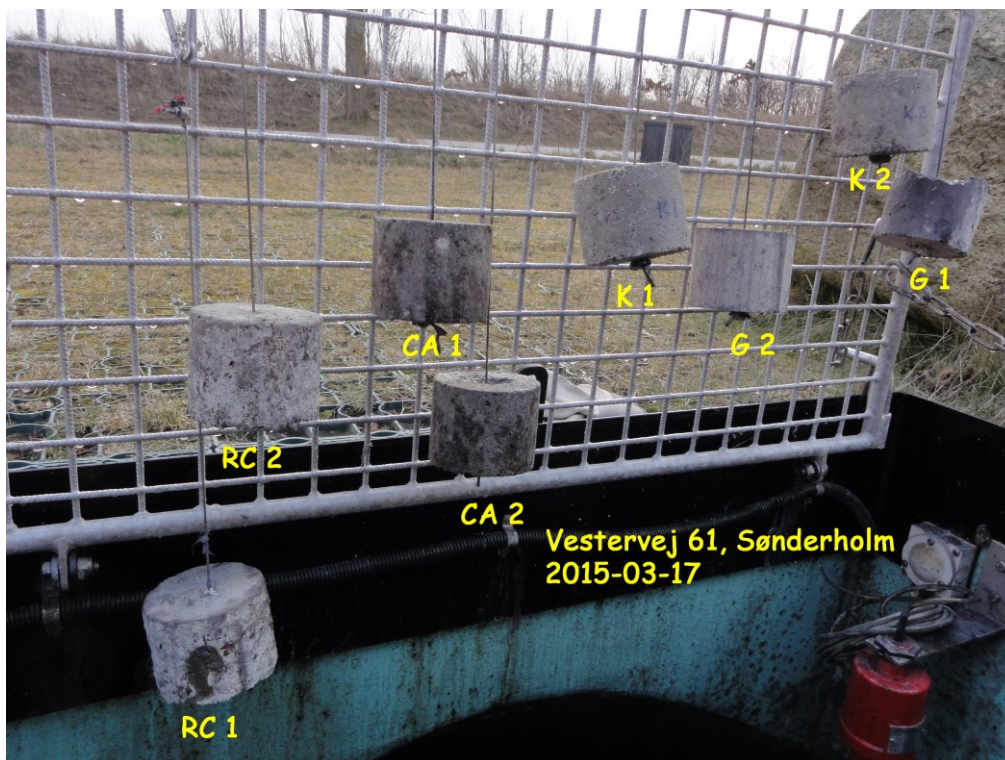
FIGUR 3 PRØVEEMNER EFTER SYRETEST (NEDERST) OG REFERENCEPRØVER OPBEVARET I VAND (ØVERST). FRA VENSTRE MOD HØJRE ER DET REFERENCE, CALCIUM ALUMINATE CEMENT, KALKSTEN OG GEOPOLYMER.

De forskellige testede teknologier har alle et markant mindre massetab end referencen. Det viser sig også at formodningen om at plastisk beton skulle være bedre end tørbeton, pga. en mere lukket overflade, kan afvises. Det tager længere tid før den plastiske beton begynder at tabe masse, men til de sene terminer har den plastiske beton et massetab tilsvarende reference tørbetonen. Det ser også ud til at HH cement er bedre end Lavalkali cement. Selvom alle de testede teknologier har et lavere massetab end referencen er der stor forskel på disse. Calcium Aluminate Cement har et forholdsvis stort massetab, slaggecement og geopolymer et forholdsvis lille massetab, mens kalksten har en massetilvækst. Massetilvæksten for kalksten kan forklares med at kalken reagerer med svovlsyre, hvorved der dannes gips som udfældes på overfladen. Dette ses tydeligt i figur 3, hvor prøven med kalksten er blevet helt hvid efter eksponering til svovlsyre. Gipsen udfældes i porerne i overfladen og beskytter mod yderligere indtrængning. Samtidig er der konstateret en 25 % styrketilvækst for kalksten prøver efter svovlsyreeksposering som følge af udfældning

af gips i porerne. Det ses også i figur 3 at referenceprøven og prøven med Calcium Aluminate Cement har tydeligt eksponerede tilslag efter svovlsyreeksponering som følge af at svovlsyren har nedbrudt cementpa-staen. Geopolymer prøven fremstår upåvirket af svovlsyreeksponering.

