



Høgskulen
på Vestlandet

BACHELOROPPGAVE

Sensorteknologi i betong

Sensor technology in concrete

Børge Koløen

Odin Iversen

Byggingeniør

Fakultet for ingeniør og naturvitenskap/Institutt for
byggfag/Konstruksjonsteknikk

Guzel Shamsutdinova

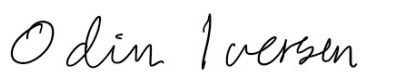
06.06.2022

Forord

Hovedforfatterne av oppgaven studerer konstruksjonsteknikk ved Høgskulen på Vestlandet. Videre har vi søkt oss inn på master i konstruksjonsteknikk og digitale byggeprosesser. Ettersom mange konstruksjoner bygges i betong var vi interessert i å få en dypere forståelse av nedbrytningsprosessene i betongkonstruksjoner, samt å undersøke muligheter for å overvåke disse prosessene digitalt. Målgruppen for denne oppgaven er de som ønsker en detaljert oversikt over nedbrytningsprosessene i betong, samt ulike sensorteknologier og et innblikk i muligheter for digital overvåkning av betongkonstruksjoner. I tillegg vil oppgaven være relevant for de som skal måle kloridinntrengning i betong.

Andrei Shpak fra Aker Solutions utlyste en bacheloroppgave om overvåking av nedbrytningsprosesser i offshore betongkonstruksjoner. I samarbeid med Andrei Shpak, Guzel Shamsutdinova og Garret John Day utviklet vi et eksperiment for å undersøke om det er mulig å bruke ion-selektiv elektrode (ISE) sensorer for å måle kloridinntrengning i betong (CEM II/B-M 42.5R). Synnøve Nymark Aasen og Mona Vestbøstad fra Institutt for helse og funksjon ved Høgskulen på Vestlandet, bisto ved CT-skanning av betongkubene. Ying Xue fra Institutt for klinisk odontologi ved Universitetet i Bergen utførte mikro-CT av betongprøvene. Utstyr til eksperimentet ble finansiert av Høgskulen på Vestlandet. Line Cecilie Flink har bistått i labarbeidet under støpeprosessen. Vi vil takke Guzel Shamsutdinova, Andrei Shpak, Garret John Day, Line Cecilie Flink, Ying Xue, Synnøve Nymark Aasen og Mona Vestbøstad for den gode hjelpen, og for å ha gjort eksperimentet mulig.

Bergen, 05.06.2022



Odin Iversen



Børge Koløen

Abstract

Understanding the degradation processes in concrete and how to monitor them, makes it possible to build longer-lasting structures, and reduce the cost of inspections. Especially when constructions are in remote places, like offshore, manual monitoring of the structures is both time consuming and expensive. This thesis has two parts: Literature review and experimental work.

In the first part of the thesis, we studied the degradation processes in concrete structures, as well as current sensor technologies. The degradation processes included physical damage, and chemical- and biological degradation. Furthermore, we studied current sensor technologies and the possibilities for digital monitoring of these processes. This included physical sensors, optical sensors, chemical- and biological sensors. Finally, we made some suggestions for possible uses of sensor technologies to monitor the degradation processes in concrete structures.

In the second part of the thesis, we experimentally simulated chloride ingress in concrete cubes, to see if the chloride ingress could be measured using Go Direct Chloride Ion-Selective Electrode (ISE) sensor. We used M60 and M90 concrete, with a ratio of 0.6 and 0.9 respectively. The samples were placed in environments with 0%, 1.75%, 3.5%, 5.25% and 7% of *NaCl*. Furthermore, at the end of the experiment, the chloride penetration depth was analysed by performing a destructive test using silver nitrate (*AgNO₃*) spray. The results showed that it is possible to measure chloride ingress in (CEM II/B-M 42.5R) concrete using an ISE sensor, without meaningful disturbance from ions in the concrete. In addition, it was shown that higher salt content and higher porosity sped up the chloride ingress.

Sammendrag

Ved å ha en dypere forståelse for nedbrytningsprosessene i betongkonstruksjoner, kan man bygge konstruksjoner som har lengre levetid. I tillegg, vil kunnskap om hvordan man kan overvåke nedbrytningsprosessene, kunne redusere kostnadene ved overvåkning av betongkonstruksjoner. Inspeksjoner kan være både dyre og tidkrevende, spesielt for konstruksjoner på utilgjengelige områder, som for eksempel offshore. Oppgaven er delt inn i to deler: En litteraturstudie og et eksperimentelt forsøk.

I den første delen har vi undersøkt nedbrytningsprosesser i betongkonstruksjoner, og eksisterende sensorteknologier. Nedbrytningsprosessene omfattet fysisk skade, kjemisk nedbrytning og biologisk nedbrytning. Sensorteknologiene som ble undersøkt var fysiske sensorer, optiske sensorer, kjemiske- og biologiske sensorer. Til slutt i litteraturstudiet kom vi med forslag til mulige bruksområder for overvåkning av nedbrytningsprosesser i betongkonstruksjoner ved hjelp av digitale sensorer.

I den andre delen av oppgaven, simulerte vi kloridinntrengning i betongkuber eksperimentelt, for å undersøke om det var mulig å måle kloridinntrengningen ved hjelp av en Go Direct Klorid Ione-selektiv elektrode (ISE) sensor. Vi brukte M60 og M90 betong (CEM II/B-M 42.5R), med forhold på henholdsvis 0.6 og 0.9. Betongkubene ble plassert i saltbad med 0%, 1.75%, 3.5%, 5.25% og 7% $NaCl$. Etter målingene, ble det utført analyse av kloridinntrengningsdybden, ved å utføre sølvnitratpraytest ($AgNO_3$). Resultatene viste at det er mulig å måle kloridinntrengning i M90 og M60 betong (CEM II/B-M 42.5R) med ISE sensor, uten betydelige ioneforstyrrelser fra betongen. I tillegg ble det vist at høyere porøsitet og høyere saltkonsentrasjon førte til større kloridinntrengningsdybde.

Innholdsfortegnelse

Forord	1
Abstract	2
Sammendrag	3
Innledning.....	5
Metode	7
Kapittel 1 Litteraturstudie	8
1 Nedbrytningsprosesser i betong	8
1.1 Fysisk skade	8
1.2 Kjemisk skade	14
1.3 Biologisk nedbrytning.....	21
2 Sensorteknologier.....	23
2.1 Fysiske sensorer	23
2.2 Optiske sensorer.....	25
2.3 Kjemiske og biologiske sensorer	35
3 Mulighetsanalyse.....	37
3.1 Optiske sensorer.....	38
3.2 Kjemiske sensorer	38
Kapittel 2 Måling av kloridinntrengning i betong ved ion-selektiv elektrode.....	40
1 Innledning.....	40
2 Materialer og Metode	40
2.1 Betong kuber til forsøk.....	41
2.2 Bad med saltløsninger	46
2.3 Oppsett for måling av kloridinntrengning.....	47
2.4 Analyse av luftinnhold og porestruktur ved CT-skann.....	50
3 Resultater.....	53
3.1 Kloridmålinger i M90 betongkuber	53
3.2 Kloridmålinger i M60 betongkuber	56
3.3 Destruktiv test med Sølvnitrat-spray	59
4 Diskusjon.....	60
5 Konklusjoner	68
Referanser	69
Vedlegg.....	70

Innledning

I innledningen skal vi først gå gjennom bakgrunnen for oppgaven. Deretter skal vi gå gjennom oppgavens oppbygning. Så skal vi beskrive målet for oppgaven. Og til slutt skal vi gå gjennom hva oppgaven skal omfatte og begrensinger for oppgaven.

Bakgrunn for oppgaven

Vi studerer tredje året med konstruksjonsteknikk på Høgskolen på Vestlandet, og ønsket å fordype oss i et av konstruksjonsmaterialene som blir mye brukt. Betong er et svært allsidig bygningsmateriale, og ved å få en dypere forståelse av nedbrytningsprosessene som kan forekomme i betongkonstruksjoner, vil vi være bedre rustet når vi skal dimensjonere og prosjektere konstruksjoner i arbeidslivet.

Når vi så oppgaven utlyst av Andrei Shpak fra Aker Solutions, vekket den umiddelbart vår interesse. Vi så muligheten for å fordype oss i betongkonstruksjoner og nedbrytningsprosesser i betong, samt muligheten for å utvikle et eksperiment for å besvare oppgaven.

Oppgaven gikk ut på å vurdere muligheter for å overvåke nedbrytningsprosesser i offshore betongkonstruksjoner ved hjelp av digitale sensorer. Dersom dette var mulig, ville det ha potensiale for å redusere tidsbruk og kostnader for overvåkning av offshore betongkonstruksjoner. Sett i sammenheng med vindmøllerparker offshore, er oppgaven fremtidsrettet og relevant med tanke på klimaendring.

Odin Iversen har søkt master i digitale byggeprosesser. Der skal han blant annet lære om digitale tvillinger. Dersom nedbrytningsprosessene i betongkonstruksjoner kan overvåkes ved digitale sensorer, vil disse målingene kunne kobles opp mot den digitale tvillingen, for å gi et estimat for levetiden til bygget.

Børge Koløen har søkt master i konstruksjonsteknikk. Der skal han spesialisere seg innenfor feltet. Den nye erfaringen og kunnskapen han har fått gjennom oppgaven, vil gi han god kunnskap og forståelse for nedbrytningsprosesser i betong.

Målet for oppgaven

Målet for oppgaven er til dels todelt, selv om det er en sterk sammenheng mellom kapitlene. I det første kapitlet, er målet å gi en oversikt og forståelse for de ulike nedbrytningsprosessene i betongkonstruksjoner, samt en oversikt over eksisterende

sensorteknologier. Videre er målet å komme med forslag for mulig bruk av sensorteknologi til overvåkning av nedbrytningsprosesser i offshore betongkonstruksjoner.

Målet for den andre delen av oppgaven var å undersøke om det er mulig å måle kloridinntrengning i betongkonstruksjoner ved hjelp av Go Direct Klorid ione-selektiv elektrode (ISE) sensor. Dersom dette er mulig, vil det være et alternativ til fysisk overvåkning. Da kan man bruke digital overvåkning, til å overvåke armeringskorrosjon forårsaket av kloridinntrengning, som er den mest aktuelle nedbrytningsprosessen i offshore betongkonstruksjoner.

For å nå disse målene gjorde vi først en litteraturstudie av nedbrytningsprosessene i betong, og eksisterende sensorteknologier. Deretter utviklet vi et eksperiment for å simulere kloridinntrengning i betong, og måle dette med ISE sensor. Videre utførte vi tilslagsanalyse og analyse av fersk og herdet betong. Vi utførte også CT-skann av den herdete betongen, for å analysere porestrukturen. I tillegg utførte vi en destruktiv sølvnitratpraytest, for å fysisk bekrefte kloridinntrengningsdybden i betongkubene. Til slutt diskuterte vi resultatene fra kloridmålingene og sølvnitratpraytesten, og trakk konklusjoner basert på resultatene.

Begrensninger for oppgaven

Varigheten på eksperimentet var begrenset ettersom målingene måtte avsluttes etter en periode på 53 dager, på grunn av innleveringsfristen på oppgaven. Antall målinger og varigheten av hver måling, måtte begrenses på grunn av vi bare hadde tilgang på en sensor. I tillegg var antall dager det kunne måles på, begrenset av at laboratoriet var stengt på søndager og ved høytider.

Det ble valgt å støpe M90 betong for at klorid skulle kunne trenge inn i betongen i løpet av tidsrammen for eksperimentet, M60 ble valgt for å sammenligne resultatene med en mer realistisk bestandighet. Det ble brukt material (tilslag og sement) og utstyr som var tilgjengelig på labben. Å simulere og måle korrosjon av armering i betong var ikke mulig innenfor tidsrammen vår, og er dermed ikke en del av oppgaven. Ettersom sensoren hadde begrensning på pH 2-12, er eksperimentet også begrenset til betong med pH-verdi innenfor dette intervallet.

Oppgavens oppbygning

Oppgaven er delt inn i to kapitler:

I kapittel 1 går vi først grundig igjennom de ulike nedbrytningsprosessene i betongkonstruksjoner. Deretter går vi gjennom eksisterende sensorteknologier. Til slutt kommer vi med forslag til hvordan de mest aktuelle nedbrytningsprosessene i offshore betongkonstruksjoner, kan overvåkes ved hjelp av eksisterende sensorteknologier. I nedbrytningsprosess delen av kapittelet går vi først gjennom fysiske nedbrytningsprosesser, som feil under proporsjonering, feil under støpning og feil under herdingsprosessen. Deretter går vi igjennom kjemiske nedbrytningsprosesser, som karbonatisering, sulfatangrep, syreangrep, kloridinntrengning og armeringskorrosjon. Til slutt går vi gjennom biologisk nedbrytning. I sensorteknologidelen av oppgaven går vi først gjennom fysiske sensorer, deretter optiske sensorer, og til slutt kjemiske og biologiske sensorer.

Kapittel 2 av oppgaven er en rapport fra eksperimentet vi har utarbeidet. Eksperimentet gikk ut på å simulere kloridinntrenging i betong, og å undersøke om det var mulig å måle kloridinntrengningen med en ISE sensor. Rapporten starter med en egen innledning, deretter går vi igjennom materialene og metoden for eksperimentet. Videre presenterer vi resultatene fra eksperimentet, og deretter blir resultatene diskutert. Til slutt i rapporten kommer konklusjonene.

Metode

I litteraturstudiet i kapittel 1 har vi søkt etter fagartikler og bøker i Google Scholar, Akademika og Byggforskserien. Vi vurderte kildene kritisk, og brukte bare fagfelleverdert bøker og artikler. Metoden for forsøket i kapittel 2 er beskrevet i material og metode delen av kapittelet.

Kapittel 1 Litteraturstudie

I dette kapittelet skal vi gå gjennom de ulike nedbrytningsprosessene i betong, og eksisterende sensorteknologier. Til slutt skal vi komme med forslag til mulig bruk av digitale sensorer for å overvåke nedbrytningsprosesser i offshore betongkonstruksjoner.

1 Nedbrytningsprosesser i betong

For å kunne gjennomføre en mulighetsanalyse av de ulike nedbrytningsprosessene i betongkonstruksjoner offshore, må det først dannes en oversikt og forståelse for de ulike nedbrytningsprosessene. Fysisk skade, kjemisk skade, armeringskorrosjon og biologisk nedbrytning er de vanligste nedbrytningsprosessene i betongkonstruksjoner, hvor armeringskorrosjon forårsaket av kloridinntrengning er mest aktuelt offshore.

1.1 Fysisk skade

Det eksisterer en rekke fysiske skader som kan forekomme både før, under og etter herding av betongkonstruksjoner. Når man skal prosjektere en konstruksjon er det viktig å ta høyde for, og forebygge disse skadene, slik at konstruksjonen oppnår ønsket levetid. Hvilke tiltak som anses å være nødvendig, vil variere fra konstruksjon til konstruksjon. Dersom man skal støpe f.eks. en platting til en vinterhage vil det være andre hensyn som må tas, enn dersom man skal støpe en offshore konstruksjon. Det er mye kunnskap og gode metoder som er utviklet for å sikre gode offshore konstruksjoner. Det er derimot ikke alle nedbrytningsprosesser som kan forhindres fullstendig, og det er disse prosessene som kan være aktuelt å overvåke med sensorer i offshore konstruksjoner.

Feil under støpeprosessen

Feil under støpeprosessen kan føre til skader på betongkonstruksjonen. Feil proporsjonering, utilstrekkelig blanding eller komprimering, uønskede stoff i betongen, frostskafer, armeringsfeil og feil forskaling er viktig å unngå for at konstruksjonen skal ha ønsket levetid, og for å unngå at nedbrytningsprosessene skal akselereres (De Schutter, 2013, s. 45).

Proporsjonering

Feil under proporsjoneringen av betongen, vil ha store konsekvenser for kvaliteten til betongen. Noe som også kan redusere levetiden til konstruksjonen. For å oppnå ønsket

betongkvalitet, er det dermed viktig å ha en god oversikt over sementinnholdet, vanninnholdet og mengden tilsetningsstoff (De Schutter, 2013, s. 45-47).

Blanding av komponentene

Det er viktig å blande betongen godt før den herder. Målet er å få en homogen fordeling av komponentene, slik at disse får god mulighet til å reagere med hverandre. Dermed er det viktig å blande betongen tilstrekkelig for at betongen skal oppnå ønsket kvalitet. På den andre siden er det viktig å ikke blande betongen for lenge, ettersom dette kan tilføre luft inn i betongen som vil svekke konstruksjonen (De Schutter, 2013, s. 48).

Uønskede stoff

Uønskede stoff i betongen kan føre til at nedbrytningsprosessene forskyndes (De Schutter, 2013, s. 48-49). Dersom det er for mye sulfat i sementsteinen, eller det introduseres sulfat under produksjonen, kan monosulfat bli omgjort til tri-sulfat. Dette medfører en volumendring som kan svekke betongen (De Schutter, 2013, s. 49). På samme måte er det viktig å unngå tilslag som utvider seg, deriblant tilslag som inneholder pyritt (De Schutter, 2013, s. 51-52). Videre vil klorider føre til korrosjon av armeringen. Dermed er det viktig å blant annet skylle tilslag fra sjø for å sørge for å ikke få kloridinnhold i betongen (De Schutter, 2013, s. 50). I Norge er det ikke lov å benytte tilslag eksponert for sjøvann. I tillegg er det viktig å unngå bruk av reaktive tilslag, eventuelt må man bruke lavalkalisement (De Schutter, 2013, s. 50). Kalsiumoksid (kalk) utvides under hydreringsprosessen. Dermed er det viktig å kontrollere mengdene i sementen, samt kontrollere tilslaget for kalk (De Schutter, 2013, s. 50-51).

Armering

Feilberegning av mengden armering, eller feilplassering av armering, vil også føre til at betongen blir svekket og at levetiden reduseres (De Schutter, 2013, s. 52-53). Dersom det ikke er tilstrekkelig armering i konstruksjonen, eller den ikke er plassert optimalt for å ta opp strekkraftene, kan dette føre til at det dannes sprekker i betongkonstruksjonen (De Schutter, 2013, s. 53). På den andre siden kan for mye armering, eller at armeringen plasseres for tett, gjøre at det dannes hulrom i betongen under støpeprosessen (De Schutter, 2013, s. 54-55). Videre kan for lite overdekning føre til at armeringen korroderer fortere, fysisk skade og mindre brannbeskyttelse (De Schutter, 2013, s. 55).

Komprimering

Tilstrekkelig komprimering av betongen er viktig for at konstruksjonen skal ha ønsket levetid (De Schutter, 2013, s. 57). Feil forårsaket av utilstrekkelig komprimering vises som regel ikke før forskalingen fjernes, og selv om det finnes tiltak for å reparere skadene, vil ikke konstruksjonen oppnå planlagt styrke (De Schutter, 2013, s. 58).

Forskaling

Riktig forskaling er vesentlig for å sikre en god støpeprosess (De Schutter, 2013, s. 60). Fersk betong påfører store krefter på forskalingen. Dersom forskalingen ikke er sterk nok, kan det føre til at konstruksjonens geometrien blir feil (De Schutter, 2013, s. 60). Videre må forskalingen være tett for å forhindre lekkasjer. Dersom vann og finstoff lekker ut, vil det føre til uønskede overflatefeil som vil gjøre betongen mer utsatt for nedbrytning (De Schutter, 2013, s. 60). Videre er det viktig å vente til betongen har herdet tilstrekkelig før man fjerner forskalingen, for å forhindre at betongen tørker ut, samt for forhindre forskyvninger og dannelse av sprekker (De Schutter, 2013, s. 62-63).

Plastisk svinn

Dersom betongen herder for fort, eller tørker ut under herdeprosessen kan det føre til plastisk svinn. Det gjør at betongen krymper, og dermed kan det dannes sprekker i betongen som vil redusere levetiden, og svekke konstruksjonen (De Schutter, 2013, s. 63-65). Dermed er det viktig at betongen herdes over en tilstrekkelig tidsperiode, og at den vannes eller dekkes til med membran for å forhindre fordampning (De Schutter, 2013, s. 63).

Plastisk setning og indre blødning

Under herdeprosessen kan det forekomme plastisk setning og blødning i betongen, som blant annet kan føre til dannelse av indre sprekker og sprekker langs armeringen. Plastisk setning kommer av at det større tilslaget synker nedover, og blødning skjer når finstoffet og vannet flyter oppover mellom tilslag eller langs armering (De Schutter, 2013, s. 66). For å forhindre plastisk svinn og blødning er det viktig at betongen ikke er for flytende, og at større konstruksjoner blir støpt lagvis (De Schutter, 2013, s. 66).

Frostskader i fersk betong

Dersom betongen fryser før den har fått en trykkfasthet på 5 MPa og har dannet tilstrekkelig andel luftporer, kan det oppstå betydelige frostskader. Dannelsen av iskrystaller og islinser i

den ferske betongen kan gi økt permeabilitet, og føre til at fastheten reduseres med opptil 80%. Dermed er det viktig å forhindre at betongen fryser når den er fersk, og i enkelte situasjoner kan det være nødvendig å aktivt varme betongen med f.eks. varmekabler under herdingsprosessen (Lindland, 2021, p. 5.2).

Konklusjon om støpeprosessen

På grunnlag av dette er det tydelig at en god støpeprosess er viktig for at konstruksjonen skal ha ønsket levetid, og for at nedbrytningsprosessene ikke skal akselereres.

Skader under herding

En av de største utfordringene med å støpe betong er volumendringene som oppstår under herdeprosessen. Dette forekommer på grunn av hydreringsprosessen, uttørking og varmeproduksjon. Når volumet endres er det høy risiko for at det dannes sprekker i konstruksjonen som vil kunne øke permeabiliteten, og føre til at betongen blir mer utsatt for korrosjon og andre nedbrytningsprosesser (De Schutter, 2013, s. 69-70).

Autogent svinn

Autogent svinn oppstår under hydreringsprosessen (De Schutter, 2013, s. 10). Hydreringsprosessen er det som gir betongen styrken sin, og det er dette som gjør at betongen herder. Denne prosessen pågår gjennom hele levetiden til betongen. Det er i midlertid i løpet av de første dagene at reaksjonsraten er størst, og etter 28 dager vil betongen ha nådd styrkekravet sitt (Alilou & Teshnehlal, 2010, s. 3).

Under hydreringsprosessen reagerer sement med vann, og sementfasene blir omgjort til nye faser med en annerledes mikrostruktur (De Schutter, 2013, s. 10). Omdanningen av mineralene fører med seg en volumendring. Ettersom produktene har mindre volum enn summen av reaktantene, vil betongen krympe (De Schutter, 2013, s. 70). Dette fører til at porevolumet øker, og differansen mellom den kjemiske krympingen og porevolumet blir det resterende autogene svinnet (De Schutter, 2013, s. 71-72). Som nevnt tidligere vil svinn øke risikoen for at det dannes sprekker, som kan redusere levetiden.

Tørkekrymping

Tørkekrymping forekommer når vannet i betongen fordampes, og overføres til omgivelsene. Under denne prosessen fordampes først vannet i kapillærporene, og dersom temperaturen er høy nok vil fysisk absorbert vann i gel porene også kunne fordampe. Kjemisk absorbert vann

derimot, er tatt opp i kjemiske forbindelser og vil ikke kunne fordampe. Ettersom vannet må overføres til omgivelsene for at tørking skal forekomme, vil overflaten tørke ut fortere. Dermed vil det oppstå en fuktighetsgradient i betongen. Dette vil føre til indre strekkrefter i betongen, ettersom overflaten vil krympe mer enn de indre delene av betongen. Dermed kan det dannes sprekker som kan redusere levetiden (De Schutter, 2013, s. 76-77).

Termisk krymping

Termisk krymping kan forårsakes av indre eller ytre fastholding, og kan føre til at det dannes sprekker. Hydreringsprosessen er en eksoterm reaksjon, som innebærer at det blir frigjort energi i form av varme. Under støpning av større konstruksjoner som demninger og større fundament (f.eks. offshore). Dette kan føre til problemer, ettersom varmeproduksjonen er raskere enn diffusjonen dersom man ikke setter inn tiltak. Termisk ekspansjon og termisk krymping forekommer henholdsvis når betongen blir varmet opp og kjølt ned (De Schutter, 2013, s. 82-83).

