

## **Bestandighetsstudie av Ultra-High Performance Concrete (UHPC)**

En forskning om påvirkningen av rissvidde, overdekning og eksponeringsmiljø med hensyn på betongens beskyttelsesevne mot armeringskorrosjon

THEA AMALIE BIRKEDAL, VILDE PETTERTEIG HOVLAND &  
VICTORIA VAISHNAVI NETLAND



### **VEILEDER**

Rein Terje Thorstensen, Universitetet i Agder

**Universitetet i Agder, 2020**

Fakultet for teknologi og realfag

Institutt for ingeniørvitenskap



## Summary

Ultra-High Performance Concrete (UHPC) was developed in research to increase the strength and durability of concrete. The material has shown remarkable ductility, durability and strength properties in laboratory tests, but has not been much tested in practice. This master thesis presents an experiment to investigate the durability of UHPC in two marine environments in view of the risk of rebar corrosion. Factors under consideration are cover depth and crack width to observe how this will influence the penetration of aggressive substances that can cause corrosion. To investigate the corrosion state and chloride content, electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and Volhard's method were performed. This was done in order to observe the permeability of UHPC. The results show that the EIS measurements for the UHPC beams have significantly greater corrosion resistance compared to the standard concrete beams, SV-40. UHPC has a resistance of almost tenfold of the SV-40. The result from the EIS-measurement for the corrosive rebar, makes a too weak comparison basis to draw a conclusion on whether there is corrosion in the different exposure environment. Disregarding that there is corrosion on the rebars, the UHPC beams could be dimensioned with a smaller concrete cover and a larger crack width compared with the requirements from the standards. Overall, this experiment shows that UHPC has a superior corrosion resistance in practice compared to SV-40.

## Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring

Den enkelte student er selv ansvarlig for å sette seg inn i hva som er lovlige hjelpemidler, retningslinjer for bruk av disse og regler om kildebruk. Erklæringen skal bevisstgjøre studentene på deres ansvar og hvilke konsekvenser fusk kan medføre. Manglende erklæring fritar ikke studentene fra sitt ansvar.

1.	Jeg/vi erklærer herved at min/vår besvarelse er mitt/vårt eget arbeid, og at jeg/vi ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen.	<input checked="" type="checkbox"/>
2.	Jeg/vi erklærer videre at denne besvarelsen: <ul style="list-style-type: none"> <li>- ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands.</li> <li>- ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt.</li> <li>- ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt.</li> <li>- har alle referansene oppgitt i litteraturlisten.</li> <li>- ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse.</li> </ul>	<input checked="" type="checkbox"/>
3.	Jeg/vi er kjent med at brudd på ovennevnte er å betrakte som fusk og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høgskoler i Norge, jf. Universitets- og høgskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31.	<input checked="" type="checkbox"/>
4.	Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert.	<input checked="" type="checkbox"/>
5.	Jeg/vi er kjent med at Universitetet i Agder vil behandle alle saker hvor det forligger mistanke om fusk etter høgskolens retningslinjer for behandling av saker om fusk.	<input checked="" type="checkbox"/>
6.	Jeg/vi har satt oss inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider.	<input checked="" type="checkbox"/>

## Publiseringsavtale

Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

Forfatter(ne) har opphavsrett til oppgaven. Det betyr blant annet enerett til å gjøre verket tilgjengelig for allmennheten (Åndsverkloven. §2).

Alle oppgaver som fyller kriteriene vil bli registrert og publisert i Brage Aura og på UiA sine nettsider med forfatter(ne)s godkjenning.

Opgaver som er unntatt offentlighet eller tausehetsbelagt/konfidensiell vil ikke bli publisert.

Jeg/vi gir herved Universitetet i Agder en vederlagsfri rett til å gjøre oppgaven tilgjengelig for elektronisk publisering:

JA  NEI

Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)?

JA  NEI

(Båndleggingsavtale må fylles ut)

- Hvis ja:

Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over?

JA  NEI

Er oppgaven unntatt offentlighet?

JA  NEI

(inneholder taushetsbelagt informasjon. Jfr. Offl. §13/Fvl. §13)

## Forord

Masteroppgaven er skrevet som et avsluttende prosjektarbeid på masterprogrammet for Byggkonstruksjon våren 2020, med en ramme på 30 studiepoeng. Oppgaven ble utarbeidet ved Instituttet for Ingeniørvitenskap ved Universitetet i Agder, det fjerde og siste semesteret.

Vi vil benytte anledningen å takke veilederen vår Rein Terje Thorstensen ved Universitetet i Agder for engasjement og praktiske løsninger. Videre vil vi rette en stor takk til Peter Hugh Middleton og Thomas Benjamin Ferriday for god innføring i korrosjonsmåling og hjelp til måling av testobjektene. Paul Ragnar Svennevig har vært til stor hjelp med anskaffelse av nødvendige materialer og utstyr i hele prosjektfasen. Vi vil også takke Rita Sølvi Ditlefsen for bistand på bygglaben og Steve Schading på mekatronikklaben. Til slutt vil vi takke Unicon AS og Ribe Betong AS for levering av betong til forsøket.

Målet med denne oppgaven er å observere hvordan bestandigheten til betongtypen *Ultra-High Performance Concrete* er i praksis. Hovedtemaet er hvordan dette materialet beskytter armeringen mot korrosjon og inntrenging av aggressive stoffer. Det legges vekt på eksponeringsmiljø, overdekning og rissvidde. Videre gir bruk av industriell betong i forsøket en større praktisk tilnærming.

Et godt samarbeid i gruppen bidro til engasjement og motivasjon i løpet av semesteret. Det var et spennende, praktisk forsøk som ga oss muligheten til å utfordre oss på mange områder og bygge et forsøk fra bunnen av. Vi satte også stor pris på å få besøke betongfabrikkene Unicon AS og Ribe Betong AS og se hvordan daglig produksjon av betong foregår. Masteroppgaven var en fin og lærerik avslutning på studiet.

Universitetet i Agder, Grimstad 05.06.2020

 Thea Amalie Birkedal	 Vilde Petterteig Hovland	 Victoria Vaishnavi Netland
---	---	--

## Innholdsfortegnelse

Summary .....	i
Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring.....	ii
Publiseringsavtale.....	iii
Forord.....	iv
Innholdsfortegnelse .....	v
Figurliste .....	viii
Tabelliste .....	x
1 Innledning.....	1
2 Samfunnsperspektiv.....	2
3 Teoribakgrunn .....	3
3.1 Betong .....	3
3.1.1 Standard betong, SV-40.....	3
3.1.2 Ultra-High Performance Concrete.....	3
3.2 Miljø og bestandighet.....	3
3.2.1 Aggressive miljø.....	5
3.3 Permeabilitet.....	6
3.3.1 Transportmekanismer .....	7
3.4 Armeringskorrosjon.....	7
3.4.1 Armering.....	8
3.4.2 Beskyttelse av armeringsstålet – passivering.....	8
3.4.3 Korrosjonsforløpet – depassivering og aktiv korrosjon.....	9
3.4.4 Armeringskorrosjon – en elektrokjemisk reaksjon.....	10
3.4.5 Karbonatisering .....	13
3.4.6 Klordinitiert armeringskorrosjon .....	14
3.4.7 Faktorer som påvirker armeringskorrosjon i betong .....	16
3.5 Oppsprukket betongtverrsnitt .....	18
3.5.1 Fiberarmeringens påvirkning på rissvidden .....	18
3.5.2 Krav til rissvidde.....	19
3.6 Korrosjonsmåling.....	20
3.6.1 Elektrokjemisk impedansspektroskopi.....	21
3.7 Klordinnhold .....	23
3.7.1 Volhards metode .....	24
4 Forskerspørsmål .....	26

4.1	Avgrensinger.....	26
5	Case .....	27
5.1	Betongresept .....	30
5.1.1	Standard betong, SV-40.....	30
5.1.2	Ultra-High Performance Concrete.....	31
6	Metode.....	32
6.1	Forskningsmål.....	33
6.2	Teoretisk rammeverk .....	33
6.3	Forskerspørsmål .....	34
6.4	Metode.....	35
6.4.1	Bjelke dimensjonering.....	36
6.4.2	Forskaling.....	37
6.4.3	Støping.....	38
6.4.4	Oppføring av testobjekter .....	40
6.4.5	Oppsprekking.....	42
6.4.6	Korrosjonstesting før miljøeksponering .....	43
6.4.7	Forberedelse til utsetting .....	43
6.4.8	Utsetting og henting.....	44
6.4.9	Korrosjonstesting etter miljøeksponering.....	46
6.4.10	Selvkurering.....	46
6.4.11	Test av kloridinnhold .....	46
6.4.12	Litteraturstudium .....	49
6.5	Validitet .....	50
6.6	Forskningsetikk.....	51
7	Resultat.....	52
7.1	Elektrokjemisk impedansspektroskopi.....	52
7.1.1	Før eksponering.....	52
7.1.2	Etter eksponering .....	53
7.2	Rissvidde før og etter .....	55
7.2.1	Stoffer i rissene.....	56
7.3	Temperatur.....	57
7.4	Klorid .....	58
7.5	Litteraturstudium .....	59
7.5.1	Overdekning .....	59



7.5.2	Rissvidde.....	59
7.5.3	Marint miljø.....	60
7.5.4	Bestandighet.....	61
8	Diskusjon .....	63
8.1	Metode.....	63
8.1.1	Bjelke dimensjonering.....	63
8.1.2	Forskaling.....	63
8.1.3	Støping.....	63
8.1.4	Oppføring av testobjekter .....	64
8.1.5	Oppsprekking.....	64
8.1.6	Korrosjonstesting før miljøeksponering .....	64
8.1.7	Forberedelse til utsetting .....	65
8.1.8	Utsetting og henting.....	65
8.2	Før og etter eksponering.....	65
8.3	Korrosjon .....	69
8.4	Overdekning .....	70
8.5	Riss.....	71
8.5.1	Selvkurering.....	73
8.6	Marint miljø.....	74
8.6.1	Temperatur.....	75
8.6.2	Kloridinnhold .....	76
8.7	Bestandighet.....	78
8.8	Feilkilder oppsummert .....	80
9	Konklusjon .....	81
10	Anbefalinger .....	83
11	Referanser .....	84
12	Vedlegg.....	89

## Figurliste

Figur 1.1: Korrosjonsskade på betongkonstruksjon. Privat foto .....	1
Figur 3.1: Skjematisk fremstilling av hvordan krav til eksponeringsklasser og tiltak for å oppnå bestandige betongkonstruksjoner omtales i standardene [23] .....	4
Figur 3.2: Fordeling mellom porer og fast stoff i herdet betong, med varierende v/b-forhold [24] .....	7
Figur 3.3: Illustrasjon av korrosjonsprosessen i betong [41].....	9
Figur 3.4: Skjematisk illustrasjon av halvcellereaksjonene ved korrosjon. Omarbeidet fra figur i [39]	10
Figur 3.5: Korrosjonsprodukt og deres relative volum i forhold til armeringsjernet [39].....	11
Figur 3.6: Illustrasjon av korrosjonsprosessen [38].....	12
Figur 3.7: Illustrasjon av prinsippet bak mikrocellekorrosjon [30].....	12
Figur 3.8: Illustrasjon av prinsippet bak makrocellekorrosjon [30].....	13
Figur 3.9: Skjematisk illustrasjon av karbonatisering: a) begynnende karbonatisering, b) karbonatiseringsfronten har nådd frem til armeringen, c) aktiv korrosjon som har ført til sprekkdannelse og avskalling av betongen. Omarbeidet fra figur i [34].....	13
Figur 3.10: Illustrasjon av generell korrosjon på armeringsstål. Omarbeidet fra figur i [43].....	14
Figur 3.11: Skjematisk illustrasjon av kloridinitiert pittingkorrosjon på armeringsjern i betong. Omarbeidet fra figur i [39] .....	15
Figur 3.12: Påvirkning av riss ved a) inntrenging av klorider og b) karbonatiseringsfronten. Omarbeidet fra figur i [34] .....	17
Figur 3.13: Typiske rissmønstre i standard betong og høyfast betong [54].....	19
Figur 3.14: Nyquist-diagram og dens ekvivalente krets viser effekten av diffusjonsimpedansen [62]	22
Figur 3.15: Prøveuttak av betongstøv med slagbor [59] .....	25
Figur 5.1: Plantegning av designet testobjekt [52].....	28
Figur 6.1: Illustrasjon over forskningsdesignet. Omarbeidet fra figur i [91] .....	32
Figur 6.2: Prosjektert tverrsnitt og lengde på bjelkene. Privat figur .....	37
Figur 6.3: Navn og plassering av de ulike platene i forskalingsformen. Privat figur .....	37
Figur 6.4: Ferdig bygget a) forskalingsform b) med vinkelbeslag og c) posisjonsplate. Privat foto .....	38
Figur 6.5: a) Støping av UHPC fra betongbil med renne og b) tildekking av testobjektene over natten. Privat foto.....	39
Figur 6.6: Demontering av kortsidede platene ved uthenting av bjelker. Privat foto .....	39
Figur 6.7: SV-40 bjelke i herdekar. Privat foto .....	40
Figur 6.8: a) Et tvingesystem med gjengestenger, skiver og muttere og b) fullstendig oppsett av testobjekt. Privat foto .....	41
Figur 6.9: Plassering av a) tvingesystem og b) avstandsknast. Privat foto.....	42
Figur 6.10: a) Rissmåleren benyttet til å måle rissvidde og b) riss på 0,1 mm gjennom rissmåler. Privat foto .....	42
Figur 6.11: a) Testapparatet IviumStat XRi og b) klyper tilkoblet armering under korrosjonstesting. Privat foto.....	43
Figur 6.12: Påføring av første lag med epoxy. Privat foto.....	43
Figur 6.13: a) Plassering av testobjekter og klosser på sjøbunnspallen, b) ferdigstilte paller og c) plassering av testobjektene på pallene i skvalpesonen. Privat foto/figur .....	44
Figur 6.14: Testobjektene lastes på kranbil før utsetting. Privat foto.....	45
Figur 6.15: Plassering og forankring av testobjekter i skvalpesonen. Privat foto .....	45
Figur 6.16: a) Prøveuttak av betongpulver i sonen utenfor rissområdet, b) betongpulver i glidelåspose og c) merking av prøve. Privat foto .....	47