### Kloakeksponering

Udover syretesten er prøveemner af de nævnte teknologier (minus slaggecement) nedhængt i kloak (se figur 4) på to forskellige lokationer med høj svovlbrinteforekomst. Disse vil blive inspiceret løbende over de næste år.

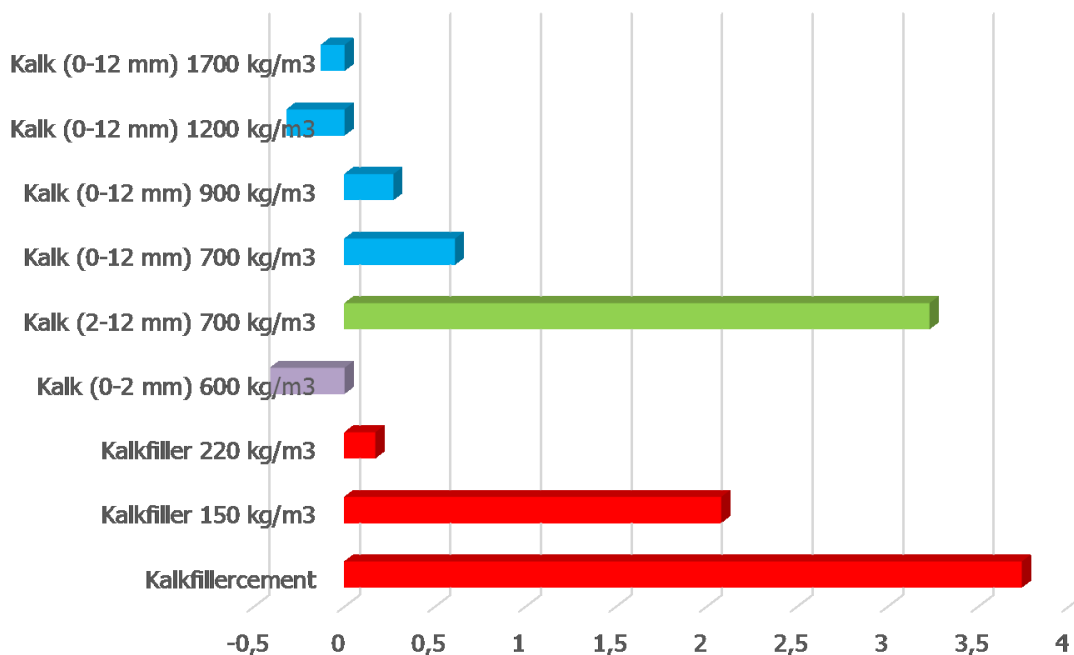


FIGUR 4 PRØVEEMNER AF TEKNOLOGIERNE EKSPONERET/NEDHÆNGT I KLOAK

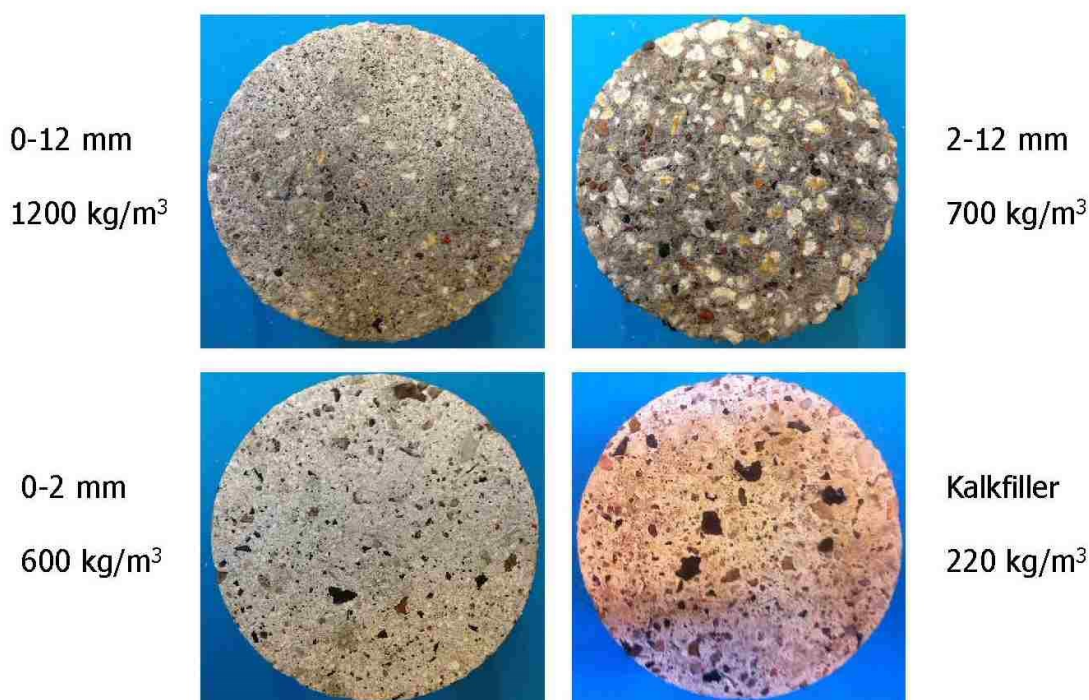
### Yderligere laboratorieforsøg med kalksten tilslag