Termisk oppsprekking på grunn av indre fastholding skjer som en følge av at varmen lettere slipper ut av overflaten til betongen enn fra kjernen. Hydreringsprosessen akselereres av høyere temperaturer. Dermed vil det både bli skapt mer varme i kjernen, samtidig som kjernen holder bedre på varmen. Dette fører til større termisk ekspansjon i midten av konstruksjonen som skaper trykkrefter inni kjernen og strekkrefter på overflaten. Under nedkjølingsfasen vil termisk krymping føre til trykkrefter i overflaten og strekkrefter i kjernen. Ettersom betongen får høy fasthet før den får høy styrke, fører dette til en høy risiko for at det dannes sprekker i strekksonen (De Schutter, 2013, s. 83-84).

Termisk oppsprekking på grunn av ytre fastholding kan forekomme dersom man støper ny betong inntil ferdig herdet betong. Under nedkjølingen vil termisk krymping føre til strekkrefter i kontaktflaten mellom den nye og gamle betongen, ettersom den nye betongen blir fastholdt av betongen som allerede er herdet. Dette kan føre til at det dannes sprekker i den nye betongen (De Schutter, 2013, s. 85-86).

Skader i brukstiden

Skader i brukstiden kan skape sprekker i betongen, eller øke permeabiliteten. Direkte last, støt, ujevn setning og frostskafer i herdet betong kan føre til at levetiden reduseres.

Direkte last og støt

Under bruddgrenseberegning blir det tatt høyde for at betongen kan sprekke under lastpåkjenning, og at armeringen tar opp strekkraftene. Dette kan derimot føre til at levetiden reduseres ettersom armeringen blir eksponert, og kan korrodere fortere. Dersom konstruksjonen er i et skadelig miljø eller offshore, må størrelsen på tillatt sprekkbredde reduseres (De Schutter, 2013, s. 99-101).

Direkte last og støt er en kategori av skader som kan forekomme som følge av dimensjoneringsfeil, eller uforventede laster, i tillegg til ulykker. I oppgaven vår har vi hovedsakelig fokusert på materialegenskaper. Det er derimot en rekke ulykker offshorekonstruksjoner kan bli utsatt for som medfører betydelige laster, som f.eks. kollisjoner eller containere som faller ned (Jones & Fraser, 2009). Selv om disse hendelsene har lav sannsynlighet for å forekomme, medfører de store konsekvenser. I tillegg vil det være aktuelt å gjøre tiltak for å forhindre kollisjoner med isberg, ettersom dette kan medføre store belastninger på konstruksjonen (Evers et al., 2013).

Ujevn setning

I statisk ubestemte system kan ujevn setning føre til at betongen sprekker opp på samme måte som under direkte last. Dersom deler av konstruksjonen tar opp mer eller mindre last på grunn av ujevn setning, vil lastbildet endre seg. Dermed kan deler av konstruksjonen få større påkjenning enn den ble dimensjonert for, noe som kan føre til at betongen sprekker og levetiden reduseres.

Frostskader i herdet betong

Frostskader/frostsprenning i herdet betong oppstår hovedsakelig som følge av osmotisk trykk og hydraulisk trykk, og kan føre til riss og avskalling i betongen (Lindland, 2021, s. 5.1.1). Forutsetningene for at frostskader skal kunne oppstå er temperaturer under frysepunktet og tilgang på vann. Vann transporteres gjennom betongen ved diffusjon, kapillært sug, fukttransport på grunn av vanntrykk, og pumpeeffekt ved våt fryse-/tineeksponering (Lindland, 2021, s. 5.1.2).

Dersom det er salt i porevannet oppstår det osmotisk trykk når vannet fryser til is. Ettersom saltholdig vann har lavere frysepunkt enn ferskvann, vil saltet samles i vannet langs isfronten. Dermed oppstår det en forskjell i saltkonsentrasjonen i vannet som utlignes ved at vannet

strømmer gjennom porene i betongen. Dette fører til osmotisk trykk som kan være rundt 10 ganger så stort som den motvirkende strekkraften i betongen, og kan føre til riss og avskalling (Lindland, 2021, s. 5.1.4).

Hydraulisk trykk oppstår som følge av volumendringen når vannet fryser til is. Ettersom vannet utvider seg med rundt 9% når det fryser, skaper dette en trykkøkning i porene. Dersom trykkøkningen overskrider strekkapasiteten til betongen, vil det hydrauliske trykket føre til riss og avskalling (Lindland, 2021, s. 5.1.3).

Frostskadene oppstår under frostsyklusene, og kan føre til at konstruksjonen svekkes, og at levetiden reduseres. Frostsyklusene kan forekomme flere ganger i løpet av en sesong. Selv om overflateavskalling starter som en kosmetisk skade, vil den etter hvert redusere overdekningen til armeringen, og dermed gjøre armeringen mer utsatt for korrosjon. I tillegg gjør riss at uønskede stoff lettere trenger inn i konstruksjonen, noe som også kan føre til at nedbrytningsprosessene akselereres (Lindland, 2021, s. 5.1.5).

For å forhindre frostskader er det mulig å bruke luftmedførende tilsetningsstoff i kombinasjon med høy bestandighetsklasse på betongen. Luftmedførende tilsetningsstoff har som mål å danne sfæriske og stabile hulrom med 100 mikrometer i diameter. Størrelsen, fasongen og avstanden mellom hulrommene er avgjørende for å beskytte betongen mot frostskader. Dersom hulrommene har riktige egenskaper, vil de gi plass til at vannet i porene kan utvide seg under frostsyklusene uten å gjøre skade på betongen. Luftboblene vil redusere trykkfastheten til betongen, men levetiden blir betydelig økt, og betongen kan tåle mange flere frostsykluser (Shang et al., 2009).

Konklusjon fysisk skade

Fysiske skader kan betydelig redusere levetiden og kapasiteten til betongkonstruksjoner, og det er derfor viktig å forebygge. Dersom proporsjonering, tilslagsanalyse, støpeprosess og herdeprosessen blir riktig utført, kan de fleste fysiske skader forhindres eller beskyttes mot. Det er derfor viktig med gode rutiner og metoder, samtidig som det er viktig å utføre tester på fersk og herdet betong, for å forsikre at betongen oppnår de ønskede egenskapene.

1.2 Kjemisk skade

Kjemiske skader er et komplekst tema ettersom betongens oppbygning er en kompleks kjemisk sammensetning. I tillegg blir betongkonstruksjoner eksponert for mange ulike miljø,

hvor de kan bli utsatt for en rekke kjemiske angrep. Hovedsakelig er det sulfatangrep, syreangrep, armeringskorrosjon, karbonatisering og kloridinntrengning som kan svekke betongen og redusere levetiden (Bensted et al., 2007, s. 86).

Sulfatangrep

Sulfatangrep er en av de vanligste nedbrytningsmekanismene for betong og «American Society of Testing and Materials (ASTM)», definerer det som et kjemisk og/eller fysisk angrep (Bensted et al., 2007, s. 89). Sulfatangrep forekommer som en reaksjon mellom herdet sement, sulfat og fuktighet (De Schutter, 2013, s. 143). Både grunnvann og sjøvann inneholder vanligvis sulfat (De Schutter, 2013, s. 144). Sulfatangrep kan deles inn i kjemisk- og fysisk sulfatangrep.

Kjemisk sulfatangrep

Kjemisk sulfatangrep vil variere ut ifra hvilke ioner som er bundet til sulfationene. Naturlige forekomster av sulfatforbindelser inneholder vanligvis alkaliske ioner eller kalsiumioner, selv om magnesium også er vanlig i enkelte tilfeller (De Schutter, 2013, s. 145). De vanligste formene for kjemisk sulfatangrep er natriumsulfat, kalsiumsulfat, magnesiumsulfat, TSA, sulfatsyreangrep, sulfatangrep i sjøvann.

Natriumsulfat

Dersom natriumsulfat trenger inn i portlandsementbasert betong vil SO_4^{2-} fra natriumsulfatet reagere med Ca^{2+} fra oppløst portlanditt, og det dannes gips. Dette fører til en dekalsifisering av sementen som gradvis reduserer styrken. I tillegg vil monosulfat fra hydreringsprosessen omdannes til ekstra ettringitt. Dannelsen av ettringitt er en ekspansiv prosess, og fører med seg en volumøkning. Dette kan føre til trykkrefter i betongen som kan forårsake sprekkdannelser, og redusere levetiden til betongen (De Schutter, 2013, s. 146).

Kalsiumsulfat

Kalsiumsulfat som trenger inn i betongen danner hovedsakelig ettringitt som svekker betongen. Ettersom kalsiumsulfat fører med seg kalsium ioner, fører ikke dette til dekalsifisering av sementen på samme måte som natriumsulfat. Det er dermed utvidelsen forbundet med omdanningen av monosulfat til ettringitt som kan svekke konstruksjonen, og redusere levetiden (De Schutter, 2013, s. 146-147).

Magnesiumsulfat

Reaksjonen forårsaket av magnesiumsulfat fører til dannelsen av gips og brucitt. Brucitt dannes når magnesiumioner fra magnesiumsulfatet reagerer med hydroksid fra C-H-S fasen i betongen. Nedbrytningen av C-H-S fasen skjer nokså fort, og fører til at betongen svekkes betydelig. Dersom sementen har høyt innhold av trikalsiumaluminat kan dette føre til at det dannes ettringitt i de indre lagene av betongen, hvor pH-verdien er høy nok. Mengden ettringitt er derimot relativ lav, og det er hovedsakelig nedbrytningen av C-H-S fasen som fører til at betongen blir svekket og får redusert levetid (De Schutter, 2013, s. 147).

Thaumasitt sulfat angrep (TSA)

I betongkonstruksjoner eksponert for lave temperaturer (under 15°C), høy fuktighet, sulfat og karbonatisering kan det forekomme thaumasitt sulfat angrep (TSA). Dersom det er karbonationer til stede i betongen og pH-verdien er høy nok, kan det dannes thaumasitt direkte fra C-H-S fasen i sementen. Under direkte thaumasittdannelse er det nedbrytningen av C-H-S fasen og ikke utvidelse som fører til at betongen svekkes. Dersom magnesiumsulfat også er til stede, kan prosessen akselereres. Dersom betongen allerede har sprekker som følge av ettringitt-dannelse, vil overflatearealet øke og sulfat trenger lettere inn i betongen, og nedbrytningen av C-H-S fasen vil akselereres. TSA er derimot en teoretisk prosess som ikke er påvist i ekte konstruksjoner, men vil trolig forekomme som en sekundær nedbrytningsprosess, etter de vanlige formene for sulfatangrep har brutt ned betongen (De Schutter, 2013, s. 147-149).

Sulfat-syreangrep

Under enkelte omstendigheter kan det forekomme svovelsyre, noe som vil føre til en kombinasjon av sulfatangrep og syreangrep. Dette fører til at det dannes gips, kombinert med syreangrep (De Schutter, 2013, s. 149). Syreangrep blir beskrevet nærmere senere i kapittel 2.

Sulfatangrep i sjøvann

Sjøvann inneholder en rekke ioner som kan være skadelig for betongkonstruksjoner, deriblant sulfationer. Det eksisterer sulfatmotstandsdyktig sement, men den har høyere permeabilitet for kloridioner, og er dermed mer utsatt for armeringskorrosjon. Dannelsen av ettringitt i sjøvannsangrep fører vanligvis ikke til ekspansjon på grunn av kloridionene som også er tilstede, men sjøvannets sammensetning vil variere geografisk (De Schutter, 2013, s. 155).

Offshore benyttes ofte «sulfatsikre sementer» kombinert med lavt vanninnhold, som fører til lav porøsitet. Dette gjør at betongen har svært lav permeabilitet, og transporten av sulfater blir svært begrenset.

Fysisk sulfatangrep

Det er vanskelig å skille fysisk sulfatangrep fra kjemisk sulfatangrep, ettersom mange kjemiske prosesser også forekommer under et fysisk sulfatangrep. Det som skiller et fysisk sulfatangrep fra et kjemisk, er at sulfatsalter kan krystalliseres i betongporer. Fysisk sulfatangrep kan forekomme dersom en betongkonstruksjon er delvis dekket av sulfatholdig grunn eller grunnvann. Da vil kapillært sug, diffusjon og fordamping føre til at sulfatholdig vann trekker inn i betongporene. Dette kan føre til at det blir svært høy konsentrasjon av SO_4^{2-} og Na^+ ioner i porene ved overflaten av betongen. Dermed vil ionene kunne krystallisere, og det er denne krystalliseringen som er en fysisk prosess som danner et trykk i betongen som kan svekke konstruksjonen og redusere levetiden (De Schutter, 2013, s. 151-152).

Syreangrep

Nedbrytning forårsaket av syreangrep vil variere basert på hvilken syre betongen kommer i kontakt med. Det vanligste tilfellet hvor betong kan bli utsatt for syreangrep er i avløpskanaler hvor en rekke syrer kan komme i kontakt med konstruksjonen. I motsetning til sulfatangrep er ikke syreangrep forbundet med volumendring ettersom ettringitt og thaumasitt blir brutt ned ved for lav pH. Derimot vil ulike syrer bryte ned sementmatriksen, som resulterer i at betongen løses opp (De Schutter, 2013, s. 156).

Armeringskorrosjon

Armeringskorrosjon er en av de vanligste formene for nedbrytning av betong. Dersom man ser betong som har blitt brutt ned, vil et vanlig syn være sprekker og avskalling langs armeringen, som kan gjøre at armeringen blir synlig. I tillegg kan man ofte se brunfarge på betongen som følge av at armeringen har korrodert (De Schutter, 2013, s. 162). Det er godt kjent at jern som kommer i kontakt med vann og oksygen vil ruste. Ettersom armeringsstål hovedsakelig består av jern, og at vann og oksygen eksisterer så godt som overalt på jorden, fører dette til at armeringen i utgangspunktet er svært utsatt for korrosjon. Selv om rustdannelse er et velkjent fenomen, er nedbrytningen av armeringsjern en kompleks elektrokjemisk prosess (De Schutter, 2013, s. 163).

Nedbrytningsprosessen krever en katode for reduksjon, og en anode for oksidering, samt en leder og elektrolytt for å frakte de ladde partiklene. Når stål kommer i kontakt med vann, oppfører vannet seg som en elektrolytt, og Fe^{2+} ioner fra stålet vil løse seg opp i vannet. Dette er den anodiske prosessen eller oksideringen, og vil skje på den negative polen. Deretter vil elektronene forlytte seg gjennom stålet som er en leder, og ende opp på den positive polen. Altså kommer elektronene til katoden, og det blir satt i gang en katodisk prosess, eller en reduksjon. Når vann og oksygen er til stede, vil oksygen, vann og elektroner reduseres til OH^- ioner. Disse hydroksidionene transporteres gjennom elektrolytten, og reagerer med jern ionene, og danner da jernhydroksid (De Schutter, 2013, s. 163). Deretter kan jernhydroksidet videre oksideres til jernoksid, altså rust (De Schutter, 2013, s. 164). Armeringskorrosjon er altså en kombinasjon av ioner som reagerer, og en overføring av elektrisk ladning. Derfor kalles det en elektrokjemisk prosess (De Schutter, 2013, s. 163). Dannelsen av korrosjonsproduktene er en utvidende prosess. Dette gjør at det oppstår strekkrefter i betongen, som igjen kan føre til avskalling eller sprekkdannelse (De Schutter, 2013, s. 164-165).

Grunnen til at armeringskorrosjon vanligvis ikke er et problem i nye betongkonstruksjoner, er at porevannet i betongen har en veldig høy pH-verdi på grunn av kalsiumhydroksid fra hydreringsprosessen. Den høye pH-en vil føre til at armeringen blir beskyttet av et passivisert lag, hvor det ikke vil oppstå korrosjon (De Schutter, 2013, s. 165). Kalsiumhydroksidet fører altså til at porevannet får et høyt innhold av hydroksyl. Dermed reagerer jernioner med hydroksyl, og danner jernhydroksid. Men ettersom hydroksylinnholdet er så høyt, vil jernhydroksidet utfelles, og danne et beskyttende lag rundt armeringen, istedenfor å oksidere til jernoksid. Armeringsjern vil altså være beskyttet inne i betongen, frem til passivlaget blir ødelagt som følge av karbonatisering eller kloridinntrengning (De Schutter, 2013, s. 166).

Karbonatisering

Som nevnt tidligere vil armeringen vanligvis være beskyttet av et passivlag, men passivlaget kan bli brutt ned som følge av karbonatisering. Dersom karbondioksid fra atmosfæren trenger inn i betongen, vil det reagere med de alkaliske stoffene i betongen. Dette vil føre til en reduksjon av alkaliteten, og passivlaget brytes ned ettersom pH-verdien reduseres (De Schutter, 2013, s. 168).

Karbondioksid vil først reagere med kalsiumhydroksid, men dersom konsentrasjonen er høy nok, vil karbondioksid kunne reagere med C-H-S fasen i betongen. Dette er en prosess som krever at reaktantene er løst opp i vann, for at reaksjonen skal forekomme. Karbonatiseringen vil gradvis gå saktere etter hvert som man beveger seg innover i betongen, og dersom man går dypt nok inn i betongen vil man nå et lag som ikke er karbonatisert (De Schutter, 2013, s. 169). Dersom armeringen befinner seg i den delen av betongen som ikke er karbonatisert, vil armeringen fortsatt være beskyttet av passivlaget. Dermed er det viktig å fastslå nødvendig overdekning, basert på inntrengningsraten til karbondioksid, for å sikre at armeringen er beskyttet mot korrosjon.

I tillegg til porøsiteten, vil en avgjørende faktor for diffusjonsraten til karbondioksid, være det relative fuktinnholdet i betongen. På den ene siden vil ikke karbonatisering kunne forekomme dersom betongen er helt tørr, ettersom reaktantene må være løst i vann for å kunne reagere. På den andre siden er diffusjonsraten 10,000 ganger mindre i vann, enn den er i luft. Dette fører til at dersom betongen er helt mettet med vann, vil ikke karbondioksid trenge fort nok inn i betongen til at det blir et problem. Dermed vil karbonatisering av betong gå raskest ved et relativt fuktinnhold på mellom 50% og 80% (De Schutter, 2013, s. 170).

Etter hvert som betongen blir karbonatisert, vil det dannes kalsiumkarbonat som et sluttprodukt. Kalsiumkarbonat er svært lite vannløselig, og vil derfor utfelles i porene. Dette fører til at porene i betongen gradvis fylles opp og tettes igjen. Dermed vil diffusjonen gradvis stoppe opp, og til slutt vil betongen i teorien kunne oppnå en endelig karbonatiseringsdybde (De Schutter, 2013, s. 171).

For å finne inntrengningsdybden til karbondioksid i betong, kan en bruke Fick's andre lov. Da får man at inntrengningsdybden er en funksjon avhengig av kvadratrotten til tid. Dette fører til at dersom man halverer overdekningen, vil tiden det tar før korrosjonen starter bli mer enn halvert. Dersom man tar høyde for endringen i poreoppbygningen, og fuktinnholdet i betongen, kan penetreringsdybden bli noe redusert (De Schutter, 2013, s. 171).

Selve karbonatiseringen av betongen er ikke skadelig, men den gjør det mulig for armeringen å korrodere, ettersom passivlaget blir ødelagt. Armeringskorrosjonsraten er også avhengig av den relative fuktigheten, og den vil være raskest når den relative fuktigheten er 95%. Dette fører til at selv om karbonatiseringen vil gå veldig fort når den relative fuktigheten er rundt

60%, fører den med seg relativt lite korrosjon. I tillegg vil en for høy relativ fuktighet gjøre at oksygenet som er nødvendig for korrosjonen, vil diffundere mye tregere, og dermed bremses korrosjonen av armeringen. På grunnlag av dette, vil en syklisk fukting og tørking av betongen forårsaket av regn eller tidevann, føre til mest armeringskorrosjon som følge av karbonatisering (De Schutter, 2013, s. 172-173).

Kloridinntrengning

Kloridkilder

Kloridinnhold i betong kommer hovedsakelig enten fra innstøpte kloridholdige delmaterialer, eller at klorider blir tilført betongen utenfra (Lindland, 2021, s. 4.3). Kloridholdige delmaterialer kan være sjøvann brukt som blandevann under produksjonen, eller at det er tilsatt kloridholdige tilslag fra sjøen. Dette er ikke et problem i dag, siden det ikke er tillatt å bruke kloridinnholdige materialer i armerte betongkonstruksjoner. I betongkonstruksjoner offshore, vil klorider som er tilført utenfra være et problem, ettersom betongen er eksponert for sjøvann.

Kloridinntrenging

Klorid trenger inn i betongen ved hjelp av diffusjon og kapillærabsorpsjon. Kapillærabsorpsjon oppstår når betongoverflaten blir utsatt for fukting og uttørking, av kloridinnholdig vann. (Lindland, 2021, s. 4.4). Kapillærabsorpsjon er en mye raskere prosess enn diffusjon (De Schutter, 2013, s. 174; Lindland, 2021, s. 4.4). Dette oppstår vanligvis nær overflaten, i de ytterste 20mm av betongen. Vann som inneholder kloridioner, vil da raskt absorberes inn i dette laget, og deretter vil det trenge seg videre inn ved hjelp av diffusjon. Måten diffusjon fungerer på, er at klorider beveger seg fra områder med høy konsentrasjon av klorider, til områder med lav konsentrasjon av klorider (Lindland, 2021, s. 4.4).

Pittingkorrosjon

I motsetning til generell korrosjon, der det er korrosjonsangrep homogent på overflaten til metallet, vil kloridangrep føre til lokalisert pittingkorrosjon. Lokalisert korrosjon fører til at tverrsnittet blir redusert lokalt, som medfører at geometrien hindrer massetransport. Dersom oksygendiffusjonen inn til hulrommet er tregere enn det oksygenet blir oppbrukt av den katodiske reaksjonen, vil det oppstå deoksidering. Dette gjør at det vil oppstå en oppløsning av jern inni hulrommet til armeringen (Angst, 2011, s. 9).

Kritisk kloridinnhold

For at kloridkonsentrasjonen i betongen skal klare å bryte gjennom det passive laget, og starte pittingkorrosjon, må den overgå det kritiske kloridinnholdet. Hvor høy pH-verdien er i poreløsningen har mye å si. Dette er på grunn av at tilstedeværelsen av hydroksidioner, gjør at det kreves flere kloridioner for at det skal korrodere. Det kritiske forholdet mellom klorid- og hydroksidioner er 0.6. Korrosjon vil oppstå dersom dette tallet blir oversteget (Angst, 2011, s. 21).

Kloridbindingskapasitet

I betong kan klorid enten være kjemisk bundet, eller oppløst i poreløsningen. Det som påvirker hvor mye klorid betongen kan ta opp er sementtype, pH, mengde kalsiumsilikathydrat og temperatur. Det er kloridene som er oppløst i poreløsningen, som fører til at armeringen blir depassivisert. Kloridbindingskapasiteten til betongen er derfor viktig for å beskytte armeringen mot korrosjon (Angst, 2011, s. 21).

Konklusjon kjemisk skade

Det er mange ulike former for kjemisk skade, og det er ikke alltid mulig å hindre at betongen blir utsatt for disse. Dermed er det viktig å undersøke miljøets kjemiske egenskaper, før man bygger i betong. Da kan man utføre nødvendige tiltak for å beskytte konstruksjonen, og velge en betong med tilstrekkelig bestandighet og overdekning. I mulighetsanalysen vil vi komme med forslag til mulig bruk av sensorer til å overvåke kjemisk skade.

1.3 Biologisk nedbrytning

Biologisk nedbrytning av betongkonstruksjoner kan føre til sprekkdannelse, avskalling og at pH-verdien reduseres, noe som kan redusere styrken og levetiden til konstruksjonen (Wei et al., 2013, s. 2). På den ene siden kan mikrobisk vekst på betongoverflaten redusere levetiden til konstruksjonen (Wei et al., 2013, s. 2). På den andre siden kan makrobegroing bidra til å beskytte betongkonstruksjoner (Iwanami et al., 2002, s. 1).

