

Sulfat- och svavelsyraangrepp på prefabricerade betonggrör i VA-miljö



Rapport 5100
ISRN: LUTVDG/TVBM—15/5100—SE(1-68)
ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds Tekniska Högskola
Byggnadsmaterial
Box 118
221 00 Lund

www.byggnadsmaterial.lth.se

Förord

Detta projekt är utfört som ett examensarbete för civilingenjörsutbildningen inom väg och vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola, LTH. Projektet utförs på uppdrag av betongtillverkaren StEriks i samarbete med avdelningen för Byggnadsmaterial. Arbetet har utförts av Oskar Linderoth med Katja Fridh som handledare och Peter Johansson som examinator. Ulrik Strömberg på StEriks har verkat som industrihandledare.

Arbetet består till största del av en litteraturstudie men det ingår även en laborativ del. Samtliga labbtester är utförda på LTH i avdelningens laboratorium.

Tack till:

Katja, Peter och Ulrik för hjälp och stöd under projektet.

Lars Wadsö för hjälp med det laborativa arbetet.

Övriga medarbetare på avdelningen för byggnadsmaterial för alla råd och tips.

Lars-Olof Nilsson på StEriks för hjälpen med material under projektets gång.

Oskar Linderoth

Lund, juni 2015

Sammanfattning

Kemiska angrepp av sulfater och svavelsyra är ett allt vanligare problem på svenska avloppsrör i betong. Inte minst tillverkarna av betongrör har märkt av ökningen, trots att deras rör uppfyller de krav som ställs är den faktiska beständigheten sämre än förväntat. Angrepp av denna typ är inget nytt i Sverige men har tidigare varit isolerat till få, särskilt extrema miljöer, till exempel rör från industrier, avfallsdeponier och i avloppstankar till finlandsfärjorna i Stockholms hamn.

Samtidigt som problemen ökar gör tuffare miljökrav att tillverkarna måste börja se sig om efter alternativ till den betong som används idag. Framförallt tillverkningen av cement är en koldioxidkrävande process vars betydelse man i framtiden hoppas kunna minska genom att byta ut cementet mot andra, mer miljövänliga, bindemedel. Mineraliska bindemedel såsom slagg, flygaska och silika har redan gjort entré på betongmarkanden. Men frågan är hur de nya bindemedlen påverkar betongens egenskaper och vad händer med beständigheten, mot till exempel kemiska angrepp, när 70 % av bindemedlet utgörs av slagg istället för portlandcement?

Projektets syftar till att genom en litteraturstudie beskriva och hjälpa tillverkarna förstå de mekanismer som ligger bakom angreppen. Arbetet innefattar även en laborativ del där ett antal betonger med varierande mängd slagg istället för portlandcement testades för sulfat- och svavelsyrabeständighet. Testerna gick till så att små, kubformade provkroppar om 5 cm placerades i baljor innehållande antingen svavelsyra (pH 1) eller en sulfatlösning (5 % $MgSO_4$, 5 % $NaSO_4$). Proverna förvarades i baljorna i cykler om sju dygn, fem i baljorna varefter de torkades två dygn i rumstemperatur innan de vägdes och åter placerades i baljorna. Resultaten gavs i form av viktförlust (%). Förhoppningen var att testerna skulle agera pekpinne till huruvida slagg är en lämplig ersättare till portlandcementet med avseende på de undersökta angreppen.

Examensarbetet utfördes vid Lunds Tekniska Högskola på avdelningen för Byggnadsmaterial, på uppdrag av Prefab-tillverkaren StEriks under våren 2015.

Beständighetstesterna visade att svavelsyra snabbt angriper betongen när pH ligger kring 1. Alla provkroppar, oavsett slagghalt, såg ut att angripas på samma sätt. Cementgelen i ytan bryts ner och faller så småningom av. En tydlig tendens är att det med ökad slagghalt följer en fördröjning av angreppet. De provkroppar som gjutits med rent portlandcement var de som uppvisade den snabbaste massförlusten. Angreppshastigheten minskade sedan med ökad slagghalt.

De prover som förvarades i sulfatlösningen uppvisade ingen eller mycket liten viktförändring. Det kan till exempel bero på att lösningen inte var tillräckligt aggressiv eller att initieringstiden för angreppen är längre än provtiden.

Man bör dock vara försiktig innan man drar några slutsatser av testresultaten. Testerna pågick under drygt en månad och utfördes i avdelningens laboratorium. Vad som händer med provkropparna i ett längre perspektiv är oklart och bör undersökas. Endast provkroppar med slagginblandning testades, andra mineraliska bindemedel, gärna i kombination med slagg vore intressanta att studera i framtida undersökningar.

Abstract

Chemical attacks caused by sulfates and sulfuric acid are a growing problem in Swedish sewer pipes made of concrete. Not least the manufacturers of these concrete pipes have noticed an increase. Their pipes are made according to given standards yet the permanence is worse than expected. However, this type of attacks is not a new phenomenon in Sweden but it used to be a problem isolated to a few extreme environments, for example pipes from heavy industries, garbage landfills and waste tanks connected to the Finland ferries in the port of Stockholm.

At the same time the environmental demands are getting tougher on the concrete industry. The production of cement is a very carbon dioxide demanding process, a process whose importance the industry is hoping to reduce in the near future by substituting parts of the Portland cement for other, environmentally friendly, binders. Mineral binders such as slag, fly ash and silica have already entered the concrete market. This project asks the question, how will these new binders affect the concretes properties in terms of sulfate and sulfuric acid permanence if 70 % of the binder is slag instead of Portland cement?

The project aimed to, through literature studies, describe and help the manufacturers understand the mechanisms behind the attacks. The project also included an experimental part where a number of concretes with a varying volume of slag, instead of Portland cement, was tested for their sulfate and sulfuric acid permanence. The tested concrete consisted of small cubes (5 cm) that were placed in tubes filled with either sulfuric acid (pH 1) or sulfate solution (5 % MgSO_4 , 5 % NaSO_4). The cubes were left in the tubes for five days before they were taken out and left to dry for two days. After drying their weight was measured and they went back in the tubes for another five days. The results of the test were measured in weight loss and loss of strength. The hope was that the test would work as a pointer as to how slag effects the attacks and the permanence.

The work was carried out at Lunds Tekniska Högskola at the department of Building Materials on behalf of the Swedish prefabricated concrete manufacturer StEriks during the spring of 2015.

The permanence tests showed that sulfuric acid attacks the concrete very quickly when pH is around 1. All specimens, independent of slag content, seem to be attacked in the same way. The cement gel in the surface is disintegrated and after a while it falls off. There is a clear tendency that specimens with small or no slag content is degraded faster than the ones with a high slag content, at least in terms of mass loss.

Specimens exposed to sulfate solutions showed no or very little weight loss. A possible explanation is, for example, that the solution wasn't aggressive enough or that the initiation time for these attacks is longer than the time of the tests.

One has to be careful before coming to any conclusions regarding these test results. The tests were carried out during one month in the department laboratory. What happens with the specimens in a longer perspective is yet to be investigated. Only specimens with slag were tested, other mineral binders, perhaps in combination with slag, would be interesting to investigate in future studies.

Innehållsförteckning

Förord	
Sammanfattning	
Abstract	
1 Inledning.....	1
1.1 Avgränsningar	2
2 Betong	3
2.1 Cementpasta	5
2.2 Bindemedel.....	6
2.2.1 Portlandcement.....	6
2.2.2 Mineraliska bindemedel	7
2.3 Ballast.....	9
2.4 Blandningsvatten	10
3 Kemiska angrepp: sulfat- och svavelrelaterade.....	11
3.1 Sulfatangrepp	12
3.1.1 Specialfall av sulfatangrepp	13
3.2 Svavelväte och svavelsyraangrepp.....	14
3.3 Svavelvätens hälsopåverkan.....	19
3.4 Yttre faktorerers påverkan på beständigheten	20
4 Test: Sulfat och svavelsyrabeständighet	23
4.1 Avgränsning	23
4.2 Material och metod.....	24
4.2.1 Gjutning och härdning.....	24
4.2.2 Utförandet av tester	30
4.3 Resultat.....	33
4.3.1 Tryckhållfasthet och lufthalt	33
4.3.2 Svavelsyrabeständighet	34
4.3.3 Sulfatbeständighet	43
5 Diskussion	45
6 Slutsatser	49
7 Referenser.....	51
Bilaga 1 – Mätdata från beständighetstester	53
Bilaga 2 – Mätdata från tryckhållfasthetstest.....	57

1 Inledning

Kemiska angrepp kopplade till sulfater och svavelväten är problem som blir allt vanligare på Sveriges VA-rör tillverkade i betong. Att problemen finns är sedan länge känt, framför allt i länder med varmt klimat och sulfatrik mark, till exempel delar av USA, mellanöstern och i Australien. I Sverige har vi historiskt sett varit relativt förskonade från denna typ av angrepp, här har fokus istället legat på fysikaliska angrepp kopplade till frost och kyla. De sulfat- och svavelväterelaterade angrepp som dokumenterats i Sverige har isolerats till extremfall i särskilt aggressiva miljöer, till exempel i ledningar från industrier, avfallsdeponier och i avloppstankar för finlandsfärjorna i Stockholms hamn [1]. Sulfater förekommer också i havsvatten och angreppen är relevanta för konstruktioner i marin miljö men det utgör inte fokus för detta projekt.

På senare år har antalet skadefall ökat även i Sverige, en orsak tros vara en ökad urbanisering vilket gör att rören på glesbygden plötsligt blir överdimensionerade och rör i städerna underdimensionerade. Båda fallen leder till ökad risk för angrepp på olika delar av VA-systemet [1, 2]. I flera fall, till exempel ett uppmärksammat sådant i Österrike [3] har rören trots att de uppfyller givna standarder behövt bytas ut efter bara några år på grund av svavelsyrakorrosion kopplad till svavelvätebildning.

Avloppssystemet består huvudsakligen av självfallsledningar, tryckledningar, brunnar och pumpstationer. Tryckledningarna är helt vattenfyllda och vattnet transporteras under tryck. Självfallsledningar är inte nödvändigtvis mer än halvfylla och flödet uppstår, precis som namnet säger, genom att självfall när ledningen lutar. Avloppsvattnet transporteras med självfall till ledningsnätets lägsta punkt där en pumpstation finns. Från pumpstationen transporteras vattnet med en tryckledning till en höjd då självfall åter är möjligt (Figur 1).



Figur 1 - Exempel på ledningssystem (Per-Åke Nilsson, Hässleholmsvatten)

Brunnar förekommer i ledningsnätet som till exempel, rensningsbrunnar, ventilation och nedstigningsbrunnar för underhållsarbete. Det är framförallt i övergångarna till brunnar och pumpstationer som risken för angrepp är som störst.

Betongtillverkningen står idag för ca 5 % av världens totala koldioxidutsläpp [4]. Detta gör att samtidigt som ledningarna utsätts för en allt tuffare miljö, ställs också hårdare krav på tillverkarna att minska sina utsläpp. Inom en snar framtid kommer därför Portlandcementet helt eller delvis att bytas ut mot mineraliska bindemedel så som slagg, flygaska och silika. En majoritet av utsläppen sker nämligen när man bränner kalksten till cementklinker, så kallad

kalcinering till Portlandcement. Den andra delen av utsläppen kommer av den värme som måste tillföras under kalcineringen.

Genom att använda mineraliska bindemedel slipper man kalcineringen och på så sätt kan utsläppen minskas betänkligt. Men, frågan är hur användningen av sådana bindemedel påverkar betongens egenskaper och beständighet, till exempel mot sulfat- och svavelsyraangrepp.

Utöver de tuffare miljökraven har betongrören fått alltmer konkurrens från tillverkare som använder plaströr istället för betong. Detta gör det särskilt angeläget för betongbranschen att hitta nya lösningar som ger mer motståndskraftiga rör samtidigt som de uppfyller uppsatta miljökrav.

Detta projekt syftar till att förstå och beskriva de mekanismer som styr angreppen. Fokus ligger på materialet, betongens egenskaper. Även andra faktorer så som utformning, avloppsvatten och angripande ämnen tas upp. Projektet ställer sig bland annat frågorna:

- Vad är svavelsyra, svavelväten och sulfater?
- Hur ser skademekanismerna ut, vad är det som angriper betongen?
- Vilka egenskaper påverkar betongens beständighet mot denna typ av angrepp?
- Hur påverkas betongen kvalitet och beständighet när man byter bindemedel?
- Är det lämpligt att använda mineraliska bindemedel och i så fall i vilken utsträckning?

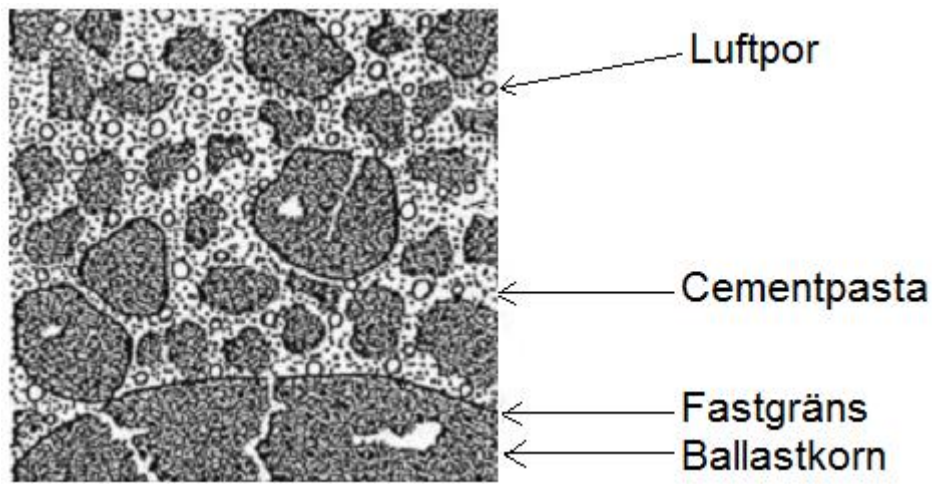
En stor del av projektet har bestått i att läsa och begrunda den kunskap som finns på området, beskriva angreppsmekanismer och betongens egenskaper. Projektet har också en laborativ del där ett antal betongblandningars sulfat- och svavelsyrabeständighet testats. Den betong som testats har haft en varierande mängd (30-70 %) granulerad masugnsslagg inblandad. Utöver de har även en referensbetong med rent Portlandcement testats. På marknaden finns dessutom en uppsjö produkter som sägs förbättra betongens beständighet mot denna typ av angrepp. Dels kemiska tillsatsmedel som blandas in redan under tillverkningen men också ytbehandlingar och färg som stryks på efter härdning. Två sådana produkter har testats. Ett kristalliseringsmedel, ”Penetron Admix” (Pen-Tec Nordic AB, Nässjö, Sverige), som ska göra betongen tätare genom att kristallisera i porerna, samt en färg och primer (STE40 och STE41, Eternit AG, Heidelberg, Tyskland), som stryks på efter härdning med syftet att täta och skydda betongens yta mot angripande ämnen. Båda produkterna har valts ut efter rekommendation från StEriks som även, genom sina leverantörer, tillhandahållit mycket av det material som behövts för testerna.

1.1 Avgränsningar

- Projektet fokuserar på betongen
- Beständighetstesterna har utförts under ca 30 dagar
- Cement med inblandning av slagg har studerats
- Kemiska angrepp av sulfater och svavelsyra
- Fokus på angrepp från rörets insida

2 Betong

Betong består huvudsakligen av bindemedel, ballast och vatten. Bindemedlet utgörs oftast av cement. Cementen reagerar med vattnet och bildar ett klister, så kallad cementpasta, vilket binder ihop ballastkornen. Cementpastafasen består dessutom av ett antal porer (porositeten varierar för olika blandningar) bestående av små gelporer, större kapillärporer och ett antal isolerade luftporer. Kring större ballastkorn kan det dessutom bildas en porös fasgränsszon. Fasgränsen tros bidra till en högre permeabilitet genom att binda samman olika delar av porsystemet, men dess betydelse är inte helt klarlagt [5]. Figur 2 nedan visar en typisk betongmassa uppförstorad ca tio gånger.



Figur 2 - Typisk betongmassa uppförstorad ca 10 gånger.