For yderligere at dokumentere effekten af kalksten tilslag er der testet mix design, hvor indholdet af kalksten er varieret og desuden er mix design med forskellige fraktioner af kalksten blevet testet. Formålet har været at finde ud hvor lidt kalksten man i princippet kan tilsætte og stadig undgå massetab og om finheden har en betydning. Massetab efter 70 døgns svovlsyreeksponering for disse fremgår af figur 5 og billeder af prøveemner efter syretesten er vist i figur 6.





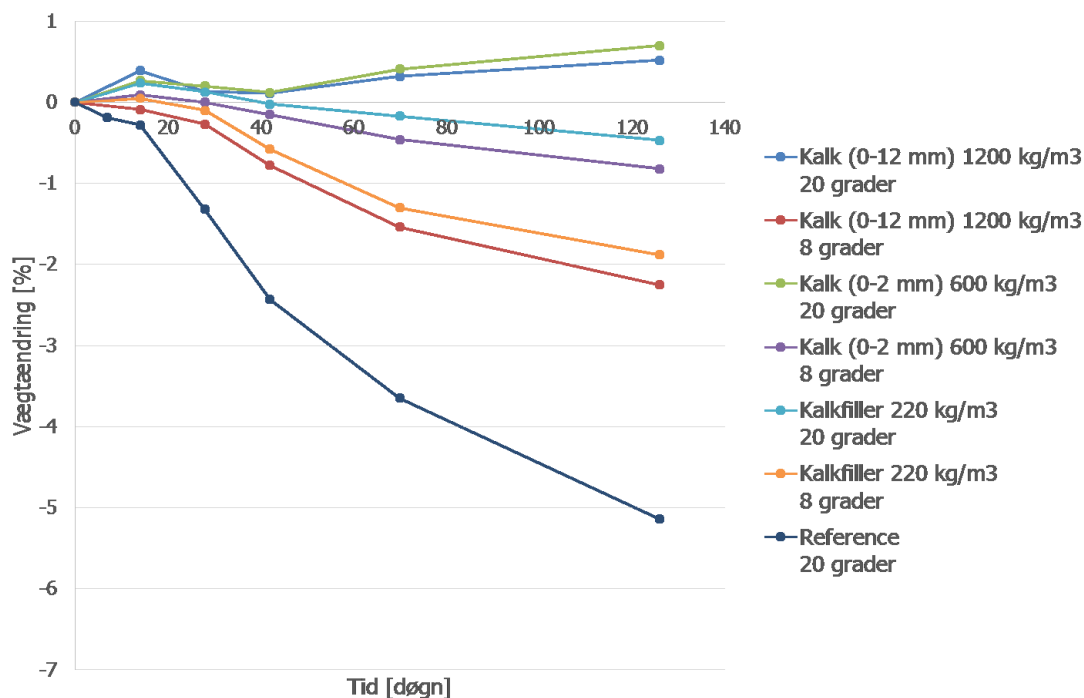
FIGUR 5 MASSETAB (PROCENTUELT) FOR PRØVER MED KALKSTEN EFTER 70 DØGNS SVOVLSYREEKSPONERING



FIGUR 6 PRØVEEMNER MED KALKSTEN EFTER 70 DØGNS SVOVLSYREEKSPONERING.

Det fremgår at grænsen for at undgå massetab ved tilsætning af kalksten med en bred kornkurve (0-12 mm) ligger mellem 900 og 1200 kg/m<sup>3</sup>. Samtidig fremgår det dog også at hvis man kun tilsætter kalksten over 2 mm (700 kg/m<sup>3</sup>) har det ingen effekt i forhold til at undgå massetab. Tilsvarende kan man helt undgå massetab ved tilsætning af 600 kg/m<sup>3</sup> kalksten under 2 mm. Tilsætning af 220 kg/m<sup>3</sup> kalkfiller giver kun anledning til et mindre massetab.