Figur 6.17: Bjelke delt i to i det dimensjonerende risset for a) UHPC og b) SV-40. Privat foto .....	47
Figur 6.18: Farge ved omslagspunktet. Privat foto .....	49
Figur 7.1: EIS-målinger før eksponering .....	52
Figur 7.2: EIS-målinger etter eksponering .....	54
Figur 7.3: Riss undersøkt for selvkurering i bjelke a) 1, b) 4, c) 6, d) 8, e) 9, f) 13 venstre, g) 13 høyre og h) 16. Bildene ble tatt etter at bjelkene ble skylt .....	56
Figur 7.4: Kloridprofiler for de ulike betongtypene i og utenfor rissområdet .....	58
Figur 7.5: Korrosjonsskademodell for betongbjelker [98] .....	60
Figur 8.1: Korrosjonsmotstand før eksponering for UHPC-bjelker .....	66
Figur 8.2: Gjennomsnittlig korrosjonsmotstand før eksponering for UHPC-bjelker .....	66
Figur 8.3: Korrosjonsmotstand for UHPC-bjelkene før og etter eksponering for a) 30 mm overdekning, b) 40 mm overdekning, c) 50 mm overdekning på sjøbunnen og d) 50 mm i skvalpesonen .....	67
Figur 8.4: Korrosjonsmotstand for SV-40 bjelker før og etter eksponering i skvalpesonen .....	68
Figur 8.5: Seriemotstanden i armeringsjernet før og etter eksponering for a) UHPC- og b) SV-40 bjelken .....	68
Figur 8.6: Forskjell i a) korrosjonsmotstand, b) seriemotstand og c) betongmotstand for UHPC-bjelken før og etter oppsprekking .....	69
Figur 8.7: Korrosjonsmotstand for korrodert armeringsjern med sjøvann som elektrolytt .....	70
Figur 8.8: Korrosjonsmotstand for UHPC-bjelker etter eksponering for ulike overdekninger og miljø med rissvidder på 0,2 mm .....	70
Figur 8.9: Korrosjonsmotstand for SV-40 bjelke etter eksponering med overdekning 50 mm og rissvidde på 0,2 mm .....	71
Figur 8.10: Korrosjonsmotstand for UHPC-bjelker etter eksponering for ulike rissvidder og miljø med overdekning på 50 mm .....	72
Figur 8.11: Korrosjonsmotstand for SV-40 bjelken etter eksponering i skvalpesonen med rissvidde 0,2 mm .....	73
Figur 8.12: Korrosjonsmotstand for UHPC-bjelkene a) på sjøbunnen og b) i skvalpesonen, hvor de stiplede kurvene illustrerer bjelkene plassert nederst på pallene .....	75
Figur 8.13: Lufttemperaturen under 55 døgns eksponering .....	76
Figur 8.14: Kloridprofiler for SV-40 og UHPC prøver, i og utenfor rissområdet .....	77

## Tabelliste

Tabell 3.1: Oversikt over de ulike miljøklassene [22].....	4
Tabell 3.2: Faktorer som påvirker korrosjonshastigheten av armeringsjern [39].....	16
Tabell 3.3: Karakteristisk rissvidde, øvre grense [56].....	19
Tabell 3.4: Krav til maksimalt kloridinnhold i betong sammenstilt fra NS 3473 [23].....	24
Tabell 5.1: Planlagte testobjekter i skvalpesonen med ønsket rissvidder og overdekning .....	29
Tabell 5.2: Planlagte testobjekter på sjøbunnen med ønsket rissvidder og overdekning .....	29
Tabell 5.3: Bestanddeler for SV-40.....	30
Tabell 5.4: Bestanddeler for UHPC.....	31
Tabell 6.1: SV-40 testobjekter med tilhørende overdekning, rissvidde og eksponeringsklasse.....	40
Tabell 6.2: UHPC testobjekter med tilhørende overdekning, rissvidde og eksponeringsklasse.....	41
Tabell 6.3: Oversikt over riss undersøkt for selvkuring.....	46
Tabell 6.4: Oversikt over betongprøvene og tilhørende dybde for testing av kloridinnhold .....	48
Tabell 6.5: Endelig vekt på betongprøvene.....	48
Tabell 6.6: Oversikt over kjemikalier brukt i titreringen .....	49
Tabell 7.1: Verdier for armeringens korrosjonsmotstand til de dimensjonerende bjelkene på sjøbunnen.....	54
Tabell 7.2: Verdier for armeringens korrosjonsmotstand til de dimensjonerende bjelkene i skvalpesonen .....	55
Tabell 7.3: Oversikt over rissviddene i hvert testobjekt før og etter eksponering .....	55
Tabell 7.4: Oversikt over lufttemperaturen under eksponeringstiden .....	57
Tabell 7.5: Titrantmengde og kloridinnhold for de ulike betongprøvene.....	58
Tabell 8.1: Oversikt over tidsperioden lufttemperaturen kunne føre til frysing av sjøvann 14. mars 2020. Tabellen viser også variasjon i temperatur innad per time .....	76

## 1 Innledning

Betong er det mest brukte byggemateriale i verden med høy trykkfasthet, bestandighet og fleksibilitet til utforming [1]. Betongkonstruksjoners levetid vil i stor grad påvirkes av miljømessige påkjenninger og kreve vedlikehold i forhold til dette. Ved utsettelse for aggressive miljø kan aggressive stoffer trenge inn i det porøse materialets overdekning og nå frem til armering. Armeringen tilføres i betongen for å ta opp strekkrefter, og reduserer oppsprekking som følge av skjærkrefter. Korrosjon kan forekomme når armering kommer i kontakt med aggressive stoffer, som vist på figur 1.1, og dette er i dag en av de største årsakene til bestandighetsproblemer i betongkonstruksjoner. Korrosjonsskadet betong vil føre til skader som avskalling og delaminering, eller i verste fall kollaps av strukturen. I forskning på å øke betongens fasthet og bestandighet ble Ultra-High Performance Concrete (UHPC) utviklet [2]. Denne type betong har vist bemerkelsesverdig duktilitet, bestandighet og styrkeegenskaper i laboratorietester. Dette vil medføre at betongkonstruksjoner får lenger levetid og gir dermed også økonomisk gevinst. Likevel er det knyttet spørsmål til hvordan materialet vil oppføre seg i praksis. På bakgrunn av dette har flere aktører i byggeindustrien startet et omfattende nasjonalt kompetanseprosjekt for å studere det nye materialets egenskaper.



Figur 1.1: Korrosjonsskade på betongkonstruksjon. Privat foto

Opgavens opprinnelse stammer fra et forslag om tema til masteroppgave presentert av Universitetet i Agder (UiA). Universitetet har siden UHPC ble kjent i Norge, vist stort engasjement for byggematerialet, og har tidlig vært involvert i forskningsprosjekter knyttet til betongens egenskaper. Med interesse for økt kunnskap rundt UHPC sin bestandighet i praksis, ble en problemstilling formulert rundt temaet korrosjon. Armeringskorrosjon gir store økonomiske konsekvenser [3] på grunn av høye reparasjonskostnader [4], og UHPC sin korrosjonsmotstand er lite forsket på.

Det skal i denne oppgaven gjennomføres en casestudie av et fullskala forsøk på UHPC. Her analyseres faktorer som betongens overdekning og rissvidde, og hvordan dette påvirker inntrenging av aggressive stoffer som kan medføre armeringskorrosjon. Testobjektene skal eksponeres i to miljøer; i skvalpesonen og nedsenket på sjøbunnen. Et regelverk for UHPC er under utvikling og derfor benyttes standardene til standard betong som referanse. Testobjekter av UHPC blir altså sammenlignet med tilsvarende objekter i standard betong. For å undersøke korrosjonstilstanden, blir det utført en elektrokjemisk impedansspektroskopi (EIS). Dette er en ikke-destruktiv test som er rask, svært pålitelig og forårsaker mindre strukturell skade under utførelse [5]. Videre skal kloridinnholdet som er potensielt trengt inn i betongen måles. Basert på usikkerheter knyttet til bruken av UHPC, er følgende problemområde formulert:

*Hvor god bestandighet har UHPC i praksis med tanke på beskyttelse av armeringskorrosjon?*

## 2 Samfunnsperspektiv

Byggematerialet betong kan spores helt tilbake til 5600 år f.kr, hvor funn av sementlignende bindemiddel, laget av kalksement, ble benyttet i et gulv. Siden den gang har betongteknologien utviklet seg betraktelig, og betong er blitt det viktigste byggematerialet i byggeindustrien verden over [6]. Tradisjonelt sett skal betong med optimal bestandighet, ha gode forutsetninger og være et nærmest evigvarende og vedlikeholdsfritt materiale. Dette har i senere tid vist seg å ikke alltid være tilfelle. Store vedlikeholdskostnader har blitt påført byggebransjen som en konsekvens av armeringskorrosjon [7].

Betong ble i utgangspunktet sett på som et holdbart materiale som trengte lite reparasjon gjennom levetiden. Hypotesen er riktig, bortsett fra når omgivelsene rundt betongen er svært aggressive og utover ytelsesnivået. I kystområder oppstår de vanligste formene for nedbrytning ; avising og armeringskorrosjon [8]. Allerede rundt 90-tallet ble det satt i gang tiltak for å endre de bestandighetsstyrende parameterne for å kunne gi konstruksjonene lengre levetid. En av de største tiltakene var å øke krav til overdekning, noe som førte til betydelig økning i tverrsnitt og dermed egenvekt [9]. I den forbindelse har det oppstått en interesse for å utvikle betongteknologien og finne nye løsninger til et mer fleksibelt betongmateriale.

Et moderne samfunns infrastruktur er avhengig av betong til blant annet bygninger, bruer, kaier, tunneler, dammer og oljeplattformer [1]. Bare i byggebransjen er 85% av de totale kostnadene, knyttet til en bygning, driftskostnader gjennom hele levetiden [3]. I løpet av 15-20 år har det vært et økende antall rapporteringer om redusert bæreevne og sikkerhetsmarginer i bygningskonstruksjoner. I år 2000 ble det estimert en vedlikeholdskostnad på nesten to milliarder kroner, hvor armeringskorrosjon var en vesentlig årsak. Behovet for rehabilitering, reparasjon og vedlikehold er like omfattende i Norge som for resten av verden [10].

UHPC er et nytt betongmateriale utviklet de senere årene. UiA var blant de første i Norge som begynte å forske på fiberbetongen. Med sin tette mikrostruktur, kan dette være svaret på problemene knyttet til armeringskorrosjon i standard betong. Flere har de siste årene fått øynene opp for dette materialet, og det er nå mange flere som deltar i kompetansekappløpet.

De unike egenskapene som gjør UHPC til et tiltalende byggemateriale er høy tetthet og betydelig økt trykk- og strekkfasthet. Det gir også arkitekter mer designfleksibilitet og ingeniører mer frihet [11]. Fibrene bidrar til økt styrke i betongen, noe som tillater slankere konstruksjoner samt redusert armeringsmengde. Dette medfører muligheten for mer kostnadseffektive løsninger på tross av økt forbruk av sement sammenlignet med konvensjonelle konstruksjoner. Studier viser også at betongen kan bidra til god bærekraft da det er mindre behov for vedlikehold under dens lange levetid [9].

## 3 Teoribakgrunn

### 3.1 Betong

#### 3.1.1 Standard betong, SV-40

SV-40 betong er en type «Vegvesenbetong» som samsvarer med bestandighetsklassen MF40. Ettersom betongkonstruksjoner i marint miljø i Norge er utsatt for eksponeringsklassene XS2, XS3 og XF4 vil kun bestandighetsklasse MF40 være aktuell. For nedsenkede konstruksjoner kan kravet til frostbestandighet i mange sammenhenger utelukkes og bestandighetsklasse M40 vurderes [12]. Denne bestandighetsklassen henviser til at betongen er frostsikker, ved at den tilsettes luftinnførende tilsetningsstoff, og har en øvre grenseverdi for v/c-forhold på 0,40 [13]. SV-40 har fasthetsklasse B45, med en forventet trykkfasthet på 45 MPa og en bøyestrekfasthet på 3-5 MPa etter 28 døgn [14]. Betongen brukes vanligvis til industrielle formål, deriblant veidekker, parkeringsanlegg og konstruksjoner i marint miljø [15]. Kvaliteten vil være avhengig av sementlimets styrke og reduseres med økende vanninnhold [16].

#### 3.1.2 Ultra-High Performance Concrete

UHPC er et sementbasert komposittmateriale som først og fremst inneholder sement, fiber og finfiller. I fersk tilstand er betongen seig og kompakt på grunn av sitt lave v/b-forhold, som ligger på maksimalt 0,25 [17]. En tettpakket mikrostruktur fører til at kapillærporene, som kan oppstå i betong med v/b-forhold over 0,40, fjernes. I motsetning til standard betong vil dermed UHPC ikke absorbere vann og utvikle riss under krevende frysing og tining [18]. UHPC vil med sin lave porøsitet ha svært høy bestandighet og en trykkfasthet på 150-200 MPa [19]. Andre forskjeller mellom UHPC og standard betong er mengde bindemiddel, størrelse på tilslaget og tilsetning av fiberarmering [17]. Det finnes ulike typer fiberarmering avhengig av konstruksjonens formål. Noen fibre skal forsterke seigheten til betongen og redusere rissvidden, mens andre skal redusere plastisk svinn, eller unngå oppsvulming av betongen ved økt temperatur, som følge av brann [20]. Innhold av fiber i UHPC bidrar til at materialet har en forventet bøyestrekfasthet på 7-15 MPa [21]. Komposittmaterialet vil ofte være tilsatt større mengder superplastiserende og pozzolane tilsetningsstoffer, for å øke støpeligheten til blandingen [17].

### 3.2 Miljø og bestandighet

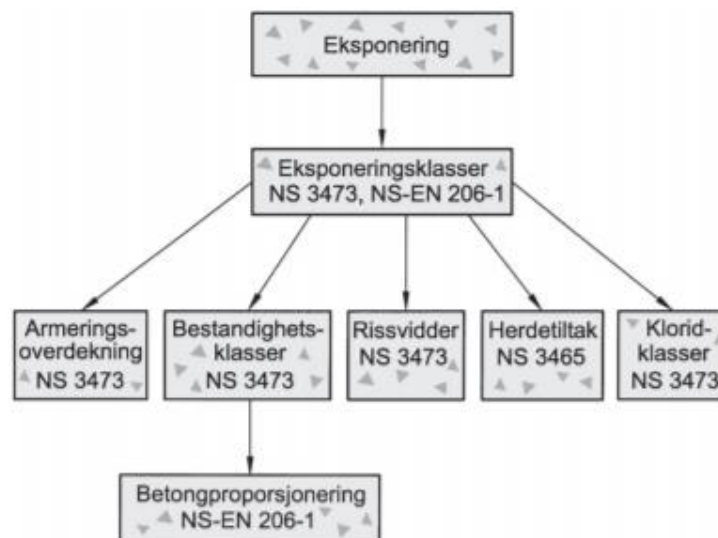
Betongkonstruksjoners levetid påvirkes i stor grad av miljømessige påkjenninger, og slike faktorer kan ha store variasjoner i art og styrke. Eksempler kan være temperatur, nedbør, vind, luftforurensninger, gasser og kjemikalier, salter og relativ luftfuktighet. Dette gjør at det er essensielt å dimensjonere betongkonstruksjoner etter ønsket formål og miljøklasse. Konstruksjonsstandarden NS 3473 deler miljøpåvirkningene inn i fire ulike klasser [22]. Disse miljøklassene vises i tabell 3.1 med en grov fordeling av ulike konstruksjonstyper ut fra miljøbelastning.

Tabell 3.1: Oversikt over de ulike miljøklassene [22]

Miljøklasse	Konstruksjonstype
<b>Særlig/svært aggressivt miljø (SA)</b>	Konstruksjoner utsatt for sterke kjemiske angrep
<b>Meget aggressivt miljø (MA)</b>	Konstruksjoner i saltvann og konstruksjoner utsatt for salting, sjøsprøyt, mildere kjemiske angrep og frysing i våt tilstand
<b>Noe aggressivt miljø (NA)</b>	Konstruksjoner utendørs og i fuktig miljø innendørs
<b>Lite aggressivt miljø (LA)</b>	Konstruksjoner innendørs

Miljøpåvirkning på betongkonstruksjoner blir klassifisert i eksponeringsklasser ut fra nedbrytningsmekanismer som betongen og dens armering utsettes for. Nedbrytningsmekanismer på betong er korrosjon på armeringen på grunn av karbonatisering og/eller klorider, fryse- eller tineangrep og kjemiske angrep [23].

NS 3473 og nasjonalt tillegg (NA) til NS-EN 206-1 presenterer til sammen 20 eksponeringsklasser i åtte grupper, som vedlagt i vedlegg 1. Klassene henviser til bestemmelse av bestandighetsklasse og krav til overdekning, rissvidde og herdetiltak. En betongkonstruksjon kan være utsatt for flere ulike miljøpåkjenninger og vil dermed inngå i flere eksponeringsklasser [23]. Eksponeringens verdi ved prosjektering av bestandige betongkonstruksjoner, vises i figur 3.1.