Utöver de tre huvudbeståndsdelarna används ibland någon form av tillsatsmedel, det utgör oftast bara några få procent av den totala massan. Tillsatsmedlen syftar till att ge betongen olika önskade egenskaper, till exempel högre lufthalt, snabbare härdning och bättre arbetbarhet, utan att ändra dess proportioner. Idag gjuts i princip all betong med någon typ av tillsatsmedel [6].

Betong är ett av de mest använda byggnadsmaterialen, inte minst i tuffa miljöer. Det marknadsförs ofta som ett material som tål det mesta och håller i hundra år. Ett påstående som delvis stämmer men det betyder inte att det inte kan brytas ner. Precis som de flesta andra material påverkas och bryts betongen ner i kontakt med omgivande vatten och atmosfär. Fel betong på fel plats kan innebära att livslängden förkortas väsentligt [3].

Det blir allt vanligare att cementet byts ut mot andra, mineraliska bindemedel. De vanligaste är granulerad masugnsslagg (slagg), flygaska och silika. Genom att byta ut en del av cementet kan man minska betongtillverkningens koldioxidutsläpp. Tillverkningen av cementklinker, så kallad kalcinering, innebär att koldioxid drivs ut från kalkstenen när den bränns [7]. Processen kräver mycket uppvärmning som, beroende på uppvärmningsmetod, är mer eller mindre koldioxidtung.

Det har dessutom visat sig att bytet av bindemedel kan ge betongen andra önskvärda egenskaper, till exempel öka beständigheten mot olika angrepp, effekten varierar dock beroende på angreppstyp. Till exempel har flera tester gjorts för svavelsyra- och

sulfatbeständighet hos betong innehållande mineraliska bindemedel [7-10]. Resultaten är tvetydiga och visar både exempel på bättre och sämre beständighet när cementen bytts ut. Beroende på testförfarandet, valet av bindemedel och inblandningsgraden ses en variation i resultaten.

All betong, oavsett användningsområde kommer under sin livstid att utsättas för angrepp av något slag. Angreppen brukar delas in i två typer, kemiska eller fysiska. Inte sällan utsätts en betongkonstruktion för en kombination av båda typerna samtidigt. Detta projekt fokuserar på angrepp kopplade till svavelsyrabildning och sulfatangrepp i VA-miljö. De kemiska processer som där leder till betongens nedbrytning är ofta komplexa och inte helt utredda. Det är inte ovanligt att flera angrepp sker samtidigt eller att en angreppsmekanism banar väg för en annan. Den miljö som kan uppstå i ett VA-rör innebär ofta låga pH och höga koncentrationer av aggressiva föreningar och joner. Angriparna finns i avloppsvattnet från industrier och hushåll och är svåra för betongen att stå emot [1, 11, 12].

En egenskap som ofta nämns som särskilt viktig för betongen (oavsett angreppstyp) är dess permeabilitet [10]. En tät betong gör det svårt för de angripande ämnena att ta sig in och skada den, samtidigt kan en alltför tät massa leda till större skador när väl ämnet tagit sig in och reagerat (exempelvis vid expansiva angrepp, se avsnitt 4.0) [13]. Men flera andra egenskaper, både hos betongen och dess omgivning har stor betydelse för beständigheten, inte minst vid sulfat- och svavelsyraangrepp.

För kemiska angrepp finns ett antal faktorer som i högre grad än andra avgör risken för angrepp [2, 11, 13, 14]:

- Koncentrationen av de aggressiva ämnena
- Tillgången på fukt/vattnet i omgivningen
- Betongens permeabilitet
- Temperaturvariationerna i omgivningen
- Betongens kemiska sammansättning

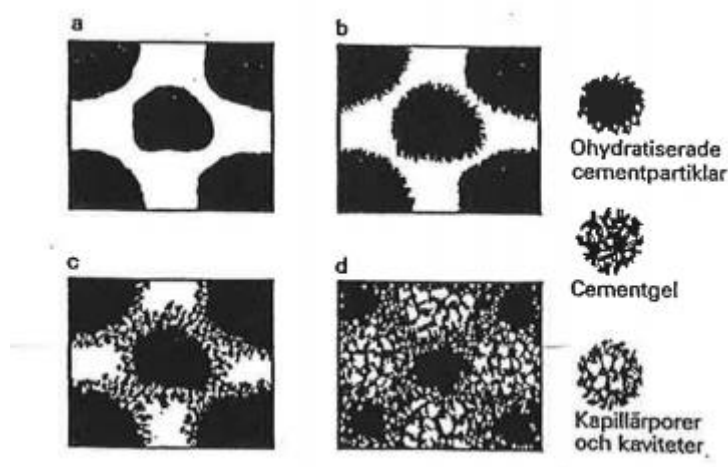
Vad gäller permeabiliteten hos betongen, styrs den i hög grad av vatten-cementtalet (vct). Ett lägre vct betyder en lägre porositet vilket ofta innebär en lägre permeabilitet. Kopplingen mellan porositet och permeabilitet beror dock också på porernas koppling till varandra. En sänkt porositet är därmed inte likställt med en lika stor sänkning av permeabiliteten. En annan gemensam nämnare med koppling till de flesta av de ovan nämnda faktorerna är fukt, utan vatten är de flesta angreppen ett icke-problem [14].

2.1 Cementpasta

När betongen blandas reagerar cement med vatten och bildar cementpasta. Cementpastan består av vatten, oreagerad cement och de reaktionsprodukter som kommer av reaktionen mellan cement och vatten. Dessutom innehåller pastan små porer, så kallade gelporer. Gelporererna är väsentligt mindre än betongens kapillärporer. Reaktionen mellan cement och vatten kallas hydratation. De två huvudsakliga produkterna av hydratationen är; CSH-gel (kalciumsilikathydrat) och $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (kalciumhydroxid eller portlandit) [7, 14].



Cementpastan spelar en avgörande roll för betongens egenskaper, det är i huvudsak den som styr betongens hållfasthet eftersom den är betydligt svagare än övriga massa. CSH-gelen är den del av cementpastan som bidrar mest till hållfastheten. Den bildas runt cementkornen när cementen hydratiserar. Gelvolymen ökar allt eftersom hydratationsgraden ökar. Det område gelen tar upp har tidigare varit vattenfyllt, varför reaktionshastigheten också avtar efterhand som volymen cementgel ökar då det blir svårare för vattnet att nå de oreagerade cementkornen. Till slut kommer cementgel kring närliggande cementkorn växa samman och på så sätt fås en tät, hållfasthetsgivande struktur. Ju lägre vct betongen har desto lägre hydratationsgrad krävs för att cementgelen ska blockera de genomgående porerna i porsystemet [7]. Gelens tillväxt under hydratationsförloppet illustreras i figur 3 nedan.



Figur 3 - Hydratiseringen hos cementpasta enligt Powers modell [5].

Pastans egenskaper styrs dels av åldern (hydratiseringsgraden) men också av vct. Hur tät pastan kan bli bestäms främst av betongens vct. Med ett högt vct kan all cement hydratisera, vid lågt vct däremot kan inte allt cement reagera. Powers strukturmodell har visat att gränsen för detta går vid $\text{vct} = 0,39$ [7].

Till skillnad från cementpastan (CSH-gelen) har kalciumhydroxiden en något hållfasthetssänkande effekt, den är inte en gel utan kristaller i porsystemet. Den höjder däremot betongens motståndskraft mot exempelvis sura angrepp genom sin alkalinitet, sitt höga pH. Vid inblandning av tillsatsmaterial förbrukas kalciumhydroxid och istället bildas mer CSH-gel (se avsnitt 2.2.2). Med mindre kalciumhydroxid minskar även risken för expansiva sulfatangrepp, vilket beskrivs mer detaljerat i avsnitt 3.1.

I miljöer med svavelväte kan svavelsyra bildas vilken angriper CSH-gelen i pastan. Gelen angrips så att den förlorar sin kohesion och sina hållfasthetsgivande egenskaper (se avsnitt 3.2.).

2.2 Bindemedel

Med bindemedel menas Portlandcement eller andra mineraliska bindemedel såsom slagg, flygaska och silika, i olika proportioner. Man skiljer på cement och cement, indelningen styrs i huvudsak av hur stor andel som utgörs av tillsatsmaterial istället för vanligt portlandcement. Det är också ut efter det man klassificerar cementet, CEM I, II, III osv, med ökande halt tillsatsmaterial [7]. Det finns även en rad andra klassificeringar kopplade till cementets egenskaper och beständighet. Klassificeringen fungerar som pekpinne för att visa vilken betong som lämpar sig för olika ändamål. En sådan märkning finns även för sulfatresistans, så kallad SR-cement. Ett SR-cement innebär att portlandcementklinkern innehåller mindre än 3 % C₃A (aluminat) [7, 14]. Aluminatens betydelse för sulfatresistansen beskrivs vidare i avsnitt 3.

Cementets huvudsakliga uppgift är att genom reaktion med vatten bilda cementpasta som håller ihop ballastkornen. Att välja rätt cement är avgörande för att man ska få den betong man vill ha, både i produktionsfasen och den färdiga produkten. Cementets kemiska sammansättning avgör betongens hållfasthet, beständighet och arbetbarhet liksom en rad andra egenskaper.

2.2.1 Portlandcement

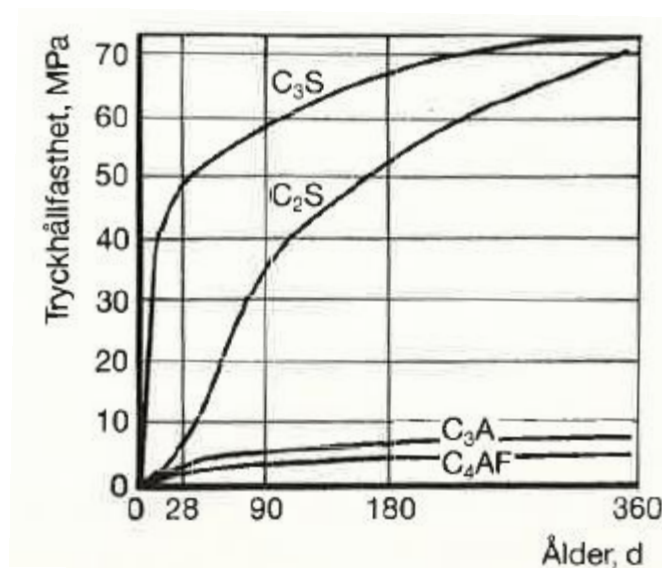
Portlandcement, eller kort sagt bara cement, är ett hydrauliskt material vilket betyder att det härdar i kontakt med vatten. Det består i huvudsak av bränd, finmald kalksten och lera, så kallad cementklinker. Processen när kalksten (CaCO₃) bränns kallas kalcinering [7]. Det är genom kalcineringen (2) som koldioxid frigörs och släpps ut i atmosfären.



Portlandcement utgör oftast majoriteten av det slutliga cementet. Dess kemiska sammansättning är avgörande för en rad egenskaper hos betongen både under produktion och brukstid. För att förstå hur valet av cement påverkar betongens egenskaper måste man veta vad det består av. Portlandcement utgörs av ett antal klinkerkomponenter. De viktigaste av dessa listas nedan:

- C₂S (dikalciumsilikat)
- C₃S (trikalciumsilikat)
- C₃A (trikalciualuminat)
- C₄AF (tetra-kalciualuminatferrit)

Fördelningen av de olika klinkerkomponenterna styr cementets egenskaper. C_2S (alite) och C_3S (belite) är exempelvis de som främst avgör cementets hållfasthet och hållfasthetsutveckling (Figur 4).



Figur 4 - De olika klinkerkomponenternas betydelse för hållfasthetsutvecklingen [7]

C_3A (aluminat) har stor betydelse för sulfatbeständigheten, men som figur 4 visar har den ingen särskild betydelse för betongens hållfasthet.

C_4AF (ferrit) innehåller även det aluminium, men i kombination med järn har det ingen särskild betydelse för varken sulfatbeständigheten eller hållfastheten [7, 14].

2.2.2 Mineraliska bindemedel

Flygaska

Flygaska är en restprodukt från kolkraftverk och värmeverk och utgörs vanligen av aska från stenkolk. Askan fås när rökgaserna från kolkraftverkens förbränningskammare filtreras och dammet avskiljs. Flygaskans partikelstorlek och egenskaper varierar beroende på kraftverkets utformning, det vill säga vilken förbränningsprocess kraftverket använder, temperaturen under förbränning och kolsorten. Med undantag för viss variation sägs flygaskan ha ungefär samma partikelstorlek som ett vanligt Portlandcement. Flygaskan är en så kallad puzzolan. Puzzolanreaktionen är långsam i förhållande till den vanliga cementreaktionen. Den långsamma reaktionen beror dels på partikelstorleken men också på dess låga innehåll av reaktiv kisel. Precis som för silika och slaggbär det att en betong med flygaska istället för portlandklinker kan räknas med en långsammare hållfasthetsutveckling med en förlängd härdningstid som följd [6].

Silikastoff

Silika är ett restmaterial från stålindustrin. Det består av ett finkornigt pulver av kiseldioxid med glasig struktur. De små sfäriska kornen och den glasiga strukturen med stor specifik yta gör silikan särskilt reaktiv. Det är en ren puzzolan vilket innebär att det krävs kalciumhydroxid för att reaktionen ska starta och bilda CSH-gel. Eftersom silikan är så starkt puzzolan är inblandningsgraden begränsad till ca 10 % av den totala bindemedelshalten [6]

Slagg

Granulerad masugnsslagg (slagg), är en restprodukt från järnframställning. Det bildas ovanpå det smälta järnet och blir ett pulver när det snabbkyls med vatten. Det mals sedan tills det har ungefär samma finhet som portlandcement. Precis som de andra mineraliska bindemedlen innehåller slagg kiselsyra (SiO_2), men den innehåller också en lika stor del kalciumoxid (CaO), ca 30 % varför den brukar beskrivas som ett ”kalkfattigt cement” [14]. Ett vanligt portlandcement innehåller ca 60 % kalciumoxid (CaO). Den snabba avkylningen direkt efter bildningen ger slaggen en glasig struktur och gör att den till skillnad från portlandcement inte är ett hydrauliskt bindemedel, utan sägs istället vara latent hydrauliskt [6]. Latent betyder fördröjning, slaggens reaktion med vatten är alltså fördröjd varför man med en högre slagghalt kan räkna med en långsammare hydratation.

Meningarna går isär för huruvida en ökad slagghalt ger en bättre eller sämre beständighet mot sulfatrelaterade angrepp. Enligt [6] och [12] är en betong med 65-70 % slagg som bindemedel att betrakta som sulfatresistent. Eftersom en stor del av cementet bytts ut minskar halten C_3A , det vill säga risken för sulfatrelaterade expansiva reaktioner minskar.

Samtidigt reagerar slaggen med bildad kalciumhydroxid och bildar mer cementgel vilket ger betongen en tätare struktur, den tätare strukturen minskar risken för såväl svavelsyra- som sulfatangrepp. En tredje faktor är slaggens låga kalkinnehåll vilket innebär en snabbare karbonatisering, med snabbare pH-förändring och ökad risk för armeringskorrosion som följd.

Gemensamma egenskaper

Till skillnad från portlandcementet är de mineraliska tillsatsmaterialen inga hydrauliska bindemedel. Silika och flygaska är så kallade *puzzolaner* och innehåller mycket kiseloxid. För att de ska reagera krävs förutom vatten också kalciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Kalciumhydroxid är en av reaktionsprodukterna när portlandcement reagerar med vatten. Slagg är latent hydrauliskt vilket betyder att det utöver vatten behöver en aktivator för att reagera. Aktivatorn utgörs ofta av just kalciumhydroxid [6, 14].

Följden av tillsatsmaterialens icke-hydrauliska härdningssätt är att härdningstiden, tiden som behövs för att nå samma hållfasthet och hydratationsgrad som för ett rent portlandcement, ändras. Det beror på att deras reaktioner kräver att cementreaktionen bildat tillräckligt mycket kalciumhydroxid först, med andra ord kommer härdningstiden också öka med ökad mängd tillsatsmaterial [6]. Slaggens, flygaskans och silikans reaktionstid skiljer sig dock åt liksom deras egenskaper. Tillsatsmaterialens reaktion (Puzzolanreaktionen) ger en omvandling av kalciumhydroxid till CSH-gel enligt (3).