Endelig er udvalgte recepter med kalksten tilslag blevet eksponeret til svovlsyre ved 8 grader, som er en realistisk temperatur i en kloak. Vægtændring for disse er sammenlignet med vægtændring ved den tilsvarende syretest ved 20 grader for de samme recepter i nedenstående figur.

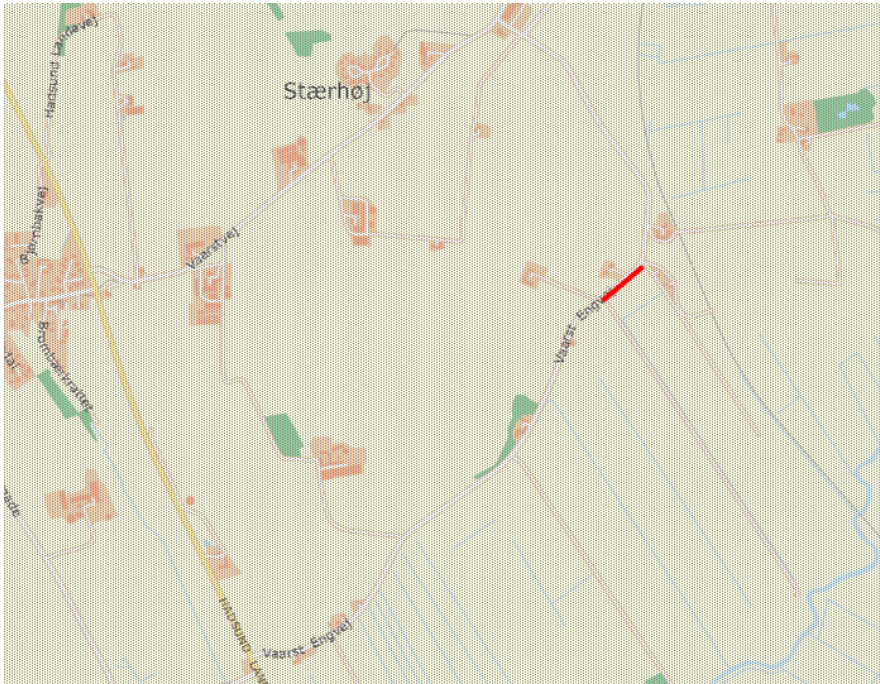


FIGUR 7 VÆGTÆNDRING OVER TID FOR PRØVER MED KALKSTEN, 8 VERSUS 20 GRADER

Det fremgår tydeligt at der for de forskellige prøver med kalksten er et større massetab ved 8 grader sammenlignet med 20 grader. Massetabet er dog stadig langt mindre end for referencen ved 20 grader (der er ikke gennemført test af referencen ved 8 grader).

### Fuldskala demonstration

På basis af laboratorieforsøgene er det besluttet at teste mix design med henholdsvis fin (0-2 mm) kalksten og slaggecement (CEM III/B) i fuld skala. Desuden er det efter ønske fra RC Betonvarer valgt at inkludere rør med en coating-løsning udviklet af Lars Børthy. Aalborg Forsyning har stillet en rørstrækning (225 meter, Ø400 mm rør) med høj svovlbrinteforekomst til rådighed ved Vaarst syd for Aalborg (se figur 8). Rørene er lagt i jorden i oktober 2014 og vil blive inspiceret løbende over de næste år.



FIGUR 8 OVERSIGTSKORT VAARST

### Produktion af rør til fuldskala demonstration

Alle rørene til forsøgsstrækningen er produceret af RC Betonvarer i perioden umiddelbart inden de er lagt i jorden. RC Betonvarer har følgende erfaringer (vejledning) i forbindelse med produktionen af rørene:

Fælles for de afprøvede teknologier er, at rørene har kunnet produceres på det eksisterende produktionsanlæg. Dog kræver den afprøvede coating-teknologi yderligere et anlæg til overfladebehandling.

#### *Slaggecement*

I prøveproduktionen er cement og flyveaske fra referencerecepten erstattet med slaggecement 1:1. Betonens homogenitet og bearbejdelighed afviger ikke fra referencen og de producerede rør er både visuelt og styrkemæssigt på niveau med referencen.