Mikrobisk nedbrytning

Dersom konstruksjonen er i et miljø som er egnet for mikrobisk vekst, risikerer en biologisk nedbrytning av betongen «Microbe induced corrosion (MID)». Miljø som egner seg for mikrobisk vekst kan blant annet karakteriseres av lav pH-verdi, høy relativ fuktighet, mye karbondioksid, sulfat eller klorider. Offshore konstruksjoner kan dermed være utsatt for

mikrobisk vekst og mikrobisk nedbrytning (Wei et al., 2013, s. 2). Mikrobiske organismer som fester seg på betongoverflaten kan produsere organiske- og uorganiske syrer, som kan akselerere nedbrytningsprosessene i betongen.

Betong som ikke er erodert eller nedbrutt, vil i utgangspunktet være immun mot biologisk nedbrytning, ettersom betongen er svært alkalisk. Få mikroorganismer overlever i miljø med høy pH-verdi. Etter hvert som overflaten eroderes av f.eks. vann, vil overflaten bli ru og gjøre det mulig for sulfatreduserende- og sulfatoksiderende bakterier å formere seg på overflaten. Dette regnes oftest som en del av sulfatangrep beskrevet i tidligere i kapitlet.

Over tid vil pH-verdien reduseres, og når overflaten er blitt pH-nøytral vil være bli mulig for andre mikroorganismer å feste seg på overflaten. Når mikroorganismene fester seg på overflaten, danner de en biofilm som fører til biologisk nedbrytning av betongen. Biofilmen vil vanligvis bestå av alger, sopp, bakterier eller lav. Etter hvert som det dannes en biofilm på betongen, vil pH-en reduseres ytterligere. Dette vil igjen føre til bedre vekstvilkår for nye mikroorganismer. Dersom pH-verdien blir lavere enn 5, vil bakterier som produserer svovelsyre kunne formere seg. Dette kan føre til at pH-verdien synker ytterligere, og kan resultere i at overflaten av betongen blir sur og kan få en pH-verdi på rundt 1.

Selv om det ikke er synlige sprekker i betongen, kan mikrober trenge inn gjennom mikrosprekker og kapillærporer. Analyse av betongkonstruksjoner har funnet alger, sopp, bakterier og protozoer inne i betongen. Selv om det er lite eksperimentelt bevisgrunnlag, har det blitt funnet tegn på at mikroorganismer i porene på betongen kan øke porøsiteten. Dette kan føre til at andre nedbrytningsprosesser, som armeringskorrosjon og overflateslitasje akselereres (Wei et al., 2013, s. 3).

Makrobegroing

Etter hvert som det dannes en biofilm på betongoverflaten, kan dette danne grunnlag for større biologisk vekst, noe som kan danne et beskyttende lag. Det biologiske laget kan forsinke klorid- og oksygeninntrenging, og dermed redusere korrosjon (Iwanami et al., 2002, s. 1). Eksempler på organismer som kan beskytte konstruksjonen er rankeføttinger og østers (Yokota et al., 2013, s. 5).

Konklusjon biologisk nedbrytning

Selv om biologisk vekst kan føre til biologisk nedbrytning, kan biologisk vekst ofte være en beskyttende faktor som forhindrer andre former for nedbrytning. Det er viktig å vite hvilke typer biologisk vekst som kan forekomme på konstruksjonen, og hvordan disse samspiller med andre nedbrytningsprosesser. Dette for å kunne implementere eventuelle tiltak for å beskytte konstruksjonen.

2 Sensorteknologier

For å gjøre en mulighetsanalyse av sensorteknologier til overvåking av nedbrytningsprosesser i offshore betongkonstruksjoner, må det dannes en oversikt over de ulike sensorteknologiene. I denne delen av oppgaven vil vi gjennomgå fysiske sensorer, optiske sensorer, kjemiske- og biologiske sensorer.

2.1 Fysiske sensorer

Fysiske sensorer er apparat som kan måle fysiske egenskaper som trykk, forskyving og temperatur. Disse målingene vil være mye mer nøyaktig en menneskelige observasjoner, og kan bli omgjort til elektriske signal som kan tolkes av datamaskiner. Grunnleggende fysiske sensorer inkluderer resistiv, induserende, kapasitiv og piezoelektriske sensorer (Taylor & Schultz, 1996, kap.2).

Piezoelektriske sensorer

En piezoelektrisk sensor, er en transduser som blir brukt til å måle fysisk belastning, ved å omgjøre fysisk belastning til et elektrisk signal. Sensoren består av en krystall som får en potensial differanse (elektrisk spenning) mellom overflatene, når den blir deformert. Disse er egnet for små krefter og belastninger, og blir ofte brukt i pulsmålere og til andre medisinske formål (Taylor & Schultz, 1996, kap.2.1).

Resistive sensorer

Resistive sensorer omdanner fysisk forskyvning eller rotasjon, til en endring i motstand (resistivitet). Denne motstandsendingen blir så målt ved å sende et elektrisk signal gjennom sensoren. Resistive sensorer kan deles inn i potensiometre og belastningsmålere (Taylor & Schultz, 1996, kap.2.2).

Potensiometre

Potensiometre består av en forskyvbar port og en stasjoner port. Den forskyvbare porten kan beveges over en motstand, og dermed vil mengden motstand mellom den forskyvbare porten og den andre porten endres. Det finnes forskyvbare-, enkelrotasjons- og multirotasjons potensiometer. Forskyvbare potensiometer måler lineærforskyvning mellom 2mm og 500mm. Rotasjoner fra 10°, og opp til 250°, kan måles med enkeltrotasjons potensiometer, og vinkelendringer på over 250° kan måles med multirotasjons potensiometer (Taylor & Schultz, 1996, kap.2.2.1).

Belastningsmåler

Belastningsmålere måler fysisk belastning ved at en motstand deformeres under belastning, og dermed endres motstandsverdien. Dersom en ledning blir utsatt for elastisk deformasjon vil lengden og diameteren til ledningen endres etter hvert som belastningen økes, og dermed vil motstandsverdien til ledningen endres (Taylor & Schultz, 1996, kap.2.2.2).

Induserende sensorer

Induserende sensorer omdanner fysiske forskyvninger til endring i induktivitet i en spole. Induktansen i en spole kan endres ved å endre permeabiliteten til materialet i spolens indre, antall vindinger og/eller formfaktoren. På den ene siden vil ikke de dielektriske egenskapene til omgivelsene påvirke induserende sensorer. På den andre siden vil magnetiske felt utenfra kunne påvirke sensorene (Taylor & Schultz, 1996, kap.2.3).

Kapasitive sensorer

Kapasitive sensorer måler fysiske forskyvninger ved å omgjøre forskyvningene til endring i kapasitansen til en kondensator. Kapasitansen kan endres ved å endre arealet til platene i kondensatoren, avstanden mellom platene og/eller den relative dielektriske konstanten til isolatoren mellom platene. Det er lettest å endre avstanden mellom platene i kondensatoren, og det er som regel denne metoden som blir brukt i kapasitive sensorer (Taylor & Schultz, 1996, kap.2.4).

2.2 Optiske sensorer

Optiske sensorer blir brukt til å måle et optisk felt, og analysere bølgelengde, intensitet, fase, polarisering, spekter og bølgefront til lyset fra det optiske feltet (Santos & Farahi, 2014, s. 4). For å gjøre optiske målinger trenger man en lyskilde og fotodetektorer, samt andre optiske elementer for å lede lyset mellom dem (Haus, 2010, s. 2).

Lyskilder

Lyskilden i en optisk sensor er essensiell ettersom den produserer mediet som blir brukt til å gjennomføre målingene. Den viktigste egenskapen til en lyskilde er emisjonsspektrumet. Emisjonsspektrumet kan være bredt og inneholde mange bølgelengder, være smalt eller være monokromatisk (Haus, 2010, s. 8).

Termiske lyskilder

Termiske lyskilder eller glødelamper, frigjør fotoner som en følge av temperaturen til glødeelementet. Det elektromagnetiske spektrumet som produseres av en glødelampe vil være et kontinuerlig spektrum, der man kan beregne fordelingen av bølgelengder ved hjelp av Planks formel for Svartlegemestråling (Haus, 2010, s. 8). Bølgelengden til fotonene varierer med temperaturen til glødeelementet, og høyere temperaturer produserer kortere bølgelengder (Haus, 2010, s. 9). Den vanligste typen glødelampe består av en metalltråd beskyttet av en edelgass. Metalltråden varmes opp ved å føre elektrisk strøm gjennom den (Haus, 2010, s. 10).

Linjekilder

Gasser under lavt trykk frigjør kun spesifikke bølgelengder, i motsetning til glødelamper som frigjør kontinuerlige spektrum. Dette kommer av at elektronene til atomene i gassen, «hopper» mellom spesifikke energinivå, når atomene i gassen kolliderer. Det er da energiforskjellen mellom energinivåene til elektronene, som avgjør hvilke bølgelengder som produseres, og man vil få et diskret spekter (Haus, 2010, s. 12). Dersom trykket og/eller temperaturen til gassen økes, vil spekterlinjene bli breiere og man får et mer kontinuerlig spektrum (Haus, 2010, s. 13).

Lysdioder

Lysdioder produserer lys i kontaktområdet mellom n-type og p-type halvledere. N-type halvledere er tilsatt ekstra elektroner (doping), som gir halvlederen en negativ ladning. P-type

halvledere er tilsatt ekstra atomer som mangler elektroner (elektronhull), som gir halvlederen en positiv ladning. Det dannes en spenning i kontaktområdet mellom halvlederne som følge av en rekombinasjonsprosess, hvor overskuddselektronene fra n-typen fyller elektronhullene i p-typen. Denne prosessen frigjør fotoner, men vil i utgangspunktet stoppe opp når det oppnås en spenningsbalanse. Dersom en ytre spenning blir påført, vil rekombinasjonsprosessen fortsette ettersom flere elektron og elektronhull, blir ført til kontaktområdet mellom halvlederne. Lysdioder produserer et smalt spektrum som en følge av at elektroner bytter energinivå (Haus, 2010, s. 15).

Laser

Laser er en engelsk forkortelse som oversatt står for lysforsterkning ved stimulert strålingsutslipp. Denne stimuleringen er en kvantemekanisk prosess, hvor langvarige høyenergiske atomtilstander blir omgjort til lavenergiske atomtilstander som følge av stråling. I et vanlig material er de fleste atomer i lavenergiske tilstander, og enkelte atomer er i høyenergiske tilstander. I en laser er denne fordelingen reversert, og lys som går gjennom materialet vil føre til at det frigjøres elektromagnetisk stråling. Dermed vil lyset som passerer gjennom materialet bli forsterket. Lyset blir så sendt frem og tilbake mellom to speil, gjennom det laserende materialet, noe som gjør at lyset blir i fase og monokromatisk (Haus, 2010, s. 18).

Fotodetektorer

For å kunne bruke lys til å gjøre målinger må lyssignalet først omgjøres til et elektrisk signal. Dette krever at det blir produsert strøm eller spenning, når et material blir truffet av lys. Den vanligste omdanningsprosessen som de fleste fotodetektorer baserer seg på, er den fotoelektriske effekten (Haus, 2010, s. 27).

Fotonmultiplikatorer

Fotonmultiplikatorer bruker et fotoelektrisk material til å omgjøre lysstrålene til frie elektroner. Frigjørelsen av elektron er ikke avhengig av mengden fotoner som treffer materialet, men bølgelengden til lyset. Dersom lyset har for stor bølgelengde, vil det ikke frigjøres elektron, uavhengig av hvor mange foton som treffer det fotoelektriske materialet. Elektronene som frigjøres blir reflektert mellom dynoder, som frigjør flere elektroner ved hjelp av sekundæremisjon. Etter hvert som elektronstrømmen blir større, øker spenningen og ved

bruk av flere dynoder vil spenningen øke eksponentielt. På denne måten kan et enkelt foton bli omgjort til en stor elektrisk spenning (Haus, 2010, s. 27).

Fotodioder

Fotodioder er ikke avhengig av høy spenning eller spesielle rør på samme måte som fotonmultiplikatorer. De er mye enklere å bruke, men vil også føre med seg mer støy. Når fotoner treffer p-n-kontaktflaten i en fotodiode, skaper den elektronhull. Dermed oppstår det en spenning i fotodioden. Prosessen er det motsatte av hvordan en diode produserer lys (Haus, 2010, s. 30).

Bilde detektorer

Fotodetektorene beskrevet ovenfor gir en punktmåling. Dersom det er behov for å måle romlige komponenter, kan man bruke en detektoroppstilling. Det finnes endimensjonale detektoroppstillinger som kalles linjekamera. Et vanlig kamera består av todimensjonale detektoroppstillinger. En detektoroppstilling består av små diskret punktsensorer (piksler) som er stilt opp på rekke med en dødsone mellom seg. Mindre og tettere piksler gir større oppløsning, men slipper også inn mindre lys og gir økt støymengde (Haus, 2010, s. 33).

Optiske element

Det finnes en rekke optiske element som kan benyttes i optiske sensorer. Optiske element kan brukes til å samle, spre, omdirigere, reflektere, dele opp i spektrum, eller velge ut spesifikke bølgelengder fra lyset (Haus, 2010, s. 37).

Optiske material

De optiske egenskapene til et optisk material kan forklares ut ifra Formel 1, som er formelen for kompleks brytningsindeks:

$$\underline{n} = n - iK \quad (1)$$

I denne formelen er n brytningsindeksen, og iK er lyset som blir absorbert av materialet. Brytningsindeksen er avhengig av bølgelengde, noe som fører til at ulike bølgelengder bryter med ulik vinkel, og man får en spredning av lyset. Glass gir en såkalt normal spredning, hvor blått lys har høyere brytningsindeks enn rødt lys, og det blå lyset vil dermed få en større vinkelendring. Den komplekse delen av formelen er ekstinksjonskoeffisienten (K), som også

er avhengig av bølgelengde. Den forteller hvilke bølgelengder som blir absorbert av materialet. Glass vil vanligvis ikke kunne slippe gjennom ultrafiolett lys med bølgelengde mindre enn 320nm (Haus, 2010, s. 37).

Speil, prismer og linser

Lys kan lett bli omdirigert ved hjelp av speil. Ifølge den fysiske loven om refleksjon vil lysets reflekterte vinkel være like stor som lysets innfallsvinkel. I tillegg vil innfallsvinkelen, normalvektoren til overflaten og refleksjonsvinkelen, alltid ligge i samme plan. Speil er som oftest laget ved å ligge et reflekterende belegg på en glassoverflate, eller ved å polere en metalloverflate. Speil kan være flate for å bare endre retningen til lyset, men de kan også være krummet for å samle eller spre lyset mot et spesifikt punkt. Ettersom lyset vil endre vinkel når det passerer mellom material med ulik brytningsindeks, kan prismer også bli brukt til å omdirigere lys. Konkave eller konvekse linser kan også bli brukt til å omdirigere lys, men ettersom brytningsindeksen er avhengig av bølgelengde vil lys med ulik bølgelengde bli fokusert eller spredd ulikt (Haus, 2010, s. 39).

Spredende element

Prismer og gitter kan bli brukt til å spre bølgelengder fra hverandre. Ettersom brytningsindeksen er avhengig av bølgelengde, vil et prisme, som nevnt tidligere, spre bølgelengdene fra hverandre. Et optisk gitter fungerer ved hjelp av interferens, som oppstår mellom lysbølgene når lyset går gjennom to små hull i gitteret. Ettersom bølgelengden til lys varierer, vil interferensmønsteret mellom bølgene skape en spredning (Haus, 2010, s. 42).

Optiske filtre

Optiske filtre kan bli brukt dersom man trenger å redusere båndbredden til lyset, eller intensiteten til lyset uten å påvirke bølgelengden. Det finnes ulike fargeglassfilter som kan slippe gjennom alle lysbølgene med kortere eller lengre bølgelengde, enn en gitt verdi. Det er også mulig å lage filter som slipper igjennom en viss båndbredde. Fargeglassfilter har ikke en brå overgang mellom bølgelengdene som slippes og ikke slippes igjennom. For å oppnå en brå overgang må man bruke interferensfilter (Haus, 2010, s. 43).

Polariseringsfilter

Polariseringen til lyset forteller hvordan den elektromagnetiske bølgen er orientert. Den elektromagnetiske bølgen kan representeres som summen av den elektriske og magnetiske

bølgekomponenten til lyset. Lyset kan være polarisert slik at bølgene bare beveger seg i et plan, eller slik at bølgen beveger seg i en spiral. Lys kan polariseres ved reflektering, spredning, dikroisme eller dobbeltbrytning (Haus, 2010, s. 44).

Optiske fibre

Dersom man skal lede lys fra en lyskilde over lengre avstander, kan en benytte optiske fibre. Optiske fibre kan også benyttes til å belyse områder som er langt vekk fra en lyskilde. Noen av fordelene med optiske fibre er at de er små, lette og fleksible. I tillegg slipper de verken inn eller ut elektromagnetisk stråling, noe som beskytter mot forstyrrelser og lekkasjer (Haus, 2010, s. 46).

Modulasjon

Lys modulerer kan benyttes dersom man ikke kan bruke en kontinuerlig lyskilde. Lyset kan moduleres ved å variere mengden lys som skapes av lyskilden. Dersom det ikke er mulig eller ønskelig å variere lyskilden, kan lyset sendes igjennom en lys-kutter. En lys-kutter er en roterende skive med regelmessige hull som roteres. Lyset som passerer gjennom lys-kutteren vil da tidvis blokkeres helt, og tidvis slippe igjennom. Dermed vil man få en modulerer av lyset. Det er også mulig å modulere frekvensen til lyset fra en laser ved hjelp av dopplereffekten. Dersom man beveger en lyskilde, vil bølgelengden til lyset endre seg avhengig av farten til lyskilden. Ved å akselerere en laser kan man dermed få en jevn fordeling av bølgelengder innenfor en smal båndbredde (Haus, 2010, s. 49).

Eksempler på optiske sensorer og deres bruksområder

Ved å bruke ulike konfigurasjoner av elementene beskrevet over er det mulig å lage en rekke optiske sensorer, tilpasset til å måle en rekke fysiske egenskaper. Et eksempel fra naturen er menneskeøyet, som er et resultat av millioner av år med evolusjon. Øyet minner om et pinhole-kamera, hvor lys fra omgivelsene passerer gjennom pupillen og linsen. Da dannes det et opp ned bilde på netthinnen. På netthinnen sitter det tapper og staver som omdanner lyset til elektrokjemiske signal, som blir sendt gjennom synsnerven til hjernen (Haus, 2010, s. 58). Eksempler på menneskeskapte optiske sensorer er beskrevet under.

Brytere

En bryter kan produsere to signal: av eller på, som digitalt vil si 0 eller 1. Det er mulig å lage optiske brytere ved å ha en kombinasjon av en lyskilde og en fotodetektor. Lyskilden sender

ut lys, som enten går direkte mot en fotodetektor, eller blir reflektert mot en fotodetektor. En lysbarriere fungerer ved at dersom et objekt kommer mellom lyskilden og fotodetektoren, stopper signalet, og man får en overgang fra på til av. Eventuelt kan fotodetektoren være plassert slik at den vanligvis ikke blir truffet av lys fra lyskilden. Dersom et objekt kommer foran lyskilden vil den reflektere lyset, og noe av det reflekterte lyset vil treffe fotodetektoren, dermed går signalet fra av til på. Denne mekanismen blir brukt i blant annet røykvarslere (Haus, 2010, s. 63). I rensensorer benytter man seg av at den totale indre reflekteringen til glass, blir forstyrret dersom det ligger seg vann på overflaten til glasset. Dersom lyset blir reflektert med en vinkel inni glasset og det er vann på glasset, slipper noe av lyset ut fra systemet og vil ikke nå fotodetektoren (Haus, 2010, s. 65).

Fysiske dimensjoner

Dersom man bruker optiske sensorer til å måle fysiske dimensjoner, trenger man ikke fysisk kontakt mellom måleren og det som måles. Dette fører til at man utelukker feilkilder fra blant annet glidning. Det er mulig å bruke optiske sensorer til å måle avstander. Dersom man måler tiden det tar for lyset fra en lyskilde å bli reflektert og returnert fra et objekt, kan man beregne avstanden mellom lyskilden og objektet. Dersom man bygger videre på dette, kan man måle farten til et objekt ved å måle avstanden på ulike tidspunkt, og beregne endringen i avstand over tid. Det er også mulig å måle rotasjon, strekk og temperatur ved hjelp av optiske sensorer.

Måling av stoff og konsentrasjon

Det er mulig å måle konsentrasjonen av ulike grunnstoff eller molekyl, ved å se på hvordan de absorberer lys, roterer polariseringen, reflekterer eller sprer lyset (Haus, 2010, s. 93).

Spektrometri

Spektrometri fungerer ved å sende lys gjennom en veske, gass eller et fast stoff, og deretter analysere lyset som slippes ut på andre siden. Intensiteten til lyset er avhengig av hvor mye av stoffet lyset passerer igjennom, og hvilke bølgelengder som blir absorbert er avhengig av absorpsjonskoeffisienten til materialet. Alle stoff har et unikt absorpsjonsspekter, og alle sammensatte stoff vil ha et unikt sammensatt absorpsjonsspekter, som kan brukes som et fingeravtrykk for å identifisere stoffene. Atom gir tydelige linjespekter, med tydelig separerte linjer. Molekyl har flere breie vibrasjonslinjer med lik avstand. Dersom lyskilden er polykromatisk og inneholder en jevn fordeling av bølgelengder, vil det være mulig å bestemme

hvilke stoff som er til stede. Dette gjøres ved å se på hvilke bølgelengder som blir absorbert. Det vil også være mulig å finne mengden eller konsentrasjonen av de ulike stoffene, ved å se hvor mye av de aktuelle bølgelengdene som blir absorbert (Haus, 2010, s. 94).

Polarimeter

Polarimeter fungerer ved å sende linjert polarisert lys gjennom et stoff, og så måle hvor mye polariseringen har blitt rotert av stoffet. Vi sier at stoff som roterer polarisering er optisk aktiv. Dersom man plasserer to linjerepolariseringsfilter med 90 grader vinkelforskjell, vil ikke det polariserte lyset fra det første filteret slippe gjennom det andre filteret. Dersom et stoff som roterer polariseringen plasseres mellom filtrene, vil det roterte lyset kunne slippe igjennom det andre filteret. Dermed kan man identifisere hvilke stoff det er, og hvor mye av stoffet som er til stede, ved å måle hvor mye lys som slipper igjennom det andre polariseringsfilteret. Ulike stoff roterer polariseringen med ulik mengde og retning, og dersom effekten av flere stoff nuller hverandre ut vil det ikke være mulig å måle optisk aktivitet. Polarimeter er dermed best egnet til å måle mengden stoff i løsninger hvor det ikke er mer enn ett optisk aktivt stoff til stede (Haus, 2010, s. 98).

Elipsometri

Elipsometri kan brukes til å bestemme tykkelsen, brytningsindeksen og homogeniteten til et tynt lag med stoff. Elipsometri fungerer ved at linjert polarisert lys som reflekteres av et dielektrisk material, blir omgjort til elliptisk polarisert lys. Det elliptiske polariserte lyset passerer gjennom et roterende linjert polariseringsfilter, og det måles hvor mye lys som slippes igjennom ved ulike rotasjonsvinkler. Dermed kan man få informasjon om stoffet man analyserer (Haus, 2010, s. 102).

Refraktometre

Refraktometre kan brukes til å finne konsentrasjonen av stoff løst i vann, ettersom brytningsindeksen til løsningen er avhengig av konsentrasjonen. Dersom vann plasseres oppå en glassoverflate vil det ha en kritisk vinkel på 49° , det vil si at lys med innfallsvinkel på mindre enn 49° ikke vil slippe gjennom. Dersom man løser opp et stoff i vannet vil denne kritiske vinkelen endres, ettersom brytningsindeksen til løsningen er ulik brytningsindeksen til rent vann. Dersom lyset fra lyskilden har en jevn fordeling av innfallsvinkler, vil man kunne måle

mengden av stoffet som er løst i vannet, ved å måle hvor mye lys som slipper igjennom løsningen i forhold til rent vann (Haus, 2010, s. 104).

Partikkel densitet og mengde

Det er også mulig å måle mengden av stoff ved å måle hvor mye av lyset som blir reflektert av stoffet på samme måte som brannvarslerne. Dersom bølgelengden til lyset tilpasses stoffet er det mulig å måle konsentrasjonen av andre partikler enn røykpartikler (Haus, 2010, s. 107).