Figur 3.1: Skjematisk fremstilling av hvordan krav til eksponeringsklasser og tiltak for å oppnå bestandige betongkonstruksjoner omtales i standardene [23]

For at betongkonstruksjoner skal tåle de miljøpåkjenningene de utsettes for, må betongsammensetningen tilfredsstillende gitte krav. Bestandighetsklassene styres av eksponeringsklasser, der den strengeste klassen er gjeldende [23]. En oversikt over alle eksponeringsklassene og de tilhørende laveste bestandighetsklassene, største masseforhold og laveste bindemiddelmengde, ligger vedlagt i vedlegg 2.



Betongoverdekning og betongkvalitet er avgjørende for en konstruksjons bestandighet med tanke på armeringskorrosjon [24]. Krav til armeringens betongoverdekning er avhengig av konstruksjonens eksponeringsklasse og dimensjonerende levetid, som er gitt i NS 3473 [23]. Det vil også være viktig at overdekningen tilpasses tilslaget i betongen, slik at det oppnås tilfredsstillende utstøping og komprimering. Overdekningen må være tilstrekkelig nok til at grove tilslag ikke kiler seg fast mellom forskaling og armering [24]. Konstruksjonsstandarden NS 3473 stiller bestemte krav for minste tillatte overdekning [22].

Formlene for beregning av tilstrekkelig overdekning er vist i (3.1), (3.2) og (3.3), hentet fra Eurokode 2 (EC2) [4.4.1.1] [14].

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev} \quad (3.1)$$

$$C_{min} = \max \{ C_{min,b}; C_{min,dur} + \Delta C_{dur,y} - \Delta C_{dur,st} - \Delta C_{dur,add}; 10 \text{ mm} \} \quad (3.2)$$

Der [14]:

$C_{min,b}$	minste overdekning som følge av kravene til heft, angitt i tabell 4.2
$C_{min,dur}$	minste overdekning som følge av miljøpåvirkning, angitt i tabell 4.4N
$\Delta C_{dur,y}$	tillegg for sikkerhet, og anbefalt verdi for Norge er 0 mm.
$\Delta C_{dur,st}$	reduksjon ved bruk av rustfritt stål, anbefalt verdi er 0 mm med mindre noe annet er angitt.
$\Delta C_{dur,add}$	reduksjon ved bruk av tilleggsbeskyttelse, anbefalt verdi er 0 mm med mindre noe annet er angitt.

$$\Delta C_{dev} = 10 \text{ mm} \quad (3.3)$$

$\Delta C_{dev}$  er et tillegg som legges til overdekning i prosjekteringen for å ta hensyn til eventuelle avvik. Verdien som brukes i de ulike land er oppgitt i det nasjonale tillegget. For Norge er den anbefalte verdien 10 mm [14].

### 3.2.1 Aggressive miljø

Betong er et bestandig materiale som kan stå imot belastningene i et til dels aggressivt miljø. Tabell 3.1 viser en oversikt over de ulike miljøklassene en betongkonstruksjon kan være utsatt for. Konstruksjoner som er eksponert for sjøvann, frysing i våt tilstand, salting eller kjemiske angrep vil være utsatt for et meget eller svært aggressivt miljø. Betongkonstruksjoner svært nær sjøen vil være eksponert for store kloridpåkjenninger, og kloridinitiert armeringskorrosjon er i et marint miljø den desidert største skademekanismen. Andre nedbrytingsmekanismer for betong i et slikt miljø er armeringskorrosjon, som følge av karbonatisering av betongen og nedbryting på grunn av frostsprengning, alkalireaksjoner og inntrenging av magnesium og sulfater. Slik nedbryting vil redusere kvaliteten på armeringsoverdekningen og bidra til redusert levetid [12].

NB publikasjon 35 henviser til at det er særlig viktig at betongkonstruksjoner i marint miljø prosjekteres robuste med hensyn til kraftige påkjenninger. Dette innebærer robusthet med tanke på bæreevne og variasjon i laster, utførelse og bestandighet. Robusthet med tanke på bæreevne og variasjon i laster

kan blant annet innebære at stål- og betongspenningene ikke utnyttes maksimalt. Det vil ha positiv innvirkning på rissvidder og dermed også betongkonstruksjonens bestandighet. Robusthet med tanke på utførelse og bestandighet er i mange tilfeller nært knyttet. Ettersom mange betongkonstruksjoner i marint miljø bygges i værharde områder, vil det være optimalt at deler av konstruksjonen kan prefabrikeres under gunstige forhold. Klorider på støpeformer og armering før støping kan med dette unngås [12].

Kloridpåkjenningen på en konstruksjon vil kunne reduseres ved at den heves så høyt over sjøen som det praktisk og økonomisk lar seg gjøre. Det vil være gunstig at så få søyler som mulig står i sjøen. Samtidig bør søylene være runde eller ha avrundede tverrsnitt for å få minst miljøpåkjenning lokalt og fordi det oftest er lettere å utføre støpingen på en god måte [12]. For konstruksjoner helt nedsenket på sjøbunnen er porene fylt opp med vann og diffusjonskoeffisienten for oksygen er lav, sammenlignet med elementer som er delvis nedsenket i sjøvann. Konstruksjoner over eller nær sjølinjen utsettes for en alvorlig kombinasjon av kloridkonsentrasjon, oksygen og elektrolyttkonduktivitet som vil fremme korrosjon. For marine konstruksjoner kan tidevann og sjøsprøyt forlenge eller forverre disse alvorlige forholdene over større deler av strukturen. Stadig ny kunnskap bekrefter at korrosjonsskader vanligvis inntreffer over sjølinjen [25].

Flere tester for å vurdere betongens bestandighetsegenskaper, ved hjelp av måling av elektrisk motstand, har vist at det er relativt stor sammenheng mellom elektrisk motstand og kloriddiffusivitet for herdet betong. I praksis har det derimot vist seg at det er vanskeligere å finne en tilstrekkelig sammenheng i tidlig alder, ettersom prøving av kloriddiffusivitet tar tid og at betongens bestandighetsegenskaper er under utvikling. Korrosjonshastigheten reduseres med økt elektrisk motstand og bidrar til senere synlige skader i form av opprissing, på grunn av lenger initieringstid [12].

### 3.3 Permeabilitet

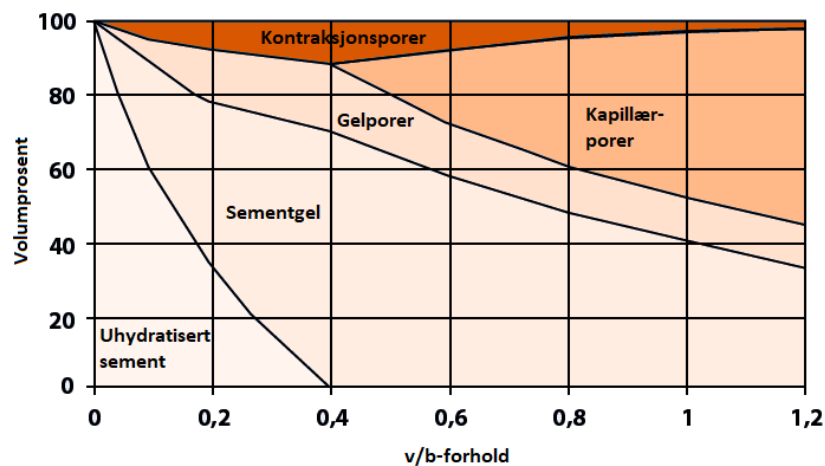
Permeabilitet betyr gjennomtrengelighet og er den viktigste materialegenskapen for betongens bestandighet. Egenskapen er et mål på hvor lett betongen gjennomstrømmes av en væske eller gass, og vil blant annet være avhengig av materialets porøsitet og rissdannelse. Ettersom betong er et porøst materiale, vil det alltid inneholde noen porer og riss, og vil være områder hvor gjennomstrømning finner sted [26].

Sement er et hydraulisk bindemiddel og vil i kontakt med vann innlede en kjemisk reaksjon, som resulterer i et fast reaksjonsprodukt. Reaksjonen kalles hydratisering. I denne prosessen vil det dannes gelporer som vil være fylt med vann fra begynnelsen av [24]. Samtidig vil det dannes løskrystaller av kalsiumhydroksid ( $Ca(OH)_2$ ), også kalt portlanditt. Portlanditt gjør betongen svært basisk [27]. Vann og sement forbrukes på to ulike måter, og det vil være nødvendig med et v/b-forhold på 0,40 for å oppnå 100% hydratisering. 0,25 av vannet vil forbrukes i hydratiseringsprosessen og blir kjemisk bundet. Videre vil 0,15 være fysisk bundet til overflaten av reaksjonsproduktene. Dette legger seg som vann i gelporene og kalles golvann [24].

Under herding av sement kan det oppstå forholdsvis store porer etter fordamping av vann. Disse porene kalles kapillærporer og er tusen ganger større enn gelporer. Materialet må minimum ha et v/b-forhold på 0,40 for at kapillærporer skal dannes. I figur 3.2 vises det at andelen slike porer vil øke med

økende v/b-forhold. Det vil også dannes kontraksjonsporer som er et resultat av at reaksjonen mellom sement og vann gir et mindre volum enn summen av volumet til reaktantene. Luftporer er en annen type pore som kan dannes, og er et resultat av dårlig komprimering under støping. Økt porøsitet i betongen vil være uheldig for strukturens fasthet og tetthet [24].

Et v/b-forhold på mindre enn 0,40 vil også forårsake porer i betongen, men hovedsakelig kun gelporer og en minimal mengde kontraksjonsporer. Porene vil være for små til at transport av væsker og gasser kan finne sted [24]. Samtidig vil det være gunstig med en viss mengde luftinnhold, for at betongkonstruksjonen skal klare seg i høye temperaturer og i verste fall brann. Rask temperaturøkning kan gi fare for avskalling av betongen, og frigjøring av damptrykk gjennom porer, er nødvendig for at konstruksjonen ikke skal få andre fysiske skader [11, 28].



Figur 3.2: Fordeling mellom porer og fast stoff i herdet betong, med varierende v/b-forhold [24]

### 3.3.1 Transportmekanismer

Væsker eller gasser kan transporteres inn i betongen med de to transportmekanismene kapillærabsorpsjon og diffusjon. Kapillærabsorpsjon går ut på at væsker som er i kontakt med betong, som har et ikke-vannmettet kapillærporesystem, vil bli transportert inn i materialet [26]. Dette kommer av adhesjonskrefter mellom væsken og poreoverflaten, som påvirkes av vannets overflatespenninger, porediameter og kontaktvinkelen mellom vannet og poreoverflaten [29]. Diffusjon av væsker eller gasser er forårsaket av konsentrasjonsforskjeller. Molekylenes og ionenes bevegelse fører til at væsker og gasser vil forflyttes fra et område med høyere konsentrasjon, til et område med lavere konsentrasjon. Diffusjon går oftest saktere enn kapillærabsorpsjon [26]. Samtidig er diffusjon en funksjon av tid, noe som fører til at den vil avta med tiden [30].

## 3.4 Armeringskorrosjon

Armeringens effekt på betong er blant annet økt styrke og duktilitet gjennom binding og forankring. Dersom armeringen, betongen, eller en kombinasjon blir brutt ned, kan effekten reduseres. Konstruksjonens bestandighet påvirkes av betongens evne til å motstå kjemiske og fysiske påvirkninger, og evnen til å beskytte armeringen [31]. Eksisterende konstruksjoner i dag blir stadig forverret med tiden på grunn av armeringskorrosjon, og konsekvenser av dette er redusert

lastkapasitet, bestandighet og levetid [32]. Korrosjon fører blant annet til sprekker, avskalling og delaminering av armeringen, og kan påføre strukturell svikt [33]. Armeringskorrosjon er en lang prosess som normalt forårsakes av karbonatisering og kloridinntrenging [34], og blir i de fleste tilfeller oppdaget før katastrofale konsekvenser inntreffer [22].

### 3.4.1 Armering

Armering blir tilført i betongen for å kunne oppta strekkrefter, da betong er et lite duktilt materiale. Armeringen reduserer oppsprekking i betongen grunnet skjærkrefter og bidrar til at konstruksjonsdimensjonene kan bli mindre. Det er hovedsakelig tre forhold som gjør komposittmaterialet gunstig; heftforbindelse, temperaturutvidelse og betongens evne til å beskytte armeringen mot korrosjon [22].

I bruksfasen overføres krefter mellom betongen og armeringen. Begge materialene kan følge hverandre i ulike formasjoner og deformasjoner. Heftoverføring bidrar til at dette er mulig, og krefter ledes fra overflaten av armeringsjernet og ut i betongen. God heft skyldes sement som limer seg rundt armeringen. Betongen trekker seg i tillegg sammen under herdefasen, og klemmer fast rundt jernet. Armering produseres av kamstål med kammer eller knaster for å gi bedre heft, slik at jernet ikke kan bevege seg. Temperaturutvidelseskoeffisienten for både armering og betong er tilnærmet lik, som vil si at begge materialene utvides og krympes omtrent likt ved en temperaturendring. Det vil derfor oppstå minimale spenninger mellom betongen og armeringen, dersom temperaturen øker eller reduseres [22]. I betongkonstruksjoner ligger armeringen godt innstøpt med god overdekning, og er derfor vanligvis beskyttet mot korrosjonsskader. Dette er på grunn av betongens tetthet som hindrer aggressive stoffer i å trenge inn til jernet, men også betongens høye alkaliske miljø vil hindre armeringen i å korrodere [35].

### 3.4.2 Beskyttelse av armeringsstålet – passivering

En herdet betong vil inneholde store mengder  $Ca(OH)_2$ , som delvis vil løse seg i vann. Betongens porevann vil dermed inneholde basiske hydroksylioner ( $OH^-$ -ioner), noe som gir et svært alkalisk miljø, og betongen får en pH-verdi på rundt 12-13 [4]. Metall korroderer i surt miljø, men ettersom alkalisk er det motsatte av surhet, beskyttes dermed armeringen mot korrosjon. I tillegg dannes lettløselig natriumhydroksid ( $NaOH$ ) og kaliumhydroksid ( $KOH$ ) i betongen, forårsaket av sement som inneholder alkalier, natrium og kalium. Dette bidrar til ytterligere økning i pH-verdi, og betongen kan oppnå et svært basisk miljø med verdier opp mot 14 [30].

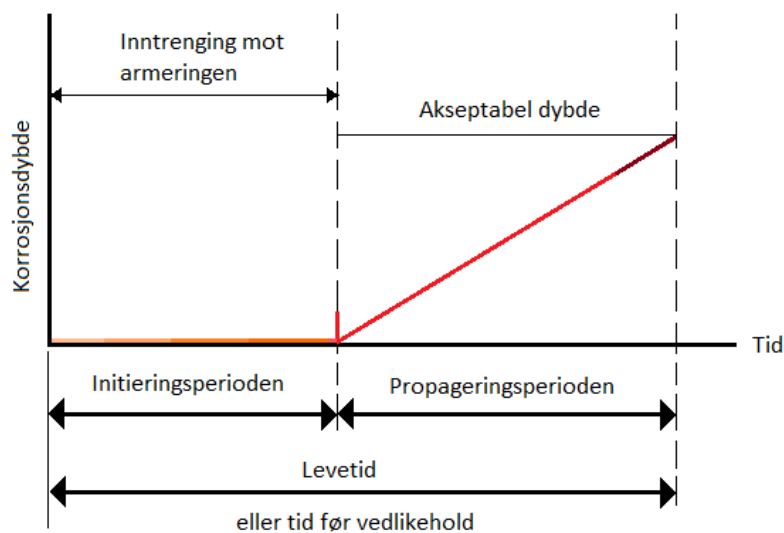
Betongens basiske miljø vil danne et beskyttende lag rundt armeringsjernet [36]. Dette kalles for passivfilm og omtales som passivering [34]. Passivering oppstår når jernet ligger i et miljø med pH-verdi over 11,5 og det samtidig kommer i kontakt med oksygen. Armeringen reagerer med oksygenet og det beskyttende laget dannes på jernoverflaten [37]. Mekanismen oppstår som en elektrokjemisk reaksjon mellom jern, vann og oksygen [34]. Passivfilmen er kun få nanometer tykk og fungerer som en beskyttende barriere mot kjemiske skader på armeringen [38]. Passivfilmen vil vedlikeholdes av elektrokjemiske reaksjoner, så lenge porevannet rundt armeringen er basisk uten oppløste kloridsalter [34].