Det är kiselsyran (SiO_2) i den som reagerar med kalciumhydroxiden till CSH-gel, den så kallade puzzolanreaktionen. Den CSH-gel som bildas genom puzzolanreaktionerna skiljer sig från den som bildas med vanligt cement, förhållandet mellan mängden C och S är ett annat. Betydelsen av denna skillnad är inte fullständigt klarlagd.

Omvandlingen till cementgel ger betongen en tätare struktur. Den tätare strukturen beror inte på att porositeten minskar (små förändringar) utan på en förfinad porstruktur med fler små gelporer istället för grövre kapillärporer. Cementgelen har en porositet på ca 28 % bestående av små, slutna porer [7]. Kalciumhydroxiden bidrar inte särskilt mycket till betongens hållfasthet det gör däremot CSH-gelen vilket innebär att omvandlingen också ger en hållfasthetsökning.

Betong med tillsatsmaterial och tät struktur har i flera fall visat sig mer beständig än betong med endast portlandcement (vid samma vct) eftersom permeabiliteten minskar och därmed tar det längre tid för angripande ämnen att ta sig in i betongen [14]. Den positiva effekten avtar med lägre vct, eftersom betong med lågt vct (utan tillsatsmedel) redan har en tät struktur, förtätningen blir därmed inte lika avgörande [14]. Tillsatsmaterialens effekt på beständigheten vid just kemiska angrepp är omdebatterad och har testats i flera studier, med varierande resultat [8-10]. För rena svavelsyraangrepp har permeabiliteten mindre betydelse eftersom angreppet sker från ytan och utgörs av en enhetlig korrosionsfront [12].

Samtidigt som puzzolanreaktionen gör betongen tätare sjunker också dess pH-värde när den basiska kalciumhydroxiden konsumeras. Ett lägre pH ökar risken för exempelvis svavelsyrakorrosion eftersom de bakterier som i avloppsröret bildar svavelsyra gynnas av en sur miljö. Mängden tillsatsmaterial begränsas av hur mycket kalciumhydroxid som cementreaktionen kan producera. För rena puzzolaner (silika, flygaska) som kräver kalciumhydroxid för sin reaktion nås max redan vid 10-20 % inblandning. Slagg innehåller som bekant även en hel del kalk vilket gör att slagginblandning upp till 70-80 % förekommer, beroende på vilken typ av slagg man använder [6, 10, 11, 13]. Dessa procentsatser utgör de teoretiska gränsvärdena, flera andra, praktiska begränsningar som exempelvis härdningstider, beständighet och arbetbarhet styr också inblandningen av tillsatsmaterial. Med bakgrunden att slagg kan användas med en betydligt högre inblandningsgrad än de övriga tillsatsmedlen är det slaggen som fått mest utrymme i detta projekt. I projektet har betong med olika slagghalt testats för såväl svavelsyra- som rena sulfatangrepp (se avsnitt 4).

När man ersätter cement med slagg, flygaska eller silika är det särskilt viktigt att man känner till produkternas ursprung. Både slagg och flygaska är restmaterial från industrin och egenskaperna kan variera beroende på ursprung. Om egenskaperna hos tillsatsmaterialet förändras påverkar det cementet och så småningom hela betongens egenskaper. Därmed följer att man för slagg, beroende på ursprunget, måste undersöka och fastställa lämplig inblandningsgrad [6].

2.3 Ballast

Ballast kallar man det stenmaterial som används i betongtillverkning. Det kan vara antingen krossat berg så kallad makadam eller singel vilket är material från en rullstensås. Numera använder man i huvudsak makadam eftersom rullstensåsarna till stor del förbrukats. I Sverige

finns urberg och det är nästan uteslutande det som används som ballast i Svenska betongkonstruktioner. På grund av svårigheterna att transportera ballastmaterial använder man ofta det lokala stenmaterialet när man gjuter betong. I många länder innebär det att man istället för hårt urberg använder till exempel kalksten. Skillnaden i ballastmaterial har stor inverkan på betongens olika egenskaper, inte minst för beständigheten mot till exempel sulfat och svavelsyra angrepp [15].

Förutom valet av stenmaterial är fraktionen en viktig faktor när man väljer ballast. Kornstorleken anges ofta i intervall och största kornstorleken bör inte överstiga $\frac{1}{4}$ av konstruktionens kortaste sida. Till exempel för en konstruktion som är 4 cm tjock bör största sten inte överstiga 1 cm.

Som tidigare nämnt är det inte ballasten som i huvudsak styr betongens hållfasthet. Svagheten sitter istället i cementpastafasen eftersom den har en väsentligt lägre hållfasthet. Bara om ballasten i sig har väldigt dålig hållfasthet kan den påverka betongen [15].

Valet av ballastmaterial är synnerligen intressant sett till den kemiska beständigheten. Oftast handlar det om olämpligheten hos vissa ballastsorter som är ”alkalireaktiva” det vill säga innehåller ämnen som ger syra-bas-reaktioner mellan ballast och cementpasta vilka skadar betongen [14] [12]. När man talar om sulfat- och framförallt svavelsyraangrepp står valet främst mellan inert ballast och reaktiv ballast. Inert ballast är till exempel det svenska urberget och reaktiv kan vara kalksten. Den förstnämnda kommer förbli opåverkad vid ett korrosivt angrepp av svavelsyra. Kalkstenen däremot bryts ner i ungefär samma takt som den mellanliggande cementpastan.

Ballastens betydelse för svavelsyra- och sulfatbeständigheten har testats och diskuterats i flera artiklar bland annat [9]. Det finns fördelar med en reaktiv ballast, till exempel kalksten, när betongen utsätts för svavelsyrakorrosion eftersom ett sådant angrepp korroderar betongens yta. Om även ballasten bryts ner blir angreppet mer jämt fördelat över ytan och mer material måste brytas ner för att nå samma djup. Dessutom innehåller kalkstenen kalciumkarbonat vilket, genom att verka som buffert, minskar belastningen på och upplösningen av kalciumhydroxid och CSH-gel.

Med inert ballast fås en ojämn yta när pastan mellan ballastkornen bryts ner och därmed fås även en större angreppsyta vilket kan leda till en ökad angreppshastighet. Massförslusten blir också större eftersom hela korn spjälkas loss när pastan runt kornet löses upp.

2.4 Blandningsvatten

När man blandar betong är det viktigt att använda ”rent” vatten, det vill säga, vattnet som inte i sig bidrar till olämplig kemi eller tidig nedbrytning av betongen. Havsvatten som innehåller lösta salter är till exempel inte lämpligt för betongblandning. Är kraven särskilt snäva kan det vara idé att använda avjonat vatten, vatten vars pH är neutralt och inte innehåller några salter [16].

Det mest bekanta exemplet då blandningsvattnet haft stor betydelse i Sverige är Ölandsbron där man använde sig av bräckt vatten vilket bland annat ledde till omfattande korrosion på armeringen och därigenom stora underhållskostnader [17].

3 Kemiska angrepp: sulfat- och svavelrelaterade

All betong, oavsett användningsområde kommer i någon mån att utsättas för angrepp av aggressiva ämnen. Betongens förmåga att stå emot denna typ av angrepp kan enligt [2] i huvudsak kopplas till två faktorer:

1. *Den kemiska sammansättningen*, fördelningen av olika hydratationsprodukter.
2. *Permeabiliteten*, tätheten, som delvis avgör angreppshastigheten.

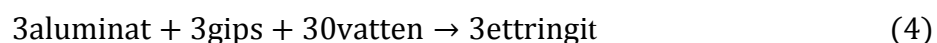
Angrepp från exempelvis syror sker normalt från ytan, betongens täthet blir då avgörande för motståndskraften mot syraangrepp. En tät betong har låg permeabilitet och uppnås normalt genom ett lågt vct och en hög hydratationsgrad. Andra angrepp verkar inifrån och undviks dels genom en tät betong, men också genom att man minimerar mängden reaktiva ämnen i betongen [12]. Sammanfattningsvis brukar de kemiska angreppen delas upp i två huvudtyper:

1. *Externa angrepp*, verkar normalt från en härdad betongs yta och angriper cementpastafasen med hållfasthetsförlust som följd.
2. *Interna angrepp*, en härdad betong exponeras för, till exempel, sulfater i omgivningen varpå expansiva reaktioner sker inuti och skadar strukturen.

Ett kemiskt angrepp behöver inte bara innebära negativa konsekvenser. Ett exempel på angrepp som medför positiva konsekvenser är karbonatisering. När betongytan karbonatiserar reagerar koldioxid i luften med kalciumhydroxid i cementpastan, varpå pH sjunker. Lägre pH ökar risken för bland annat armeringskorrosion. Men karbonatiseringen ger samtidigt betongen en tätare yta vilket kan göra den mer beständig mot andra angrepp, till exempel inträngande sulfater [18].

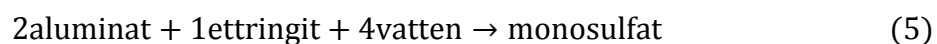
De två angrepp som utgör fokus för detta projekt är sulfatangrepp och svavelsyraangrepp. Även om båda angreppen kan kopplas till samma ämne (svavel) är det två skilda mekanismer som ligger bakom angreppen. Sulfatangrepp räknas till kategorin saltangrepp, eftersom sulfater är salter av svavelsyra. Angrepp kopplade till svavelväten och svavelsyra räknas som ett biologiskt angrepp. Detta eftersom svavelväte och sedermera svavelsyran bildas av bakterier i avloppsvattnet [1, 14, 19].

Som tidigare nämnt har aluminathalten (C_3A) i cementet stor betydelse för sulfatbeständigheten. Den reagerar snabbt med vatten till så kallad CAH (kalcium-aluminat-hydrat) och gör att cementet hårdnar. För att förhindra att betongen hårdnar för snabbt tillsätter man gips (ca 5-8 %). Gipsen fungerar som retardator och bromsar aluminatens hastiga reaktion enligt (4).



Reaktionen till ettringit binder hela 30 vattenmolekyler och innebär en stor volymökning. I en härdad betong skulle en sådan volymökning verka sprängande och ge stora skador på strukturen.

När allt tillsatt gips reagerat reagerar återstående aluminat antingen med den bildade ettringiten och vatten till att bilda monosulfat (5) eller direkt med vatten till monosulfat.



Reaktionen innebär viss volymminskning. Båda reaktionerna sker dock innan betongen härdat så volymförändringarna ger inga bestående skador på betongen. Det är först i ett senare skede, om betongen utsätts för sulfater utifrån som monosulfatet kan reagera och ombilda ettringit, som skador kan ske [14].

Förutom betongens egenskaper har de omgivande förhållanden stor påverkan på hur allvarligt ett angrepp blir. Som tidigare nämnt tros de ökade problemen i Sverige främst bero på lägre vattenkonsumtion. Men andra faktorer så som rörens utformning, luftningen i avloppssystemet och pH påverkar också angreppet. Normalt ligger pH i en VA-ledning på mellan 6,6 - 7,2 och en förändring 0,2 kan innebära $\pm 30\%$ för svavelväteproduktionen.

3.1 Sulfatangrepp

Sulfater är salter av svavelsyra, ofta lösta i vatten som sulfatjoner (SO_4^{2-}) [11, 14].

Sulfatangrepp på betong räknas som ett kemiskt saltangrepp. I vissa delar av världen är det vanligt med sulfater i marken och grundvatten. Sådana förhållanden är ovanliga i Sverige men förekommer till exempel som malmfält i Norrland vilka innehåller malmsulfider. Svavel i olika konstellationer är däremot mer vanligt även i Sverige, inte minst som organiska föreningar i avloppsvattnet vilka kan orsaka angrepp på betongen i rören.

Beroende på vilket salt som angriper får man olika mycket skador. Svavel utgör ofta anjonen av en svavelförening, den andra delen kallas katjon. Sådana föreningar kan till exempel vara Na_2SO_4 (natriumsulfat) eller MgSO_4 (magnesiumsulfat), där Na^+ och Mg^{2+} är katjoner. Vilken katjonen är kan påverka hur allvarligt angreppet blir eftersom katjonen också kan angripa betongen. Ett sådant exempel är Mg (magnesium). När betongen utsätts för MgSO_4 sker utöver det rena sulfatreaktionerna även en reaktion mellan cementgelen och magnesiumjonen där kalciumet i gelen byts ut mot magnesium varpå det bildas magnesiumsilikathydrat (MSH) vilken saknar egen hållfasthet. Man får alltså ett dubbelt angrepp, expansiva sulfatreaktioner och en nedbrytning av cementpastan [14].

De komponenter i betongen som har störst betydelse för sulfatangreppet är:

- C_3A (aluminat)
- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (kalciumhydroxid)

Båda reagerar med sulfat till expansiva produkter vilket kan skada betongens struktur. Vid ett rent sulfatangrepp tränger sulfater in i betongen och reagerar med ovan nämnda komponenter. De vanligaste reaktionerna är gips- och ettringitbildning. Tidigare klargjordes att aluminat är den klinkerkomponent som till största del bestämmer betongens sulfatbeständighet och att ett sulfatresistent cement kännetecknas av lågt aluminat innehåll [11, 12]. Den monosulfat och ettringit som bildats, i reaktion med C_3A , innan betongen härdate kan leda till skador när betongen utsätts för sulfater under brukstiden, se formel (7) nedan.

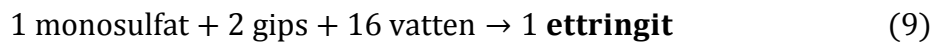
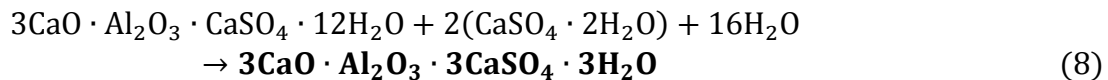
Mekanism

När sulfathaltigt vatten tränger in i betongen sker ett första sulfatangrepp när sulfatet reagerar med kalciumhydroxid. Till exempel för natriumsulfat enligt (6) (7):



Gipsbildningen leder till en volymökning på ca 18 % [14]. Eftersom reaktionen beror av tillgången på kalciumhydroxid är det troligt att betong med slagginblandning klarar sig bättre mot ett rent sulfatangrepp än betong med rent portlandcement eftersom den innehåller mindre kalciumhydroxid. Tester [20] på betong med C₃S som enda klinkerkomponent som utsatts för sulfater har visat att gipsbildning och viss volymökning alltså kan ske även utan C₃A så länge det finns kalciumhydroxid för sulfatet att reagera med.

Sedan betongen göts och härdade finns det monosulfat bunden i strukturen (minns C₃A reaktionen). När betongen under brukstiden utsätts för sulfater, med gipsbildning som följd, kan det leda till reaktion mellan gips, monosulfat och vatten till bildning av ettringit (8) (9).



Ettringitbildningen leder till stor volymökning eftersom den binder väldigt mycket vatten. Enligt [14] kan volymökningen uppgå till 230 % från aluminat till ettringit. I en härdad betong kan sådan expansion verka sprängande och leda till stora skador.

3.1.1 Specialfall av sulfatangrepp

Förutom det ”rena” sulfatangreppet finns det ett antal specialfall. Fall där även andra ämnen och mekanismer är inblandade. Nedan beskrivs två sådana fall i korthet, båda avviker från det rena sulfatangreppet på olika sätt men bör inte förbises när man gör en skadeutredning.