Overflate topografi

I en rekke sammenhenger vil det være nyttig å undersøke topografien til en overflate. Topografien vil ikke bare fortelle noe om utseende til objektet, men også en rekke andre fysiske og kjemiske egenskaper. Topografien til et objekt kan måles ved å reflektere lys av overflaten, og måle tiden det tar før lyset kommer tilbake. Dette på samme måte som avstandsmålingene som er nevnt tidligere (Haus, 2010, s. 114).

Konfokal kromatisk sensor

En konfokal kromatisk sensor baserer seg på at dersom man fokuserer lys fra en lyskilde mot et punkt, vil mengden lys som reflekteres være avhengig av hvor langt unna objektet er. Det reflekterte lyset vil nå et maksimum når objektet som måles befinner seg i brennpunktet. Dersom man endrer avstanden mellom og objektet på en rekke punkt, og måler når det blir reflektert mest lys kan en danne et topografisk kart av overflaten til objektet. Dersom man bruker en lyskilde bestående av flere bølgelengder vil brennpunktet til de ulike bølgelengdene være forskjellige. Dermed kan man ved hjelp av et spektrometer bestemme avstanden til objektet uten å bevege instrumentet (Haus, 2010, s. 115).

Konoskopisk holografi

I konoskopisk holografi blir enfaset lys fra en laser reflektert fra en overflate. Det reflekterte lyset passerer gjennom et sirkulært polariseringsfilter, og så igjennom en enaksielt dobbeltbrytende krystall. Der blir lyset brutt i to deler som igjen passerer gjennom et sirkulært polariseringsfilter, og ettersom de to delene har tatt forskjellige baner gjennom krystallen vil de være utav fase, og danne et sirkulært interferensmønster. Dersom man måler radiusen til ringene i interferensmønsteret, kan man beregne avstanden til objektet laserstrålen ble reflektert fra, og man kan bruke denne informasjonen til å måle topografien til objektet (Haus, 2010, s. 117).

Multibølgelengde interferometri

Om man bruker interferens til å måle avstand, vil man bare få et entydig svar på avstandsforskjeller mindre enn halve bølgelengden. Lyset som sendes mot objektet vil interferere med det reflekterte lyset avhengig av bølgens høyde når den treffer objektet. Dersom man bruker to bølgelengder, vil kombinasjonen av interferensen til de to bølgelengdene, gi et entydig svar over en større avstand. De to bølgelengdene vil kombinert tilsvare en syntetisk bølgelengde Λ , gitt ved Formel 2:

$$\Lambda = \frac{\lambda_1 \times \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (2)$$

Dersom forskjellen på de to bølgelengdene er liten, vil den resulterende syntetiske bølgelengden bli stor, og man kan måle med entydig sikkerhet over en større rekkevidde.

Hvitt-lys interferometri

Hvitt-lys interferometri bruker hvitt lys som splittes i to delstråler til å måle avstander. De to delstrålene blir sendt mot reflektorer, og dersom avstanden til reflektorene er ulik vil lyset interferere når det samles igjen. Dermed vil lyset bli svakere enn dersom reflektorene har lik avstand. På denne måten er det mulig å måle topografien til et objekt dersom man erstatter den ene reflektoren med objektet man vil måle (Haus, 2010, s. 119).

Nærfelt optisk mikroskopi

I nærfelt optisk mikroskopi er størrelsen på objektene som kan undersøkes begrenset av bølgelengden til lyset som blir brukt. Vanligvis ville det ikke vert mulig å gjøre observasjoner på objekter som er mindre enn bølgelengden til lyset man bruker. Det er imidlertid mulig å sende lyset gjennom et optisk stetoskop for å øke oppløsningen. Dette vil gjøre det mulig å observere objekt som er mindre enn bølgelengden. Et optisk stetoskop kan lede lys gjennom en åpning som er betydelig mye mindre enn bølgelengden til lyset. Optiske stetoskop kan lages ved å strekke ut en optisk fiber, og dekke den i et belegg av aluminium. Dersom fiberen ender i en mindre diameter enn bølgelengden til lyset, har man laget en subbølgelengde blenderåpning. Lyset som kommer ut av stetoskopet er i flukt med åpningen, og når det treffer materialet som skal undersøkes, vil det ha en tilsvarende diameter som åpningen til

stetoskopet. På denne måten får man konsentrert lyset, og man kan undersøke objekter som er mindre enn diffraksjonsgrensen til lysdetektoren (Haus, 2010, s. 122).

Konturmåling ved strukturert lysteknikk

En enkel måte å måle konturen til et objekt på er å reflektere lys med kjent struktur av overflaten til objektet. Dersom man bruker lys fra en laserstråle, vil forvrengningen til lyset være avhengig av innfallsvinkelen og konturen til overflaten. Dersom man skal finne konturen i to dimensjoner gjør man samme skanningen vinkelrett på den første (Haus, 2010, s. 123).

Deformasjon og vibrasjonsanalyse

Det er mulig å måle vibrasjoner ved å analysere frekvensen til bevegelsesendring i et objekt. Dersom man skal måle endimensjonal vibrasjon hvor retningen er kjent, er det tilstrekkelig med en optisk sensor. Dersom man derimot skal måle tredimensjonal vibrasjon trenger man tre endimensjonale sensorer, som gjør det mulig å gjøre vektorberegninger for å finne vibrasjonsmengde og retning (Haus, 2010, s. 127).

Laservibrometre

Laservibrometre måler vibrasjon, ved å måle endringen i farten parallelt med laserstrålen. For å måle fartsendringen benyttes dopplereffekten. Dopplereffekten beskriver effekten farten v til et objekt, har på frekvensen f_0 til det reflekterte lyset. Dersom $v \ll c$ vil det være mulig å beregne frekvensen f' ved Formel 3:

$$f' = f_0 \sqrt{\frac{c \pm v}{c \mp v}} \quad (3)$$

Det øverste leddet i brøken beskriver tilstanden når objektet beveger seg mot lyskilden, og det nederste leddet beskriver når objektet beveger seg vekk. På grunnlag av denne sammenhengen vil det være mulig å bruke interferometri til å måle frekvensen et objekt vibrerer med (Haus, 2010, s. 127).

Flekkmønsterinterferometri

Dersom man reflekterer en laserstråle av et objekt med ujevn topografi, vil det reflekterte laserlyset danne et flekkmønster. Intensiteten til hvert enkelt punkt i flekkmønsteret vil variere avhengig av faseforskyvningen og interferensen mellom lysstrålene som treffer

punktet. Dette vil være tydelig dersom ujevnhetene i topografien er i samme størrelsesorden som bølgelengden til laserstrålen. Dersom man måler interferensen mellom flekkmønsteret med og uten belastning, kan man danne et kart over hvilke deler av objektet som deformeres og hvilke deler som står i ro. Dette gjøres ved å skanne objektet i ro, og lagre informasjonen og digitalt beregne interferensen med målinger fra når objektet vibrerer (Haus, 2010, s. 129). Holografisk interferometri gjør det mulig å måle vibrasjonsdeformasjoner uten å måle et referansemønster når objektet er i ro (Haus, 2010, s. 132).

2.3 Kjemiske og biologiske sensorer

Kjemiske og biologiske sensorer blir definert som måleapparater som benytter kjemiske eller biologiske reaksjoner, for å oppdage og kvantifisere en spesifikk analytt eller en hendelse. Forskjellen mellom kjemiske og biologiske sensorer er hva deres reaktive overflate reagerer på. Kjemiske sensorer reagerer på spesifikke polymere membraner, mens biologiske sensorer reagerer på biomolekyler som enzymer, antistoff og reseptorer (Taylor & Schultz, 1996, kap1.1.1). Elektrokjemiske sensorer blir delt inn i potensiometriske, amperometriske og konduktometriske sensorer.

Elektrokjemiske sensorer

Elektrokjemiske sensorer som direkte måler elektriske verdier av analytter, er rimelige apparater som er kommersielt tilgjengelig. De har ofte et enkelt design som kan brukes i forskjellige krevende miljøer. Felles for disse sensorene er at det må være en lukket elektrisk krets, enten ved vekselstrøm eller likestrøm. Det kreves to elektroder for å forme en lukket krets, en arbeidselektrode og en returelektrode (Fraden, 1994, s. 652). Begge elektrodene blir senket ned i analytten med elektrolytter, og dette blir da til en elektrokjemisk celle. Arbeidselektroden sin oppgave er å ta opp den kjemiske reaksjonen. Det elektriske signalet som måles her blir sammenlignet med en referanseelektrode. Returelektroden blir ofte benyttet som referanseelektrode. Siden det elektriske signalet blir sammenlignet opp mot denne verdien, må den ha en konstant verdi. Returelektroden må heller ikke forstyrre den kjemiske løysingen i analytten, samtidig som analytten ikke må forstyrre returelektroden. Referanseelektroden blir ofte omringet av en broløsning, for å forsterke den elektriske kontakten. Dette fører til at potensialet i referanseelektroden blir summen av to potensialer. Det første potensialet kommer fra grensesnittet mellom elektroden og broløsningen, og det andre kommer fra grensesnittet mellom broløsningen og analytten. På bakgrunn av dette må

man kalibrere sensoren med en standard analytisk løsning, slik at referansepotensialet har samme verdi som standardløsningen (Fraden, 1994, s. 653-654).

Potensiometriske sensorer

Potensiometriske sensorer benytter ioneselektive elektroder til å skaffe de analytiske signalene. Ioneselektive elektroder tar opp spesifikke ioner i en løsning, og konverterer aktiviteten i ionene til et potensial målt i volt. Det blir benyttet ulike membraner til å ta opp ionene. Utfordringen med membranene er å finne det rette materialet, som binder de ønskede ionene. De ioneselektive elektrodene blir delt inn etter hvilke typer materiale de består av. Eksempelvis glassmembran, væskemembran og fast tilstandsmembran (Taylor & Schultz, 1996, kap.5.3.1).

Disse sensorene bruker effekten av konsentrasjonen ved likevekten til redoksreaksjonene som forekommer mellom elektroder og elektroner, i en elektrokjemisk celle. For en halvcellereaksjon gjelder Formel 4:



Ox beskriver oksidanten, Z_{e-} beskriver hvor mange elektroner som er involvert i redoksreaksjonen, og Red er det reduserte produktet. Denne reaksjonen inntreffer ved en av elektrodene. Her kan man benytte Nernsts ligning som beskrives ved Formel 5:

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_0^*}{C_R^*} \quad (5)$$

Der C_0^* og C_R^* er konsentrasjonen av redoks- og oksidasjonsreaksjonen, n er antall elektroner, F er Faradays konstant, T er temperatur, R er gasskonstanten og E_0 er elektrodepotensialet sin standard verdi. Dette uttrykket gir det elektriske potensialet som oppstår mellom elektrodene (E). I potensiometriske sensorer vil det være to halvcellereaksjoner, men bare den ene halvcellereaksjonen tar opp de ønskede ionene. Den andre skal være reversibel, ikke forstyrre prosessen og være kjent (Fraden, 1994, s. 656).

Amperometriske sensorer

Amperometriske sensorer er basert på gjenkjenningen av elektroaktive arter. Transduksjonen i en amperometrisk sensor fungerer ved å holde spenningen av elektrodene konstant, og måle strømmen som en funksjon av tid. Den påsatte spenningen setter i gang elektronoverføringen, og den gjør at artene gir fra seg eller tar opp elektroner. Basert på dette kan man måle elektronoverføringen (Taylor & Schultz, 1996, kap.5.2.1). Riktig valg av arbeidselektrode er viktig for en god amperometrisk sensor. Materialet i arbeidselektroden må ha høy sensitivitet, selektivitet og stabilitet (Taylor & Schultz, 1996, kap.5.2.2).

Clark-oksygen-sensor er et eksempel på en amperometrisk sensor. Denne blir brukt til å måle oksygenmolekyl i en elektrolytisk væske. Prinsippet bak en Clark-oksygen-sensor kan brukes til å måle andre molekyl som for eksempel glukose (Fraden, 1994, s. 659).

Konduktometriske sensorer

En konduktometrisk sensor måler forandringen i konduktivitet av elektrolytten, i en elektrokjemisk celle. Det blir ofte benyttet en Wheatstone-bro som består av flere motstandsarmer. Her blir sensoren en del av broen som en motstand i kretsen. Måling av elektrolytter kan bli forstyrret av polariseringen, som oppstår i elektrodene ved en gitt spenning. En faradisk prosess kan oppstå, noe som vil endre konduktiviteten til elektrodeoverflaten, og dermed forstyrre målingene. Denne type sensor må dermed ha en spenning som ikke forårsaker en slik prosess (Fraden, 1994, s. 657).

3 Mulighetsanalyse

I denne delen av oppgaven vil vi komme med forslag til mulige metoder for å overvåke nedbrytningsprosessene i betongkonstruksjoner offshore. Det er vanlig å bruke termometer i større betongkonstruksjoner, for å overvåke temperaturen under de tidlige stadiene av hydreringsprosessen (Shin et al., 2004). Men dersom det er mulig å bruke sensorer til å overvåke betongen gjennom hele levetiden, vil dette kunne føre til sikrere konstruksjoner og lavere inspeksjonsutgifter. Ved å se på hvilke nedbrytningsprosesser som er mest aktuell, samt hvilke aspekt av nedbrytningsprosessene som i teorien kan måles av eksisterende sensorteknologier, er det en rekke alternativ som bør undersøkes nærmere.

3.1 Optiske sensorer

Optiske sensorer kan gi svært nøyaktige og detaljerte målinger av hvilke stoff og mengden stoff i en løsning. Dermed vil det i teorien være mulig å overvåke enkelte nedbrytningsprosesser i betongkonstruksjoner, ved hjelp av optiske sensorer. Dersom man klarer å gjøre en spektroskopisk analyse av porevannet, vil man kunne måle inntrengningen av ulike stoffer i betongen. Sulfatangrep forekommer dersom ulike sulfatstoffer trenger inn i betongen. Dersom mengden sulfat i betongen blir målt ved hjelp av et spektrometer vil man kunne vurdere risikoen for kritisk nedbrytning. I tillegg vil det i teorien være mulig å måle kloridinntrengning i betongen og dermed vurdere risiko for korrosjon.

Det vil være utfordrende å utføre en spektroskopisk analyse av porevannet i betongen for å overvåke nedbrytning, ettersom porevannet er inne i selve betongen. Dersom man støper et lite hulrom inn i betongen vil dette kunne fylles med porevann. Dersom det er mulig å støpe optiske kabler inn i betongen, vil det i teorien være mulig å ha lyskilden og spektrometeret på utsiden av betongen. Dette vil kunne gi en god oversikt over risikoen for nedbrytning av betongen. I tillegg vil det i teorien være mulig å måle resultantstoffene fra nedbrytningsprosessene dersom disse er vannløselige. Da vil man kunne måle hvor mye nedbrytning som har forekommet.

Spektroskopisk overvåking av porevannet i betongkonstruksjoner offshore er et alternativ som bør undersøkes nærmere. Dersom det er mulig å gjennomføre i praksis, og på en kosteffektiv måte, vil spektroskopi i teorien kunne gi god informasjon om det er risiko for nedbrytning.

3.2 Kjemiske sensorer

Kjemiske sensorer kan i teorien måle hvor mye av ulike stoff som er i porevannet i betongkonstruksjoner offshore. Armeringskorrosjon er den vanligste nedbrytningsårsaken i offshore konstruksjoner, og er forårsaket av kloridinntrengning. Det eksisterer kjemiske sensorer som kan måle kloridinnholdet i en vannløsning. Utfordringen vil igjen være å gjøre målinger inne i betongen. Det kan tenkes to alternativer, enten må sensoren plasseres inne i betongen, eller så må porevannet hentes ut fra betongen.

Dersom man klarer å lage en kjemisk sensor som ikke må kalibreres regelmessig, og som har tilstrekkelig levetid, vil det være mulig å støpe sensoren inn i betongen. Dersom man har flere

sensorer i ulike dybder, vil man i teorien kunne følge kloridinntrengingsprogresjonen over tid, og på denne måten vite når klorid når armeringen. Eventuelt dersom man plasserer sensoren inntil armeringen vil den kunne gi utslag før kloridinnholdet i porevannet når et kritisk nivå.

ISE sensoren vi benyttet i vår eksperimentelle måling, har begrenset levetid, og elektroden må byttes i løpet av et års tid. I tillegg måtte den kalibreres daglig for å gi nøyaktige målinger. Dersom en skal bruke en lignende sensor offshore, vil et alternativ kunne være å hente ut porevannet fra betongen. Dersom man støper et hulrom i betongen som etter hvert fylles med vann fra porene, kan det være mulig å pumpe ut vannet fra betongen og opp til en målestasjon utenfor betongen. Utenfor betongen kan det lages et apparat som flytter sensoren mellom kjente kloridløsninger for kalibrering, og over i prøven av porevannet i betongen. Dersom dette er mulig å automatisere, ville det i teorien gi et mulig alternativ for fjernovervåking av nedbrytningsprosesser i betongkonstruksjoner offshore, ved bruk av ISE sensor.

Kapittel 2 Måling av kloridinntrengning i betong ved ion-selektiv elektrode

Kapittel 2 av denne bacheloroppgaven er eksperimentell, og bygger på funnene fra kapittel 1. Kloridinntrengning og armeringskorrosjon er mest avgjørende for levetiden til offshore betongkonstruksjoner. Derfor har vi utviklet et eksperiment for å forsøke å måle kloridinntrengning i betong.

1 Innledning

Målet med forsøket er å undersøke om det er mulig å måle kloridinntrengning i betong, ved bruk av en Go Direct Klorid ione-selektiv elektrode (ISE) sensor. Dersom dette er mulig, vil sensoren i teorien kunne brukes til å overvåke den vanligste formen for nedbrytning av offshore betongkonstruksjoner, nemlig armeringskorrosjon forårsaket av kloridinntrengning. Dette vil da kunne redusere kostnadene for overvåkingen av offshore konstruksjoner, og det vil kunne redusere behovet for å reise ut til konstruksjonen for å undersøke nedbrytningen.

Basert på tidligere forskning som er gjort på feltet, vil en av utfordringene være at de vanligste kloridsensorene også reagerer på hydroksidioner som er vanlig i betong.

Hypotesen for eksperimentet er at målingene vil få et grunnutslag på grunn av andre ioner som reagerer med sensoren, men at man vil se en stigning etter hvert som klorid trenger inn i betongen.

Dermed ble det utarbeidet et eksperiment for å simulere ulike kloridinnholdige miljø, og overvåke kloridinntrengningen i betongkuber plassert i disse miljøene.

Tidligere forskning på feltet er blitt gjort ved å blant annet undersøke kloridinntrengning ved bruk av sølvnitrat (He et al., 2012). Det er også blitt gjort forsøk ved bruk av klorid-ione-sensor på syntetisk porevann (porevann laget i laboratoriet) (Abbas et al., 2018).

2 Materialer og Metode

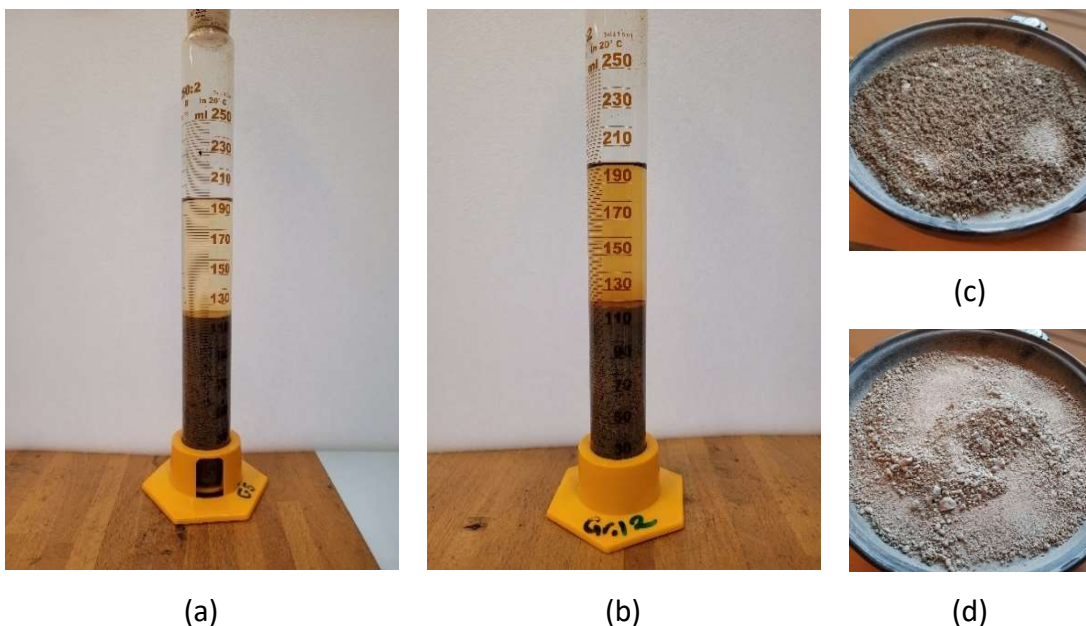
Først ble det gjort analyse av tilslagetts egenskaper. Så ble det støpt M60 og M90 betong, og egenskapene til betongen ble analysert. Deretter ble saltløsningene blandet, og saltinntrengningen i betongkubene ble målt over en periode på 53 dager. Til slutt ble det utført en destruktiv sølvnitratspraytest.

2.1 Betong kuber til forsøk

Eksperimentet ble utført på betongkuber laget av CEM II/B-M 42.5R sement produsert av Standard Sement, blandet produsert sand (0 - 8 mm) og knust granitt tilslag (8 – 24 mm) fra Arna NCC. Vi hadde to ulike forsendelser av tilslaget fra samme produsent tilgjengelig i laboratoriet. Det ble utført tilslagsanalyse, analyse av den ferske betongen, trykkfasthetstest og CT-skann.

Tilslagsanalyse

Humus og filler ble kontrollert ved å fylle 125ml 3% natronlut i et 225ml glassrør. Deretter ble det helt 75 ml sand oppi røret. Røret ble så endevendt i 30 sekund, og satt til side for observasjon. Filler og humus ble så lest av etter en uke. Som man kan se i Figur 1 (b), har den nye sanden høyere humusinnhold enn den gamle sanden som man kan se i Figur 1 (a). Basert på humusinnholdet ble dermed den gamle sanden i Figur 1 (a) valgt til videre bruk.



Figur 1 Sandens egenskaper: a) Hummus og filler gammel sand; b) Hummus og filler ny sand; c) Fuktig sand; d) Tørket sand

Fukttinnholdet til sanden ble målt ved at det ble veid opp ca. 1 kg sand som ble tørket og veid på nytt. I Figur 1 (c) kan man se den fuktige sanden, og i Figur 1 (d) kan man se den tørkede sanden. Basert på vektforskjellen til den fuktige og tørkede sanden, ble fukttinnholdet til den gamle sanden beregnet til 1,7% som vist i Tabell 1. Som vist i Tabell 2 ble filler andelen til den gamle sanden beregnet til 6,7%, basert på den kombinerte hummus og filler testen i Figur 1 (a).

Tabell 1 Fuktinhold fingrus

	Gammel	Ny
Vekt fuktig, [g]	1050,0	1000,6
Vekt tørket, [g]	1031,7	949,9
Fuktinnhold, [%]	1,7	5,1

Tabell 2 Filler gammel sand til bruk (fingrus)

	Gammel	Ny
Volum uten filler, [ml]	112,0	110,0
Volum med filler, [ml]	120,0	119,0
Volum filler, [ml]	8,0	9,0
Filler andel, [%]	6,7	7,6

Sandens densitet ble målt ved å veie opp 125g sand, og fylle et 225ml glassrør 1/3 med vann. Volumet ble lest av, og så ble sanden helt oppi røret. Røret ble rotert på skrå slik at luft mellom sandkornene ble frigjort. Til slutt ble volumet av vannet og sanden lest av som vist i Figur 2, og densiteten til den gamle fingrusen ble beregnet til 2501 kg/m³ som vist i Tabell 3.

Steinens densitet ble målt på samme måte som sanden, men det ble brukt 250g stein, og et 500ml glassrør. Densiteten til den gamle steinen ble beregnet til 2692 kg/m³ som vist i Tabell 3.