### 3.4.3 Korrosjonsforløpet – depassivering og aktiv korrosjon

Dersom passivfilmen blir ødelagt, vil depassivering forekomme. Dette kan blant annet oppstå som følge av at pH-verdien til porevannet i kontakt med jernet reduseres til omtrent 8-9. Reduksjonen er et resultat av karbonatisering. Filmen kan også skades dersom porevannet som kommer i kontakt med armeringen inneholder oppløste klorider over en viss terskelverdi [39]. Jernet blottlegges når passivfilmen ødelegges. Når dette skjer, blir armeringen utsatt for aktiv korrosjon. Hastigheten på korrosjonen er betydelig høyere sammenlignet med reaksjonen for passivering [34].

Levetiden til betongen kan deles opp i to faser, initieringsperioden og propageringsperioden [40]. Initieringsperioden er første fasen i korrosjonsutviklingen og er forløpet frem til depassivering [34]. Armeringen er fortsatt passiv, men stoffer som kan føre til reduksjon av passivitet kan trenge inn i betongen [37]. Initieringsperiodens lengde er avhengig av blant annet initieringshastigheten, betongens evne til å binde stoffer, overdekning og nødvendig konsentrasjon av stoffer som kan depassivere jernet [41].

I det tidspunktet aggressive stoffer har depassivert armeringen, vil aktiv korrosjon oppstå [34]. Da starter propageringsperioden, og den slutter ikke før den betingede tilstanden for korrosjon er oppstått. Ytterligere korrosjon kan ikke aksepteres. Korrosjonshastigheten er faktoren som påvirker tiden fra korrosjon har begynt å utvikle seg, til den minste akseptable korrosjonstilstanden for den enkelte konstruksjon [38]. Tuutti's modell, som vist i figur 3.3, illustrerer denne korrosjonsprosessen i grove trekk sammenlignet med realiteten. Modellen viser at i initieringsperioden vil korrosjonshastigheten være lik null. I praksis vil derimot en lav hastighet være til stede, samtidig som hastigheten ikke vil være konstant i propageringsperioden [41].



Figur 3.3: Illustrasjon av korrosjonsprosessen i betong [41]

### 3.4.4 Armeringskorrosjon – en elektrokjemisk reaksjon

Armeringskorrosjon består av anodiske og katodiske halvcellereaksjoner og er en elektrokjemisk reaksjon [30]. I området rundt anoden vil korrosjonsproduktet rust oppstå og begynne å bli synlig på jernoverflaten [4]. Denne korrosjonsprosessen avhenger av tilførsel av oksygen og vann, og kan oppsummeres med følgende reaksjon [38]:

*Jern + oksygen + vann → korrosjonsprodukt*

Metallet tæres opp ved anoden, og jern ( $Fe$ ) blir fjernet fra armeringen. Videre vil det korrodere og oppløses som jernholdige ioner ( $Fe^{2+}$ ). Oppløsningen vil oppstå i det begrensede området med vannløsning som forekommer i porene rundt armeringen [37]. De elektrokjemiske reaksjonene er prinsipielt like for dannelse av passivfilm og aktiv korrosjon. Både for dannelse av passivfilm og korrosjonsprodukter, oppstår det flere jern(III)oksider ( $Fe_2O_3$ ) og jernhydroksider ( $Fe(OH)_2$ ) [34]. Halvcellereaksjonene beskrives i formlene (3.4) og (3.5) [39]:

**Anodereaksjon** (oksidasjon av jern):

*Armeringsjern → jernioner + elektroner*

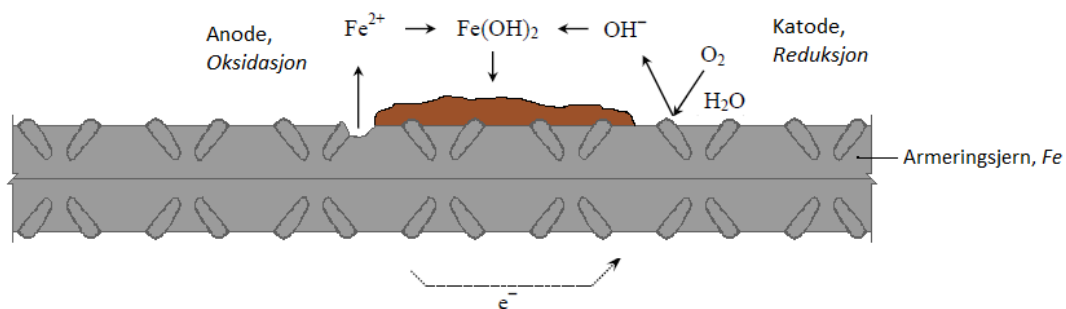


**Katodereaksjon** (reduksjon av jern):

*Oksygen + vann + elektroner → hydroksylioner*

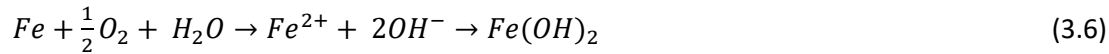


For å bevare den elektriske nøytraliteten, må de to elektronene som frigjøres i en anodereaksjon (3.4) konsumeres andre steder, da store mengder elektrisk ladning ikke kan bygge seg opp på ett sted. Det medfører at elektronene må forbrukes i en annen reaksjon og resulterer i en katodereaksjon (3.5) [4]. Her vil elektronene forbrukes i en reduksjonsprosess ved katoden, og medfører dannelse av  $OH^{-}$ -ioner [42]. Korrosjonsprosessen er illustrert i figur 3.4.

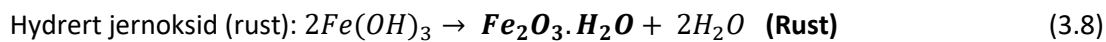
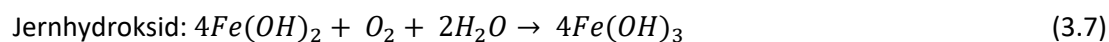


Figur 3.4: Skjematisk illustrasjon av halvcellereaksjonene ved korrosjon. Omarbeidet fra figur i [39]

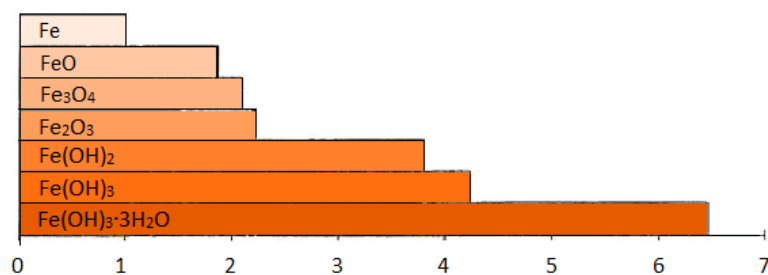
Rust dannes ved at  $Fe^{2+}$ -ioner reagerer med  $OH^-$ -ioner og oppløste oksygenmolekyl ( $O_2$ ) [37]. Ulike varianter av rust eksisterer og er avhengig av pH-verdi, fuktinnhold og oksygentilførsel [39]. Rust oppstår etter flere prosesser, og første trinnet for å skape rust skjer som følge av totalreaksjonen av anoden og katoden [42]. Dette er vist som følge av reaksjonen (3.6) [34].



Produktet av totalreaksjonen  $Fe(OH)_2$  er et fast stoff som legger seg i et tett lag på armeringsoverflaten ved aktiv korrosjon [34]. Kun oppløste  $Fe$  i porevannet vil føre til at det ikke oppstår sprekker og avskalling av betongen. Flere reaksjoner som vist i (3.7) og (3.8) må oppstå for at rust dannes [42].



Den mest kjente og synligste varianten for armeringskorrosjon er  $Fe_2O_3$  og kjennetegnes som rustrød i fargen [34]. Uhydrert  $Fe_2O_3$  vil ha et volum omtrent dobbelt av armeringsjernet når det er helt tett [37]. Når det tilføres fuktighet, vil det svulme betraktelig mer og bli porøst [42]. På grunn av det utvidede volumet vil produktet spre seg til de tilgjengelige porene i betongen [36]. Ulike varianter av korrosjonsproduktet forekommer i ulike volumer, og er illustrert i figur 3.5.

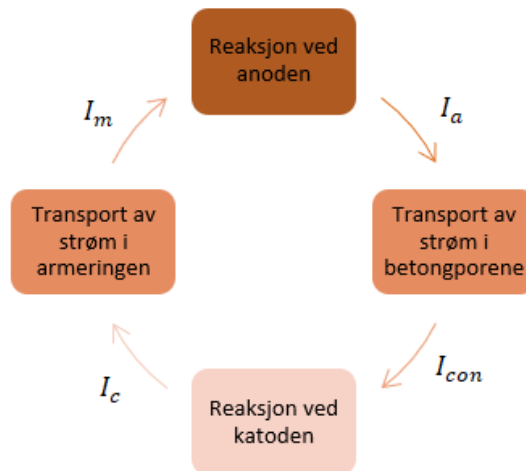


Figur 3.5: Korrosjonsprodukt og deres relative volum i forhold til armeringsjernet [39]

Uten eksterne kilder til elektroner, vil elektronene som produseres i (3.4) bli konsumert i reaksjon (3.5). Her må oksidasjons- og reduksjonshastigheten være like store [37]. Korrosjonsprosessen kan bli sett på som en elektrisk krets bestående av fire deler: anode, katode, ionisk leder (porevann) og elektrisk leder (armering) [39]. Reaksjonene utfyller hverandre og er illustrert i figur 3.6. Det medfører at den anodiske strømmen  $I_a$  (antall elektroner frigjort), den katodiske strømmen  $I_c$  (antall elektroner som konsumeres), strømmen som flyter i armeringen fra anoden til katoden,  $I_m$ , og strømmen som transporteres i betongen via porevannet,  $I_{con}$ , må være like. Korrosjonshastigheten bestemmes dermed fra den tregeste [38].

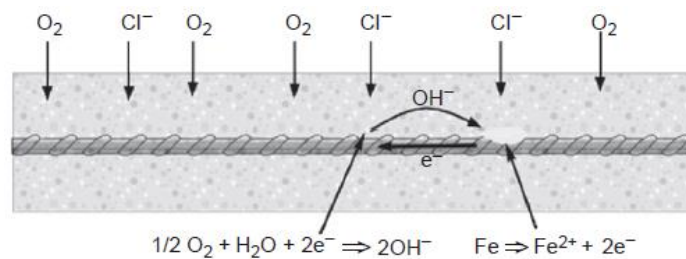
Fellesverdien for alle strømmene er som følger av (3.9). Korrosjonsstrømmen ( $I_{corr}$ ) er graden på den generelle korrosjonsprosessen [38]. Strømmene drives av potensialforskjeller mellom anoden og katoden [39].

$$I_a = I_c = I_m = I_{con} = I_{corr} \quad (3.9)$$



Figur 3.6: Illustrasjon av korrosjonsprosessen [38]

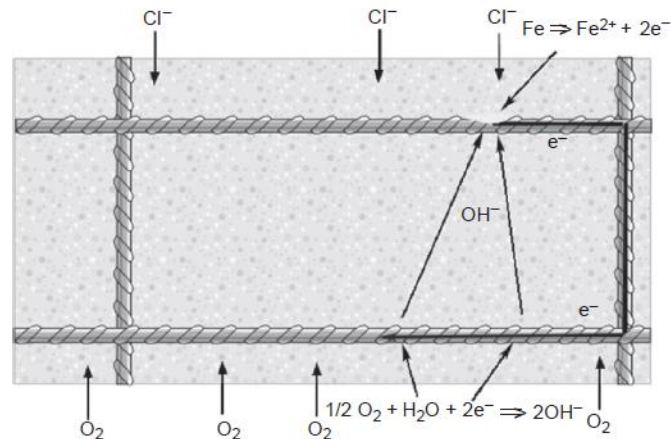
Mikrocellekorrosjon betegnes som en situasjon hvor aktiv oppløsning, anoden, og den tilsvarende katodiske halvcellereaksjon, finner sted på samme del av armeringsjernet. For et armeringsjern i betong oppstår denne prosessen alltid i praksis. Overflaten på det korroderende jernet har funksjon som en elektrode, da den har både en anode og katode [30]. Prinsippet for mikrocellekorrosjon er vist i figur 3.7.



Figur 3.7: Illustrasjon av prinsippet bak mikrocellekorrosjon [30]

Den anodiske og katodiske prosessen kan i tillegg forekomme på separate områder på armeringens overflate. Dette fører til makrocellekorrosjon [38], og kan oppstå der en aktiv korroderende armering er i kontakt med en passiv armering. Den aktive korrosjonen skiller da fra den passive katoden [39]. Dette fenomenet er en følge av ulike sammensetninger og miljøer i forskjellige deler av betongen. Figur 3.8 viser prinsippet for makrocellekorrosjon [30]. Potensialforskjeller mellom to armeringsjern kan resultere i at det passive jernet akselererer korrosjonen på det aktive jernet [39]. Makrocellekorrosjon kan også forekomme på en enkeltstang som er utsatt for ulike miljø innad i betongen, eller der stangen stikker ut av konstruksjonen. Prosessen blir lik for begge tilfeller [30].

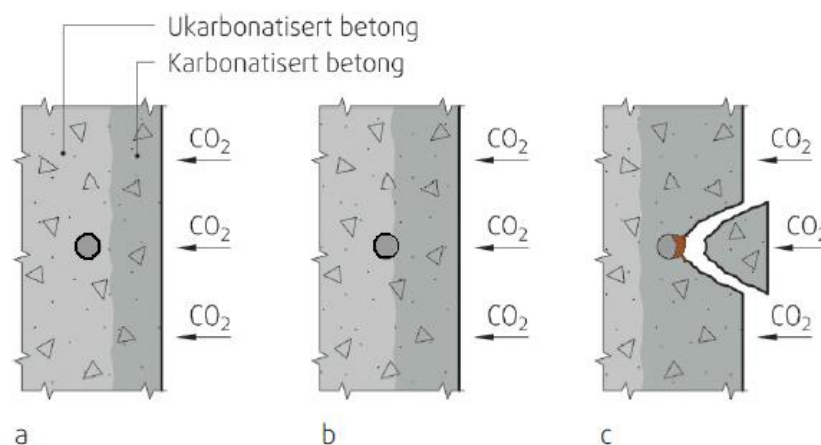




Figur 3.8: Illustrasjon av prinsippet bak makrocellekorrosjon [30]

### 3.4.5 Karbonatisering

Karbonatisering er en kjemisk prosess som forårsakes av at karbondioksidgass ( $CO_2$ ) fra atmosfæren trenger seg inn i betongen [34, 42]. Betegnelsen karbonatisering kommer av at  $CO_2$  omdannes til karbonat ( $CO_3^{2-}$ ) og videre reagerer med kalsiumioner ( $Ca^{2+}$ ) oppløst i porevannet. Dette danner det tungløselige stoffet kalsiumkarbonat ( $CaCO_3$ ). Prosessen starter ved betongens overflate og trenger seg gradvis inn mot armeringen [37]. Dette oppstår vanligvis i fuktig miljø der karbondioksid danner en syreholdig løsning som kan reagere med hydratisert sementpasta. Karbonatiseringen vil bidra til at betongen blir tettere og sterkere, men den kjemiske reaksjonen vil i tillegg skape en lav pH-front, som vil bidra til at det alkaliske miljøet i betongen nøytraliseres. pH-verdien reduseres til under 8 og vil gjøre betongen mer sårbar for armeringskorrosjon [22, 38]. Figur 3.9 illustrerer prinsippet for karbonatisering i betong.