- Försenad ettringitbildning
- Thaumazitbildning

Försenad ettringitbildning

När ettringit bildas i en härdad betong utan att den utsätts för yttre sulfater kallar man det försenad ettringitbildning. Eftersom expansionen är väldigt stor kan ettringiten orsaka stora skador på betongen. I Sverige hade man tidigare problem med att betongslipers till järnvägen drabbades av försenad ettringitbildning. Orsaken tros vara att betongen värmehärdats i alltför hög temperatur så att värmeutvecklingen i betongen gjort att temperaturen överstigit 70°C. Det har visat sig att ettringit inte är stabilt över just 70°C. Istället för den normala reaktionen med C₃A (enligt ekvation 7 och 8 ovan) förblir sulfaten från gipset löst bunden i cementpastan. När betongen sedan härdats och utsätts för normala, fuktiga, kalla förhållanden kan sulfatjoner frigöras och reagera med aluminaten till ettringit. Angreppet kan hindras dels genom att inte härda i höga temperaturer men också genom att använda SR-cement med lågt C₃A-innehåll [13, 14]

Thaumasitbildning

Thaumasitbildning är relativt nyupptäckt angrepp och vars angreppsmekanism skiljer sig en del från övriga sulfatangrepp. Utöver de normala förutsättningarna för sulfatangrepp kräver thaumasitbildningen att betongen innehåller kalkfiller och gynnas av att temperaturen understiger 15°C, båda stämmer för svensk betong och svenska förhållanden. Kalkfillern består delvis av karbonat vilket är den huvudsakliga källan till angreppet. När betongen utsätts för sulfater sker inte de vanliga reaktionerna, det vill säga gips och ettringitbildning. Istället angrips CSH-gelen som bryts ner och thaumasit bildas. Thaumasit saknar egen hållfasthet och koehsion och pastan reduceras till en grötliknande massa och liknar snarare ett angrepp av svavelsyrakorrosion än det typiska sulfatangreppet [14]. Angreppet sker alltså, till skillnad från övriga sulfatangrepp, inte i reaktion med aluminat. Med andra ord riskerar även betong med SR-cement att angripas.

Enligt [14] är det bästa sättet att undvika angreppet en tät struktur, slaggcement borde därmed ha en bättre beständighet än till exempel ett rent portlandcement.

3.2 Svavelväte och svavelsyraangrepp

Angrepp orsakade av svavelvätebildning är ett vanligt problem i avloppssystemen i många länder, särskilt de med varmt klimat. I Sverige har vi länge varit förskonade från allvarligare angrepp, men problemet finns och har ökat de senaste åren. Ökningen sägs bero en lägre vattenkonsumtion vilket leder till lägre flöden och längre uppehållstider i rören, som är dimensionerade för högre flöden. Längre uppehållstider leder till att det oftare uppstår syrefria förhållanden vilket är ett av kraven för att svavelväten ska bildas [21].

Enligt [1] finns det två huvudsakliga källor till svavelväte och sulfider i avloppsvattnet:

- Direkta utsläpp av sulfider (S^{2-}) till avloppsnätet från industrier
- Sulfater reduceras till sulfid i samband med att organiskt material i avloppsvattnet bryts ner under syrefria förhållanden.

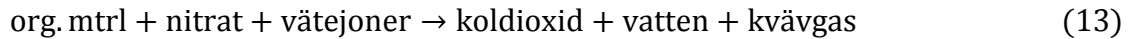
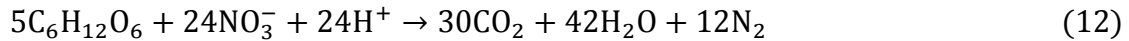
Svavelväte är en gas som bildas när bakterier i avloppsrörets bottenlam konsumerar organiskt material eller lösta sulfater och reducerar dem till svavelväte (H_2S). De angrepp som svavelvätebildningen leder till är inga saltangrepp och även om det är svavelsyra inblandat är det inte något surt angrepp heller. Det räknas som ett biologiskt angrepp eftersom det är bakterier som bildar de angripande ämnena [12].

Svavelvätebildningen kräver syrefria förhållanden, det beror på att bakterierna vill utvinna så mycket energi som möjligt när de oxiderar det organiska materialet. Det betyder att de i första hand konsumerar syre, därefter nitrat och sedan sulfat. Så länge de två förstnämnda finns är bakteriernas oxidering harmlös, se (10-13).

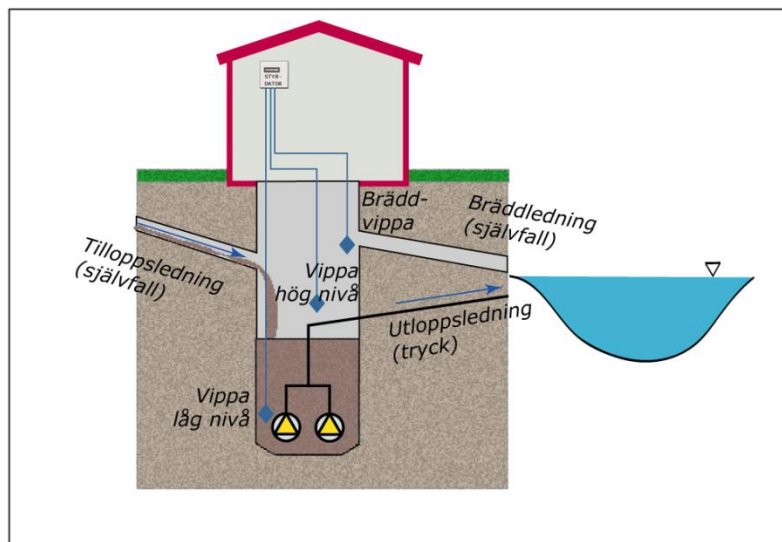
Med syre närvarande:



Reaktion med nitrat:



Syrefria förhållanden kan uppstå i stora delar av avloppssystemet, särskilt om luftningen är dålig. Det är dock vanligast att det uppstår i de trycksatta ledningarna, där hela röret är vattenfyllt. När tryckledningen övergår i en självfallsledning kan det i övergången, till exempel en brunn eller pumpstation, bli det ett turbulent vattenflöde varpå det bildade svavelvätet avges till luften (Figur 5).



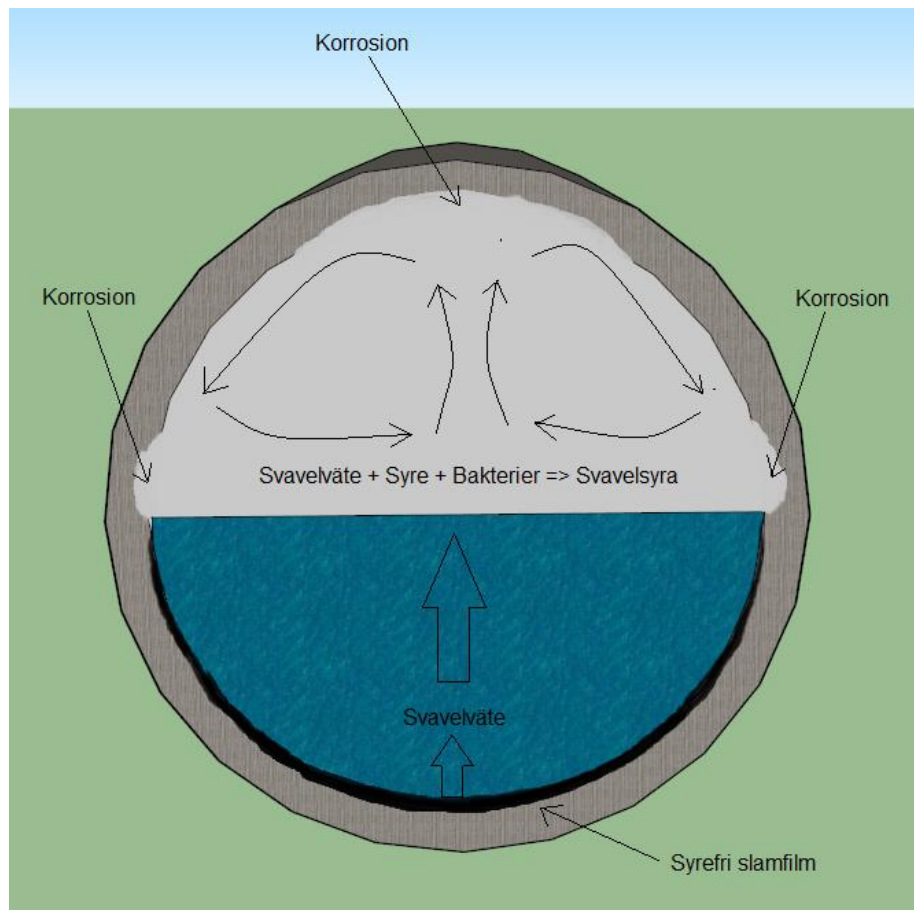
Figur 5 - Övergång mellan självfallsledning och tryckledning i pumpstation (Per-Åke Nilsson, Hässleholmsvatten)

Svavelvätebildningen gynnas av en låg vattenhastighet (lång uppehållstid) eftersom det då är mer sannolikt att syrefria förhållanden uppstår. Dessutom leder en högre temperatur och lägre pH till ökad svavelvätebildning eftersom bakterietillväxten då ökar. Svavelväteproduktionen har alltså mindre med rörmaterialet att göra, den beror i huvudsak på vattnets innehåll och utformningen av rörsystemet.

Det är inte svavelvätet i sig som angriper betongen, istället är det när svavelvätet oxideras till svavelsyra som man får ett korrosivt angrepp på betongens yta (se figur 6 nedan) [1, 2, 21]. Precis som i bildandet av svavelväten är det bakterier på rörets yta som tillsammans med syre omvandlar svavelväte till svavelsyra. När svavelvätet kondenserar på rörets ytor och bildar svavelsyra sjunker pH-värdet lokalt, pH kan sjunka så lågt ca 0,5-1, vilket innebär en extremt aggressiv miljö. Redan när pH-värdet går ner under 4 tar korrosionen fart. När pH-sjunker gynnas tillväxten av de bakterier som oxiderar svavelvätet till svavelsyra vilket leder till att angreppshastigheten ökar ytterligare. Eftersom svavelväte anhopas i vissa delar av systemet kommer pH-värden och skadorna att variera mycket, ofta blir angreppen värre i de nedersta delarna av systemet (sett från källa till recipient), särskilt om luftningen är dålig. Detta

eftersom mer svavelväte hinner bildas längs vägen och ackumuleras eftersom det inte avlägsnas med ventilationen.

Svavelsyrakorrosion angriper främst cementpastans kalciumhydroxid och CSH-gel genom att kalcium (C) försvinner, kvar blir en grötig massa av i huvudsak gips och kiseloxid, utan någon betydande hållfasthet. Figur 6, nedan, illustrerar hur förloppet går till.



Figur 6 – Svavelsyrakorrosion i en självfallsledning

Vanligen får man svavelsyrabildning och korrosion först i rörets tak och på ytorna närmast ovanför vattenytan. Den drabbade ytan växer succesivt ihop till en kontinuerlig, fuktig och svavelsyrerik yta. Taket drabbas först eftersom rörets väggar är kallare än omgivande luft varpå svavelvätet stiger i mitten av röret innan det kondenserar i taket. I ytorna närmast vattenytan ses ofta en större kavitation än på övriga ytor. Den extra kavitationen beror på att den totalförstörda massan sköljs bort av vattnet när nivån stiger varpå ny oskadad betong exponeras [21]. För oskadade delar av rörgodset kan den totalförstörda pastan snarare ha en skyddande effekt eftersom den, med ökande tjocklek, gör det svårare för syran att nå den oskadade betongen [2]. De svavelsyrabildande bakterierna är aktiva så länge svavelväte och syre finns tillgängligt, upp till en svavelsyrakoncentration på ca 7 %. Figur 7 nedan visar en ytan på en betongplatta som angripits av svavelsyra.



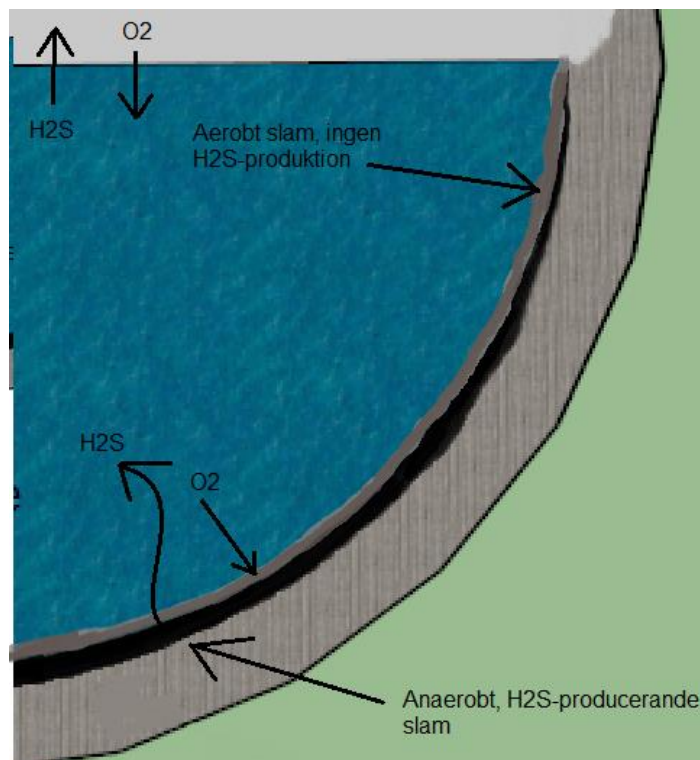
Figur 7 - Betong angripen av svavelsyra (Mårten Janz)

Som tidigare nämnt, finns det en koppling mellan svavelsyrakorrosion och rena sulfatangrepp. Sulfater förekommer i avloppsvattnet. När korrosionen skadar och vattnet sköljer bort material i ytan fås en ojämn betongyta, särskilt om man har inert (icke reaktiv) ballast, såsom det urberg vi använder i Sverige. Den ballasten påverkas inte nämnvärt av svavelsyran, istället koncentreras angreppet till den mellanliggande cementpastan. Med en ojämnare yta fås också en större total yta som exponeras för nya angrepp. Sulfater kan tränga in i den till synes oskadade betongen och genom expansiva reaktioner, till exempel gips och ettringitbildning, skada betongens struktur.

För att analysera huruvida betongen utsatts även för sulfatangrepp utöver det korrosiva angreppen kan kärnprover borrar ut. Ett sulfatangripet prov kan se helt oskadat ut för blotta ögat men om betongen färgas kan gips och ettringit skiljas från övrig massa med hjälp av mikroskop. Ett annat sätt är att prova tryckhållfastheten hos proverna eftersom de expansiva reaktionerna ofta leder till skador på strukturen med hållfasthetsförlust som följd [2].

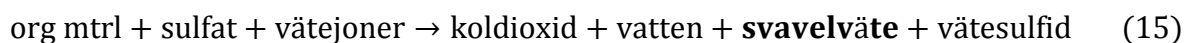
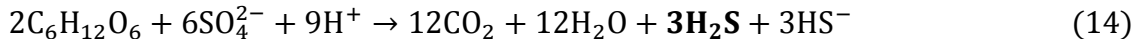
Mekanism – svavelväte till svavelsyrakorrosion

I avloppsvattnet finns som tidigare nämnt ett antal källor till svavel. På de delar av avloppsrören och övriga anläggningar som är under vatten bildas ett bottenslam och på väggarna en slamhud. Slammet består huvudsakligen av organiskt material, bakterier och andra mikroorganismer. Dess tjocklek beror främst på vattenflödet, vid låga flöden (lång uppehållstid) kan den växa till, men tjockleken minskar med ökade flöden eftersom vattnet då kan slipa av delar av huden. Figur 5, nedan, visar en syresatt del av röret och även här kan svavelväte bildas eftersom delar av slamhuden kan förbli aerob och svavelväteproducerande.



Figur 8 - Svavelvätebildning kan förekomma även i syrasatta delar av rörsystemet.

Under syrefria förhållanden kan bakterierna konsumera organiskt material och oxidera sulfater i vattnet till svavelväte och sulfider (se ekvation (14) och (15) nedan).



Svavelvätet är till en början löst i vattnet men vid hastiga flödesförändringar eller rörövergångar där flödet blir turbulent släpps svavelvätet ut i rörluften [1, 2, 8]. Enligt [8] talar man om två faser som sammanfattar skeendet som leder till svavelsyrakorrosion:

- Det bildade svavelvätetets avgång från vattnet till luften
- Metaboliseringen (oxideringen) av svavelväte till svavelsyra i betongensyta

Ytorna i avloppsrören (ovanför vattenytan) är ofta fuktiga och kallare än omgivande luft, svavelvätet i rörluften kan då kondensera på ytorna. Precis som i slammet finns det bakterier på rörets fuktiga ytor. Om förhållandena i röret är aeroba, det vill säga, om det finns syre kan bakterierna oxidera svavelvätet till korroderande svavelsyra. Korrosion är alltså inget problem förutsatt att hela röret är vattenfyllt, till exempel i en tryckledning. Svavelsyrabildningen sker enligt (16)(17) nedan.