Tabell 3 Massetetthet tilslagsanalyse stein og fingrus

	Gammel		Ny	
	Stein	Fingrus	Stein	Fingrus
Vekt, [g]	301	150	300	150
Volum vann, [ml]	168	90	500	250
Volum vann og tilslag, [ml]	280	150	615	312
Volum tilslag, [ml]	112	60	115	62
Massetetthet tilslag, [kg/m ³]	2692	2501	2610	2420

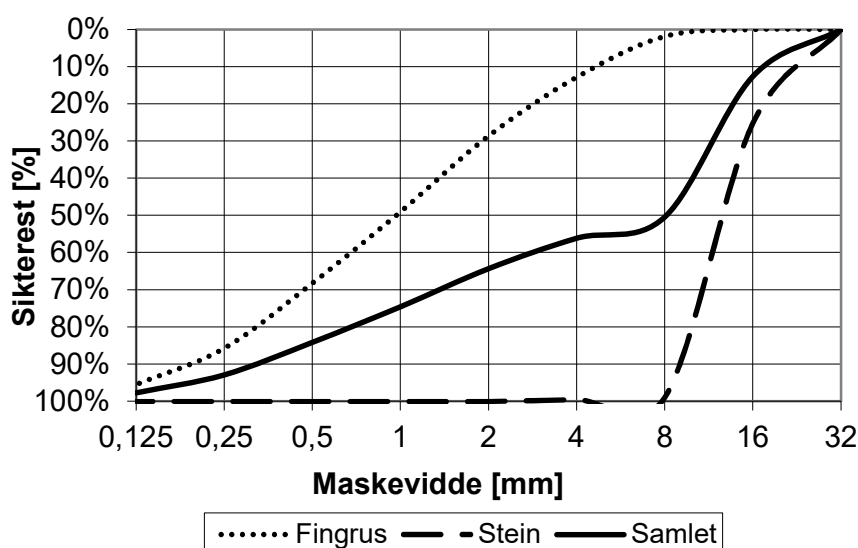


Figur 2 Massetetthet fingrus

Finhetsmodulen til sanden/fingrusen i Figur 3 (a), ble funnet ved å ta den tørkede sanden over i en sil, hvor den ble ristet av maskinen i Figur 3 (b), til den var sortert i de ulike kornstørrelsene. De ulike kornstørrelsene ble så veid, der den største kornstørrelsen ble veid først og så ble de mindre kornstørrelsene veid sammen med de forrige for å finne den kumulative vekten som vist i Tabell 4. Finhetsmodulen til steinen i Figur 3 (a), ble funnet ved å veie opp ca. 1 kg stein, og sikte og veie steinen på samme måte som sanden. Fordelingen av kornstørrelsene til sanden er vist i Tabell 4, og den samlede fordelingen til sanden og steinen er vist i Tabell 4 og Figur 3 (a).

Tabell 4 Kornfordeling fingrus, stein og samlet

Sikt, [mm]	Sikterester				Samlet %
	Fingrus		Stein		
	[g]	[%]	[g]	[%]	
32	-	-	-	-	-
16	-	-	251,8	25 %	13 %
8	19,1	2 %	989,8	99 %	50 %
4	132,1	13 %	996,0	100 %	56 %
2	295,0	29 %	1001,1	100 %	64 %
1	505,7	49 %	1001,1	100 %	75 %
0,5	703,7	68 %	1001,1	100 %	84 %
0,25	884,2	86 %	1001,1	100 %	93 %
0,125	985,1	95 %	1001,1	100 %	98 %
Bunn	1028,7	100 %	1001,1	100 %	100 %
Ved start	1031,7	-	1000,8	-	-



(a)



(b)

Figur 3 Sikteanalyse tilslag: a) Finhetsmodul graf; b) Siktemaskin

Proposjonering og den ferske betongens egenskaper

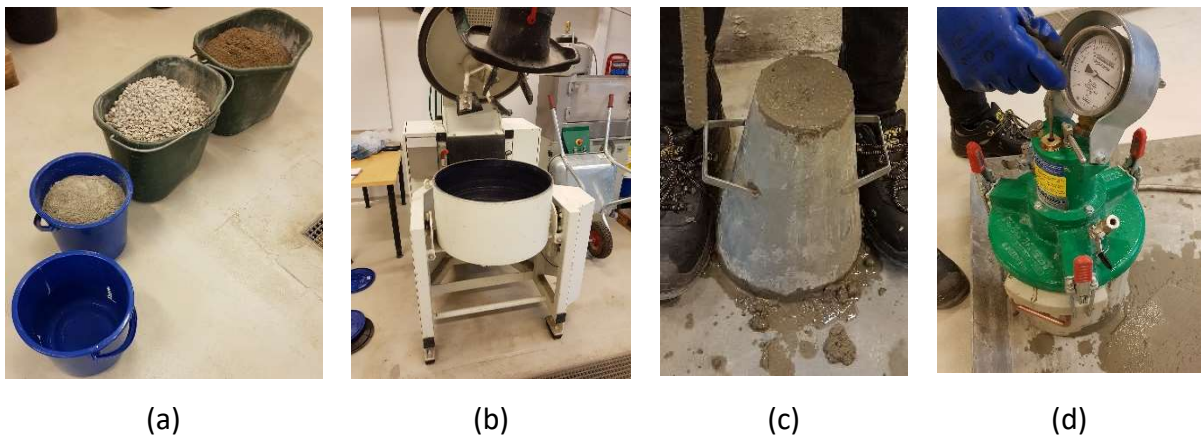
Resultatene fra tilslagsanalysen ble brukt til å beregne to betongresepter. M60 betong med $w/c = 0.6$, og M90 betong med $w/c = 0.9$, der w og c er henholdsvis vekten til vann og sement. Før den endelige M90 betongen ble laget, ble det gjort en prøvemiks M90 (se vedlegg), for å forsikre om at betongen ikke ville være for flytende eller svak til å støpe. Andel matriks var 29.8% for M60, og 28.3% for M90. Betongreseptene er lagt ved som vedlegg.

Egenskapene til den ferske betongen ble fastslått i henhold til (EN-12350-1, 2009), del 2 (synkmål), del 6 (densitet) og del 7 (luftinnhold), innen omtrent 10 min etter at vannet ble tilsatt. En oppsummering av betongens egenskaper er gitt i Tabell 6.

Komponentene ble veid opp i bøtter og gjort klar til blanding som vist i Figur 4 (a). De tørre komponentene ble helt oppi en betongblander vist i Figur 4 (b), og blandet sammen. Deretter ble vannet helt oppi og blandet inn. Til slutt ble den blandede betongen helt ut på et brett.

Betongens konsistens/synkmål ble målt ved å lagvis fylle en stålkjegle som vist i Figur 4 (c), med betong i tre lag. Hvert lag ble gjennomstukket 25 ganger med en stålstang. Kjeglen ble så løftet forsiktig rett opp, og ble plassert ved siden av betongen. Synkmålet ble målt som avstanden fra toppen av kjeglen til betongens høyeste punkt.

Luftinnholdet av betongen ble målt ved å bruke en lufttrykkmåler vist i Figur 4 (d). Lufttrykkmåleren ble fylt med betong lagvis i tre lag. Hvert lag ble gjennomstukket 25 ganger med en stålstang. Lufttrykkmåleren ble så veid før lokket ble satt på. Det ble fylt vann i ventiler, som ble lukket igjen før luftinnholdet ble målt.



Figur 4 Betongblanding og analyse av fersk betong: a) Komponenter veid opp i bøtter; b) Betongblander; c) Slumptest; d) Måling av uftinnhold

Støpning

Betongkubene skulle ha et hulrom som ISE sensoren kunne senkes ned i for å gjøre kloridmålinger. Derfor ble det sagt 134 mm lange rør med 32 mm diameter. Rørene ble pusset for at endene ikke skulle være skarpe. Gummihanskene ble klipt til og deretter tapet på den ene enden av rørene som vist i Figur 5 (a). Deretter ble det markert hvor dypt røret skulle senkes ned i betongen.

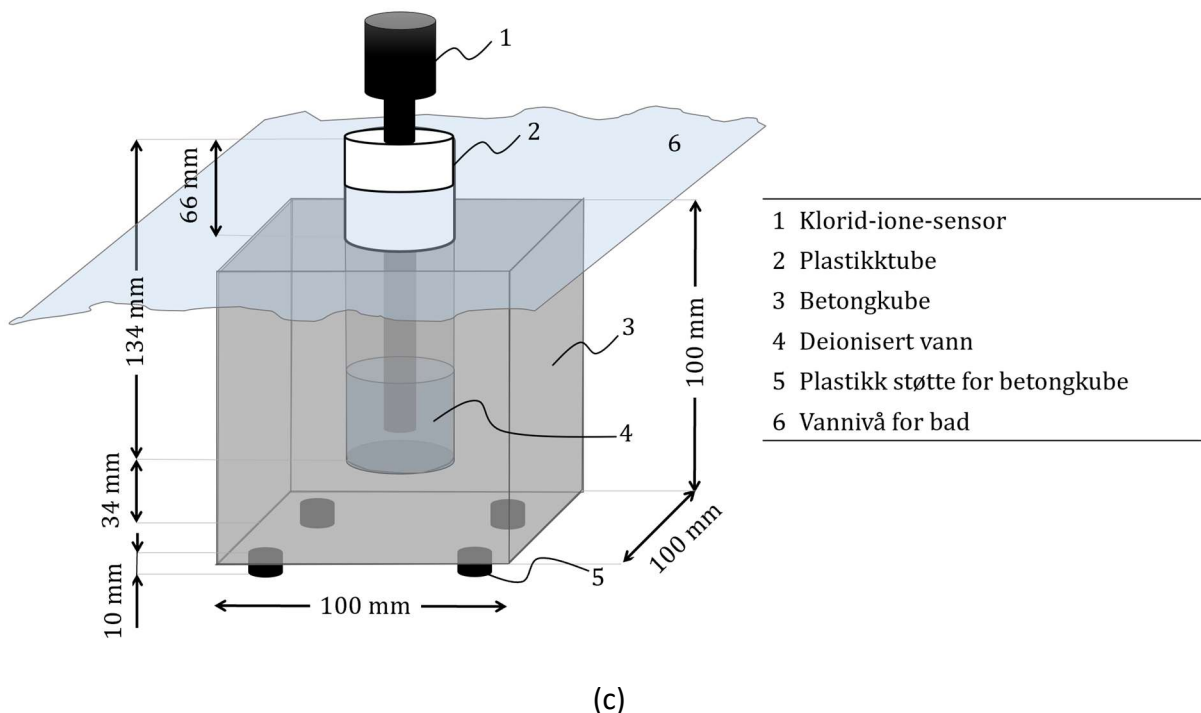
Betongen ble støpt i 100mm kubiske former. Formene ble smurt inn med olje. Formene ble fylt halvveis med betong, og betongen ble gjennomstukket med en metallstang. Røret ble plassert til oppmålt dybde, og det ble fylt betong rundt røret som ble gjennomstukket med metallstangen. Til slutt ble det kontrollert at det ikke var blitt hull i gummihanskene, og eventuelle ødelagte rør ble byttet ut. Små vekter ble plassert oppå rørene slikt at de ikke skulle flyte opp under herding som vist i Figur 5 (b). Dagen etter ble betongklossene tatt ut av formene, gummihanskene ble skrapet ut av røret, og klossene ble markert og plassert i vannbad til herding. Kubenes dimensjoner er modellert og vist i Figur 5 (c).



(a)



(b)



(c)

Figur 5 Støpning av kuber: a) Rør til kloridmåling; b) Betongkuber som herder; c) Modell av betongkuber med mål

Betongens trykkfasthet ble målt med den hydrauliske trykkapasitetsmåleren vist i Figur 6, etter 7 og 28 dager. Betongen ble klassifisert som B15 og B30 i henhold til (206:2013+NA:2014, 2014). Forventet trykkapasitet ble beregnet basert på w/c tallet og er vist i Tabell 5, sammen med den målte trykkapasiteten og tettheten til M60 og M90. Betongkubene som skulle brukes i eksperimentet ble herdet i vannbad ved 20°C i 11 og 12 dager, for henholdsvis M60 og M90, før eksperimentet startet.



Figur 6 Hydraulisk presse

Tabell 5 Forventet trykkapasitet, målt trykkapasitet og målt tetthet

Kube	7 dager		28 dager	
	Målt verdi Trykkapasitet, [Mpa]	Målt verdi Tetthet, [kg/m ³]	Målt verdi Trykkapasitet, [Mpa]	Målt verdi Tetthet, [kg/m ³]
M60				
nr.1	28,3	2389,2	39,7	2347,2
nr.2	27,0	2392,8	40,1	2345,5
nr.3	28,7	2394,0	40,5	2369,5
Gjennomsnitt	28,0	2392,0	40,1	2354,1
Forventet verdi	33,1	-	45,3	-
M90				
nr.1	15,0	2341,3	20,8	2374,5
nr.2	16,9	2358,1	21,2	2362,0
nr.3	15,9	2339,6	20,4	2363,0
Gjennomsnitt	15,9	2346,4	20,8	2366,5
Forventet verdi	12,5	-	20,8	-

Tabell 6 Oversikt over betongens egenskaper

	M60	M90
Tetthet/Densitet, [kg/m ³]	2555,3	2503,1
luftinnhold, [%]	1,2	2,5
synkmål, [mm]	150,0	140,0
Arna 0-8 mm, [vol.%]	35,1	43,0
Arna 8-24 mm, [vol.%]	35,1	28,7
28 dager trykkapasitet, [Mpa]	40,1	20,8

2.2 Bad med saltløsninger

Før vi lagde saltbadene ble vanninnholdet i saltet (bundet vann) undersøkt, slikt at proporsjoneringen skulle bli riktig. Bundet vann i saltet ble målt tre ganger, ved å først lage

saltløsninger beregnet til 0,1% (1000ppm), basert på antagelsen at hele vekten til saltet var NaCl. Deretter ble den faktiske saltkonsentrasjonen målt, og bundet vann ble beregnet til 30.3% som vist i Tabell 7.

Tabell 7 Måling og beregning av bundet vann i salt

Test	nr.1	nr.2	nr.3	Gjennomsnitt
Vann, [ml]	15000,0	20000,0	15000	-
Densitet salt, [kg/m ³]	2170,0	2170,0	2170,0	-
Vekt salt, [g]	15,0	20,0	15,0	-
Volum salt, [ml]	6,9	9,2	6,9	-
Totalt volum, [ml]	15006,9	20009,2	15006,9	-
Målt saltinnhold, [ppm]	703,0	702,9	685,0	-
NaCl, [g]	10,5	14,1	10,3	-
Bundet vann, [%]	29,7	29,7	31,5	30,3

Plastboksene ble fylt med salt og vann basert på beregningene i Tabell 8, og satt til side i et par dager for at saltet skulle løses opp. For at saltet skulle løses opp fortest mulig, ble det rørt om med en stålstav.

Tabell 8 Beregning av salt og vann til saltbad

	0 %	1,75 %	3,50 %	5,25 %	7,00 %	Totalt
Ønsket Volum, [ml]	13000,0	13000,0	13000,0	13000,0	13000,0	-
Ønsket Konsentrasjon, [ppm]	0,0	17500,0	35000,0	52500,0	70000,0	-
NaCl, [g]	0,0	227,5	455,0	682,5	910,0	-
Salt tilsettes, [g]	0,0	326,3	652,5	978,8	1305,1	3262,7
Volum salt, [ml]	0,0	150,4	300,7	451,1	601,4	-
Vann tilsettes, [ml]	13000,0	12849,6	12699,3	12548,9	12398,6	63496,5

2.3 Oppsett for måling av kloridinntrengning

Oppsettet med betongkubene i vannbadene er vist i modellen i Figur 5 (c), og ved bilde i Figur 7. Når saltet var løst opp, ble betongkubene plassert i plastboksene på støtter slik at de var hevet ca. 10 mm, slik at kubene skulle bli eksponert for saltløsningen fra alle sider. Deretter ble tubene ble fylt med deionisert vann til samme nivå som vannet i plastboksene. Det ble brukt 3 betongkuber per saltbad for å forsikre at målingene skulle bli reproducerbare. Plastboksene hadde lokk, og ble satt i et romtemperert rom, skjermet for direkte sollys for å redusere fordamping. Vannivået i plastboksene ble markert, og observert i løpet av eksperimentet. Reduksjonen i vannivå var neglisjerbar med tanke på formålet til eksperimentet.

Sensor til måling

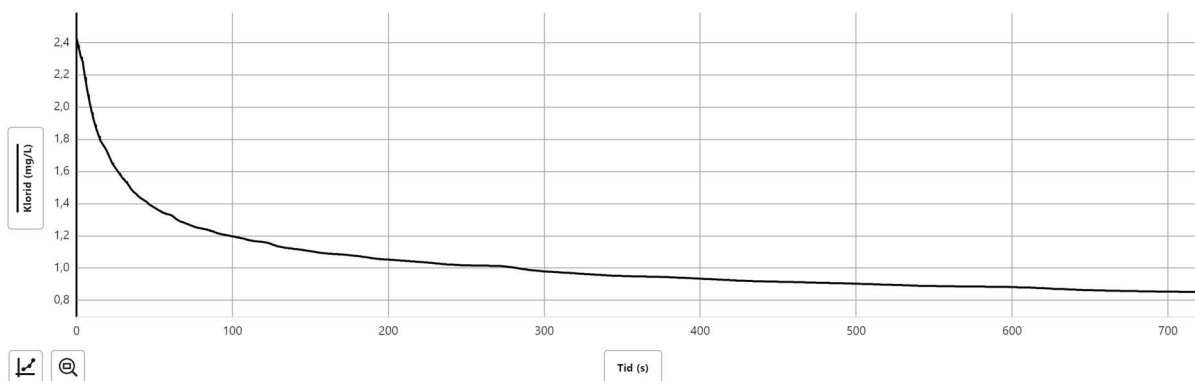
Før måling av saltinnhold ble ISE sensoren kalibrert ved å måle kjente løsninger på 1000ppm og 10ppm i en halv time hver, i henhold til produsentens instruksjoner. Saltinnholdet i betongklossene ble målt ved å plassere sensoren slik at tuppen var senket mer enn 2.8cm ned i løsningen, men uten at den berørte bunnen slik som vist i Figur 7. Målingene ble utført over en periode på 720 sekund, og det ble gjort 2 målinger per sekund.



Figur 7 Måling med klorid-sensor

Mellom hver måling ble sensoren skyllet godt i deionisert vann og tørket.

På grafen i Figur 8, kan man se en måling av kloridioner inne i en enkelt betong kube, hvor x-aksen er sekund, og y-aksen er klorid ppm (mg/liter). Som man kan se på grafen, er målingen unøyaktig i begynnelsen, men etter rundt 600 sekund er målingen blitt ganske stabil. Dette dannet grunnlaget for å ta målinger over 720 sekund, og bruke de siste 120 sekundene som den gjeldende målingen. Dermed ville målinger av alle betongkubene av en betongbestandighet være mulig å utføre i løpet av ca. 3,5 timer.



Figur 8 Måling dag 48; M90-3,5%-nr.3

Det ble laget matlabscript «csv_reader2.m» (se vedlegg) for å lese målingsdata fra cvs-filer. Gjennomsnittet og standardavviket til de to siste minuttene av målingene ble beregnet. Resultatene fra beregningene ble plottet med errorbar for å gi en oversikt over målingene over tid. Gjennomsnittet av de tre kubene ble også regnet ut. Basert på gjennomsnittet per

saltløsning, ble det utført lineær regresjon for å få et estimat på stigningstallet. Ettersom enkelte av målingene måtte gjøres to ganger som følge av at forbindelsen til sensoren ble brutt, ble det laget et matlabscript «csv_editor.m» (se vedlegg) som kunne slette målingene som var feil.

Destruktiv test ved sølvnitrat-spray

For å bekrefte kloridinntrengningen, og finne inntrengningsdybden ble det utført en destruktiv test med sølvnitratspray på slutten av eksperimentet. For å dele kubene uten å skylle vekk saltet som hadde trengt inn i betongen, splittet vi betongkubene i to ved å hamre med meisel rundt hele kubene, til den delte seg i to. Bruddene ble ikke helt jevne, men med tanke på formålet om å finne en antydning på inntrengningsdybden, var bruddene tilstrekkelig jevne.

Når kubene var splittet, ble det sprayet sølvnitrat på kubene, og de ble lagt til side på nummererte ark for å tørke. Når sølvnitratet reagerte med betongen, ble det dannet en brunlig farge som vist i Figur 9 (b). På de stedene der det var salt til stede, ble det hvitt som vist i Figur 9 (a). Det ble det tatt to bilder av hver kube (et bilde av hver halvdel). Bildene ble så beskåret slik at de ble kvadratiske, og skalert slik at alle bildene fikk lik bredde og høyde. Deretter ble dybden av det hvite feltet målt fra venstre, høyre og bunnen på alle bildene.



Figur 9 Sølvnitratspraytest eksempel: a) M60-3,5%-nr.1 høyre halvdel; b) M60-0%-nr.1 høyre halvdel

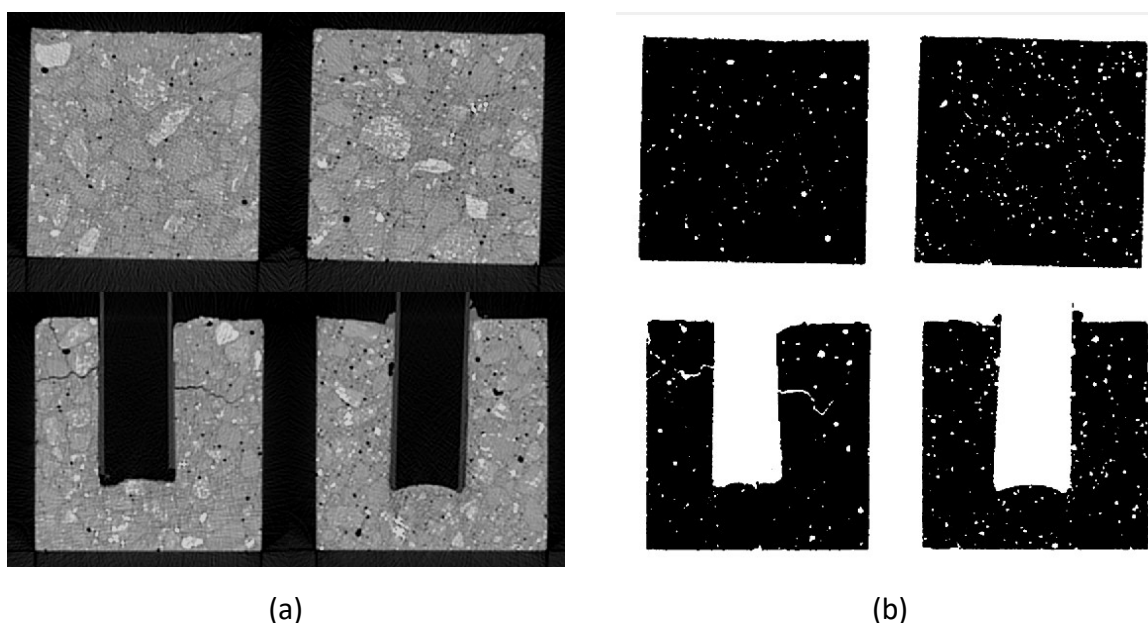
2.4 Analyse av luftinnhold og porestruktur ved CT-skann

Porestørrelsen til betong varierer mellom mm- og nm- skala. For å få et innblikk i porøsiteten ble det støpt M60 og M90 betongkuber, både med og uten tube. Disse kubene ble ikke brukt videre i eksperimentet, og ble bare brukt til CT-skann. Oppløsningen var på 0,6mm og porene som var større enn 0,6mm kunne dermed bli analysert. Det ble laget et matlabscript som justerte kontrasten til CT-bildene, slik at luftboblene ble helt hvit, og betongen ble helt svart. Deretter ble den redigerte dataen tolket som en punktsky, som ble brukt til å lage 3D modell av luftboblene. Dataene ble også brukt til å regne ut luftinnholdet i betongen.