Figur 3.9: Skjematisk illustrasjon av karbonatisering:

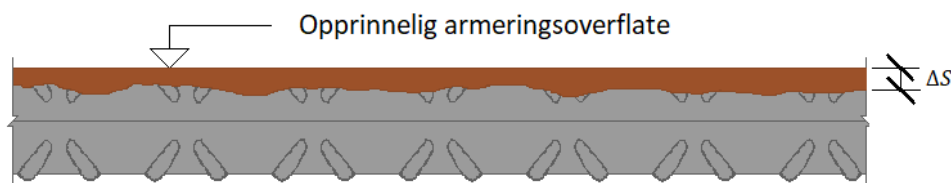
a) begynnende karbonatisering, b) karbonatiseringsfronten har nådd frem til armeringen, c) aktiv korrosjon som har ført til sprekkdannelse og avskalling av betongen. Omarbeidet fra figur i [34]

De alkaliske stoffene i betongen finner sted i poreløsningen, men også som hydratiseringsproduktene  $Ca(OH)_2$  og kalsiumsilikathydrat ( $CSH$ ) i fast form.  $Ca(OH)_2$  vil der kunne reagere med  $CO_2$  [38], og reaksjonen danner følgende uttrykk gitt i (3.10) og (3.11) [37].



Karbonatiseringen forløper i et tynt grensesjikt som kalles karbonatiseringsfronten [22]. Sjøkket skiller mellom karbonatisert og ikke-karbonatisert betong, og kan påvises i ferdigstilte konstruerte modeller. Den vil gradvis bevege seg innover i betongen, men hastigheten vil avta jo lenger inn den kommer [34]. Denne stadig reduserte hastigheten påvirkes av tre faktorer. Først må gassene trenge lenger inn i betongen, deretter vil betongen fortsette å hydratisere og bli mindre permeabel, og til sist vil permeabiliteten bli redusert videre som følge av karbonatiseringen. Redusert permeabilitet forekommer av at betongen feller ut karbonat i de eksisterende porene og karbonatiseringsprosessen frigjør vann. Dette fører til økt hydrering [30]. Karbonatiseringsfronten vil ikke bevege seg konstant innover i betongens tverrsnitt, men mer ujevnt, grunnet ulik porøsitet og eksponeringsforhold.

På grunn av pH-verdien, vil armeringen ligge i et alkalisk miljø helt til karbonatiseringsfronten har trengt inn til jernet. I det fronten treffer armeringen, er ikke jernet lenger beskyttet mot korrosjon [22]. Korrosjonen fører til fullstendig oppløsning av passivfilmen [37]. Dette resulterer i jevn nedbryting, som medfører jevn tykkelsesreduksjon [43]. Denne typen form for korrosjon kalles generell korrosjon, og illustreres på figur 3.10.



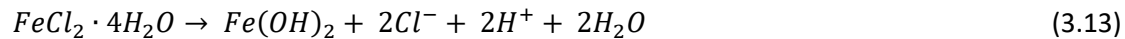
Figur 3.10: Illustrasjon av generell korrosjon på armeringsstål. Omarbeidet fra figur i [43]

### 3.4.6 Kloridinitiert armeringskorrosjon

Når kloridsalter oppløses i vann og kommer i kontakt med betongoverflaten, kan det trenge videre inn og skape en kloridinitiert korrosjon. Saltene kommer primært fra to kilder; sjøvann og veisalt. Det er stort innhold av natriumklorid ( $NaCl$ ) i sjøvann, mens veisalt inneholder kalsiumklorid ( $CaCl_2$ ), og begge saltene er løselig i vann [34]. Andre kloridinnblandinger kan forekomme fra forurenset vann, tilsetningsstoffer med kloridinnhold eller dårlig rensed tilslag [42].

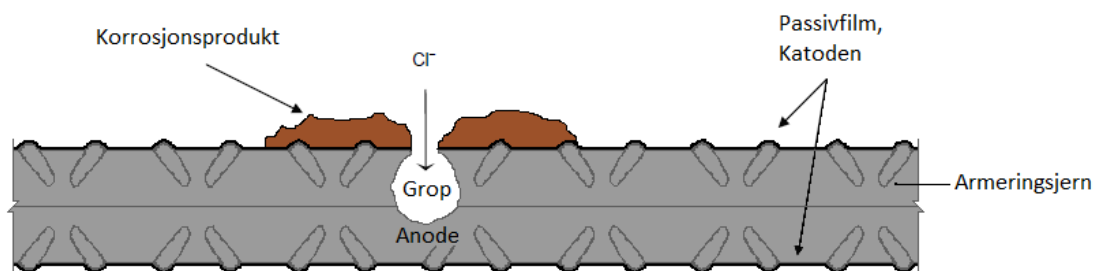
Sammenlignet med karbonatisering er kloridinntrengende korrosjon mer komplisert å bekjempe [34]. Det er som oftest konstruksjoner utsatt i marint miljø, samt moderne infrastrukturer slik som kaier, bruer og parkeringshus, som får korrosjon forårsaket av klorider [38]. Kloridangrep bidrar ikke til å redusere pH-verdien, men angriper passivfilmen som ligger rundt armeringen. Ettersom kloridioner ( $Cl^-$ ) ikke forbrukes i korrosjonsprosessen, vil det resultere i en raskere prosess når nedbrytningen av jernet fortsetter [37]. Hovedproblemet med kloridinitiert korrosjon er at kloridsaltene forårsaker svært kraftige, lokale korrosjonsangrep [34]. Reaksjonen kan uttrykkes fra (3.12) og (3.13) [37].





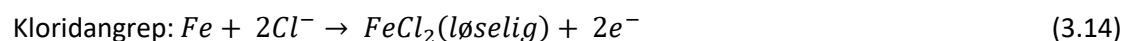
Korrosjon forårsaket av klorider oppstår som lokale sammenbrudd, ved å angripe på begrensede områder, som omringes av ikke-korroderende områder [38]. Når terskelverdien for kloridioner er forbigått, vil oksidfilmen brytes ned, og det oppstår en «utgraving» på jernoverflaten der filmen er skadet. Dette medfører dannelse av gropen i armeringen og kalles pittingkorrosjon eller groptæring [34]. Det lokale angrepet oppstår vanligvis der en elektrokjemisk potensialforskjell i armeringen tiltrekker ioner [37, 38].

Kloridionene binder seg til armeringsjernet og reagerer med passivfilmen. Ionene bytter plass med  $OH^-$ -ionene [34]. Området uten beskyttelse vil oppføre seg som anoder, eller en aktiv sone, mens de passive områdene rundt kalles katode. Her vil oksygenreduksjon oppstå [38]. Hydrogenioner ( $H^+$ -ioner) blir dannet i gropen som et produkt av vann og kloridioner. Kloridioner i kontakt med  $H^+$ -ioner i gropen, vil danne saltsyre ( $HCl$ ) og føre til et surt miljø. Jernet vil oksidere som følge av det sure miljøet, og videre reduksjon av armeringens tverrsnitt oppstår som følge av svært høy korrosjonshastighet i gropen [34]. Større områder med korrosjon på armeringen oppstår kun ved høye verdier av klorider eller redusert pH-verdi. Først da kan man kategorisere korrosjonen som generell korrosjon [38]. En skematisk illustrasjon av pittingkorrosjon er vist i figur 3.11. Etter hvert vil gropene øke i antall, utvide seg, og noen kan slå seg sammen [42].



Figur 3.11: Skematisk illustrasjon av kloridinitiert pittingkorrosjon på armeringsjern i betong. Omarbeidet fra figur i [39]

To konkurrerende anodereaksjoner oppstår når passivfilmen brytes ned. Klorider vil videre kunne bryte ned armeringen, mens  $OH^-$  vil reparere. Reaksjonene blir som følger (3.14) og (3.15) [34].



Ved høy klorid-hydroksylkonsentrasjon ( $Cl^- / OH^-$ ) i porevannet rundt armeringsjernet vil kloridangrepene oppstå hyppigere. Dersom forholdet er lavt nok kan jernet likevel repassiveres slik at aktive korrosjoner blir hindret i å starte [34].

Kritisk kloridinnhold er den nødvendige terskelverdien for kloridkonsentrasjon som må oppnås for å initiere pittingkorrosjon. Mange faktorer påvirker terskelverdien, slik som pH-verdien til betongen. Denne avhenger hovedsakelig av sementtype og tilsetningsstoff som blir anvendt. Andre faktorer er

sementens kloridbindingsegenskap, jernets elektrokjemiske potensial, samt forekomst av hulrom i grensesjiktet mellom armering og betong [34]. Det elektrokjemiske potensialet er relatert til oksygentilgjengeligheten ved armeringsoverflaten og fukt i betongen. Lav permeabilitet i betongen fører til høyere terskelverdi [38].

Inntrenging av klorider kan oppstå ved de to transportmekanismene kapillærabsorpsjon og diffusjon. Absorbering av klorholdig vann i overflaten av betongen er hovedsakelig den vanligste måten inntrengingen forekommer. En konsekvens av dette er at betongen blir utsatt for syklisk fukting og uttørking. Dette fører til høyt kloridopptak. Kloridene som har trengt inn i betongen forblir også med uttørking. I motsetning til ved karbonatisering, dannes det ikke en front for kloriddiffusjon, men det dannes en konsentrasjonsprofil [34]. Konsentrasjonen av klorider avtar gradvis innover i betongen, og er dermed størst ved overflaten [38]. Diffusjonsmekanismen fører til at kloridene trenger langsomt inn mot områder med lavere konsentrasjon [34].

Kloridene i betongen kan være både oppløste som frie klorider i en poreløsning, eller være bundet kjemisk til sementpastaen [30]. Klorider bundet til sementpastaen, fører ikke til direkte korrosjonsrisiko, men kan danne faste og tungløselige kloridforbindelser som felles ut når trikalsiumaluminat ( $C_3A$ ) i sementpastaen hydratiserer og reagerer med kloridioner. Ettersom kloridbindeegenskapene til sement avhenger av pH-verdien, kan bundne klorider løses opp og føre til korrosjon ved pH-reduksjon. Karbonatisering kan også medvirke til denne reduksjonen [34].

### 3.4.7 Faktorer som påvirker armeringskorrosjon i betong

Ulike faktorer som påvirker korrosjonshastigheten for armeringen i betong, er forklart i tabell 3.2 og kan beskrives fra (3.16) [39].

$$V_{corr} = f(T, F_{O_2}, RH, C_{Cl}, pH, \gamma, F_{galv}, F_{oxide}) \quad (3.16)$$

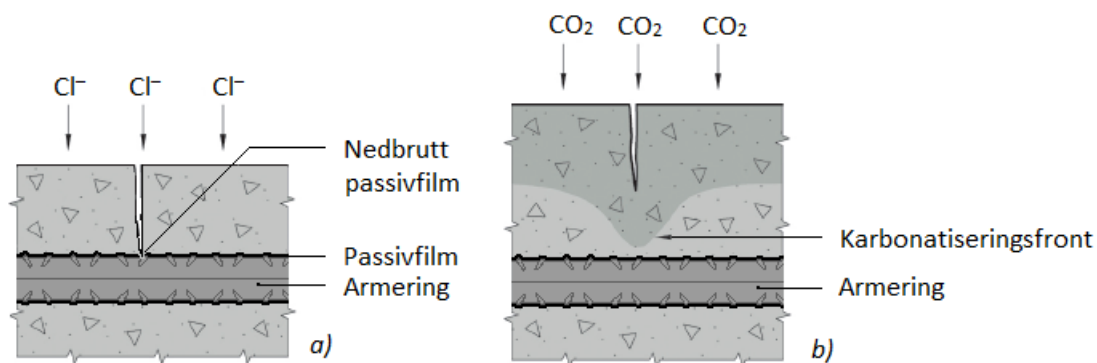
Tabell 3.2: Faktorer som påvirker korrosjonshastigheten av armeringsjern [39]

Faktor	Beskrivelse
$T$	temperatur
$F_{O_2}$	tilførselen av oksygen til poreløsningen ved katoden på ståloverflaten
$RH$	relativ luftfuktighet i betongporene (eller graden av porevannmetning)
$C_{Cl}$	konsentrasjonen av oppløste klorider
$pH$	alkalinitet, eller konsentrasjonen av OH-ioner i poreløsningen ved ståloverflaten
$\gamma$	betongens elektriske motstand
$F_{galv}$	galvaniske interaksjoner mellom forskjellige deler av stålarmeringen
$F_{oxide}$	effekten av dannelsen av oksid (rust) på korrosjonshastigheten

Riss vil bidra til å øke angrepsarealet i betongen, samtidig som de forkorter avstanden inn til armeringsjernet for de aggressive stoffene som trenger inn [24]. Diffusjonskoeffisienten for ikke-oppsprukket betong vil derfor være lavere enn for oppsprukket betong [44]. Ved fuktbevegelse vil kloridioner transporteres raskere inn i rissene, og de bruker bare noen timer på å nå inn til armeringen

[36]. Riss vil alltid oppstå og er tillatt så lenge de er innenfor kravet gitt i NS 3473, se tabell 3.3 i kapittel 3.5.4. Figur 3.12 illustrerer hvordan sprekker i betongen påvirker karbonatiseringsfronten og inntrenging av kloridioner.

Den geometriske formen på risset har også innvirkning på permeabiliteten [44]. Det vil si risstetthet, -svingning, -orientering [45] og -lengde [36]. Risstettheten øker med belastningsnivået. Videre vil riss vinkelrett på armeringen gir et mer begrenset eksponeringsområde, sammenlignet med parallelle riss [39]. Vinkelrette riss kommer hovedsakelig i den plastiske fasen, mens parallelle vanligvis oppstår fra påvirkning på herdet betong [41]. Rissene kan ofte forekomme som mer kronglete enn rette riss, og de fører til økt rissfrekvens som en konsekvens av dannelse av rissforgreninger og bruer [44, 46].



Figur 3.12: Påvirkning av riss ved a) inntrenging av klorider og b) karbonatiseringsfronten. Omarbeidet fra figur i [34]

Når vann trenger inn i de åpne rissene, kan betong som inneholder uhydrert sement reparere risset ved rehydratisering. Fenomenet omtales som selvkuring og oppstår så lenge sementen ikke er påvirket av kullsyreholdige stoffer i kontakt med fuktig luft [36]. Selvkuring påvirkes av flere parametere slik som rissvidde, type belastning, bindemiddeltype og eksponeringsmiljø [46]. Korrosjonsproduktet, som et resultat av selvkuring, vil kunne blokkere riss og porer slik at aggressive stoffer blir stengt ute [41].