När svavelsyra bildas sjunker pH-värdet i betongens yta. Lägre pH gynnar bakterietillväxten och med god tillgång på syre leder pH-sänkningen till ytterligare syrabildning. Man får alltså en synergieffekt, med ökad angreppshastighet som följd [1, 2].

Svavelsyran angriper och bidrar till skador i betongen på i huvudsak två sätt. Det första sättet är det korrosiva angreppet och innebär att syran angriper kalciumhydroxid och CSH-gelen i cementpastan [1, 12, 21]. Kalciumet urlakas och kvar blir en mörkgrå grötig massa bestående av i huvudsak kiseldioxid. Med ytterligare korrosionsangrepp och mycket lågt pH sker fullständig nedbrytning av cementpastan som förlorar all hållfasthet och kohesion. Efterhand som korrosionsfronten rör sig inåt i betongen avtar korrosionshastigheten eftersom det tar längre tid för angripande ämnen att nå korrosionsfronten såvida den förstörda massan ligger kvar.

Det andra sättet är att syraangreppet bryter ner pastan och skadar ytan vilket banar väg för andra angrepp, till exempel inträngning av sulfathaltigt vatten.

3.3 Svavelvätens hälsopåverkan

Svavelväten angriper i sig inte betongen och kan i det avseendet anses som ofarliga. För oss människor är de å andra sidan inte ofarliga. Lukten av svavelväte kommer redan vid låga koncentrationer och påminner om den från ruttnande ägg och sopor. Vid lite högre halter kan de ge upphov till irritation på ögon och slemhinnor och vid riktigt höga halter kan de vara direkt hälsovådliga. Det har hänt att personer som exponerats för extremt höga halter av svavelväte dött. Dödsfallen har framförallt drabbat personer som utfört underhållsarbete i nedstigningsbrunnar där särskilt stora koncentrationer svavelväten hopat sig. Svavelväte har nämligen en högre täthet än luft vilket betyder att om luftomsättningen är låg ansamlas det nedtill exempelvis i en brunn [1, 2, 21]. Övergången mellan tryckfallsledning och självfallsledning, brunn eller pumpstation där svavelväte frigörs från vattnet är platser där koncentrationerna kan bli särskilt höga. Tabell 1 nedan visar svavelvätets hälsopåverkan vid olika koncentrationer.

Tabell 1 - Olika svavelhalters påverkan på människor [1].

<i>Svavelhalt i luft, ppm</i>	<i>Människans reaktion</i>
0,13	Lukttröskel
1	Svag men klart märkbar lukt
5	Tydlig lukt
10	Hygieniskt gränsvärde för en arbetsdag
10-50	Lätt ögonirritation
30	Stark, obehaglig lukt
50-100	Smärre ögon- och andningsbesvär efter en timmes arbete
100-200	Hosta och ögonbesvär. Luktkänslan försvinner efter 2-15 minuter, yrsel efter 14-20 minuter
>500-1000	Snabb medvetslöshet och död

Svavelväte angriper först kroppens slemhinnor, vilka blir torra och irriterade. Utsätts man för låga nivåer under lång tid kan det leda till huvudvärk, trötthet och yrsel. Vid högre koncentrationer påverkas kroppens syretillförsel. Extremt höga värden (500-1000 och högre)

leder snabbt till medvetlöshet eftersom hjärnans andningscentrum förlamas när det händer drabbas hjärnan av syrebrist vilken kan vara dödlig [1].

Den stora faran med svavelväten är att kroppens luktsinne bedövas vilket innebär att man kan vara utsatt för höga halter svavelväte utan att man märker det. Lukten av ruttna ägg redan vid väldigt låga koncentrationer har gjort att många kommuner satt gastäta lock på nedstigningsbrunnar efter att boende närheten klagat. Effekten av de gastäta locken blir att svavelvätekoncentrationen i avloppet ökar eftersom luftningen blir sämre. I de fall då människor dött på grund av svavelväteexponering har de antingen exponerats för extremt höga koncentrationer och snabbt blivit medvetlösa eller arbetat på platser med höga koncentrationer vilket gjort att deras luktsinne domnat [2].

3.4 Yttre faktorerers påverkan på beständigheten

Det är i huvudsak tre faktorer som styr svavelangrepp i VA-miljöer, vilka går att påverka på olika sätt:

- Materialvalen
- Vattnet
- Utformningen

I detta projekt ligger fokus på den förstnämnda, materialet, det vill säga hur betongens egenskaper påverkar dess beständighet. Betongen och dess delmaterials koppling till dessa frågor har beskrivits i förgående kapitel [1, 21]. Vad som inte tas upp är till exempel användningen av andra material är betong. Enligt [21] kan det vara idé att på särskilt utsatta delar använda helt korrosionsbeständiga material, till exempel plast eller lergods.

Avloppsvattnets kemi är en faktor som är minst lika viktig som materialvalet, det är dock inget fokus för detta projekt. Det är vattnets innehåll som bestämmer hur stor risk eller potential som finns för skadliga ämnen att utvecklas. Den viktigaste åtgärden är att minimera mängden svavelhaltigt organiskt material i avloppsvattnet eftersom det är grunden för hur mycket svavelväte som kan bildas. Om möjligt kan man tillsätta syre och nitrat till vattnet för att minska risken att anaeroba förhållanden uppstår. Tillsats av metalljoner till vattnet vilka kan binda sulfidjonerna till svårösliga metallsulfider är ett sätt att försvåra bildandet av svavelväte [1].

Utformningen av rör och rörsystem utgör inte heller fokus för projektet men är likväl en viktig parameter som påverkar angreppets omfattning. Det är framförallt rörens dimension i förhållande till aktuella flöden och luftningen av systemet som spelar störst roll. Rörens dimension nämndes tidigare som en anledning till de ökade problemen i Sverige. Det beror på att det med stora rör och låga flöden följer en låg vattenhastighet. Vattenhastigheten styr uppehållstiden vilken påverkar bildningen av svavelväte eftersom risken att anaeroba förhållanden uppstår, ökar. Rörens storlek bör optimeras för att klara högsta dimensionerande flöde samtidigt som det vid låga flöden upprätthåller en viss vattenhastighet [1, 2].

Dålig luftomsättning är en annan orsak till anhopning av svavelväte i olika delar av rörsystemet. Som tidigare nämnt (se avsnitt 3.3) kan dålig luftning leda till höga koncentrationer svavelväte till exempel vid nedstigningsbrunnar. Precis som för

vattenhastigheten leder dålig luftomsättning till en ökad risk för svavelsyrabildning och korrosion eftersom stillastående svavelväte ges tid att kondensera på rörets tak och väggar. Problemen ökar eftersom människor som bor i anslutning till angripna rör klagat på den dåliga lukten som svavelväte genererar. Vissa kommuner löser luktproblemen genom att sätta gastäta lock, vilket innebär en ökad koncentration av svavelväten och ökade angrepp som följd. I dimensioneringen bör man därför se till att turbulenta rövergångar, där svavelväte avgår till luften, skapas i punkter där man kan lufta ledningen.

Sammanfattningsvis kan ett antal åtgärdsförslag identifieras [1, 2, 21]:

- Betong med SR-cement, låg permeabilitet och hög täthet
- God luftning av systemet
- Optimera dimensionen på ledningen
- Minimera vattnets uppehållstid
- Använda korrosionsbeständigt material på särskilt utsatta delar, till exempel rörövergångar
- Om möjligt, minimera utsläppen av sulfathaltiga föreningar
- Syresätta vattnet för att hindra bildningen av svavelväte
- Utforma systemet så att turbulens minimeras
- Möjliggöra rensning av ledningen för att få bort slamhuden.

De yttre omständigheterna och åtgärder kopplat till vattnet och utformningen av rörsystemet diskuteras mer ingående i bland annat [2] och [21], till vilka den intresserade läsaren hänvisas.

4 Test: Sulfat och svavelsyrabeständighet

Projektets laborativa del syftade till att prova ett antal betongblandningar, där cementet i varierande grad ersatts av granulerad masugnsslagg för att se hur slagginnehållet påverkat deras beständighet mot sulfat och svavelsyraangrepp. Resultaten fås genom mätning av massförlusten hos provkropparna och okulära bedömningar av deras skador. Dessutom har provkropparna exponerade för svavelsyra SEM-analyserats, det vill säga, deras ytor har studerats i elektronmikroskop för att bedöma skadorna svavelsyran orsakat. Fem olika betonger testades:

Tabell 2 - Provade cementtyper

Cement	Slagg (%)
SH-cement	-
CEM II/B S52,5 N	30
CEM II/B S52,5 N + Penetron	30
CEM III/A 42,5 N	50
CEM III/B 42,5 L	70

Till en av betongerna (CEM II/B – S52,5 N + Penetron) användes ett kristalliserande tillsatsmedel, Penetron (Pen-Tec Nordic AB, Nässjö, Sverige), motsvarande 1,5 % av cementvikten. Tillsatsmedlet ska enligt tillverkaren, Pen-Tech, göra betongen tätare och på så sätt mer beständig mot denna typ av angrepp. Dessutom målades ett par prover av varje betongblandning med en färg och primer (STE40 och STE41 från Eternit AG, Heidelberg, Tyskland) som sägs ge en tätare yta och därigenom förhindra angrepp.

Proverna gjuts alla enligt samma förfarande och tillåts härda under likvärdiga förhållanden. Testerna gjordes genom att proven placeras i baljor, en som innehöll svavelsyralösning och en annan med rena sulfater. Utöver slaggens förväntade påverkan var förhoppningen att testerna ska peka på vilket det angripande ämnet var, det vill säga svavelsyran eller sulfaterna. Syftet med undersökningen var också att se om det fanns en eventuell samverkan mellan de båda.

4.1 Avgränsning

- Testerna utfördes i 5 cykler á 7 dagar.
- Testmetoden har utformats av författaren själv efter studier av liknande testförfaranden.
- Svavelsyratestet är till skillnad från verkligheten inte bakterieinducerat
- Förhoppningen var att testerna skulle fungera som pekpinne till hur slagg påverkar beständigheten mot denna typ av angrepp.

4.2 Material och metod

4.2.1 Gjutning och härdning

Cementet som använts kommer från tillverkaren Cemex i Tyskland och levererades färdigblandade med given mängd slagg. Eftersom slaggens egenskaper varierar beroende på var den kommer ifrån var det särskilt önskvärt att samtliga slaggcement kom från samma tillverkare.

Gjutningarna utfördes på Lunds Tekniska Högskola i avdelningen för byggnadsmaterials betonglabb. Till blandningen användes en 5 liters blandare (Hobart A200 från Hobart Corporation, Troy, USA), se figur 9 nedan.



Figur 9 – Hobart A200 blandaren som användes.

Samtliga betonger blandades enligt samma metodik och med samma ballasttyp. Alla recept beräknades enligt samma antagna förhållanden mellan de olika materialen och samma vct (0,4). Cement-ballast förhållandet sattes till 1 på 3, det vill säga tre gånger mer ballast än cement. Mängden vatten var 0,4 gånger mängden cement. Dessutom gjordes antagandet att slaggen hade effektivitetsfaktorn 1. Effektivitetsfaktorn används med hänsyn till att de mineraliska tillsatsmaterialens egenskaper skiljer sig från portlandcementets och det kan därför behövas en annan mängd av, exempelvis, slagg för att uppnå samma egenskaper som motsvarande mängd Portlandcement ger. När faktorn sätts till 1 innebär det att den totala erforderliga mängden bindemedel antogs var densamma trots att delar av Portlandcementen byttes ut mot slagg.

Tabell 3 - De recept som användes till gjutningarna.

SH-cement				
	Cement	Vatten	Ballast (0-8)	
Mängd [kg]	2,373	0,913	7,216	
Densitet [kg/m ³]	3100	1000	2650	
Volym [m ³]	0,001	0,001	0,003	Totalt:
Volym [liter]	0,765	0,913	2,723	4,401 liter

CEM II/B S52,5 N (30 %)				
	Cement	Vatten	Ballast (0-8)	
Mängd [kg]	2,370	0,911	7,207	
Densitet [kg/m ³]	3080	1000	2650	
Volym [m ³]	0,001	0,001	0,003	Totalt:
Volym [liter]	0,769	0,911	2,720	4,400 liter

CEM III/A 42,5 N (50 %)				
	Cement	Vatten	Ballast (0-8)	
Mängd [kg]	2,359	0,907	7,173	
Densitet [kg/m ³]	3000	1000	2650	
Volym [m ³]	0,001	0,001	0,003	Totalt:
Volym [liter]	0,786	0,907	2,707	4,400 liter

CEM III/B 42,5 L (70 %)				
	Cement	Vatten	Ballast (0-8)	
Mängd [kg]	2,352	0,905	7,152	
Densitet [kg/m ³]	2950	1000	2650	
Volym [m ³]	0,001	0,001	0,003	Totalt:
Volym [liter]	0,797	0,905	2,699	4,401 liter

Innan gjutningarna påbörjades korrigerades vattenmängden med hänsyn till ballastens fuktinnehåll. Genom att väga upp en mindre mängd ballast och sedan torka den genom att elda med t-sprit kunde dess fuktinnehåll bestämmas (Figur 10 nedan) genom att provet vägdes före och efter torkningen. Fuktinnehållet i den eldade ballasten antogs vara representativt även för övrig ballast som användes under gjutningarna och varje recept korrigerades för detta.



Figur 10 - Eldning av ballast (Henrik Sjöbeck)

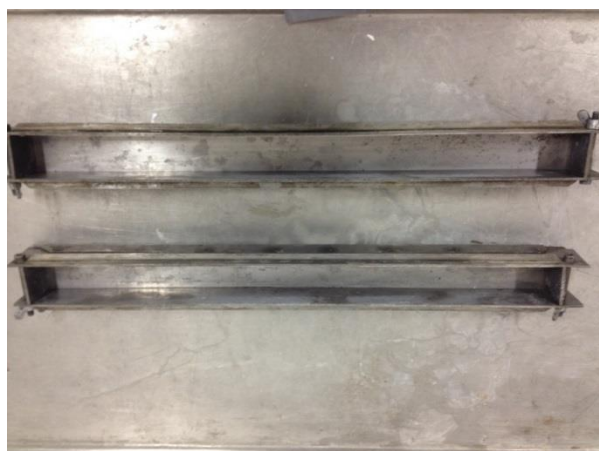
Nästa steg var sedan att de i recepten angivna mängderna vägdes upp. För att säkerställa en god säkerhet och arbetsmiljö användes skyddsutrustning såsom glasögon, handskar, hörselskydd och overall.

Först blandades ungefär halva mängden ballast med hela mängden cement, därefter tillsattes resterande mängd ballast. I enlighet med gjutningsförfarandet (se tabell 3 nedan) blandades cement och ballast i ca 2 minuter för att säkerställa en god omblandning. När tidtagningen passerat 2 minuter tillsattes vattnet utan att blandaren stoppades. Efter att vattnet tillsatts och betongen blandat i ytterligare ca 1 minut droppades flytmedlet i med pippetter. Effekten av flytmedlet var något fördröjd (ca 10-15 sekunder) varför man måste vara försiktig med att ha i för mycket. Mängden flytmedel ansågs vara tillräcklig när betongmassan sjunkit ihop något i blandaren.



Figur 11 - Lufthaltsmätare, procent/liter

Innan betongen hamnade i formarna användes en del av massan för att beräkna lufthalten. Det gjordes med en lufthaltsmätare (Figur 11). Lufthalten anges i procent per liter, det vill säga en liter betongmassa går åt till testningen. Den massa som används för lufthaltstestet kan inte återanvändas i formarna.



Figur 12 - Formar 65x5x5 cm som användes till gjutningarna

När betongen läggs upp i formarna (figur 12 ovan) är det viktigt att massan fyller ut hela formen och att överflödigt luft försvinner. Därför fylls först halva formen varefter den vibreras ca 10-15 sekunder på vibrationsplatta. Därefter fylls hela formen på och vibreras igen ca 10-15 sekunder. Med hjälp av en linjalliknande metallstång jämnas ytan på formen av så att formen är helt fylld.