CT-skann

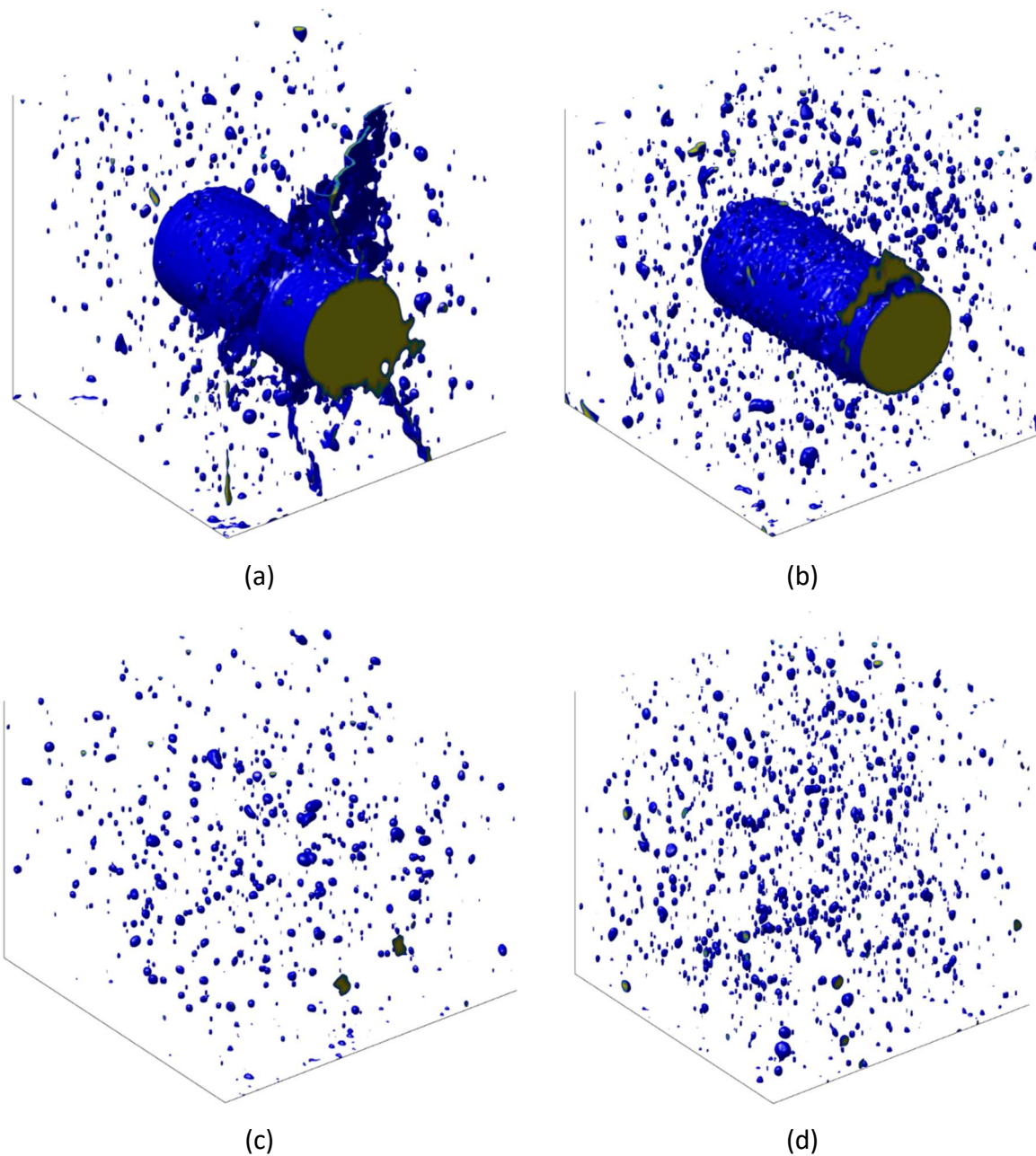
CT-skann ble utført på Institutt for helse og funksjon ved HVL, på radiografavdelingen, av Mona Vestbøstad og Synnøve Nymark Aasen.

Ett eksempel fra de originale CT-bildene er vist i Figur 10 (a). Det er mulig å vise en video av alle CT-bildene ved å bruke kommandoen «vis_original()» i matlabscriptet «CT.m» (se vedlegg). Et eksempel fra de redigerte CT-bildene er vist i Figur 10 (b), og det er mulig å se en video av alle de redigerte CT-bildene ved å bruke kommandoen «vis_skarpere_bilder()» i matlabscriptet «CT.m». I Figur 10 (b) kan man se at luftboblene og sprekkene er hvit, og betongen er svart. I matrisen hvor dataene er lagret, er luftboblene 1 og betongen 0. Ettersom matrisene er tredimensjonale kan matlab tolke de som en punktsky og representere det som en 3D-modell av luftboblene.



Figur 10 Eksempler CT-skann: a) Original; b) Redigert

I Figur 11 (a) kan man se 3D-modellen av luftboblene i M60 kuben med tube, og det er tydelig at det har blitt dannet sprekker. Dette ettersom det ble forsøkt å fjerne tuben før betongen var tilstrekkelig herdet. I Figur 11 (b) kan man se 3D-modellen av luftboblene i M90 kuben med tube. I Figur 11 (c) kan man se en 3D-modell av luftboblene i M60 betongkuben uten tube, og i Figur 11 (d) kan man se M90. Det er tydelig at det er større luftinnhold i M90 betongen som forventet. Luftinnholdet i CT-scannene ble beregnet til 1,2% i M60, og 2,7% i M90. Dette stemmer godt overens med testen av fersk betong. I tillegg ble gjennomsnittsradiusen til luftboblene beregnet til 0,4mm i M60 og 0,6mm i M90.

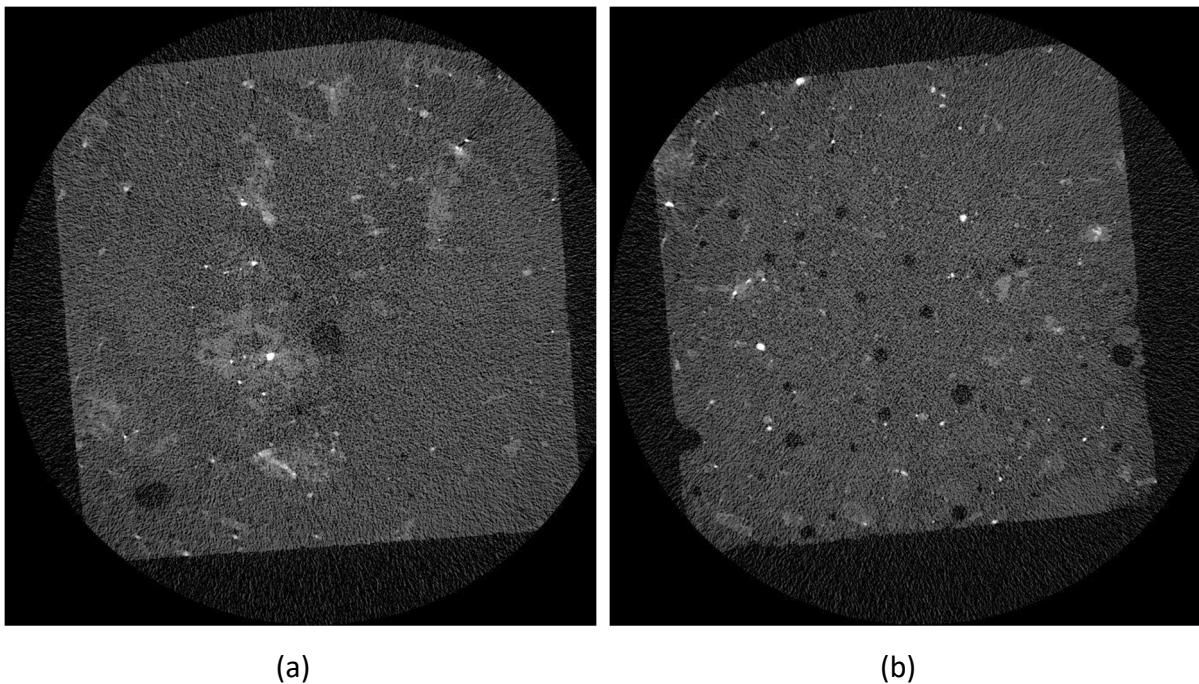


Figur 11 3D-Modeller av luftbobler: a) M60 med tube; b) M90 med tube; c) M60 uten tube; d) M90 uten tube

Mikro CT-skann

For å få høyere oppløsning, og undersøke den mindre porestrukturen, ble det utført Mikro-CT. Micro-CT, Skyscan 1172, Institutt for klinisk odontologi ved UiB. Ying Xue, senioringeniør ved Institutt for klinisk odontologi ved UiB utførte skanningene.

Først ble M60 og M90 betongkubene, slipt ned til en størrelse på $20 \times 20 \times 40 \text{ mm}$ slik at de fikk plass i skanneren. Parameterne for scannene ble valgt i henhold til litteratur på feltet (Bernardes et al., 2015). Oppløsningen av mikro CT var $1 \text{ piksel} = 13.3 \mu\text{m}$. Bildene ble derimot ikke skarpe nok til at det samme matlabskriptet kunne tolke bildene og lage 3D-modeller. Som man kan se i Figur 12 er det hvit støy utenfor kubene, og svart støy inne i kubene. Med et mer avansert skript ville det vært mulig å undersøke naboeene til pikslene, og ha en størrelsesbegrensning for å tolke et område som luft eller betong. Dermed valgte vi å analysere bildene manuelt. Da fikk vi et innblikk i den mindre porestrukturen i betongprøvene, og ytterligere analysert porøsiteten til M90 og M60 betongen. Alle bildene fra mikro CT-skann er lagt ved som vedlegg. Ved å se på Figur 12 (a) for M60, og sammenligne med Figur 12 (b) for M90, er det tydelig at M60 har færre hulrom, og at M90 har flere hulrom og høyere porøsitet. Når lokale skanninger ble valgt fra prøven, ble større tilslag unngått manuelt for å gi et innblikk i betongens porøsitet.



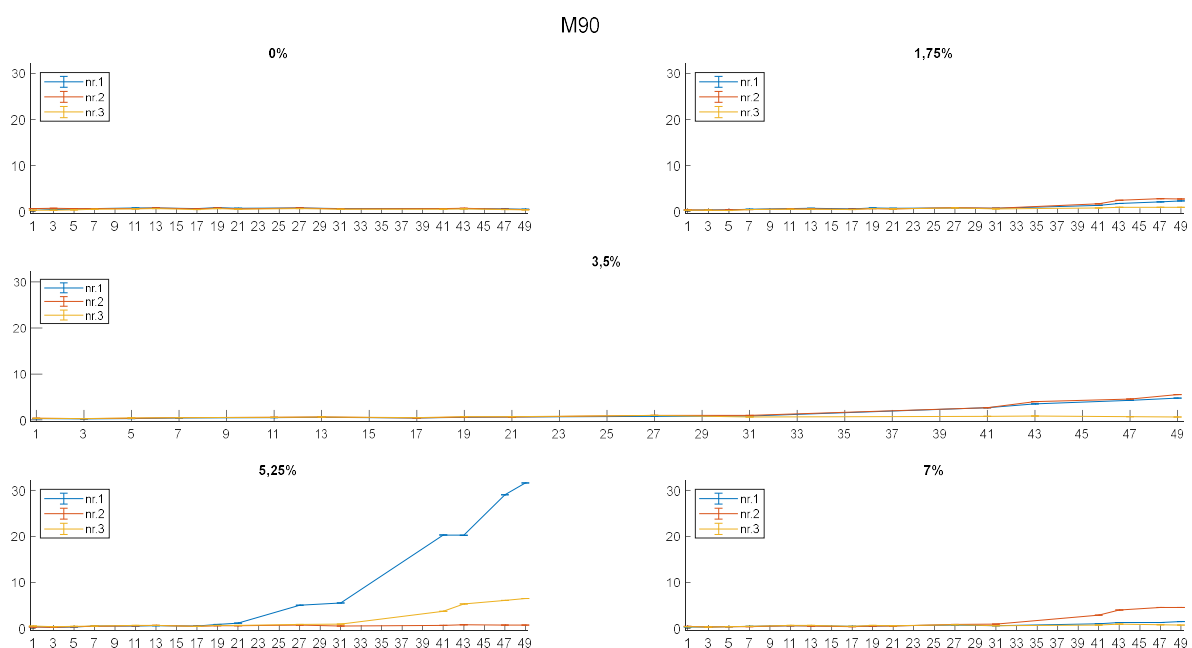
Figur 12 Mikro CT-bilder: a) M60; b) M90

3 Resultater

Resultatene er delt inn i tre deler. Første del viser kloridmålingene i M90 betongkubene, målt ved Go Direct Klorid ione-selektiv elektrode (ISE) sensor. Del to presenterer tilsvarende kloridmålinger i M60 betongkubene. Til slutt i del 3, vises resultatene fra den destruktive sølvnitrat testen. I alle grafene av kloridmålinger viser y –aksen mg/L (ppm) kloridioner, og x –aksen viser tiden betongkubene har ligget i saltbadene, målt i dager. Basert på at kloridinnholdet må overskride 0,2% av sementvekten for at korrosjon skal forekomme, får vi en nedre grense på $411ppm$ og $576ppm$, for henholdsvis M90 og M60 betongen vi har brukt (Sánchez & Sagüés, 2014, s. 1).

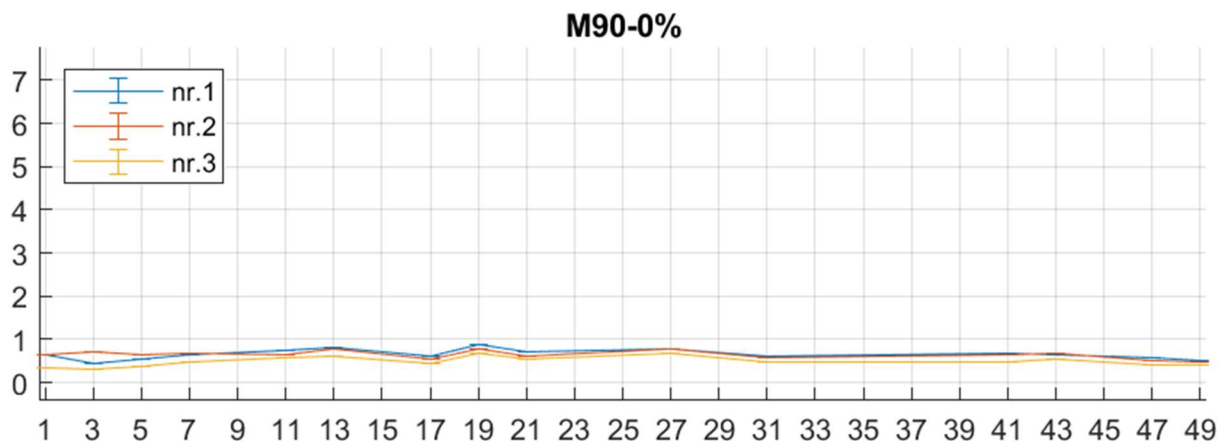
3.1 Kloridmålinger i M90 betongkuber

M90 betongkubene ble målt over en periode på 49 dager. Som vist i Figur 13 begynte kube M90-5,25%-nr.1, å stige etter 17-19 dager. Dette var tidligere enn alle de andre M90 kubene, og kloridmålingene i kube M90-5,25%-nr.1 nådde et betydelig høyere nivå enn resten av M90 kubene. Dermed vil M90-5,25%-nr.1 utelates fra videre grafer hvor den ikke direkte blir henvist til, slik at det blir lettere å lese av verdiene til de andre kubene.



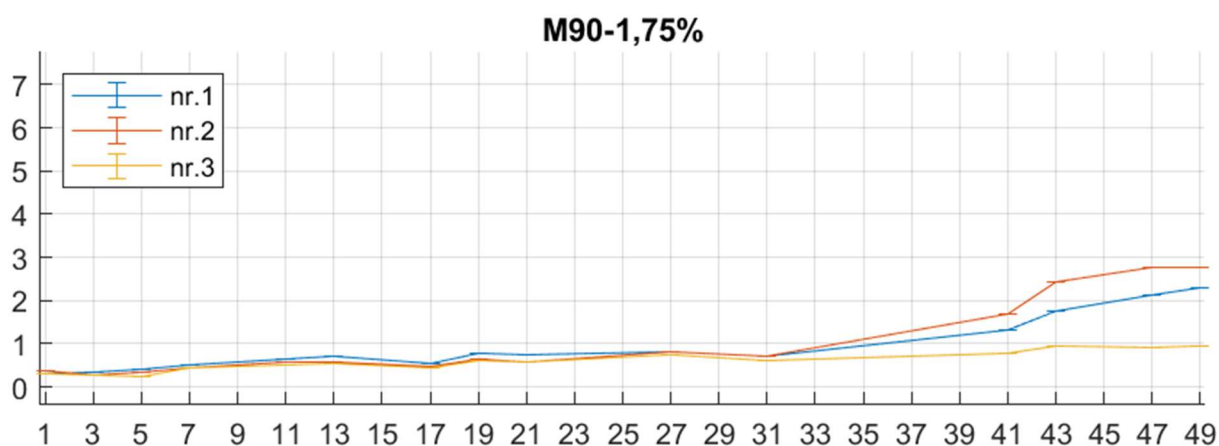
Figur 13 Kloridmåling M90-alle saltbad og kuber (skalert til høyeste verdi blant M90)

I Figur 14 kan man se at M90-kubene i 0% saltbad *ikke* viser en stigende trend i løpet av 49 dager. De varierer litt, men holder seg rundt/under $1ppm$.



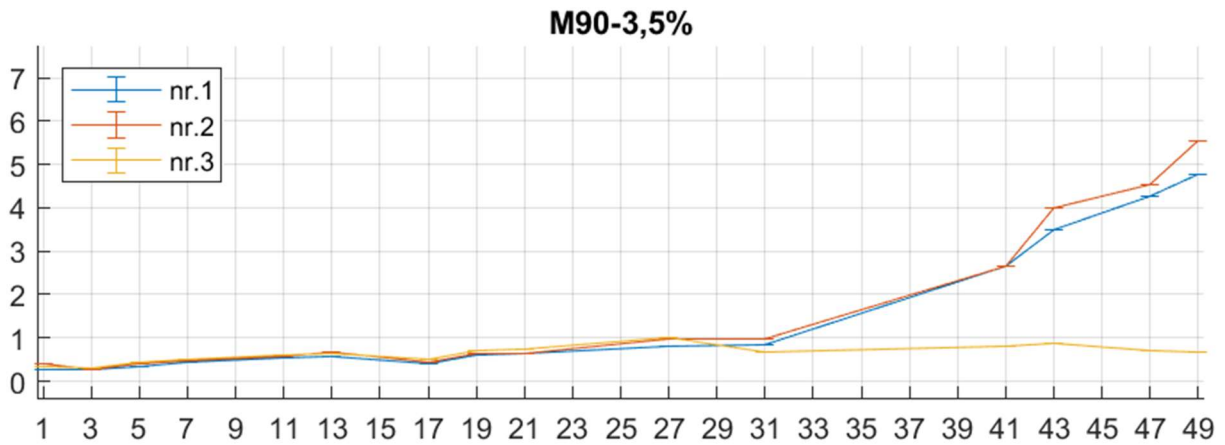
Figur 14 Kloridmålinger M90 i 0% saltbad

Blant M90 kubene i 1,75% saltbad, begynte kube nr.1 og nr.2 å stige etter å ha vært i saltbadet mellom 31 og 41 dager, og steg til mellom 2 og 3ppm etter 49 dager (se Figur 15). Kube nr.3 derimot, steg ikke over 1ppm i løpet av de 49 dagene (se Figur 15).



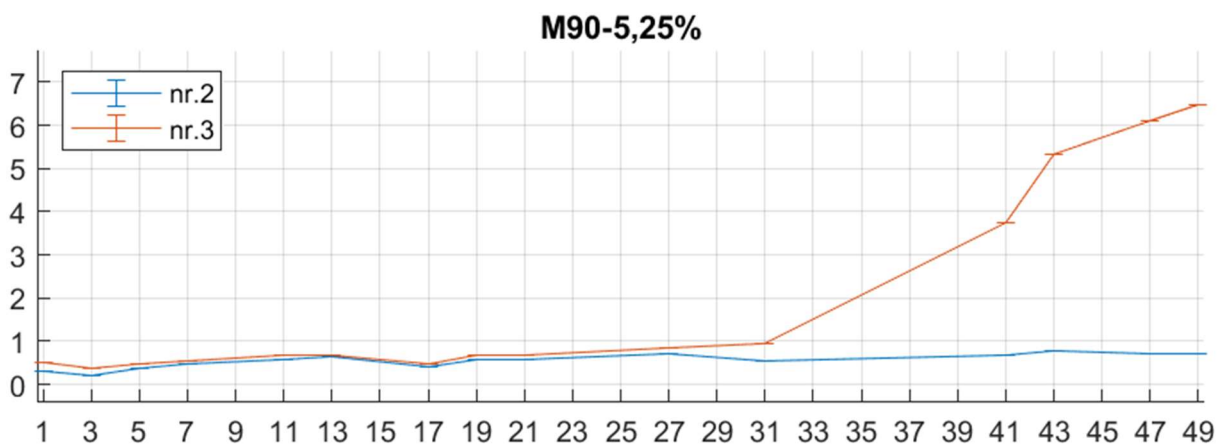
Figur 15 Kloridmålinger M90 i 1,75% saltbad

Blant M90 kubene i 3,5% saltbad, begynte kloridinnholdet i kube nr.1 og nr.2 å stige etter å ha tilbrakt mellom 31 og 41 dager i saltbadet, og steg til ca. 5ppm etter 49 dager som (se Figur 16). Kube nr.3 steg ikke over 1ppm i løpet av de 49 dagene som vist i Figur 16.



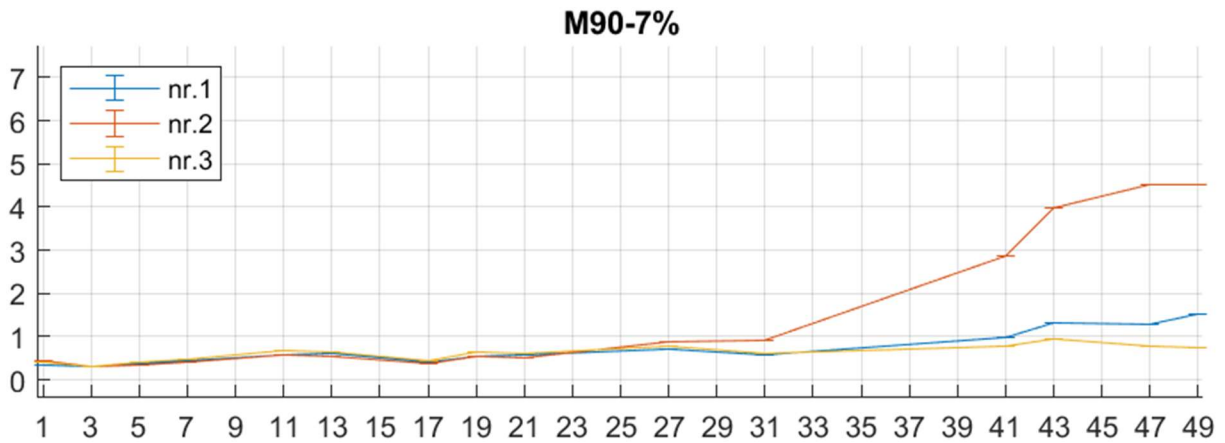
Figur 16 Kloridmålinger M90 i 3,5% saltbad

Kube M90-5,25%-nr.2, begynte å stige i samme intervallet mellom 31 og 41 dager, og steig til ca. 6.5ppm etter 49 dager (se Figur 17). Kube nr.3 i M90-5,25% saltbad, steg ikke over 1ppm i løpet av de 49 dagene (se Figur 17).