Betongkvaliteten er avgjørende for korrosjonshastigheten. Parametere som påvirker betongen er elektrisk motstand ( $\Omega m$ ), permeabilitet [46] og oksygentilgang [34]. Høy elektrisk motstand gir lav korrosjonshastighet [38]. Motstanden påvirkes av betongens strukturelle oppbygging, porøsitet, fuktinnhold, temperatur og oppløste ioner i porevannet [47]. Høy porøsitet i betongen øker diffusjonskoeffisienten og betongens evne til å lede strøm [41, 44]. Lav elektrisk motstand fører til raskere inntrenging av kloridioner [39]. Transporten av vann og stoffer rundt armeringen påvirkes av porøsiteten [41]. Her vil kapillærporesystemet være den avgjørende faktoren ved inntrenging av klorider, karbondioksid, oksygen og fuktighet i betongen [30].

Korrosjonsdrivkraften, eller halvcellepotensialet, øker med reduserende pH-verdi [39]. Sementtype og -mengde har påvirkning på korrosjonsprosessen, hvor mer sement øker andel  $Ca(OH)_2$  og alkalier [38]. Ved høyere pH-verdi kreves det større konsentrasjoner for å bryte passivfilmen. En kontinuerlig dannelse og aldring av riss vil også påvirke korrosjonshastigheten [39].

Følgende faktorer innen miljøforhold bidrar til økt korrosjonshastighet [41]:

- Fuktighetsinnhold i betongen
- Miljøvariasjon
- Temperatur rundt korrosjonsområdene

Fuktighetsinnholdet i porene kan uttrykkes som relativ fuktighet og definerer mengden elektrolytt i et poresystem [41]. 95% relativ fuktighet medfører størst oppnåelig korrosjonshastighet. Betongen har da lav elektrisk motstand og oksygendiffusjon [38]. Vanninnholdet i porene er et resultat av at betongen eksponeres for vann med variasjoner i det lokale klimaet, slik som fuktighet, temperatur og vind [39]. En relativ fuktighet på under 90% gir en betong med høy elektrisk motstand og begrenset galvanisk effekt [41]. Diffusjon er en funksjon av temperatur [30], hvor økt temperatur medfører økt mobilitet hos molekylene. Dette tilrettelegger for transportering og løselighet for ulike stoffer i betongen [41].

### 3.5 Oppsprukket betongtverrsnitt

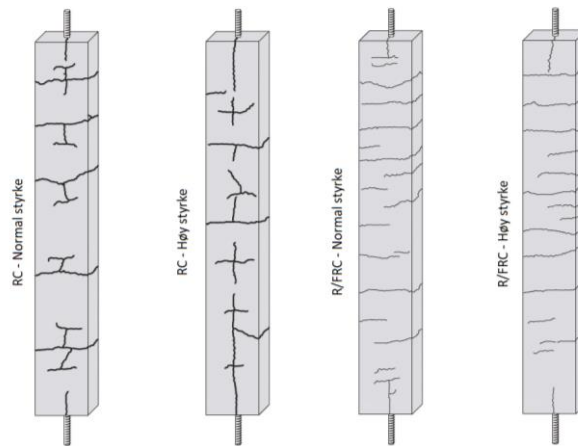
Betongkonstruksjoner har god styrke, stivhet og motstand mot deformasjon. Det vil til gjengjeld være mangel på fleksibilitet til bevegelse [48], og dermed minimal styrke til å ta opp strekkrefter [49]. Dette resulterer i dannelse av riss når betongens strekkapasitet er nådd [39]. Riss kan dannes i både fersk og herdet fase og vil påvirke strukturintegriteten, bestandigheten og konstruksjonens levetid [50]. Riss kan hovedsakelig oppstå av volumendringer i betongen, nedbrytning og brukslaster [51]. Overbelastning eller underdimensjonering vil også bidra til at betongkonstruksjonen påføres riss som er større enn risskravene, se risskrav i tabell 3.3 [49]. Årsaker til riss i plastisk og herdet fase er videre utdypet i forprosjektet [52].

#### 3.5.1 Fiberarmeringens påvirkning på rissvidden

Fibrenes primære effekt er å forbedre betongens oppførsel etter riss- og sprekkdannelse, og bidrar til økt duktilitet [20]. Etter at riss er dannet, vil fibre holde sementen sammen som en bru. Fibrene vil da få en lik funksjon som armeringen ved å oppta og overføre strekkreftene, og reduserer dermed rissvidden og skaden de kan påføre [53]. En lav prosentandel med fiber vil også bidra til å kontrollere riss som oppstår ved plastisk- og uttørkingssvinn, som følge av økt seighet i betongen. Legemer med fiber utsatt for strekkrefter, vil i tillegg få økt strekkavstivning, selv ved store deformasjoner. De tverrgående rissene, i forhold til armeringen, vil ligge tettere, og de langsgående rissene er nærmest ikke-eksisterende [54]. Slike typiske rissmønstre er illustrert på figur 3.13.

En av hovedgrunnene til at fibre bidrar til å redusere utvikling av riss, er evnen til god heftforbindelse mellom fiber og sementmørtelen, samt styrken til fibre. Det vil si at det eksisterer en bindemekanisme mellom de nevnte komponentene. Dette kan forklares ved at styrken som mobiliseres i fibre ved ulike spenningsnivåer, avhenger av trekkmotstanden til fibre i betongen og de mekaniske egenskapene fibre har. Denne bindemekanismen er et indirekte mål på fiberslipp, fiberforlengelse og fiberstyrke, og er knyttet til tre mekanismer; heftfasthet, friksjon og mekanisk forankring. Trekkmotstanden avhenger av lengden på fiberen og hvor mye av lengden som sitter i sementmørtelen etter oppsprekking, fiber aspektforhold, som er forholdet mellom fiberens lengde og diameter, og fiberorienteringen i forhold til lastretning. Fiberens tilfeldige orientering gir en

anisotropisk oppførsel til betongen. Når fibrene derimot orienteres i samme retning som spenningen i et bøyelegeme, vil fibrene bidra til ytterligere styrke, da de vil overbygge sprekkoverflaten og danne denne nevnte bruene som reduserer videre utvikling [55].



Figur 3.13: Typiske rissmønstre i standard betong og høyfast betong [54]

En studie utført av El-Din et al. [53] undersøker hvordan ulike fibervolumer i betongen påvirker dens egenskaper. Spenningen som fører til de første rissene, definerer maksimal bøyespenning for betongen. Forsøket viste at betongen uten stålfiber krevde en høyere bøyespenning sammenlignet med betongen med fiber. Forskjellen var derimot liten og kan bekrefte at fiberen har størst innvirkning etter første oppståtte riss. Studien viser også økt bøyestyrke ved økt volumprosent av fiber, noe som viser til en høyere duktilitet i betongen. Strekkfastheten hadde tilsvarende utvikling med økt strekkfasthet med økt fiberinnhold. Betongen fikk et mer duktilt brudd, sammenlignet med betong uten fiber som fikk et sprøtt brudd.

### 3.5.2 Krav til rissvidde

Definisjonen av skadelige riss for en betongkonstruksjon, vil avhenge av omstendighetene og kan dermed ikke fastsettes. De fleste undersøkelser konkluderer med at riss gir en negativ innvirkning på betongkonstruksjonens bestandighet, når rissene er større enn omtrent 0,3-0,4 mm og rekker inn til armeringsjernet. Det kan dermed være relevant å kategorisere skaden for et riss når det er større enn 0,4 mm. Kritisk rissvidde kan defineres som rissåpningen når ingen spenninger blir overført, og vil påvirkes av konstruksjonens funksjon og miljøet den utsettes for [51]. NS 3473 angir krav til rissvidder i konstruksjoner med forutsatte laster og mulige opptredende krefter. Kravet tar også hensyn til risikoen for armeringskorrosjon. Tabell 3.3 viser kravene for største aksepterte rissvidde og vil avhenge av miljøklassene, som er beskrevet i kapittel 3.2. Disse vil være gjeldene for kamstål med diameter 8-32 mm [56].

Tabell 3.3: Karakteristisk rissvidde, øvre grense [56]

Miljøklasse	Største tillatte rissvidde [mm]
SA	Vurderes særskilt
MA	0,2
NA	0,4
LA	–

### 3.6 Korrosjonsmåling

Korrosjonsmåling er en teknikk som benyttes for å skaffe informasjon om korrosjonsutviklingen i betong [57]. I løpet av de siste tiårene er det utviklet flere metoder for korrosjonsovervåking av betongkonstruksjoner. Metodene er kategorisert som destruktive eller ikke-destruktive tester, alle med ulik grad av kompleksitet og kostnad. De destruktive testene utføres ved hjelp av direkte måling og gir informasjon om den gjennomsnittlige korrosjonshastigheten. Ikke-destruktive tester gir muligheten til å måle mengden jern som er korrodert, ved bruk av instrumentelle metoder [58].

Destruktive tester krever utarbeidelse av en prøvetakingsplan på utvalgte steder, med en bestemt fremgangsmåte for gjennomføring [59]. Prøvetakingsplanen må inneholde definerte plasseringer og omfang av eventuelle prøveuttak [49], samtidig kontrollere for at ingen armeringsjern blir kuttet [59]. Prøveuttak er en mye brukt og svært pålitelig metode [57]. Det er spesielt viktig for armert betong å skaffe informasjon som er representativ for hele konstruksjonen, da materialet inneholder heterogeniteter både i struktur og eksponeringsmiljø. Et så stort bilde har ikke materialprøver kapasitet til, og de tilfredsstillende derfor ikke alle behovene ved korrosjonsmåling. Ved destruktive metoder er det dermed flere faktorer som må tas hensyn til, og det er en tidkrevende prosess. Det er derfor utviklet forskjellige instrumenter og metoder for ikke-destruktiv måling [43]. Slike metoder er designet for å gi raske og nøyaktige målinger av tilstanden til hele betongkonstruksjonen [60], samtidig som de ikke forårsaker skade på betongen ved påføringstidspunktet [61]. I tillegg kan de brukes både i laboratoriet og i felt [62].

Armeringskorrosjon i betong er som nevnt en elektrokjemisk prosess, og potensialet og strømmen på grunn av reduksjon og oksidasjon av jernet, kan derfor måles ved elektrokjemisk testing [8]. Det er utviklet forskjellige elektrokjemiske teknikker, hvor de mest brukte er å bestemme polariseringsmotstanden ( $R_p$ ) eller korrosjonsstrømtettheten ( $i_{corr}$ ) [39]. Målet er å oversette denne informasjonen til en korrosjonshastighet som beskriver korrosjonsmotstanden i betongen [63]. Alle teknikkene tvinger et potensial på arbeidselektroden (armeringen) for å måle den resulterende strømmen eller omvendt [8]. Elektrokjemisk impedansspektroskopi (EIS) er en elektrokjemisk metode som er effektiv for bruk i armert betong, og teknikken forklares nærmere i kapittel 3.6.1. Metoden tilegner rask og pålitelig informasjon om elektrisk motstand i betongen, sannsynligheten for korrosjon og korrosjonshastigheten [64].

Elektrokjemiske tester følger en grunnleggende modell av elektrodekinetikk assosiert med korrosjonsprosessen, for å kvantifisere korrosjonshastigheten [8]. Alle system består av flere elektroder og en elektrolytt [65]. Potensialet til arbeidselektroden kan ikke måles alene, da det kun er mulig å måle forskjellen mellom to elektroder, og det er derfor nødvendig med referanseelektrode [66]. Spenningsforskjellen vil indikere om armeringen er i et passivt miljø eller om den er utsatt for aktiv korrosjon [49]. Under utførelsen polariseres prøvene for å akselerere måleprosessen, og målingene gjøres i løpet av minutter [57]. Fordelene ved elektrokjemiske teknikker, er at målingene oppdager korrosjon som enda ikke har påført synlige skader på konstruksjonen. Teknikkene er enklere å utføre og de gir en kostnadseffektiv vurdering. Det eneste problemet er at resultatene kan være vanskeligere å tolke [49].



### 3.6.1 Elektrokjemisk impedansspektroskopi

Elektrokjemisk impedansspektroskopi (EIS) er en metode designet for å unngå ødeleggelse av betongkonstruksjoner, og brukes for å studere korrosjonen ved armeringsjernet [67]. Det er en ikke-destruktiv, rask test som anvender et vekslende signal med amplitude på 5 – 20 mV til en elektrode (armeringen) satt inn i en elektrolytt (betongen) [62, 68], for å estimere korrosjonsmotstanden [60]. Hvor raskt testen gjennomføres, avhenger av spenningsfrekvensen som påføres. Samtidig gjennomføres målingene over et bredt spekter av frekvenser, noe som medfører at frekvensavhengige responser kan karakteriseres riktig [69]. På denne måten kan den gi detaljert informasjon om mekanismen og kinetikken til elektrokjemiske reaksjoner [60]. I tillegg vil ikke metoden akselerere korrosjonsreaksjonen ved armeringen [63].

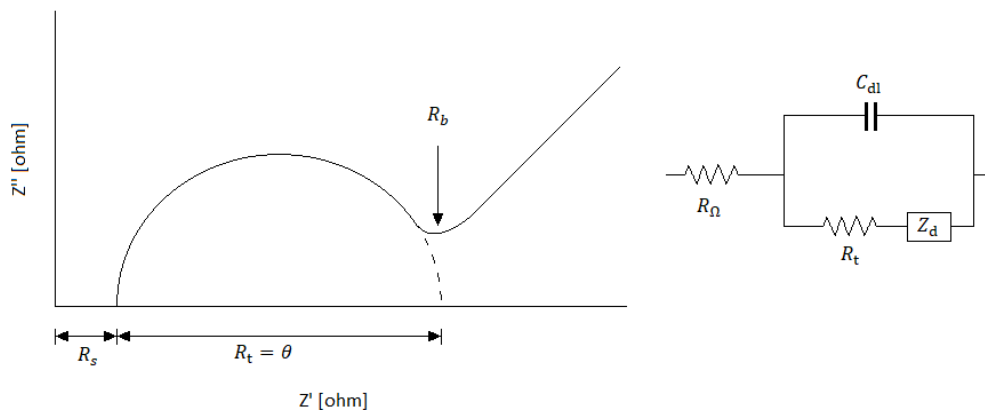
Frekvenser og vekselstrøm anvendes for å produsere forstyrrelsessignal på arbeidselektroden (armeringen). Dette medfører at korrosjonstilstanden kan bestemmes ved analysering av strømresponsen til spenningen eller frekvensen [67]. Målingene blir utført med et to-elektrodesystem, som eksponeres for samme type elektrolytt [70]. Den påførte forstyrrelsen og responsen fra elektroden sammenlignes ved å måle faseforskyvningen av strøm- og potensialkomponentene, samt amplituden. Dette kan gjennomføres i et tidsdomene eller i et frekvensdomene ved å bruke en spektrumanalysator eller frekvensresponsanalysator. Den første forstyrrelsen er et sinusformet forstyrrelsespotensial ( $\Delta E$ ), som må påføres under jevn tilstand i systemet. Elektrodesvaret er en sinusformet strøm ( $\Delta I$ ) med en faseforskjell ( $\varphi$ ) fra det påførte signalet [62]. Impedansen ( $Z$ ) representeres matematisk og måler forholdet mellom  $\Delta E$  og  $\Delta I$ , mens det er fasevinkelen som angir faseforskjellen [71].

Impedansen til en elektrisk krets er et mål på dens motstand mot et elektrisk signal (potensiale eller strøm) [62]. Det er en kombinasjon av passive elementer i en elektrisk krets; motstand, kapasitans og induktans [72]. Konseptet med EIS-teknikken er basert på et elektrokjemisk grensesnitt som finnes på overflaten av korroderende armeringsjern, og kan ses på som en kombinasjon av de nevnte passive elektriske kretselementene. Når en vekslende spenning påføres på elementene, kan resulterende strøm beregnes ved å bruke Ohms lov [8]. For komposittmaterialet kan flere parametere oppnås ved å bruke EIS-teknikken, slik som tilstedeværelsen av passivfilm, betongens egenskaper og grensesnittkorrosjon [62]. Metoden er godt egnet for materialer med lav ledningsevne, slik som betong, da den ikke gir systemforstyrrelser [73].