Teknologien vil uden problemer kunne udrulles til fuldskalaproduktion.

Slaggecement anvendes normalt ikke i Danmark og en markedspris for cementen er derfor usikker. Kostprisen vurderes dog at være tæt på referencen.

#### *Kalktilslag*

I prøveproduktionen er sand 0-4 mm erstattet med kalk 0-2 mm (Granufax fra Faxe Kalk). Det store indhold af fine partikler medfører, at der skal tilføres en betydeligt større vandmængde (+50 %) til betonen for at opnå den ønskede konsistens.

På de producerede rør ses, som følge af den kraftige vibration, en tendens til at fint materiale/slam samler sig i overfladen særligt ved spidsender. Dette giver en lidt mere uregelmæssig overflade, men har ikke nævneværdig betydning for kvaliteten.

På enkelte rør forekommer områder med lidt grovere overflader som følge af en ikke 100 % homogen beton. Dette har dog ikke haft indflydelse på tætheden og må forventes at kunne elimineres ved tilpasning af recepten.

De målte rørstyrker er lavere end referencen, dog uden at være kritiske i forhold til forsøgsstrækningen. Det må påregnes, at recepten skal optimeres for at kunne opnå tilfredsstillende styrker.

Teknologien vil uden større problemer kunne udrulles til fuldskalaproduktion. Det vil dog kræve nogen indkøring og receptoptimering at opnå styrker og overflader, der er fuldt tilsvarende referencen.

Tilslaget skal transporteres og lagres tørt, og det vil derfor, for de fleste fabrikkers vedkomne, være nødvendigt med en ombygning af materialesiloer før produktet kan indgå i en fuldskalaproduktion.

### Coating

Den testede coating-teknologi er afprøvet på standardrør og brønde.

Løsningen er en 2 lags løsning, der består af først en sealer/primer og herefter en topcoat. Både sealer og topcoat er epoxybaserede og er specialudviklet til formålet.

Sealeren er en kraftigt fortyndet 2 komponent væske, der sprøjtes på overfladen, hvorefter emnet placeres i et trykkammer, således at der sker en imprægnering af betonen. Imprægneringen kan også foretages ved vakuum.

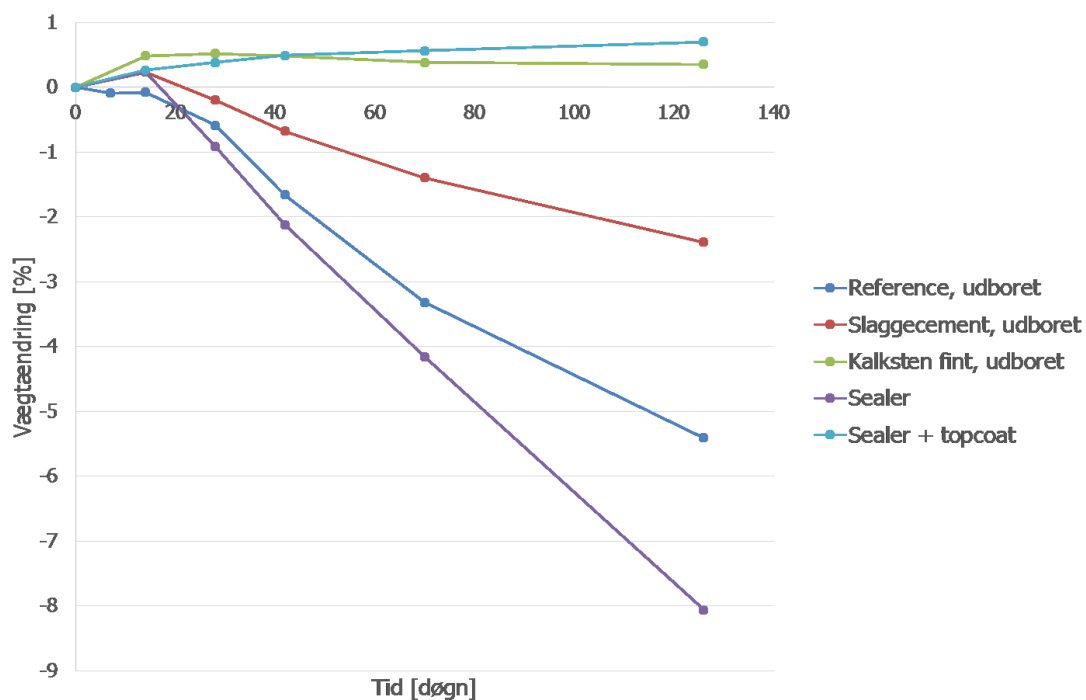
Topcoaten påføres inden sealeren er afhærdet, således at der opnås den bedst mulige vedhæftning mellem lagene. Topcoaten er ligeledes et 2 komponent produkt, der påføres med en lagtykkelse på min. 300  $\mu$ . For at kunne anvende denne teknologi skal der investeres i et coatinganlæg og et trykkammer, og vil derfor kræve en større investering hos producenten.