Figur 17 Kloridmålinger M90 i 5,25% saltbad

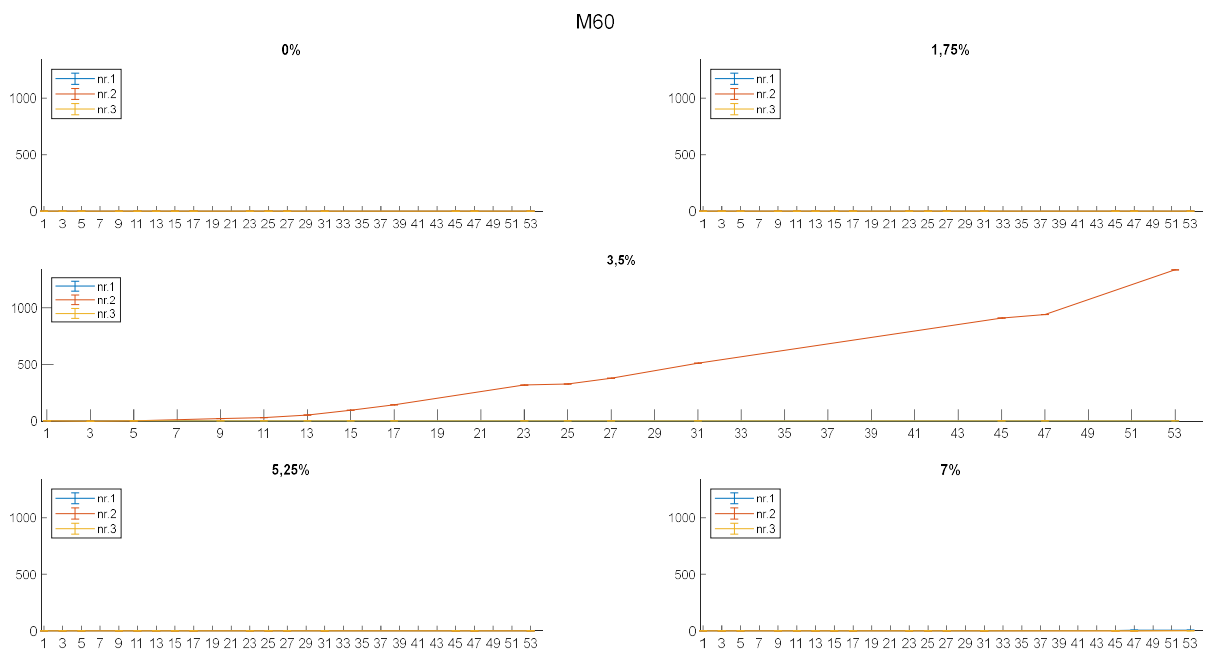
M90-7%-nr.2 begynte å stige etter mellom 31 og 41 dager, og steg til ca. 4.5ppm etter 49 dager i saltbadet (se Figur 18). M90-7%-nr.1 begynte å stige etter ca. 41 dager og steg til ca. 1.5ppm etter 49 dager (se Figur 18). M90-7%-nr.3 steg ikke over 1ppm i løpet av de 49 dagene (se Figur 18).



Figur 18 Kloridmålinger M90 i 7% saltbad

3.2 Kloridmålinger i M60 betongkuber

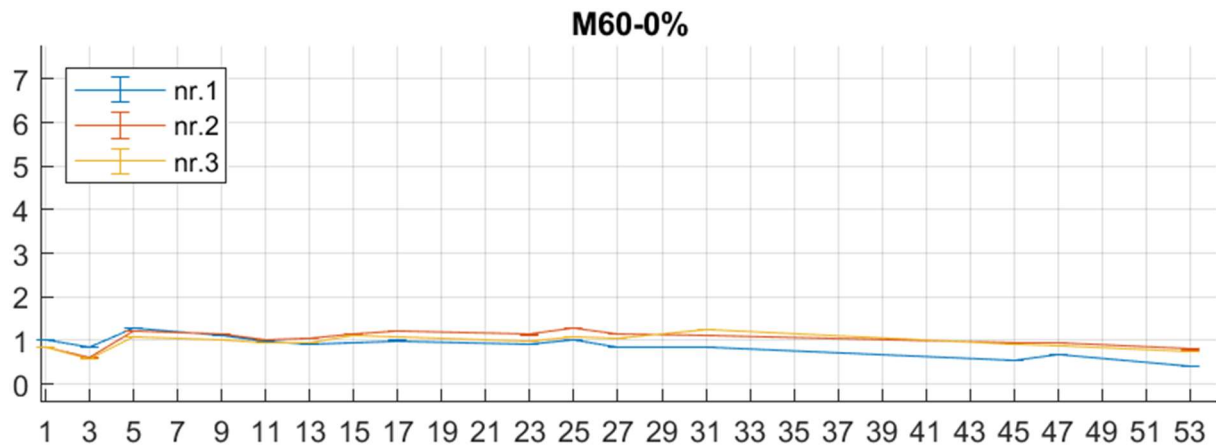
Blant M60 betongkubene, begynte M60-3,5%-nr.2 å stige etter 11 dager, altså før de andre M60 kubene viste tegn til stigning, som vist i Figur 19. Dette var tidligere enn alle de andre M60 kubene, og kloridmålingene i kube M60-3,5%-nr.2 nådde et betydelig høyere nivå enn resten av M60 kubene. Dermed vil M60-3,5%-nr.2 utelates fra videre grafer hvor den ikke direkte blir henvist til, slik at det blir lettere å lese av verdiene til de andre kubene.



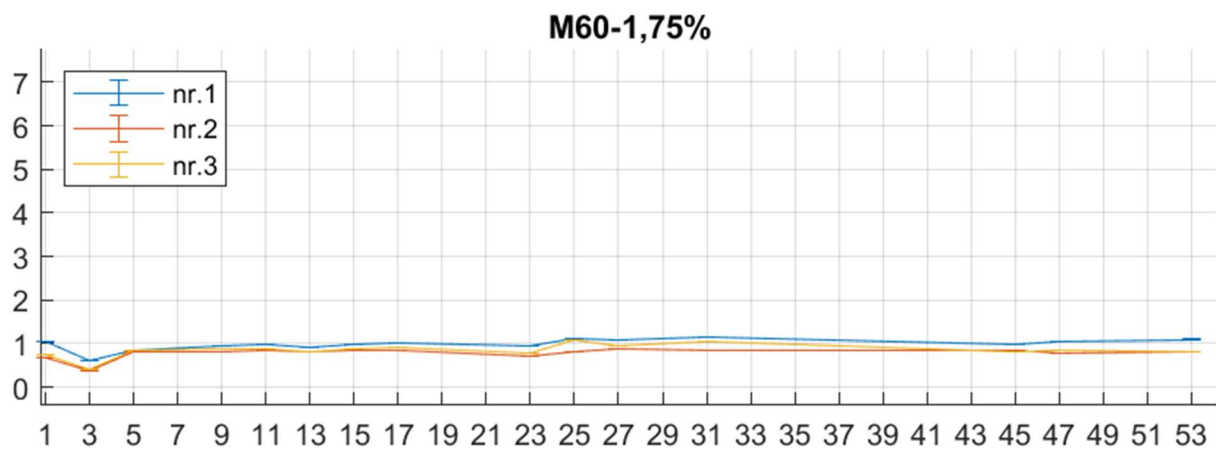
Figur 19 Kloridmålinger M60 alle saltbad (skalert til høyeste verdi)

I Figur 20 kan man se at M60-kubene i 0% saltbad *ikke* viser en stigende trend i løpet av 53 dager, på samme måte som M90-kubene i 0% i Figur 14. M60 kubene varierer litt, men holder

seg rundt 1ppm (se Figur 20). Det ble heller ikke målt betydelig stigning eller variasjon i M60 kubene som var i 1,75% saltbad. Som man kan se i Figur 21, holdt M60-1,75% seg rundt 1ppm.

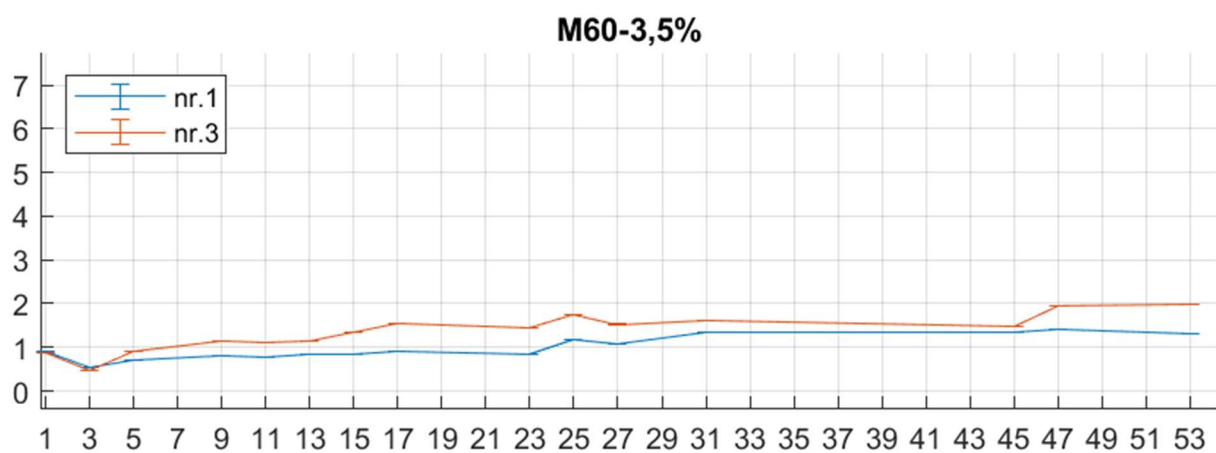


Figur 20 Kloridmålinger M60 i 0% saltbad



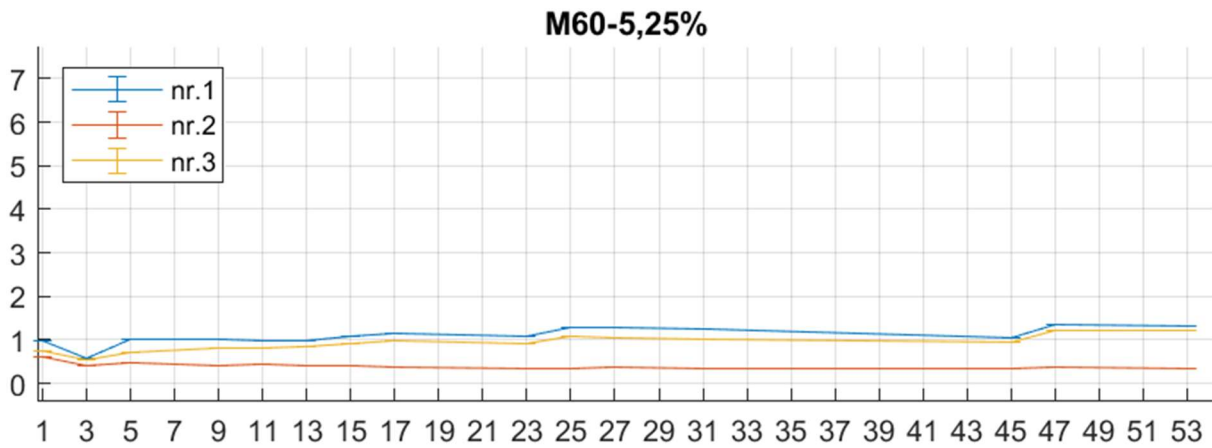
Figur 21 Kloridmålinger M60 i 1,75% saltbad

Blant M60 kubene i 3,5% saltbad, begynte kube nr.2 å stige etter 45-47 dager. Etter 53 dager endte M60-3,5%-nr.2 med et kloridinnhold på ca. 2ppm (se Figur 22).



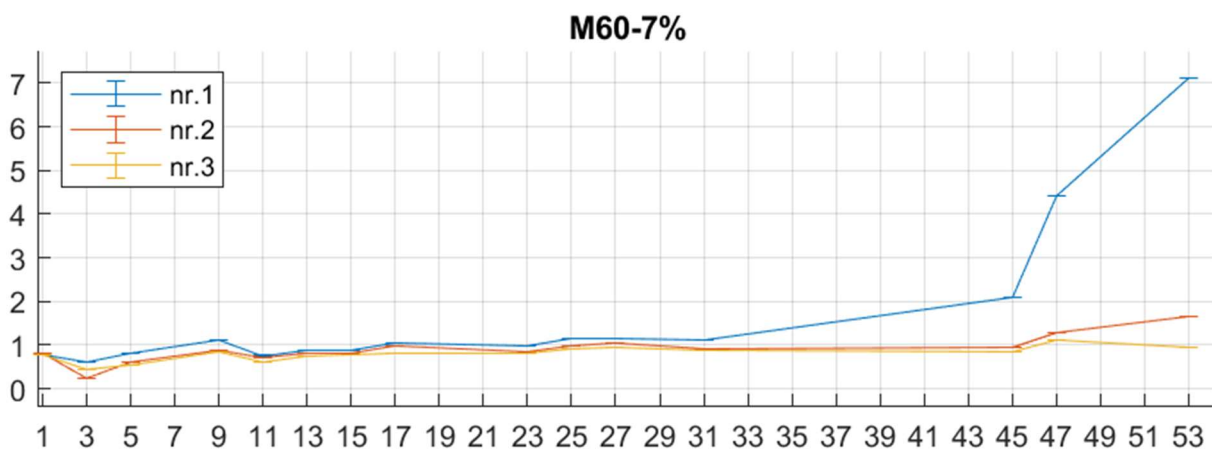
Figur 22 Kloridmålinger M60 i 3,5% saltbad

I 5,25% saltbad var det lite økning blant M60 kubene, og kube nr.2 holdt seg under 1ppm i løpet av de 53 dagene (se Figur 23). Kube nr.1 og nr.2 steg litt mot slutten, og endte opp litt i overkant av 1ppm etter 53 dager (se Figur 23).



Figur 23 Kloridmålinger M60 i 5,25% saltbad

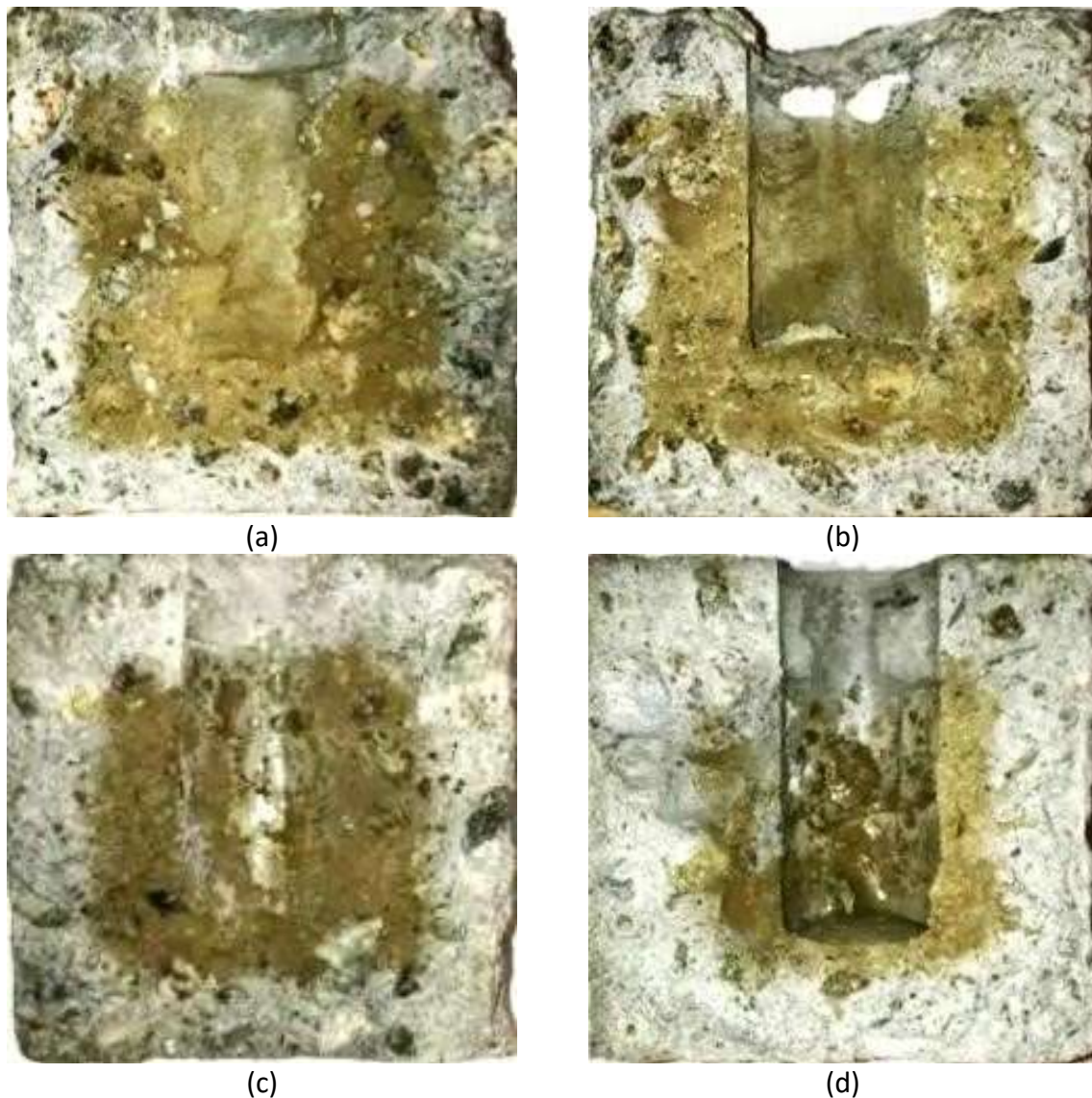
Som man kan se i Figur 24, begynte kube nr.1 blant M60-7% å stige etter 31-45 dager, og den endte opp med et kloridinnhold på ca. 7ppm etter 53 dager. Videre kan man se at M60-7%-nr.2 begynte å stige etter 45-47 dager, og etter 53 dager målte den et kloridinnhold på ca. 1.5ppm (se Figur 24).



Figur 24 Kloridmålinger M60 i 7% saltbad

3.3 Destruktiv test med Sølvnitrat-spray

Resultatene fra målingene av kloridinntrengningsdybden basert på sølvnitrat testen, er vist i Tabell 9 som gjennomsnittlig inntrengningsdybde per saltløsning. Eksempler på bilder fra testen er vist i Figur 25. Kloridionene hadde trengt lengre inn i M90 betongen enn M60 betongen, og høyere saltkonsentrasjon i saltbadene førte til dypere inntrengning. Full oversikt over alle mål ligger i vedlegg. Gjennomsnittlig kloridinntrengningsdybde for hver enkelt betongkube er vist i Tabell 10.



Figur 25 Eksempler fra sølvnitratspraytest: a) M60-5,25%-nr.1; b) M60-7%-nr.3; c) M90-3,5%-nr.3; d) M90-7%-nr.3

Tabell 9 Oversikt over kloridinntrengningsdybde fra sølvnitratspraytest

Saltbad, [%]	Fra venstre, [mm]	Fra høyre, [mm]	Fra bunn, [mm]	Gjennomsnitt, [mm]
M60				
0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,75	8,8	8,0	8,3	8,4
3,5	9,3	10,5	12,5	10,8
5,25	12,3	12,5	13,0	12,6
7	13,2	13,7	12,5	13,1
Gjennomsnitt, [mm]	8,7	8,9	9,3	-
M90				
0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,75	13,3	14,5	13,3	13,7
3,5	17,0	18,3	18,0	17,8
5,25	19,0	17,8	17,2	18,0
7	22,3	19,7	17,3	19,8
Gjennomsnitt, [mm]	14,3	14,1	13,2	-

Tabell 10 Gjennomsnittlig inntrengningsdybde per kube fra sølvnitratspraytest

Salt, [%]	M60			M90		
	Kube nr.1	Kube nr.2	Kube nr.3	Kube nr.1	Kube nr.2	Kube nr.3
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,75	8,2	8,0	9,0	12,5	13,8	14,8
3,5	11,2	-	10,3	17,0	18,8	17,5
5,25	13,0	13,2	11,7	17,5	19,3	17,2
7	13,2	12,8	13,3	17,5	22,5	19,3

4 Diskusjon

I denne delen av oppgaven skal vi diskutere resultatene fra kloridmålingene og sølvnitrattesten. Vi vil også diskutere eventuelle feilkilder i forsøket, og vurdere hvilken innvirkning de vil ha på resultatene, med tanke på formålet med eksperimentet. Vi vil vurdere feilkilder under støpeprosessen, saltbad, målinger med ISE sensor og sølvnitratspray.

Støpeprosessen

Mulige feilkilder under støpeprosessen kan være feil under tilslagsanalysen, proporsjoneringen og feil under selve støpningen.

Målingene i tilslagsanalysen ble bare utført en gang. For bedre nøyaktighet ville det vært hensiktsmessig å utføre analysen av fuktinnhold, densitet osv. flere ganger, og tatt gjennomsnittet av målingene, samt fjernet høyeste og laveste måling. Dette kan ha ført til feil i betongproporsjoneringen, som igjen kan ha ført til at egenskapene til betongkubene ikke ble som ønsket. Derimot vil disse eventuelle feilene være små, og ikke ha direkte innvirkning på

hypotesen om at det er mulig å måle kloridinntrengning i betong med ISE sensor. Videre viste trykktestene at betongen hadde 88% og 100% av forventet trykkapasitet etter 28 dager, for henholdsvis M60 og M90. Dette tyder på at proporsjoneringen var tilstrekkelig nøyaktig med tanke på formålet til eksperimentet.

Feilkilder under støpningen kan være at det ble målt opp feil mengder av komponentene, eller at komponentene ble blandet for mye eller for lite. Videre kan det ha blitt dannet hulrom dersom betongen ikke ble tilstrekkelig komprimert. Plasseringsdybden til plastrørene kan ha vært ujevn, noe som kan ha ført til ulik overdekning på betongkubene. I tillegg kunne man se at plasthansken i bunnen av tubene bulte oppover på grunn av trykket fra betongen, noe som også kan ha ført til ulik overdekning. Ettersom det ble brukt tre kuber per saltløsning vil dette veie opp for den varierende overdekningen, og den gjennomsnittlige kloridmålingen per saltbad vil være representativ av hva en kan forvente.

Saltbad

Feilkilder forårsaket av saltbadene kan være feil saltkonsentrasjon og fordampning. Beregningene av bundet vann er basert på eksperimentelle målinger, og dersom produsenten hadde oppgitt denne informasjonen, eller vi hadde hatt tilgang på helt rent $NaCl$, ville saltkonsentrasjonene vært mer presise. Selv om det ble gjort tiltak for å forhindre fordampning, vil det fortsatt ha forekommet fordampning til en viss grad. Dette kan ha ført til at saltkonsentrasjonen endret seg over tidsløpet til eksperimentet. Derimot vil disse eventuelle feilene ikke påvirke om salt trenger inn i betongen, men heller mengden og hastigheten. Med tanke på formålet med eksperimentet vil ikke disse feilkildene ha innvirkning på konklusjonen.

Målinger med ISE sensor

Mulige feilkilder under måling med ISE sensor kan tenkes å være kalibrering, skylning, tiden brukt per måling eller interferens fra andre ioner.

Kalibreringen ble utført i henhold til produsentens instruksjoner. Det ble brukt 10 og 1000 ppm kloridløsninger til å kalibrere sensoren, og sensoren var dermed mest nøyaktig innenfor dette intervallet. Dette kan føre til at målingene utenfor dette intervallet er blitt forskjøvet, og ikke er helt nøyaktige. Derimot, ettersom de samme kloridløsningene ble brukt

til å kalibrere hver gang, vil endringer og trender i målingene være representativt av endringer og trender i det faktiske kloridinnholdet.

Videre kan utilstrekkelig skylling av sensoren føre til feil i målingene. Dersom dette hadde vært tilfellet ville man forventet at påfølgende målinger etter en høy måling, ble høyere enn realiteten. Dersom man ser på Figur 17, ser man at M90-5,25%-nr.2 ikke viser tegn til stigning, dette selv om målingen ble tatt etter M90-5,25%-nr.1 som viste høy stigning i forhold. Dersom man ser på Figur 22, kan man se at M60-3,5%-nr.3 har høyere utslag enn M60-3,5%-nr.1. Ettersom M60-3,5%-nr.2 viste mye høyere målinger, kan utilstrekkelig skylling ha ført til høyere utslag i kube nr.3. Utslaget er derimot nokså lavt og kan skyldes andre feil, eller være en reell økning, ettersom kube nr.1 og nr.3 i 5,25% saltløsning viser lignende stigning (se Figur 23).

Tiden brukt per måling er en mulig feilkilde. Det ble observert at målingen stabiliserte seg over tid, og var avhengig av saltkonsentrasjonen som var målt tidligere. Dersom det ble målt en høy saltkonsentrasjon, og deretter en lav konsentrasjon, ville den andre målingen starte høyt og gradvis synke. Tilsvarende kunne man se en motsatt trend dersom man gikk fra å måle lav til høy konsentrasjon.