Samtliga gjutningar utfördes enligt följande schema:

Tabell 4 - Arbetsmoment och tidsschema under gjutning

Arbetsmoment	Tidsåtgång (min)
Blandning av cement och ballast	2 ($\pm 0,5$) min
Tillsats av vatten och omblandning	3 min
Vid behov flyttillsats	Kontinuerligt
Fyll av halva formarna	-
Vibrering på vibrationsbord	ca 5-10 sek
Fyll av hela formarna	-
Vibrering	Ca 5-10 sek
Avjämning av ytan	Tills ytan är jämn

För att förbättra betongens arbetbarhet och gjutbarhet användes flyttillsatsmedel (Sika VicoCrete RMC-320, Sika AG, Baar, Schweiz) (se figur 10 nedan). Flytmedlet tillsattes under omblandningens sista två minuter med pipetter och mängden varierade för de olika blandningarna. Eftersom det behövs väldigt lite flyttillsatsmedel för att få en god konsistens antas dess betydelse för betongens vct vara försumbar. Efter ovan nämnda steg placerades betong och formar i svarta sopsäckar tillsammans med en mindre mängd vatten. På så sätt hölls betongen fuktig fram tills den avformades.



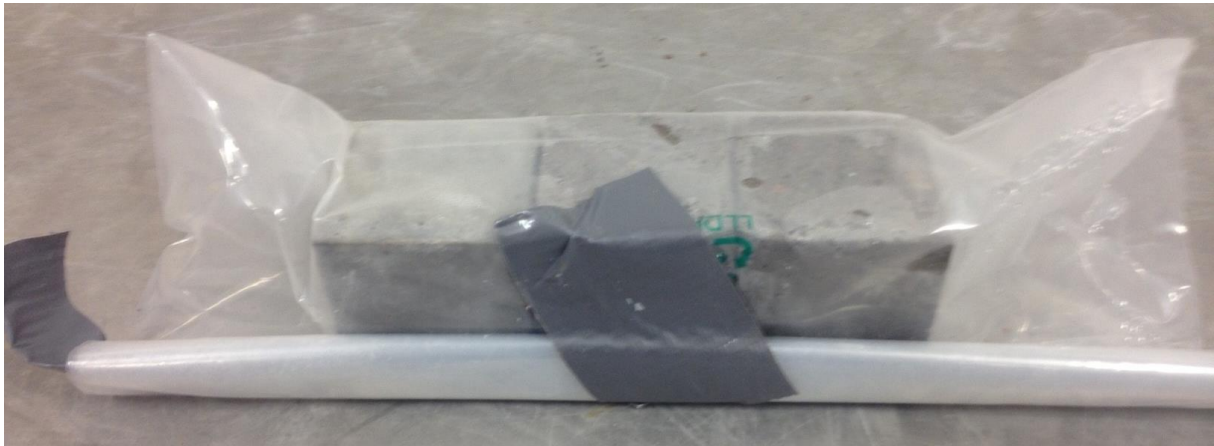
Figur 13 - Flytmedel och utrustning

Efter härdning i form mellan 1-3 dagar (varierade beroende på gjutningstillfället) avformades betongen och sågades med stensåg till kubiska provkroppar om 5x5 cm (Figur 14 nedan).



Figur 14 - Sågade provkroppar, kuber med sidan 5 cm.

Provkropparna lades tre och tre i 0,9 mm tjocka plastpåsar med lite vatten i (se figur 15 nedan). Därefter placerades de i en ugn att härda i 40°C (se figur 13). Den förhöjda temperaturen syftade till att skynda på härdningsförloppet. Risken för så kallad försenad ettringitbildning ökar med en hög härdningstemperatur, dock först över 70 °C [14]. Under härdningen kontrollerades att proverna hela tiden var fuktiga. Om proverna tillåts torka ut stannar härdningen.



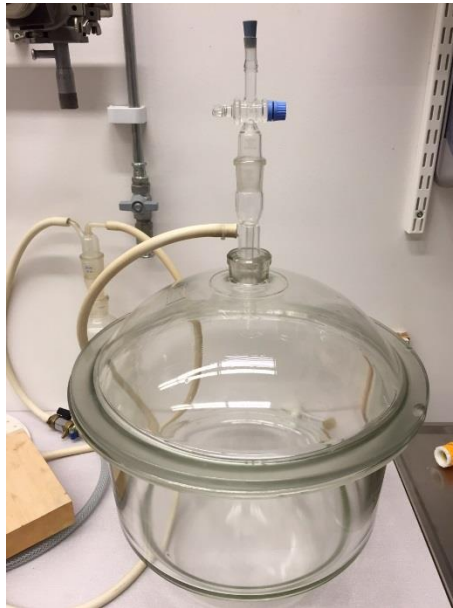
Figur 15 - Prover i påse



Figur 15 - Ugnen som användes för härdning av proverna.

När proverna härdats i ugnen i 17 dagar (alla prover placerades i ugnen samtidigt), togs de ut för att förberedas för testerna. De provkroppar som skulle utsättas för angrepp vattenmättades med vakuum (se figur 16 nedan) före exponeringen.

Vakuummätningen gick till så att proverna placerades i en exsickator där luften sögs ur med en pump. Därefter fylldes exsickatorn med vatten så att alla provkroppar precis täcktes. Vakuomet bibehölls därefter under cirka två timmar varpå pumpen stoppades.



Figur 16 -Exsickator för vakuummättnad, kopplad till pump som suger ut luften

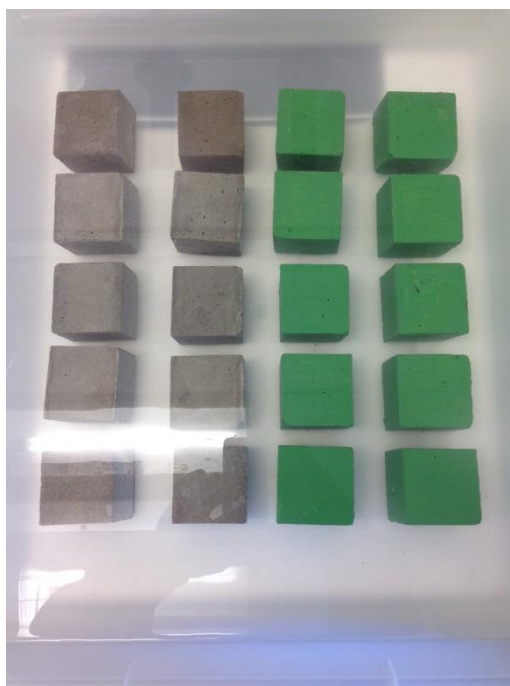
Under tiden efter att proverna vattenmättats fram tills testerna påbörjades förvarades provkropparna i ett öppet kärl med avjoniserat vatten. Enda undantaget var de prover som målats med skyddande primer och färg, de vattenmättades inte. Om produkten hade avsedd funktion förväntades ytan vara tät och därför bedömdes vakuummättnadsproceduren som onödig vid försöket.

Eftersom slagginblandningen leder till en långsammare hydrattation var det intressant att bedöma hydrattationsgraden hos de olika betongerna före beständighetprovningen påbörjades. För att mäta hydrattation krävs utrustningen som projektet saknade tillgång till och därför fick tryckhållfastheten fungera som ställföreträdande parameter. Fem provkroppar av var variant provades med avseende på hållfasthet och resultaten användes för att bedöma skillnaden i hydrattationsgrad.

4.2.2 Utförandet av tester

Till beständighetstesterna behövdes syratålig skyddsutrustning, kärl och övrig utrustning för att det skulle gå att genomföra. Salterna (NaSO_4 (98 %) och Mg_2SO_4 (99,1 %)) levererades i pulverform och blandades med vatten så att varje salt utgjorde ungefär 5 % av lösningen.

Syran (0,5 molar) levererades i färdiga ampuller som blandades ut med 5 liter vatten för att få pH $1(\pm 0,5)$. De baljor som innehöll svavelsyra placerades av säkerhetsskäl i dragskåp. Saltlösningen ansågs vara ofarlig och stod kvar ute i labbet.



Figur 17 - Provkropparnas placering i kärnen

Tabell 5 - Arbetsmoment under en provningscykel.

Arbetsmoment	Dygn
Provkropparna placerades i kärnen	1
Provkropparna togs upp ur kärnen	5
Löst material avlägsnas med syrabeständig trasa	5
Torkning i rumstemperatur	5-7
Vägning	7
Åter i kärn	7

Efter den tredje cykeln byttes de gamla lösningarna ut mot nya och kärnen rengjordes innan den fjärde cykeln påbörjades. Detta gjordes för att säkerställa att löst material och eventuella förändringar i jonkoncentrationer inte skulle påverka resterande cykler.



Figur 18 – Provkropparna som legat i svavelsyra torkar efter cykel 1

Resultatet av varje provningscykel gavs av de uppmätta vikterna som jämfördes med tidigare vikt för att ge massförlusten i procent. Totalt gjordes 5 cykler som alla följde samma förfarande. Som komplement till massförlusten studerades bitar från de svavelsyraexponerade provkropparna i SEM-mikroskop efter den fjärde cykeln. Detta gjordes för att studera den svavelsyrakorroderade ytan, men också om det fanns något avvikande hos strukturen i provkropparnas mitt. SEM (svepelektronmikroskop) innebär, i korta drag, att en elektronstråle skickas mot provets yta och förmedlar bilder av densamma.

4.3 Resultat

4.3.1 Tryckhållfasthet och lufthalt

Tryckhållfasthetstesterna visade en viss skillnad i hållfasthet mellan proverna efter härdning, se tabell 6 nedan. Resultaten av lufthaltstesterna och mängden flyttillsatsmedel syns nedan i tabell 7.

Tabell 6 – Resultat av hållfasthetstester och härdningstiden i antal dygn

	Tryckhållfasthet [MPa]	Härdningstid	Varav i ugn
SH-cement	76	19	17
CEM II/B S52,5 N	69	20	17
CEM II/B S52,5 N + Penetron	65	20	17
CEM III/A 42,5 N	50	23	17
CEM III/B 42,5 L	57	23	17

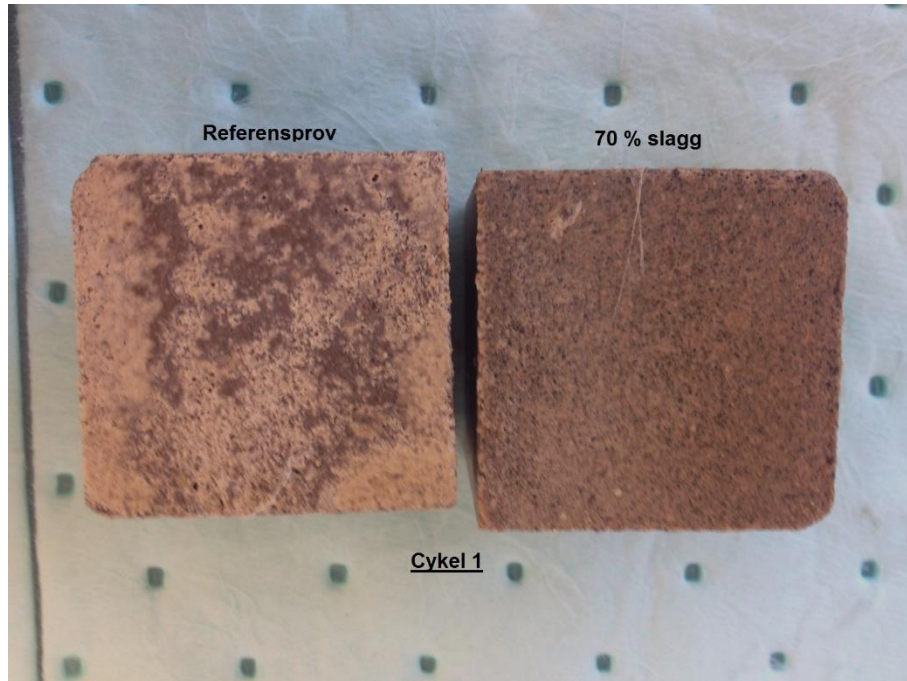
Tabell 7 - Uppmätt lufthalt och tillsatt mängd flytmedel.

	Lufthalt [%]	Flytmedel [g]
SH-cement	4,8	22
CEM II/B S52,5 N	6,0	18
CEM II/B S52,5 N + Penetron	3,8	32
CEM III/A 42,5 N	5,0	25
CEM III/B 42,5 N	5,0	24

4.3.2 Svavelsyrabeständighet

Cykel 1

Redan efter cykel 1 noterades tydliga skillnader mellan provkropparna (Figur 19).



Figur 19 - Ett av referensproven jämfört med ett med 70 % slagginnehåll efter cykel 1

Att proverna skadats av syran redan efter cykel 1 blev särskilt tydligt när man tittade på den sida av provkropparna som stått ner mot kärlets botten (Figur 20).



Figur 20 - Undersidan på ett referensprov efter en cykel. Skillnaden mellan skadad och oskadad betong.



Figur 21 - Skillnaden mellan proverna efter cykel 1

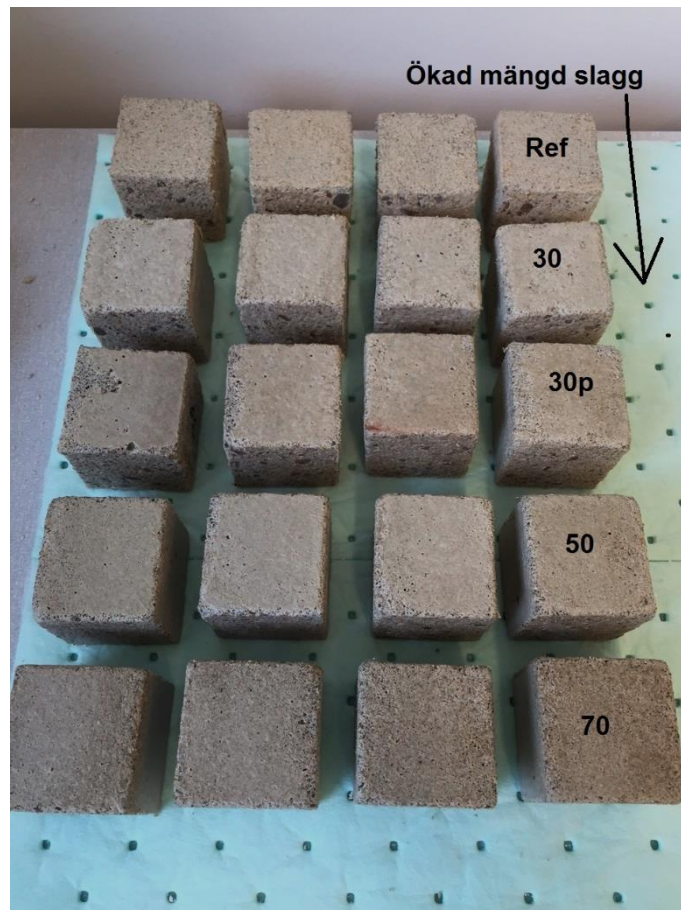
Figur 21 visar samtliga provkroppar från ett kärl, det är tydligt hur påverkan, åtminstone i ytan, minskar med ökad slagghalt.

Massförlusten efter första cykeln var i det närmsta obefintlig på samtliga prover.

Cykel 2

Samma tendens som efter cykel ett, referensproverna visar tydligast påverkan.

Referensproverna var så skadade att det yttersta skiktet föll av vid lätt torkning med trasa och därav uppvisade de också en viss massförlust.