Coatingen kan benyttes til efterbehandling af både våd- og tørstøbte emner og kan derfor benyttes til det fulde produktprogram inkl. specialudførte brønde og bygværker.

Det er usikkert, hvad produktionsprisen vil være på et fuldskala-anlæg, men for rør forventes en fordobling af prisen, og for brønde en smule mindre.

### Syretest af prøver fra rør til fuldskala demonstration

Der er udført syretest af udborede kerner fra rørene med henholdsvis fint kalktilslag og slaggecement samt af coatede betonprøver. Resultaterne fremgår af figur 9.



FIGUR 9 SYRETEST AF UDBOREDE KERNER FRA BETONRØR SAMT COATEDE BETONPRØVER

Det fremgår tydeligt at for coating-løsningen er sealeren ikke i sig selv tilstrækkelig (sealeren skallede af prøven, hvorefter den underliggende beton blev angrebet), mens når der yderligere er anvendt topcoat kan der ikke konstateres noget massetab. Der kan heller ikke konstateres noget massetab for kerner med fint kalktilslag. Kerner med slaggecement har et højere massetab end tidligere konstateret for de laboratoriefremstillede prøver, men stadig meget lavere end referencen.

# 3. Konklusion


Rapportens hovedkonklusion er, at der ud fra laboratorietest er dokumentation for, at de udviklede og testede teknologier alle forbedrer betonens modstandsdygtighed over for svovlsyrepåvirkning og at den teknologi, der performer bedst, nemlig anvendelsen af kalkstenstilslag som delvis erstatning for traditionelle tilslagsmaterialer til beton, samtidig er lige til at implementere i produktionen, uden at det forventes at ville få nævneværdig betydning for produktionsomkostningerne.

Med resultaterne fra denne rapport er der basis for, at der i en årrække foretages inspektion og tilstandsvurdering af fuldskala ledningsentreprisen samt af prøveemner ophængt i kloak med henblik på at opnå langtidserfaringer med den nye rørtype udlagt i det "virkelige" spildevandsmiljø.

# Litteratur

- [1] Til kamp mod svovlbrinte. Artikler i DanskVand nr. 8 – oktober 2003.
- [2] Modelling af pH i spildevand - Bestemmelse af betydende buffersystemer og proces-ser. Afgangspjekt Aalborg Universitet 2011.
- [3] Miljøprojekt 1065/2006 Afløbssystemets levetid og renovering. Miljøstyrelsen.
- [4] Svovlbrinte i kloakker. Tidsskriftsartikler af Weixiao Yang, Henning Hjuler i Stads- og havneingeniøren 2005.
- [5] Spildevand ødelægger kloak. Artikel af Palle Søderberg, Faaborg Spildevand A/S på [www.fyens.dk](http://www.fyens.dk) 2003.
- [6] Temablad 13. Afløbsfraktionen, Dansk Beton Industriforening. Oktober 2000.
- [7] Notat om miljø- og sundhedsfaglige aspekter ved PVC. Informationscenter for Miljø & Sundhed 2009.
- [8] Temablad 9. Betonrør har den største vandføringskapacitet. Afløbsfraktionen, Dansk Betonindustriforening
- [9] Temablad 8 Betonrør sikrer god komprimering og hydraulik. Fordele ved lægning af betonrør. Afløbsfraktionen, Dansk Beton Industriforening.
- [10] Temablad 10 Store betonrør – en bæredygtig løsning. Afløbsfraktionen, Dansk Beton Industriforening.

## Udvikling af modstandsdygtige betonrør til aggressive miljøer



Naturstyrelsen  
Haraldsgade 53  
DK - 2100 København Ø  
Tlf.: (+45) 72 54 30 00  
**[www.nst.dk](http://www.nst.dk)**