En feilkilde vi hadde forutsett, som er en del av hypotesen, er at sensoren også måler blant annet hydroksidioner. Det ble antatt at ioner fra betongen ville danne forstyrrelser på målingene, og vi ville få et utslag på målingene forårsaket av selve betongen. Dersom man ser på oversikten over stigningstallet til kloridmålingene i M60 og M90, målt i *ppm/dag* (vist i Tabell 11), kan man se at verken M60-0% eller M90-0% viste tegn til stigning i løpet av eksperimentet. Selv om Figur 14 og Figur 20 viser et grunnutslag på målingene i 0% saltbad var dette utslaget veldig lavt (ca. *1ppm*), med tanke på at kloridinnholdet må overskride *411ppm* for M90 og *576ppm* for M60, for at armeringskorrosjon skal kunne oppstå. Dette kombinert på at det *ikke* ble målt en stigende trend tyder på at interferens fra betongen ikke påvirker muligheten for å måle kloridinntrenging.

Tabell 11 Stigningstall kloridmålinger fra lineær regresjon

	M60	M90
salt (%)	[ppm/dag]	[ppm/dag]
0	-0,004	-0,001
1,75	0,003	0,033
3,5	0,018	0,062
5,25	0,005	0,065
7	0,036	0,04
Gjennomsnitt	0,0116	0,0398

Basert på stigningstallene i Tabell 11 kan vi se at høyere saltkonsentrasjon i saltbadene, samt mer porøs betong, gir større utslag på kloridmålingene målt med ISE sensor. Dette stemmer godt overens med resultatene fra den destruktive sølvnitratstestet i Tabell 9. Ettersom det er en sterk sammenheng mellom kloridinntrengningsdybden og kloridmålingene målt med sensoren, er dette en god indikasjon på at målingene med elektrokjemisk sensor kommer fra kloridinnhold i porevannet.

Destruktiv test med sølvnitratstestet

En av begrensningene til sølvnitratstestet er at vi bare fikk undersøkt ett enkelt snitt. Ujevnheter og eventuelle feil i betongkubene kan føre til at den målte inntrengningsdybden er upresis. Dette ble kompensert for ved at eksperimentet ble utført på tre betongkuber per saltbad. Dermed ble datagrunnlaget større, og eventuelle ufullkommenheter vil ha mindre betydning. Mulige feilkilder i sølvnitratstesten kan være splittingen av kubene, redigeringen av bildene og målingen av dybden.

Splittingen ble ikke utført i henhold til standard, på grunn av manglende utstyr. I tillegg var kubene ikke uniforme ettersom de hadde hull til kloridmålinger, og vi ble dermed nødt til å utvikle en egen metode. Splittingen av kubene ble utført manuelt, og det knakk av mindre biter av betongen under splittingen. Dette kunne også bidra til at den målte inntrengningsdybden ble feil. Men disse feilkildene er små, og resultatene vil fortsatt gi et godt innblikk i inntrengningsdybden. Derimot vil videre analyse av sprekker i betongen potensielt ikke være mulig ettersom hamringen kan ha introdusert sprekker i betongen.

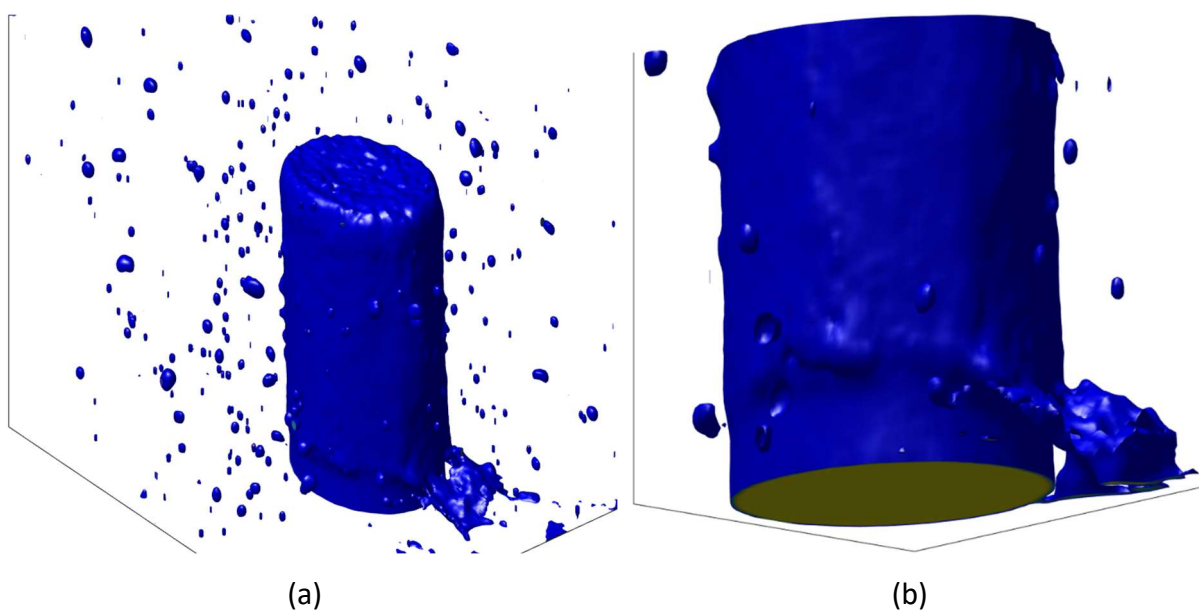
En annen feilkilde kan være når bildene ble beskåret. Ettersom kantene på de delte kubene var ujevne, var det vanskelig å sørge for at bildene ble beskåret helt nøyaktig. Dette kan også ha bidratt til at de målte inntrengningsdybdene ikke ble helt nøyaktig.

Ettersom målingene ble gjort med linjal på skjermen er dette også en mulig feilkilde. Inntrengningsdybden var ikke jevn, og det ble gjort mål til beste evne for å finne inntrengningsdybden.

På tross av disse feilkildene, ble det gjort tilstrekkelig mange målinger til at det var mulig å få en god antydning på inntrengningsdybde ved ulike saltkonsentrasjoner og betongkvaliteter. Den målte inntrengningsdybden sees å være nøyaktig nok til formålet, og den viser en tydelig sammenheng mellom saltkonsentrasjon, porøsitet og kloridinntrengningsdybde.

M60-3,5%-nr.2

Det ble utført CT-skann av M60-3,5%-nr.2 ettersom kloridmålingene viste høy stigning sammenlignet med resten av M60 kubene i 3,5% saltbad. Basert på bildene ble det laget en 3D-modell av luftboblene, for å se etter porestruktur som kunne forklare stigningen. Basert på 3D-modellene vist i Figur 26 (a), og den forstørrede versjonen i Figur 26 (b), kan man se at det er et hulrom inne i betongen. Hulrommet strekker seg fra like under overflaten på betongen, og helt inn til røret. Dette er mest sannsynlig forårsaket av en produksjonsfeil, som f.eks. manglende vibrering av betongen. Dersom man ser på den nedre delen av røret i Figur 26, kan man se en kant som går rundt røret. Denne kanten er trolig forårsaket av tapen, som holdt fast gummihansken. Man kan se at hulrommet går helt inn til tapen. Det er trolig ikke like tett rundt tapen, og kloridene kan ha trengt inn langs røret, og ned til vannet hvor målingene ble gjort.



Figur 26 3D-modell luftbobler M60-3,5%-nr.2: a) Hele modellen; b) Forstørret del med sprekk

Det ble også utført sølvnitratspraytest på M60-3,5%-nr.2 etter CT-skann, for å undersøke årsaken til de høye kloridmålingene nærmere. Sprekken/hulrommet fra 3D-modellen kan sees ved enden av tubehullet i Figur 27 (a), og oppe til høyre i Figur 27 (b). Dersom man ser langs tubehullet i Figur 27 (b), og i bunnen av tubehullet i Figur 27 (c), kan man se at det er klorid til stede. Det er tydelig at kloridinntrengningsdybden er rundt 10mm, som vist i Figur 27 (d). Innenfor kloridinntrengningslaget, kommer det et lag hvor det ikke er klorid til stede. Selv om det ikke ser ut til at kloridinntrengningen har nådd helt inn til tuben, ser man tegn til klorid på innsiden av tubehullet.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figur 27 Sølvnitratspraytest M60-3,5%-nr.2: a) Sprekk venstre halvdel; b) Sprekk og innside tube venstre halvdel; c) Bunn av tube høyre halvdel; d) Hele høyre halvdel ovenfra

Basert på 3D-modellen og sølvnitratpraytesten er det trolig produksjonsfeilen (sprekken som er vist) som har forårsaket de høye kloridmålingene. Dette danner grunnlaget for avgjørelsen om å utelate M60-3,5%-nr.2 fra kloridmålingsresultatene.

M90-5,25%-nr.1

En mulig forklaring på hvorfor M90-5,25%-nr.1 begynte å stige før de andre M90 kubene i 5,25% saltbad, kan være feil under støpeprosessen. Som man kan se nede i venstre hjørne av tubehullet i Figur 28 (a), har saltet tydelig trengt helt inn til tuben. Dette i motsetning til kube nr.2 i 5,25% saltløsning vist i figur 28 (b). Dette dannet grunnlaget for å utelate M90-5,25%-nr.1 fra kloridmålingsresultatene.

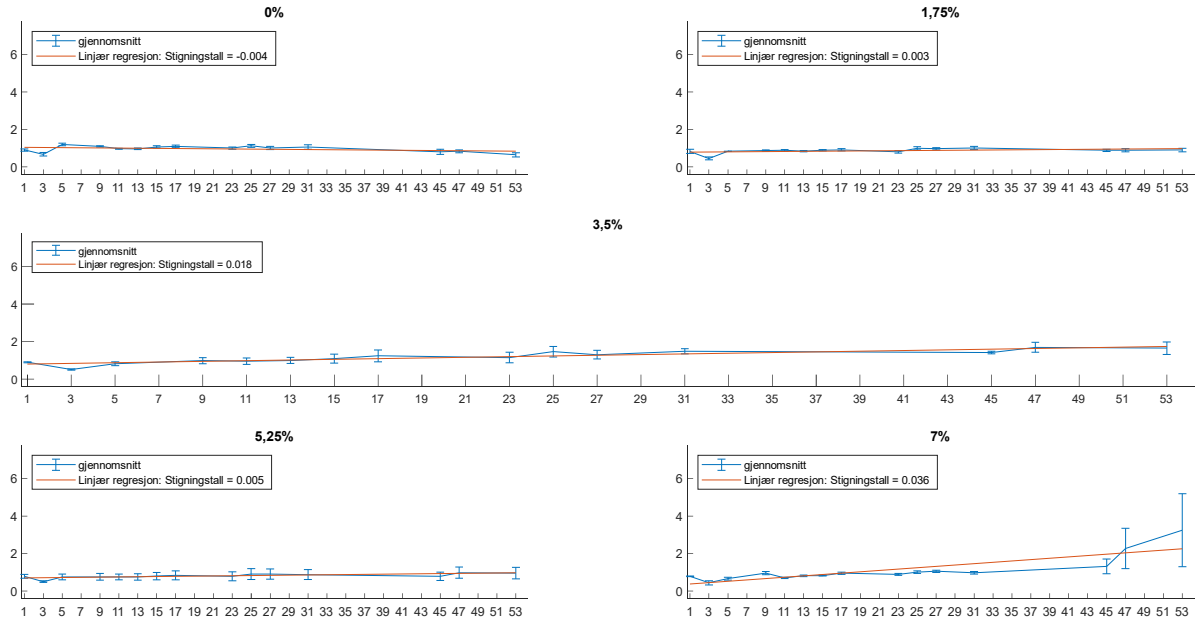


Figur 28 Sølvnitratpraytest M90-5,25%: a) nr.1 venstre halvdel; b) nr.2 høyre halvdel

Gjennomsnitt og stigningstall til kloridmålinger

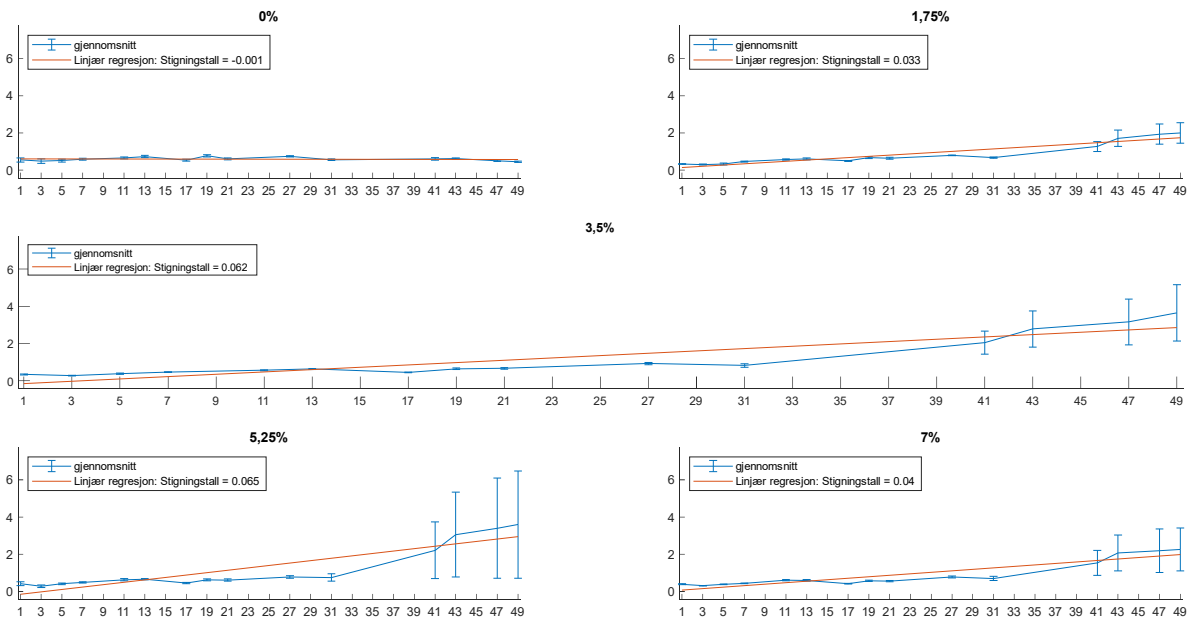
Basert på kloridmålingene ble det beregnet gjennomsnittlig kloridmåling per saltbad, og det ble laget grafer med konfidensintervall for å vise den statistiske signifikansen til det gjennomsnittlige resultatet. I Figur 29 og Figur 30 kan man se at selv om stigningstrenden befinner seg i nedre del av intervallet, er det fortsatt vist stigning i kloridmålingene.

M60 Gjennomsnitt



Figur 29 Gjennomsnitt M60-med standardavvik

M90 Gjennomsnitt



Figur 30 Gjennomsnitt M90-med standardavvik

5 Konklusjoner

Basert på formålet med oppgaven og eksperimentet, er hovedkonklusjonen vi kan trekke fra resultatene, at det er mulig å måle kloridinntrengning i M60 og M90 betong (CEM II/B-M 42.5R), ved hjelp av Go Direct Klorid ioneselektiv elektrode (ISE) sensor. Dette besvarer vårt hovedforskningsspørsmål, og bekrefter hypotesen vår. I tillegg til dette, er det andre konklusjoner vi kan trekke, basert på resultatene fra eksperimentet.

Det er tydelig basert på CT-bildene, at proporsjoneringen av betongen er svært avgjørende for mikrostrukturen i den herdede betongen. Videre er det tydelig basert på kloridmålingene og sølvnitratpraytesten, at bestandighetsklassen er avgjørende for mengden kloridioner som trenger inn i betongen og inntrengningsdybden. I tillegg vil høyere porøsitet og lavere bestandighetsklasse, føre til høyere og raskere kloridinntrengning. Derimot er det også tydelig at den mest avgjørende faktoren for kloridinntrengning er produksjonsfeil. Selv om M60 betong har høyere bestandighetsklasse enn M90 betong, viste M60-kuben med produksjonsfeil både størst og tidligst kloridinntrengning.

Det ble observert at ved en overdekning på 34 mm, startet kloridinntrengningen i M90 betong innen 41 dager, og for M60 betong startet inntrengningen innen 47 dager.

I tillegg til konklusjonene om bestandighetsklasse og produksjonsfeil, er det også tydelig basert på resultatene, at saltkonsentrasjonen i miljøet betongkuben er eksponert for er avgjørende for kloridinntrengningsdybden og -mengden. Basert på resultatene fra kloridinntrengningsdybden, gir en økning i saltkonsentrasjon minkende avkastning, og de første 1,75%-ene er mest avgjørende.

Vi kan konkludere med at interferens fra betongens ioner ikke påvirker muligheten for å måle risiko for korrosjon i CEM II/B-M 42.5R betong forårsaket av kloridioner. Dette ettersom interferensen var mye lavere enn det kritiske kloridinnholdet i betongen.

Til slutt observert vi at kloridinntrengningen var uniform og lik fra alle sider, så sant betongkubene ikke inneholdt produksjonsfeil.

Referanser

Uncategorized References

- 206:2013+NA:2014, N.-E. (2014). Concrete -Specification, performance, production and conformity. National annex.
- Abbas, Y., Pargar, F., Koleva, D. A., van Breugel, K., Olthuis, W. & van den Berg, A. (2018). Non-destructive measurement of chloride ions concentration in concrete—A comparative analysis of limitations and prospects. *Construction and Building Materials*, 174, 376-387.
- Alilou, V. K. & Teshnehlab, M. (2010). Prediction of 28-day compressive strength of concrete on the third day using artificial neural networks. *International journal of Engineering*, 3(6), 565-576.
- Angst, U. (2011). Chloride induced reinforcement corrosion in concrete: Concept of critical chloride content—methods and mechanisms.
- Bensted, J., Rbrough, A. & Page, M. (2007). Chemical degradation of concrete. *Durability of Concrete and Cement Composites; Page, CL, Page, MM, Eds*, 86-135.
- Bernardes, E. E., Mantilla Carrasco, E. V., Vasconcelos, W. L. & de Magalhães, A. G. (2015). X-ray microtomography (μ -CT) to analyze the pore structure of a Portland cement composite based on the selection of different regions of interest. *Construction and Building Materials*, 95, 703-709. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.128>
- De Schutter, G. (2013). *Damage to concrete structures*. Taylor & Francis.
- EN-12350-1. (2009). Testing fresh concrete Sampling.
- Evers, L., Green, D., Young, N. & Snellen, M. (2013). Remote hydroacoustic sensing of large icebergs in the southern Indian Ocean: Implications for iceberg monitoring. *Geophysical research letters*, 40(17), 4694-4699.
- Fraden, J. (1994). *Handbook of modern sensors*. Springer.
- Haus, J. (2010). *Optical sensors: basics and applications*. John Wiley & Sons.
- He, F., Shi, C., Yuan, Q., Chen, C. & Zheng, K. (2012). AgNO₃-based colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete. *Construction and Building Materials*, 26(1), 1-8.
- Iwanami, M., Yokota, H., Hamada, H., Yamaji, T. & Watanabe, H. (2002). Can marine fouling organisms extend the life of concrete structures? IABSE Symposium Report,
- Jones, J. & Fraser, R. (2009). Ship impact on concrete offshore platform legs. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 162(1), 21-25.
- Lindland, J. (2021, 30.10.2021). 720.105 Nedbrytningsmekanismer i betongkonstruksjoner. SINTEF Byggforsk. Hentet 10.02 fra
- Sánchez, A. N. & Sagüés, A. A. (2014). Chloride Corrosion Threshold Dependence on Steel Potential in Reinforced Concrete. CORROSION 2014,
- Santos, J. L. & Farahi, F. (2014). *Handbook of optical sensors*. Crc Press.
- Shang, H., Song, Y. & Ou, J. (2009). Behavior of air-entrained concrete after freeze-thaw cycles. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 22(3), 261-266.
- Shin, J.-H., Kim, G.-H., Kang, K.-I., Kim, H.-R. & Jo, H.-K. (2004). Wireless data acquisition system for measuring the curing temperature of mass concrete. *ISARC Proceedings*, 589-594.
- Taylor, R. F. & Schultz, J. S. (1996). *Handbook of chemical and biological sensors*. CRC Press.
- Wei, S., Jiang, Z., Liu, H., Zhou, D. & Sanchez-Silva, M. (2013). Microbiologically induced deterioration of concrete: a review. *Brazilian Journal of Microbiology*, 44(4), 1001-1007.
- Yokota, H., Hamada, H. & Iwanami, M. (2013). Evaluation and prediction on performance degradation of marine concrete structures. Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Kyoto, Japan,

Vedlegg

Vedleggene er lastet opp onedrive. Filen «1 Oversikt vedlegg.txt» viser en oversikt over alle vedlegg og deres plassering. Denne løsningen ble valgt ettersom vedleggene har stor filstørrelse, og det er mange individuelle filer, fra for eksempel CT-skann. Linken under fører til onedrive:

<https://drive.google.com/drive/folders/10AYtp4X8kMTs3BuL80HmgrY2t41vQ3pu?usp=sharing>

Oversikt vedlegg

CT	(Mappe med CT-bilder, matlabscript og matlabfiler)
CT scan av kubler	(Mappe med CT-bilder)
CT1	(CT-bilder M60)
CT1-T	(CT-bilder M60 med tube)
CT2	(CT-bilder M90)
CT2-T	(CT-bilder M90 med tube)
bilder.mat	(matlab fil med alle CT-bildene)
bilder2.mat	(matlab fil med alle CT-bilder med justert lysstyrke)
CT.m	(matlabscript for generering av 3D-modeller og beregning)
skarpere_bilder.mat	(matlab fil med redigerte bilder)
Mikro CT	(Mappe med mikro-CT-bilder)
M60_Rec	(Mappe med alle mikro-CT-bilder av M60)
m90_Rec	(Mappe med alle mikro-CT-bilder av M90)
pic	(Mappe med bilder av hele M90 betongprøven)
Målinger kloridsensor	(Mappe med alle kloridmålinger)
csv reader	(Mappe med matlabscript og csv filer med målinger)
csv_editor.m	(matlabscript for sletting av feilmålinger)
csv_move_data.m	(matlabscript for flytting av målinger i feil rekkefølge)
csv_reader.m	(første versjon av matlabscript for tolking av målinger)
csv_reader2.m	(Matlabscript for tolking og plotting av målinger)
dag1.csv	(Kloridmålinger dag 1)

...	(dag1-dag54: kloridmålinger)
dag54.csv	(kloridmålinger siste dag)
Målinger	
dag1.gambl	(Orginalfil med målinger dag 1)
...	(dag1-dag54: orginalfiler)
dag54.gambl	(siste dag orginalfiler)
Test og kalibrering	
	(mappe med test av bundet vann i salt)
csv-export.csv	(målinger bundet vann)
Test av vannprosent salt.gambl	(orginalfil bundet vann måling)
Sølvnitrat test	
	(Mappe følvnitrat test)
M90 M60 spray test raw.pptx	(orginalbilder sølvnitrat test)
Sølvnitrat bilder.pptx	(redigerte bilder sølvnitrat test)
Sølvnitrat mål.xlsx	(oversikt mål sølvnitrat test)
1 Oversikt vedlegg.txt	
	(oversikt over vedlegg)
Finhetsmodul M60.xlsx	
	(Finhetsmodul M60)
Finhetsmodul M90.xlsx	
	(Finhetsmodul M90)
M60 mix design.xlsx	
	(Betongresept M60)
M90 mix design.xlsx	
	(Betongresept M90)
Oversikt tester fersk betong.xlsx	
	(Tester på fersk betong)
Plan for måling.xlsx	
	(oversikt over dager for kloridmålinger)
Saltløsninger.xlsx	
	(Oppskrift saltbad)
Siktekurve.xlsx	
	(Finhetsmodul M90 og M60)
Stigningstall kloridmålinger.xlsx	
	(Oversikt stigningstall fra matlabberegning)
Tilslagsanalyse.xlsx	
	(Resultat fra tilslagsanalysene)
Trykkkapasitet-7-og-28-dager.xlsx	
	(Resultat fra trykktester)
Trykktest 7 og 28 dager.ggb	
	(Beregning av forventet trykkapasitet i geogebra)
vc-tall.ggb	
	(Forventet vc tall basert på trykktest i geogebra)