Figur 22 - Skillnaden mellan proverna efter cykel 2

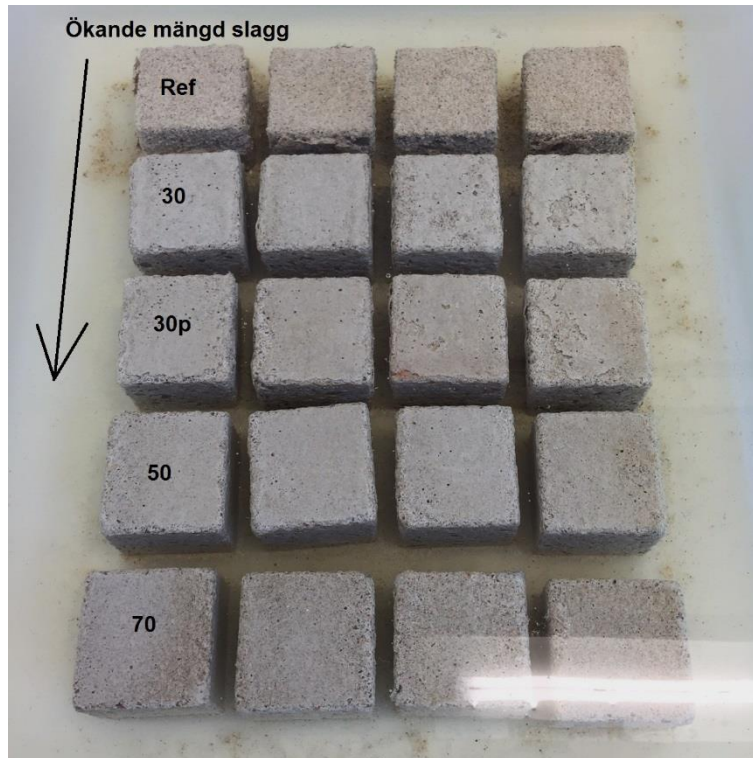
För provkropparna med dels 30 % slagg och dels 30 % slagg + penetron hade delar av det ytliga materialet skadats så att det föll av vid torkning (se figur 23). För prover med 50-70 % slagg var ytan alltså intakt och de visade tvärt emot övriga viss viktökning. De målade proverna var fortfarande oskadade.



Figur 23 – Delvis avskalad yta på provkropp med 30 % slagg + penetron.

Cykel 3

Efter den tredje cykeln hade samtliga prover påverkats så mycket att delar av materialet i ytan kunde avlägsnas med lätt torkning. Figur 24 visar proverna i det ena kärlet strax före de plockades upp. Notera hur referensproverna skiljer sig från övriga genom att ytan är helt avskalad med synliga ballastkorn.



Figur 24 - Provkropparna i ett av kärnen innan de plockades upp under cykel 3.

Ballasten var helt frilagd i ytan hos referensproverna vilket syntes tydligt efter att de plockats upp ur kärlet (Figur 25).



Figur 25 - Referensprov 1 efter cykel 3

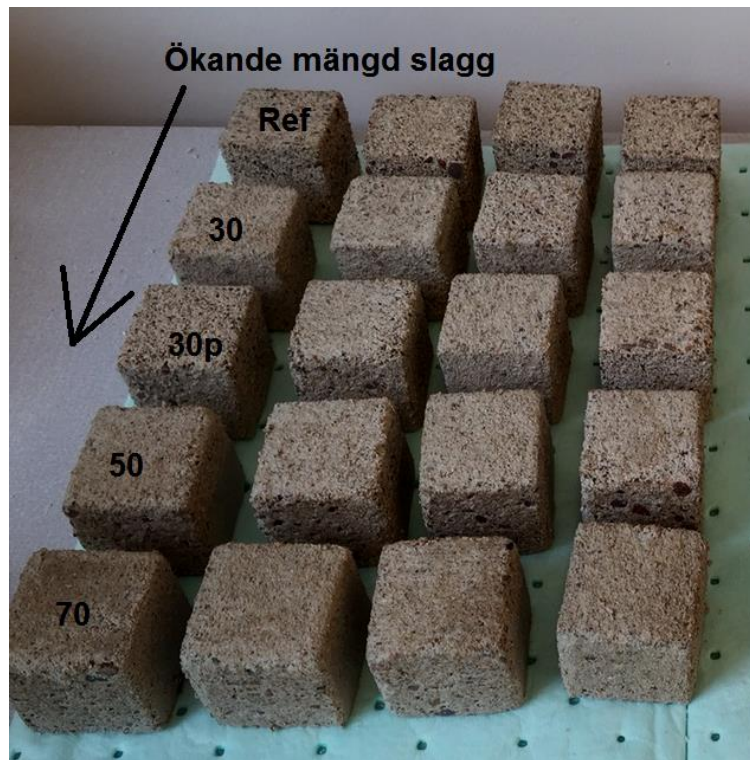
Efter tredje cykeln i syran hade även proverna målade med tätande färg och primer påverkats. Precis som för övriga prover minskade den synliga påverkan med ökande mängd slagg. Figur 26 visar en målad provkropp med referensbetong strax efter att den plockats ur kärlet under cykel 3.



Figur 26 - Referensprov 5 målad med tätande färg och primer efter cykel 3.

Cykel 4

Efter cykel fyra var tendensen den samma som tidigare (Figur 27)



Figur 27 - Provkroppar efter cykel 4

För de målade betongproverna blev det allt tydligare hur stor inverkan det underliggande materialet hade. Figur 28 visar dels en målad provkropp med 70 % slagg (vänster) och ett referensprov (höger).



Figur 28 - Provkropparna 70-5 och Ref-5.

Cykel 5

Efter sista cykeln sågs samma trend som tidigare, de okulära skillnaderna blir mindre när även provkropparna med 50 och 70 % börjar tappa det yttersta skiktet. Skillnaderna syns istället tydligast i massförlusterna (Figur 33 nedan).



Figur 29 - Provkropparna efter cykel 5.



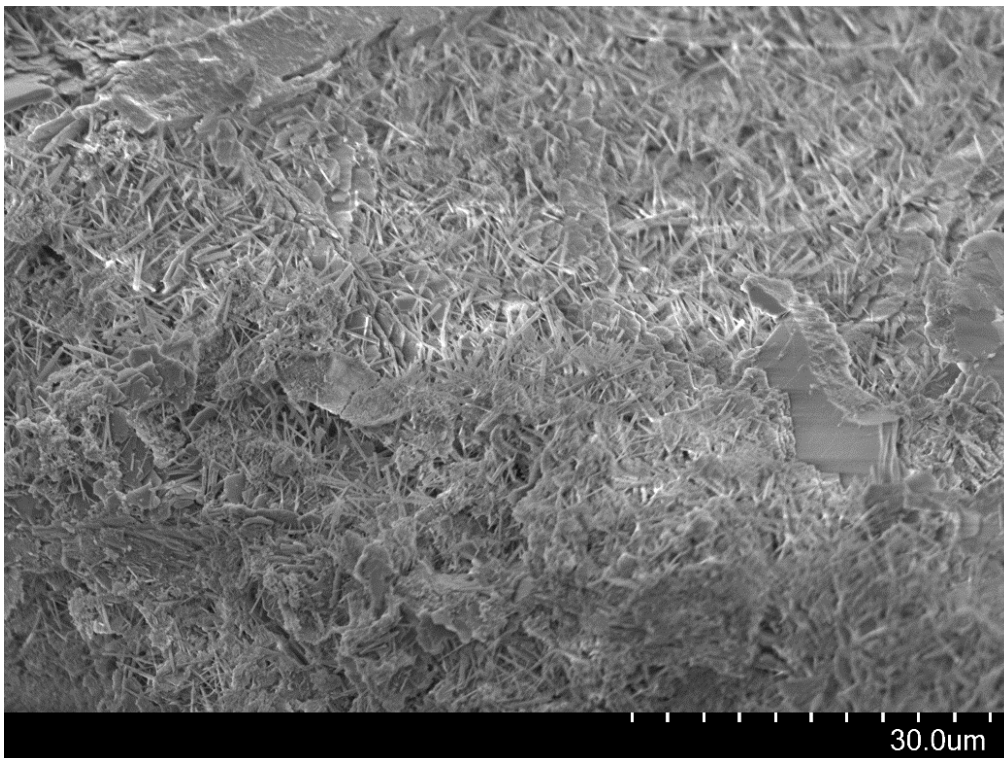
Figur 30 - Målade provkroppar efter cykel 5.

SEM-analysen som gjordes efter cykel 4:a visade att cementpastan skadats, framförallt i ytan där det sågs tydliga spår av gipsbildning i form av avlånga gipskristaller (Figur 31).



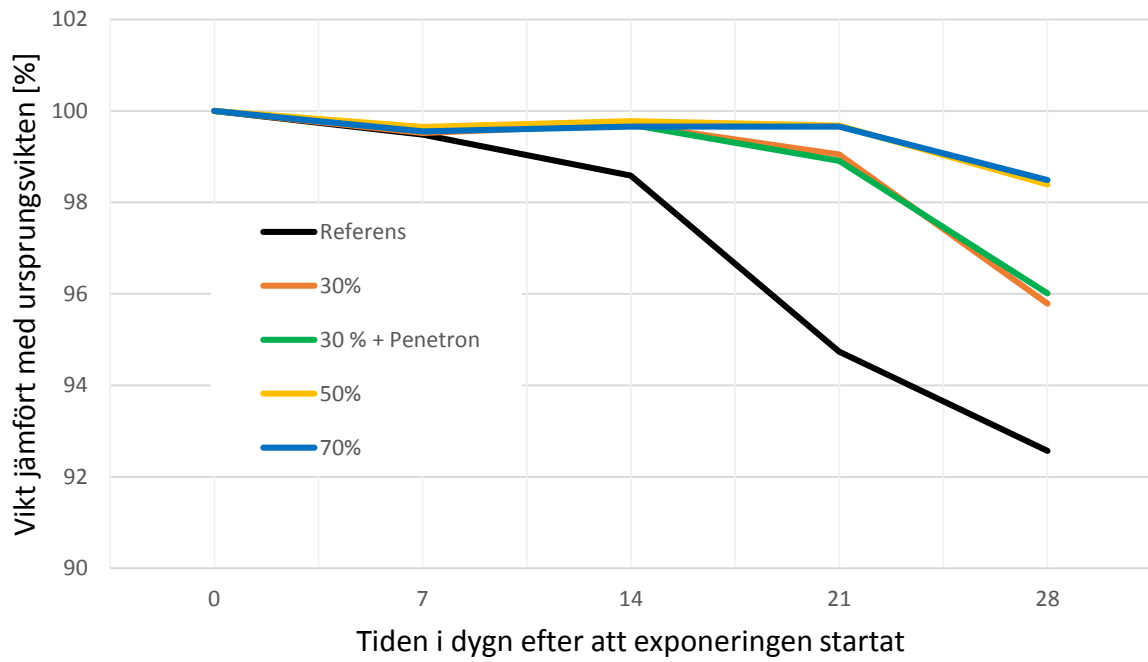
Figur 31 - Avlånga gipskristaller i ytan på ett svavelsyraangripet prov med 30 % slagg.

På bitar från mitten av provkropparna sågs tydlig ettringitbildning, troligen från härdningsförloppet. Ettringiten syns i form av trådliknande kristaller i cementgelen (Figur 32).



Figur 32 - Trådformiga ettringitkristaller och cementgel

Resultat av svavelsyraexponeringen



Figur 33 – Diagrammet visar medelvärdet av de vikter som uppmätts hos samtliga exponerade provkroppar.

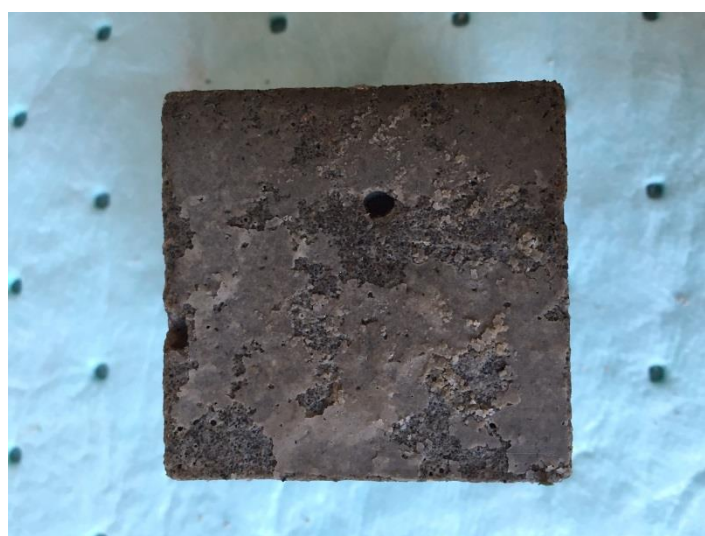
4.3.3 Sulfatbeständighet

Under de fem cyklerna visade ingen av provkropparna tecken på betydande nedbrytning, varken okulärt eller vid vägningarna.



Figur 34 - Provkropparna efter sista cykeln.

Efter de två sista cyklerna sågs en tunn beläggning på ytan hos några provkroppar. Referens kropparna (utan slagg) var något mörkare än övriga efter exponeringen i sulfatlösning.



Figur 35 - Beläggning på provkropp (50 %) efter cykel 5.

5 Diskussion

Efter beständighetstesterna verkar det troligt att det, i enlighet med litteraturstudien, är svavelsyran som angriper betongen. Svavelsyrabildningen är å andra sidan, i verkliga rör, beroende av att det i ett tidigare skede bildats svavelväte som kan kondensera på ytan. När det finns bakterier på ytan och samtidigt tillgång till syre omvandlas svavelvätet till syra.

Testerna visade att en ren sulfatlösning inte orsakar några märkbara skador på betongen under ca trettio dagars exponering. Det behöver inte betyda att sulfatlösningen är ofarlig det är snarare mer troligt att initieringstiden för den angreppsmekanismen är längre än testtiden eller att sulfatlösningen inte är tillräckligt koncentrerad.

En annan teori är att sulfatangrepp i VA-rör snarare sker som en konsekvens av andra angrepp. Till exempel att svavelsyran korroderar betongytan varpå vatten med sulfater kan tränga in. Sulfatjonerna kan då reagera med oreagerat aluminat, monosulfat eller gips till expansiva reaktionsprodukter, till exempel ettringit. Ett sådant scenario skulle dels kunna skada betongens struktur och dessutom leda till en acceleration av det korrosiva skadeförloppet.

Att döma av litteraturstudien är betongens täthet och cementets kemi de två viktigaste egenskaperna för att uppnå god beständighet mot sulfat- och svavelsyraangrepp. Ett lågt innehåll av aluminat (C_3A) är särskilt viktigt för beständigheten mot sulfatangrepp men det har däremot ingen större betydelse vid ett rent svavelsyraangrepp. För svavelsyraangrepp verkar tätheten vara den viktigaste parametern, framfört allt i ytan där korrosionen rör sig in i betongen likt en front.

Svavelsyratestet simulerade förhållanden där pH är ungefär 1. Enligt litteraturstudien kan sådana pH-värden uppstå i betongens yta när bakterierna bildar svavelsyra. Mätningen av pH har gjorts med pH-indikatorpapper vilket gör att man kan ifrågasätta exaktheten i mätningarna. Exakta värden har å andra sidan inte varit någon hög prioritet under testförfarandet. Istället har likabehandlingen av samtliga provkroppar prioriterats. Målet har varit att varje provkropp ska utsättas för så lika förhållande som möjligt för att möjliggöra jämförelser och slutsatser kring resultaten.

Resultaten från beständighetstestet tyder på att slagginblandningen har en positiv effekt på beständigheten genom att angreppet fördröjs. En trolig orsak till detta är att slaggen bildar mer CSH-gel, vilket är den komponent i cementpastan som främst angrips av svavelsyran. Mer gel borde därmed betyda långsammare nedbrytning. Å andra sidan innebär ökningen av CSH-gel också en minskad mängd kalciumhydroxid eftersom den förbrukas av puzzolanreaktionen. Kalciumhydroxiden bidrar med alkalinitet (högre pH), förbrukningen av densamma borde då leda till en generell sänkning av pH i betongen. Den bakterietillväxt som leder till svavelsyrabildning på rörens yta gynnas av ett lägre pH. Det är alltså inte självklart att resultaten är desamma vid ett bakterieinducerat syraangrepp som för det undersökta, rena, svavelsyraangreppet.

Tryckhållfasthetstesterna, som utfördes efter härdning innan beständighetstesterna påbörjades, syftade till att uppskatta hur väl de olika betongerna hydratiserat. Tabell 6 visar medeltryckhållfastheten för fem prover av varje recept. Tendensen var att hållfastheten minskar med ökad slagghalt, även om samtliga betonger visade en god hållfasthet. Eftersom endast fem provkroppar av varje betong provades med avseende på hållfasthet är det svårt att dra några övriga slutsatser av resultaten. Man kan dock fråga sig om inte resultaten av beständighetstesterna varit än mer till slaggens fördel om samtliga prover härdats till samma hydratationsgrad och hållfasthet.