Målingene tolkes vanligvis ved å bruke en korrelasjon mellom impedansdataene og en ekvivalent krets, som representerer de fysiske prosessene som foregår i systemet. En graf over  $Z = Z' + Z''$  målt ved forskjellige frekvenser kalles et Nyquist-diagram, impedansdiagram eller impedansspektrum.  $Z'$  representerer den reelle (resistive) delen og  $Z''$  representerer den imaginære (reaktans) delen [62]. Resistivitet er et mål på motstanden som elektrisk strøm møter når den går gjennom et materiale. Den sier noe om de indre egenskapene ved en type materiale, som gjelder uansett form og størrelse [74]. Reaktansen er den delen av impedansen (vekselstrømmotstanden) som skyldes induktans og kapasitans. Den måles med SI-enheten ohm ( $\Omega$ ), på samme måte som impedans og resistans [75]. Induktans er en størrelse knyttet til elektriske kretser og representerer motstand mot at strømmen i kretsen endres. Den defineres som forholdet mellom induert spenning og endringen av strømstyrke per sekund [76]. Kapasitans er den evne et elektrisk, ledende legeme eller et system av ledere har til å

oppta elektrisk ladning. Den er definert som forholdet mellom legemets ladning og dets spenning i forhold til ledende omgivelser [77].

Nyquist-diagrammet består av en rekke punkter, som hver representerer størrelsen og retningen til impedansvektoren til en bestemt frekvens. Diagrammet er en sammensatt plan av karakteristiske koordinater, der x-aksen er den reelle delen og y-aksen er den imaginære delen [72]. Impedansdata representert på det karakteristiske planet, under et bredt spekter av frekvenser (vanlig fra  $10\text{kHz}$  til  $0,1\text{mHz}$ ), genererer typiske konfigurasjoner i henhold til de dominerende elektrokjemiske mekanismene som er til stede. Figur 3.14 viser et typisk Nyquist-diagram og dens ekvivalente krets. En av utfordringene med denne teknikken er karakterisering av armeringsjern i passiv tilstand. Ladningsoverføring langs armeringsjernet, som indikerer korrosjonsprosessen, er for dette tilfellet svært liten. Dette medfører at kapasitive halvsirkler for ladningsoverføringen blir dårlig utviklet, og påvirker datatolkningen negativt [62]. De kapasitive halvsirklene oppstår ved forskjellige frekvensområder. Ved høy frekvens vises betongens egenskaper, mens for lave frekvenser vil det bli gitt informasjon om forholdene til armeringen [78].



Figur 3.14: Nyquist-diagram og dens ekvivalente krets viser effekten av diffusjonsimpedansen [62]

I denne Randles-kretsen representerer  $R_{\Omega}$  motstanden til elektrolyttløsningen (betongen) [65] mellom referanseelektroden og arbeidselektroden (armeringen) [60].  $R_t$  og  $C_{dl}$  representerer motstanden og kapasitansen ved korrosjonsgrensesnittet (mellom elektroden og elektrolytten).  $C_{dl}$  er den doble elektriske sjikkkapasitansen som er resultatet av ioner og vannmolekyler absorbert. Dette som følge av potensialforskjellen mellom elektroden som er utsatt for korrosjon og elektrolytten [62]. Denne sjikkkapasitansen kan da være overflateaktiviteter, overflatehomogeniteter, ruhet eller geometri og elektrodeporøsitet [65].  $R_t$  er motstanden mot ladningsoverføring som bestemmer korrosjonsmotstanden for reaksjonen, og er et mål for elektrisk ladningsoverføring gjennom elektrodeoverflaten [62]. Elektrolytten blir i dette elektrokjemiske systemet betraktet som en relativ stabil komponent, og den elektrokjemiske reaksjonen oppstår kun på overflaten av elektroden [65].

Å plote den imaginære impedansen mot den reelle impedansen gir en halvsirkel [60], som illustrert på figur 3.14. Diameteren til halvsirkelen ekstrapolert i Nyquist-diagrammet representerer  $R_t$ , som tilsvarer polariseringsmotstanden ( $R_p$ ) for armeringsjernet. En stor diameter vil gi en høy  $R_p$ , og dermed en stor korrosjonsmotstand [72]. Halvsirkelen er forskjøvet fra opprinnelsen med en verdi lik  $R_s$ , som er seriemotstanden til elektroden [60].  $R_b$  representerer motstanden til sementmatrisen, og

er punktet der de to buene skjærer hverandre. Halvsirkelene som oppstår representerer henholdsvis elektroden og elektrolytten [62].

Fordeler med EIS-testen vil være som følger [62]:

- Den gir informasjon om korrosjonskinetikken
- Den er nøyaktig og reproducerbar som egner seg for motstandsdyktige miljø, slik som betong
- Den gir informasjon om den elektrokjemiske kontrollmekanismen, som forteller om korrosjon oppstår ved aktivering, konsentrasjon eller diffusjon
- Den kan kjennetegne armeringsjernet tilstand og korrosjonens morfologi
- Det er en ikke-destruktiv og ikke-forstyrrende test, fordi signalene som brukes er av liten amplitude, slik at korrosjonspotensialet ikke endres
- Den gir mulighet for overvåking av utviklingen av den passive eller aktive tilstanden til armeringen over tid

### 3.7 Kloridinnhold

Omtrent 40% av hovedkildene til svikt i betongkonstruksjoner er forårsaket av kloridangrep. Hovedeffekten av kloridangrep er korrosjon av armering, som fører til en drastisk reduksjon av konstruksjonens styrke. Slike angrep kan enten foregå fra innsiden av betongen eller gjennom inntrenging av klorider fra omgivelsene. Angrep fra innsiden kan forekomme ved bruk av kalsiumklorid i tilsetningsstoff, for å øke herdetiden, eller ved bruk av tilslag med høyt kloridinnhold. Inntrenging av klorider fra omgivelsene kan foregå hvis en betongkonstruksjon blir eksponert for sjøvann, eller ved bruk av veisalt for å smelte is [79].

Betongens motstand mot inntrenging av klorider, såkalt kloriddiffusivitet, påvirkes av v/c-forhold, sementtype, tilsetningsmaterialer, porøsitet, temperatur og konsentrasjon av klorid i miljøet. Betongkonstruksjonens påvirkning av klorider vil også være avhengig av konstruksjonens utforming og mikromiljø, som blant annet vind, nedbør og sol [12].

Det finnes flere metoder som kan forhindre virkningen av klorider på betongkonstruksjoner. Den enkleste metoden kan være å øke overdekningen, slik at kloridionene får lenger vei inn til armeringsjernet. Å øke overdekningen med en tomme kan øke levetiden til en struktur med det dobbelte [79]. Andre metoder for å redusere kloridinntrenging kan være å benytte rustfritt stål eller redusere permeabiliteten til betongen.

Det er grenseverdier for tillatt kloridinnhold i betong. Betongens anvendelsesområde stiller krav til kloridinnholdet i betongen, og de inndeles i forskjellige kloridklasser. Derav deles betongen inn i kloridklasser, som angir grenseverdier for tillatt kloridinnhold ut fra tiltenkt anvendelse, referert tabell 3.4. Kloridklassene betegnes med Cl, etterfulgt av et tall som beskriver maks antall klorider, som prosent av sementvekten [23].

Tabell 3.4: Krav til maksimalt kloridinnhold i betong sammenstilt fra NS 3473 [23]

Anvendelse	Kloridinnhold klasse	Største Cl <sup>-</sup> -innhold i forhold til sementmasse
Betongkonstruksjoner uten armeringsstål eller annet innstøpt metall, unntatt korrosjonsbestandige løfteanretninger	Cl 1,0	1,0 %
Betongkonstruksjoner med armeringsstål eller annet innstøpt metall	Cl 0,20 Cl 0,40	0,20 % 0,40 %
Betong, mørtel, sementlim som kommer i kontakt med spennstålarmoring	Cl 0,10	0,10 %
Betongkonstruksjoner med sulfatresistent sement	Cl 0,10	0,10 %
Betongkonstruksjoner i spesielt kloridrike miljøer, for eksempel utsatt for sjøvann eller tinesalt	Cl 0,10	0,10 %

### 3.7.1 Volhards metode

Titrimetri er en metode for kjemisk analyse som brukes til å bestemme mengde av et kjemisk stoff. Fremgangsmåten går ut på at stoffet overføres til en annen form ved hjelp av egnet reagens [80]. Volhard titrering er en indirekte metode for å bestemme kloridinnholdet. En kjent mengde sølvnitrat ( $AgNO_3$ ) blir tilsatt en prøveløsning, og overskuddet av sølvioner titreres tilbake med kjent indikator. Titranten som brukes er kaliumtiocyanat ( $KSCN$ ). Reaksjonen er vist i formel (3.17) [81]:



Jern(III)ioner virker som en indikator, den gir en rødfarget løsning med en gang det er overskudd av tiocyanat ( $Ag^+$  fra  $AgNO_3$  blir konsumert). Reaksjonen er vist i formel (3.18):



Kloridinnholdet kan bestemmes fra mengde tiocyanat som blir tatt opp når rødfargen oppstår. En syreløsning vil forhindre utfelling av jern(III), som er et hydrert oksid. Videre tilsettes benzylalkohol for å hindre  $AgCl$  i å løse seg opp, ettersom det er mer løselig enn  $AgSCN$  [81].

Titrimering er en metode som gir høy reproduserbarhet og nøyaktighet ved bestemmelse av kloridinnholdet, og må gjennomføres i laboratoriet. Under utførelse er det noen utfordringer som må tas hensyn til; nøyaktighet ved uttak av materialprøver, å oppnå en klar løsning uten partikler før måling og kalibrering mot kjente referanser [59].

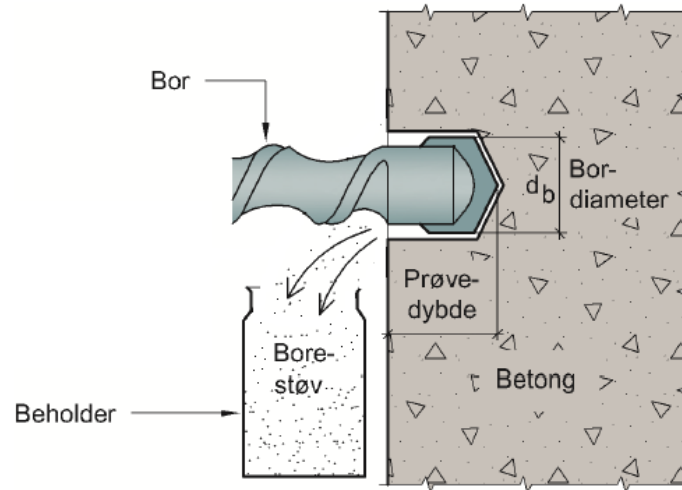
Masse kloridinnhold,  $m_{Cl}$ , beregnes fra formel (3.19-21).

$$n = C \times V \quad (3.19)$$

$$n_{Cl} = n_{Ag} - n_{KSCN} \quad (3.20)$$

$$m_{Cl} = Mm_{Cl} \times n_{Cl} \quad (3.21)$$

Uttak av prøvemateriale gjennomføres best med borhammer. Prøvene tas av det oppsamlede betongstøvet ved boring i konstruksjonen, se figur 3.15. Før prøvetaking vil det være lurt å gjøre vurderinger som; hvilket miljø konstruksjonen står i, flo/fjære, vindretning, kjørefelt og avdryping fra biler [59].



Figur 3.15: Prøveuttak av betongstøv med slagbor [59]

## 4 Forskerspørsmål

Fra formulert problemområde ble det i samarbeid med veileder utarbeidet følgende forskerspørsmål:

### ***Hvordan beskytter Ultra-High Performance Concrete (UHPC) mot armeringskorrosjon i praksis?***

For å kunne besvare denne problemstillingen er det flere temaer som bør diskuteres. Følgende underspørsmål settes for å kunne besvare forskerspørsmålet:

1. Hvordan vil ulike overdekninger påvirke UHPC sin evne til å motstå armeringskorrosjon?
2. Hvilken påvirkning vil ulike rissvidder ha på armeringen med hensyn på korrosjon i UHPC?
3. Hvordan vil ulike marine miljø påvirke armeringen med hensyn på korrosjon i UHPC?

### 4.1 Avgrensinger

For å konkretisere forskerspørsmålet og avgrense omfanget av oppgaven, er det satt følgende avgrensinger:

- Det er sett bort i fra å designe UHPC og SV-40 resept
- Det ses ikke på korrosjon av fiberarmeringen. Indre fiber vil bli beskyttet av betongens basiske miljø, mens de i ytterkanten vil korrodere i kontakt med fuktighet. Reaksjonsproduktet antas som neglisjerbart, med tanke på rissutvikling i dette forsøkets tidsrom.
- Det er sett bort ifra å ta hensyn til støpeorienteringen
- Det er ikke gjennomført tester av betong i fersk og herdet fase

## 5 Case

UiA var en av de første forskningsmiljøene i Norge som begynte å forske på det nye byggematerialet UHPC. Det har lenge vært stor skepsis rundt dette materialet, men det har i senere tid blitt mer omtalt. Det er nå mange som deltar i kompetansekappløpet, og flere store aktører har slått seg sammen for å starte et stort nasjonalt forskningsprosjekt på UHPC. Her er det mange interessante spørsmål, men et av hovedspørsmålene er knyttet til hvor god beskyttelse UHPC gir mot armeringskorrosjon. UHPC har vist seg å være overlegen i laboratorietester sammenlignet med standard betong, men en utfordring knyttet til dette, er at det er forskjell på testing i kunstige kontra naturlige omgivelser. I forbindelse med dette forskningsprosjektet skal det nå bygges et fullskala anlegg hvor konstruksjonene skal utsettes i et marint miljø over lengre tid. En sammenligningsstudie av UHPC og standard betong kan gi svarene.

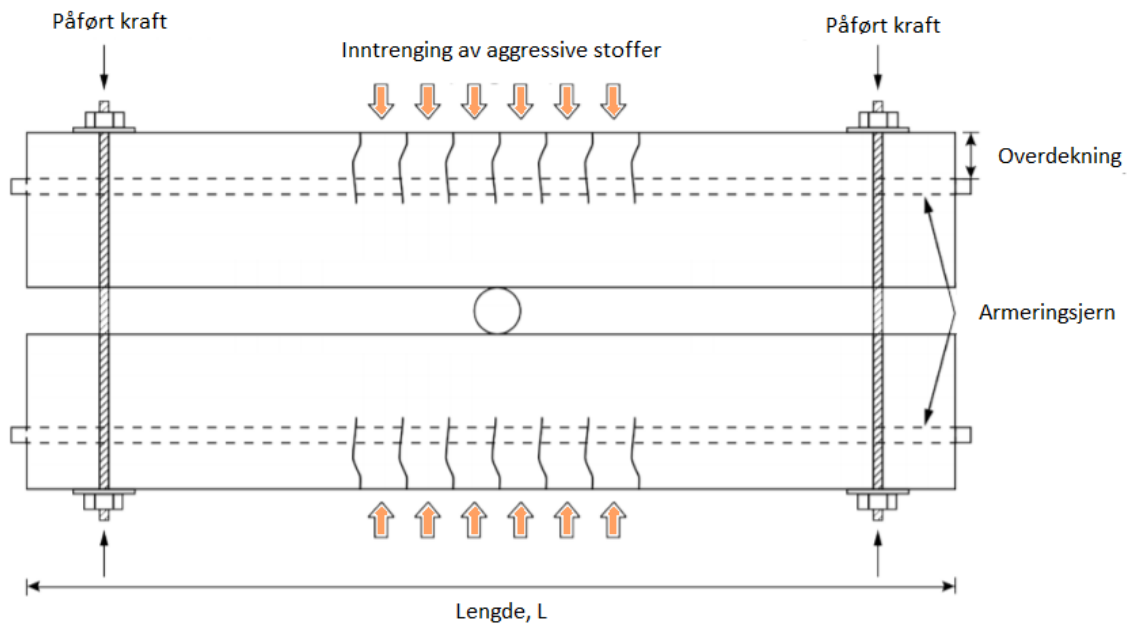
Gjennomførelse av prosjektet krever en grundig forståelse av problemet armeringskorrosjon. Det vil si hva det innebærer, hvordan det oppstår, hvilke faktorer som påvirker korrosjonsutviklingen, hvordan måle korrosjon og hvordan planlegge et forsøk for å utfordre materialene mest mulig. For å besvare spørsmålene ble det gjennomført et forprosjekt [52], hvor det ble utført en gjennomgang av tilgjengelig litteratur på armeringskorrosjon. Forprosjektet økte også kompetansen rundt UHPC og planleggingen av et forsøk på hvordan et fullskalaprojekt kunne utformes. Faktorene som ble fokusert på var blant annet miljøforhold, betongkvalitet og oppsett av testobjekt.