Nedbryningsmekanismen ser ut att vara den samma oavsett slagginblandning, åtminstone vid en okulär bedömning. Att döma av massförlusterna, figur 33, noteras ingen betydande skillnad mellan proverna med 50 % respektive 70 % slagginblandning. Däremot är skillnaden betydligt större mellan 30 % och 50 %. En teori är, i enlighet med litteraturstudien, att maximal inblandningsgrad för slagg är ca 50 % och vid högre inblandning kommer inte all slagg att kunna reagera. Den oreagerade slaggen fungerar sannolikt då bara som en filler i betongmassan.

Resultaten visar vidare ingen märkbar skillnad i massförlust mellan proverna med tillsatsmedlet penetron och de utan. Under givna förutsättningar verkar medlet göra varken till eller från för beständigheten.

Den tätande primern och färgen ser inte ut att påverkas av syran under de rådande förhållandena (syrans koncentration och testtiden). Det är dock tydligt att den underliggande betongen har stor betydelse. De prover som målats visar samma nedbryningsmönster som övriga prover, det vill säga att angreppet fördröjs med ökad slagghalt. Man kan därmed argumentera för att ytbehandlingen har en positiv effekt eftersom den bidrar till ytterligare fördröjning av angreppet.

SEM-analysen visade på tydlig gipsbildning i den yta som utsatts för svavelsyra (Figur 31), vilket stämmer väl överens med teorin som presenterades i litteraturstudien. Det fanns även ettringitkristaller i provens struktur, mest troligt är den ettringiten bildad redan under härdningen som ett resultat reaktionen mellan gips och aluminat.

Man måste dock vara försiktig innan man drar några slutsatser av resultaten. Projektets laborativa del har aldrig haft intentionen att komma med några direkta svar. Tanken har snarare varit att testerna och resultaten ska föreslå inriktning till framtida studier. Dels är tiden, under vilken testet har utförts, begränsad till ca en månad, det går inte att med säkerhet säga vad som händer med de olika proverna i ett längre perspektiv. Dessutom är förhållandena i labbet andra än de ute i fält. Som tidigare nämnt är det skillnad på ett rent svavelsyraangrepp och ett bakterieinducerat angrepp och det är inte säkert att angreppet ser likadant ut när det är bakterier inblandade. Vad testerna däremot har visat, genom att slaggen klarade sig bäst, är att det finns en poäng med vidare studier och tester.

Ballastens betydelse för nedbrytningen och massförlusten ska inte underskattas. I Sverige används nästan uteslutande krossat urberg i betongen. Eftersom ballast är svårt att transportera tar man det lokala berget. I andra länder innebär det att man använder till exempel kalksten. Kalkstenen är, till skillnad från urberget, inte svavelsyrabeständig. Dessutom innehåller den kalk som bidrar till ett högre pH, vilket borde gynna beständigheten.

Att kalkstenen inte har samma goda hållfasthet som urberget borde vara av sekundär betydelse så länge dess hållfasthet är högre än den kringliggande cementpastans. Det borde vara intressant att studera ballastens betydelse även i Sverige. Kanske kan en framtida produkt, för särskilt utsatta områden, vara en betong med kalkstenballast.

Kunskapen om de mineraliska bindemedlens betydelse för den färdiga betongens egenskaper är idag otillräcklig. Innan de kan börja implementeras i större omfattning behövs omfattande studier gällande hur exempelvis strukturutveckling, beständighet och hållfasthet påverkas både under produktion och brukstid. Det finns idag, i Sverige, inga standardiserade beräkningsmodeller för betong med andra bindemedel än rent portlandcement. Det som finns är omräkningsfaktorer, till exempel effektivitetsfaktorn, som säger hur mycket slagg som ungefärligen behövs för att uppnå samma egenskaper som motsvarande mängd portlandcement ger.

Utformningen av rör och ventilation har stor betydelse för angreppsriskerna och omfattningen av ett eventuellt angrepp. Risken för svavelvätebildning och efterföljande svavelsyrakorrosion kan minskas betänkligt genom ett välutformat rörsystem med god ventilation.

6 Slutsatser

- Resultatet av svavelsyratesterna visade på en minskad viktförlust med ökad slagginbladning, det vill säga slagginblandning ser ut att fördröja det korrosiva angreppet av svavelsyran.
- De provkroppar som exponerades för sulfatlösning visade få tecken på skador under hela provtiden. Det verkar som att sulfatangreppens initieringstid är längre än de knappt trettio dagar som exponeringen pågick.
- Testerna visade också att användning av tätande skikt, till exempel färg, kan ha en positiv inverkan på beständigheten genom en ytterligare fördröjning av angreppen. Färgen verkar inte skadas nämnvärt av svavelsyran, men den underliggande betongen skadas om ytan inte är helt tät.
- Exponeringen pågick under knappt trettio dagar, slaggens inverkan på beständigheten i ett längre perspektiv återstår att utreda. Det är möjligt att skadeförloppet förändras vid längre exponering.
- Skillnaden mellan rena svavelsyraangrepp och det bakterieinducerade angreppet bör utredas. Det är bakterietillväxten som leder till svavelsyrabildning i rörets yta. När svavelsyra bildas sjunker pH vilket gynnar bakterietillväxten. Med andra ord är det möjligt att nedbrytningen av betongen går snabbare i verkligheten, där angreppet är bakterieinducerat, jämfört med ett rent svavelsyraangrepp likt det som undersökts i projektet.
- Ballastens betydelse för svavelsyrabeständigheten är intressant i vidare studier. Det är möjligt att en reaktiv ballast, till exempel kalksten, ger än bättre beständighet än en inert ballast. Detta eftersom angreppet blir jämt utbrett över den exponerade ytan istället för att koncentreras till pastan mellan ballastkornen.
- Angreppen kan till stora delar förhindras genom ett väl utformat rörsystem med god ventilation. God ventilation förhindrar kondensationen av svavelväte som leder till bildandet av korrosiv svavelsyra.
- Andra puzzolaner (till exempel flygaska och silika) bör också testas, gärna i kombination med slagg.

7 Referenser

- [1] S.-G. L. A. Ledskog, B-G. Lindqvist, "Svavelväteproblem i avloppsledningar - driftenheter och tillämpbara anvisningar," Stockholm 1994.
- [2] D. K. B. Thistlethwayte, *The control of sulphides in sewerage systems*. Melbourne: Butterworths, 1972.
- [3] F. M. C. Grengg, A. Baldermann, M.E Böttcher, A. Leis, G. Koraimann and M.Dietzel, "Bacteriogenically induced sulfuric acid attack on concrete in an austrian sewer system," presented at the XIII International Conference on Durability of Building Materials and Components, Sao Paulo, 2014.
- [4] J. L. J.S. Damtoft, D.Herfort, D. Sorrentino, E.M. Gartner, "Sustainable development and climate change initiatives," *Cement and Concrete Research*, vol. 38, pp. 115-127, 2008.
- [5] G.Fagerlund, "Struktur och strukturutveckling," in *Betonghandboken*, G. M. C. Ljungkrantz, N. Petersons, Ed., 2 ed Stockholm: AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, 1994, pp. 273-307.
- [6] S.-E. Johansson, "Tillsatsmaterial," in *Betonghandboken*, G. M. C. Ljungkrantz, N. Petersons, Ed., 2 ed Stockholm: AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, 1994, pp. 123-147.
- [7] S.-E. Johansson, "Cement," in *Betonghandboken*, G. M. C. Ljungkrantz, N. Petersons, Ed., 2 ed Stockholm: AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, 1994, pp. 33-69.
- [8] J. M. N. De Belie, A. Beeldens, E. Vincke, D. Van Gemert, W. Verstraete, "Experimental research and prediction of the effect of chemical and biogenic sulfuric acid on different types of commercially produced concrete sewer pipes," *Cement and concrete research*, vol. 34, pp. 2223-2236, 2004.
- [9] R. D. M. F. Girardi, "Resistance of concrete mixtures to cyclic sulfuric acid exposure and mixed sulfates: Effect of the type of aggregate," *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, pp. 276-285, 2011.
- [10] W. V. F.Girardi, R. Di Maggio, "Resistance of different types of concretes to cyclic sulfuric acid and sodium sulfate attack," *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, pp. 595-602, 2010.
- [11] G. Fagerlund, *Betongkonstruktioners Beständighet*, 3 ed. Uppsala: AW Grafiska, 1992.
- [12] L. Rombén, "Kemiskt angrepp," in *Betonghandboken*, G. M. C. Ljungkrantz, N. Petersons, Ed., 2 ed Stockholm: AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, 1994, pp. 809-849.
- [13] J. M. a. I. O. J.Skalny. (2001). *Sulfate attack on concrete*.
- [14] G.Fagerlund, "Inverkan av salter på betong," 2011.
- [15] L. Johansson, "Ballast," in *Betonghandboken*, 2 ed Stockholm: Svensk Byggtjänst och Cementa AB, 1994, pp. 69-95.
- [16] G. Klingstedt, "Vatten," in *Betonghandboken*, 2 ed Stockholm: AB Svensk Byggtjänst och Cementa AB, 1994, pp. 95-103.
- [17] B. Persson, "13 års studier visar att silikastoft gör brobetong mer beständig," *Husbyggaren*, vol. 3, 2003.
- [18] P.-G. Burström, *Byggnadsmaterial - uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*, 2 ed. Lund: Studentlitteratur AB, 2006.
- [19] H. H. S. Sporre, B. Hultman, F. Nyberg, "Svavelvätebildning och svavelsyrakorrosion vid avloppsanläggningar," Stockholm 1978.

- [20] M. C. B. Tian, "Does gypsum formation during sulfate attack lead to expansion?," *Cement and concrete research*, vol. 30, 2000.
- [21] H. H. S.Sporre, B. Hultman, F. Nyberg, "Svavelvätebildning och svavelsyrakorrosion vid avloppsanläggningar," Svenska vatten- och avloppsverksföreningen, Stockholm 1978.

Bilaga 1 – Mätdata från beständighetstester

Svavelsyratest – vikt

	Dygn	0	7	14	21	28	35
SH							
	1	307,75	306,313	305,003	292,205	284,738	279,605
	2	310	308,577	306,506	294,802	288,503	283,71
	3	297,325	295,924	292,741	281,374	275,568	270,609
	4	302,523	301,022	297,798	285,673	279,737	275,325
	5	289,136	287,221	283,569	273,179	266,294	X
	6	292,073	290,462	287,968	276,992	270,472	266,751
	7	298,944	300,765	301,56	301,619	299,02	296,407
	8	296,393	298,214	299,354	300,321	300,278	299,176
Slagg 30							
	1	300,392	298,939	299,913	298,079	287,203	283,244
	2	301,746	299,879	300,947	298,079	288,611	283,52
	3	293,851	292,687	293,119	291,188	281,253	275,29
	4	298,129	297,529	298,314	295,864	285,22	X
	5	303,383	301,72	301,69	300,583	290,74	285,427
	6	301,544	299,74	299,845	298,32	290,378	284,841
	7	294,089	295,983	297,157	298,03	297,687	297,8
	8	294,288	296,256	297,464	298,476	298,288	297,277
Slagg 30 + penetron							
	1	286,19	285,013	285,134	283,199	272,784	268,212
	2	295,73	294,547	295,21	293,121	285,081	279,232
	3	293,777	292,586	293,221	290,021	281,46	276,267
	4	298,719	297,427	297,732	293,821	286,473	X
	5	293,11	291,739	292,105	291,001	282,53	275,909
	6	300,823	299,275	299,668	298,046	289,466	284,31
	7	288,481	290,264	291,29	291,953	291,563	291,343
	8	294,456	296,16	297,244	298,146	297,568	296,821
Slagg 50							
	1	297,004	296,238	296,876	296,581	292,799	287,029
	2	300,071	299,272	299,798	299,921	295,837	288,449
	3	292,716	291,764	292,427	292,372	288,457	283,103
	4	292,829	291,708	292,222	292,017	288,434	X
	5	299,126	297,867	297,784	296,93	292,807	287,972
	6	303,217	301,926	302,067	301,604	298,017	294,367
	7	297,828	299,503	300,644	301,486	301,198	301,402
	8	301,657	303,199	304,373	305,293	305,067	304,605
Slagg 70							
	1	298,799	297,704	298,289	298,406	294,7	291,75
	2	305,459	304,274	304,838	305,029	301,269	297,772
	3	295,874	294,701	295,142	295,021	292,631	290,178
	4	303,17	301,896	302,307	302,149	298,322	X

5	307,305	305,759	305,656	305,496	301,475	297,996
6	298,914	297,15	297,182	297,337	293,885	290,307
7	308,083	309,734	310,783	311,621	311,898	312,666
8	299,311	300,765	301,65	302,55	302,757	303,434

Gröna celler = målade prover

<u>Sulfattest - vikt</u>	Dygn	0	7	14	21	28	35
SH	Provkropp						
	1	295,162	293,602	293,464	293,464	293,472	294,521
	2	302,915	301,207	301,142	301,181	301,186	302,249
	3	307,611	305,811	305,683	305,708	305,677	306,74
	4	297,202	295,669	295,506	295,49	295,408	296,37
	5	306,677	304,881	304,776	304,724	304,645	305,213
	6	302,888	301,207	301,115	301,061	300,985	301,532
	7	286,13	287,088	287,235	287,297	287,315	287,798
	8	310,554	311,524	311,664	311,732	311,73	312,23
Slagg 30							
	1	299,678	298,688	298,56	298,531	298,559	298,116
	2	292,406	291,319	291,199	291,178	291,235	291,75
	3	294,506	293,337	293,289	293,265	293,287	293,82
	4	295,8	294,657	294,539	294,563	294,544	295,051
	5	294,486	293,403	293,262	293,187	293,013	293,483
	6	294,529	293,401	293,306	293,252	293,159	293,642
	7	311,929	312,97	313,125	313,193	313,212	313,733
	8	297,65	298,61	298,775	298,861	298,897	299,348
Slagg 30 + penetron							
	1	283,711	283,222	283,142	283,148	283,2	283,7
	2	293,638	293,184	293,082	293,081	293,198	293,735
	3	296,385	295,899	295,791	295,789	295,873	296,382
	4	284,833	284,333	284,224	284,197	284,202	284,636
	5	288,61	287,917	287,798	287,727	287,675	288,142
	6	305,455	304,473	304,419	304,392	304,347	304,793
	7	294,803	295,534	295,697	295,759	295,792	296,228
	8	301,188	301,91	302,086	302,155	302,175	302,606
Slagg 50							
	1	299,108	298,157	298,054	298,003	297,95	298,271
	2	300,571	299,769	299,592	299,53	299,566	299,926
	3	305,915	305,129	305,005	304,996	300,411	300,749
	4	301,491	300,555	300,455	300,409	304,912	305,198
	5	301,346	300,257	300,299	300,194	300,035	300,323
	6	296,097	295,108	295,184	295,033	294,748	294,935
	7	298,696	299,504	299,694	299,74	299,802	300,103
	8	299,546	300,264	300,455	300,493	300,514	300,827

Slagg 70

1	300,938	300,185	300,132	300,086	299,963	300,291
2	307,015	306,059	305,948	305,912	305,891	306,339
3	307,959	307,228	307,16	307,146	307,031	307,412
4	300,576	299,689	299,689	299,733	299,647	299,991
5	305,004	303,978	304,2	304,021	303,614	303,832
6	306,284	305,47	305,726	305,537	304,981	305,059
7	304,692	305,603	305,834	305,903	306	306,258
8	300,865	301,742	301,978	302,039	302,089	302,387

Gröna celler = målade prover

Bilaga 2 – Mätdata från tryckhållfasthetstest

Trycktest:	1	2	3	4	5	Medel [MPa]
SH-cement	72,8	70,8	86	73,2	80,8	76,72
CEM II/B S52,5 N	72,8	63,5	77,2	62,8	-	69,08
CEM II/B S52,5 N + Penetron	50	67,5	72,8	48,4	84	64,56
CEM III/B 42,5 N	35,2	55,2	42,4	57,2	60	50
CEM III/B 42,4 L	54,8	56	-	54	62,4	56,8