Denne oppgaven skal ta for seg et fullskala forsøk for å teste UHPC sin evne til å beskytte mot armeringskorrosjon. Et fullskala forsøk innebærer testobjekter i realistiske dimensjoner, med overdekning og rissvidde i henhold til kravene gitt i EC2 [14]. Ettersom det ikke er utviklet en standard for UHPC, vil dimensjoneringen ta utgangspunkt i standardene for standard betong. Det blir i tillegg produsert testobjekter i standard betong, for å sammenligne resultatene for UHPC mot Eurokoden. Betongen benyttet i forsøket ble levert av betongleverandører for å få et mer virkelighetsbasert forsøk. UHPC ble levert av Unicon AS i Larvik, og standard betong ble levert av Ribe Betong AS i Lillesand.

Testobjektet ble designet under forprosjektet [52]. I tidsrommet mellom forprosjekt og master ble det konstruert testobjekter i mindre skala med dimensjonene  $80 \times 60 \times 1400 \text{ mm}$ . Bjelkene inneholdt to armeringsjern på  $\varnothing 8$ . På disse bjelkene ble det undersøkt om det designede oppsettet hadde ønsket funksjon, at UHPC-bjelkene kunne risses opp for hånd og forbli opprisset under hele forsøket.

Det ønskes å risse opp testobjektene for å undersøke om UHPC virkelig er så bestandig som vist fra laboratorietester. I tillegg til testobjektene lages det referansebjelker uten riss for å sammenligne. Hvert testobjekt vil bestå av to bjelker som festes sammen på endene med et tvingesystem. En avstandsknast plasseres i midten av de to bjelkene. Det vil da oppstå riss i strekksonen når tvingesystemet strammes til på begge sider av bjelkene. Figur 5.1 illustrerer planlagt testoppsett. Testobjektene blir så plassert i to ulike miljø, der de skal ligge i 55 døgn før de blir hentet opp og skal testes for armeringskorrosjon. Korrosjonstesten som gjennomføres er EIS og kloridinnholdet måles ved Volhards metode. Begge metodene forklares i henholdsvis kapittel 3.6.1 og 3.7.1. Formålet med å undersøke kloridinnholdet er å observere om det er forskjellig innhold i SV-40 og UHPC, samtidig som det vil bli undersøkt om riss har påvirkning på konsentrasjonen.

På grunn av UHPC sine karakteristiske egenskaper, er betongen mye brukt i vei- og brukonstruksjoner; spesielt som bruoverbygninger, tilkobling av prefabrikerte elementer, forspente bruelementer og reparasjon og rehabilitering [21, 82]. Det vil derfor være aktuelt å teste materialet i de mest aggressive miljøene brukonstruksjoner blir utsatt for. Dette tilsvarer eksponeringsklassene skvalpesone,  $XS3$ , og sjøbunn,  $XS2$ , som vist i vedlegg 1. Slike miljø inngår i miljøklassene MA, gitt i NS 3473 vist i tabell 3.1. Ved dimensjonering beregnes overdekning fra formlene gitt i (3.1), (3.2) og (3.3), mens rissvidden følger kravene gitt i tabell 3.3.



Figur 5.1: Plantegning av designet testobjekt [52]

Fra litteraturstudien gjort i forprosjektet [52] er det vist at UHPC har en bedre beskyttelsesevne enn standard betong grunnet tettere mikrostruktur. Det vil derfor være interessant å teste om overdekningen kan reduseres ytterligere for UHPC. Standard betong vil ha overdekning på 50 mm og en rissvidde på 0,2 mm for å overholde kravet gitt i miljøklassen MA. Testobjektene i UHPC vil ha overdekning på 50, 40 og 30 mm. Videre skal det testes om UHPC tillater større rissviddekrav, ved å gradvis øke rissvidden med 0,2 mm. Testobjektene får da rissvidder på 0,2, 0,4, 0,6 og 0,8 mm for UHPC-bjelkene.

Det vil i tillegg være interessant å presentere en oversikt over temperaturforskjeller i løpet av døgnene testobjektene ligger i eksponeringsmiljøene. Dette for å observere om frysetemperatur kan påføre større belastning på bjelkene og føre til økt rissvidde. Sjøvann har et frysepunkt på omtrent  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  [83] og isen vil vokse omtrent en tidels millimeter per minusgrad per time [84]. I forsøksperioden vil det ikke være fare for at sjøvannstemperaturen fører til frysing, og testobjektene som ligger nedsenket på sjøbunnen vil derfor ikke være påvirket. Det vil derimot være gunstig å se utviklingen av lufttemperaturen i denne perioden, for å observere om testobjektene i skvalpesonen kan være utsatt.



Tabell 5.1 og 5.2 viser de planlagte konstruksjonene med definerte rissvidder og overdekning i de utvalgte eksponeringsmiljøene. Det skal i tillegg produseres to ekstra testobjekter, som skal ligge igjen for langtidseksponering i skvalpesonen. Bjelkene dette omhandler er omtalt som «Ekstra» i tabell 5.1.

Tabell 5.1: Planlagte testobjekter i skvalpesonen med ønsket rissvidde og overdekning

Skvalpesone, eksponeringsklasse XS3					
Antall	Betong	Grader	Overdekning	Rissvidde	Kommentar
2	UHPC	20	50	0,2	
2	UHPC	20	50	0,4	
2	UHPC	20	50	0,6	
2	UHPC	20	50	0,8	
2	SV-40	20	50	0,2	
2	UHPC	20	40	0,2	
2	UHPC	20	30	0,2	
1	UHPC	20	50	0	Referanse
1	SV-40	20	50	0	Referanse
2	UHPC	20	50	0,2	Ekstra
2	UHPC	20	40	0,2	Ekstra

Tabell 5.2: Planlagte testobjekter på sjøbunnen med ønsket rissvidde og overdekning

Sjøbunnen, eksponeringsklasse XS2					
Antall	Betong	Grader	Overdekning	Rissvidde	Kommentar
2	UHPC	20	50	0,2	
2	UHPC	20	50	0,4	
2	UHPC	20	50	0,6	
2	UHPC	20	50	0,8	
2	SV-40	20	50	0,2	
2	UHPC	20	40	0,2	
2	UHPC	20	30	0,2	
1	UHPC	20	50	0,2	Referanse
1	SV-40	20	50	0,2	Referanse

## 5.1 Betongresept

### 5.1.1 Standard betong, SV-40

Tabell 5.3 viser en oversikt over bestanddelene med tilhørende mengde, hentet fra betongresepten fra Ribe Betong AS, som er vedlagt i vedlegg 3.

Tabell 5.3: Bestanddeler for SV-40

Betongresept for standard betong			
Synkmål	200	v/(c+ks)-forhold	0,39
Materialer	Kg/m <sup>3</sup>		
Reddal 0-8 N	813,85		
Omre 2-8 K	173,49		
Omre 8-16 K	728,64		
Norcem STD.FA	412,92		
Silica	12,77		
Vann (*)	167,10		
Mapeair 25 1:19	1,28		
Dynamon SX-23	3,41		

**Sement:** I betongblandingen fra Ribe Betong AS ble det benyttet Norcem Standardsement FA produsert etter kravene gitt i NS-EN 197-1:2011 for Portlandsement CEM II/B-M 42,5 R [85]. Sementen er tilpasset norske forhold og egner seg godt for høye bestandighetsklasser. I tillegg yter den godt sammen med alkalireaktivt tilslag, men det totale alkali-innholdet må ikke overstige kravet.

**Tilslag:** Reddal Sand AS er leverandør av tilslaget og er en lokal produsent i Agder. Største kornstørrelse i betongresepten er 16 mm og det grove tilslaget deles i to fraksjoner; 2-8 og 8-16. Finkornet tilslag fra 0-8 mm leveres av Reddal Sand AS i Grimstad, mens det grove tilslaget leveres fra deres pukkverk på Omre.

**Filler:** Silikastøv er et pozzolant bindemiddel som benyttes i betongen for å øke dens mekaniske egenskaper samt redusere permeabiliteten. Det er et ultrafint pulver bestående av tilnærmet helt runde partikler med gjennomsnittlig diameter på 0,15 µm. Silikastøv er et biprodukt fra rensing av avgasser fra ferrosilisiumproduksjon [86].

**Tilsetningsstoff:** Luftporedannende tilsetningsstoff som ble benyttet for å gjøre betongen frostbestandig var Mapeair 25, produsert av Mapei og ga et luftinnhold på 4%. Stoffet er basert på syntetiske tensider og talloljederivater og bidrar også til å redusere separasjonsfare i betongen [87]. I tillegg ble det tilsatt superplastiserende stoff, Dynamon SX-23 også produsert av Mapei, for å øke støpeligheten. Produktet består av vannløselige modifiserte akrylpolymerer som effektivt dispergerer sementklaser [88].

### 5.1.2 Ultra-High Performance Concrete

Tabell 5.4 viser en oversikt over bestanddelene med tilhørende mengde, hentet fra betongresepten fra Unicon AS, som er vedlagt i vedlegg 4.

Tabell 5.4: Bestanddeler for UHPC

Betongresept for Ultra-High Performance Concrete			
Synkmål	200	v/c-forhold	0,22
Materialer		Kg/m <sup>3</sup>	
Aalborg Portland CEM 52,2 N		767	
Silikastøv k=1		152	
0-8 mm Skyggestein		1231	
ViscoCrete 6120		16,87	
MasterSet R 433 Retarder		3,83	
Kaldt vann		98	
Varmt vann		87	
Fiber		2%	

**Sement:** Rapid Aalborg sement benyttes i betongen fra Unicon AS og tilfredsstillende kravene for CEM I 52,5 N gitt i NS-EN 197-1:2011. Med et sulfatinnhold på under 8%, betegnes sementen som moderat sulfatbestandig, noe som er fordelaktig for UHPC på grunn av dens motstandsdyktighet mot sulfatangrep [89].

**Tilslag:** Fint tilslag av skyggestein på 0-8 mm benyttes i betongblandingen. Største kornstørrelse er dermed 8 mm.

**Filler:** Sammenlignet med SV-40-betongen benyttes det betraktelig større andel silikastøv. Silikastøv har ikke hydrauliske egenskaper i seg selv, men under gitte forhold reagerer det kjemisk og danner forbindelser med  $CaOH_2$  [24]. På grunn av lavt v/b-forhold vil ikke deler av støvet komme i kontakt med vann, men heller legge seg mellom tilslaget. Slik oppnås den kompakte mikrostrukturen som gir en høy bestandighet med lav permeabilitet.

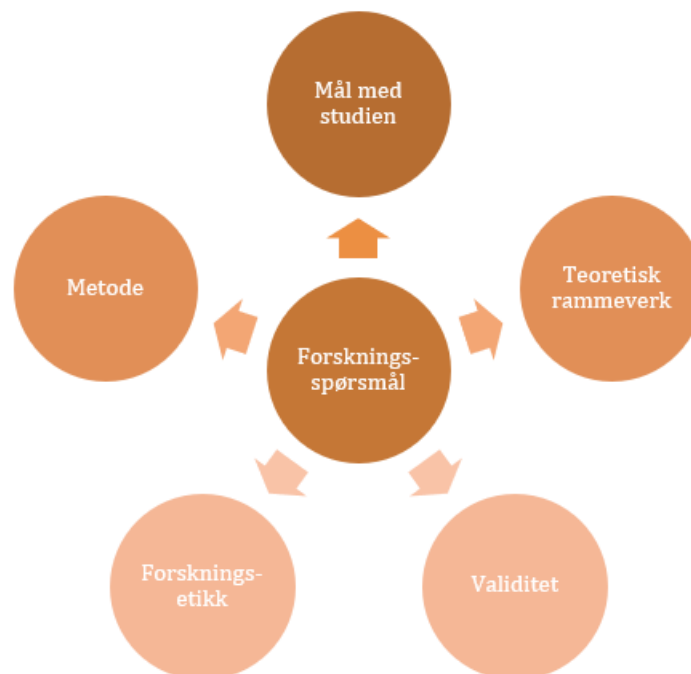
**Tilsetningsstoff:** For å oppnå tilstrekkelig støpelighet på grunn av lavt vanninnhold, må det tilsettes betraktelig med superplastiserende tilsetningsstoff. ViscoCrete 6120, produsert av Sika Norge, benyttes i betongresepten. MasterSet R 433 Retarder tilsettes i tillegg for å forlenge herdetiden, ved å forsinke hydratasjonen og demper varmeutvikling [90]. Stoffet produseres av BASF.

**Fiber:** Det ble tilsatt 2% av 9 mm rette stålfibre i betongen. Unicon AS bisto med fiber.

## 6 Metode

Begrepene forskning og metode blir brukt om hverandre, men det er nyanser alt etter hvilke språklig presisjonsnivå det opereres i. Forskning er en prosess som gjennom systematisk arbeid, kan skape ny kunnskap og økt vitenskap om virkeligheten [91]. For å gjennomføre dette kreves det en strategi for hvordan man skal gå frem for å nå målet. Metode er en slik strategi [92].

Krumsvik [91] presenterer en forskningsdesignmodell som illustrert i figur 6.1. Forskningsdesign beskriver et fleksibelt sett med retningslinjer, som kobler teoretiske paradigmer til strategier for utredning og deretter metoder for å samle inn empirisk materiale. I denne oppgaven kreves et design som fokuserer på dybdeforståelse, nærhet til felt og tekstdata. Valgene som tas i de ulike fasene vil ha konsekvenser for undersøkelsens validitet (gyldighet). Alle delene i denne oppgavens forskningsdesign ble nøye tenkt gjennom før datainnsamlingen startet.



Figur 6.1: Illustrasjon over forskningsdesignet. Omarbeidet fra figur i [91]

Alle design vil møte på problemer knyttet til kausalitet og generalisering, hvor generalisering deles inn i statistisk og teoretisk. Oppgaven fokuserer på teoretisk generalisering ved å utvikle teori om hvordan virkeligheten ser ut, og hvordan fenomenene henger sammen. Disse to formene for generalisering avgjør om det skal gjennomføres et intensivt eller ekstensivt undersøkelsesdesign. Intensive går i dybden på et fenomen, mens ekstensive går i bredden og inkluderer mange enheter [92]. Oppgaven har et intensivt undersøkelsesdesign, noe teoretisk generalisering krever.

Casestudie er et undersøkelsesdesign som egner seg til formålet i denne oppgaven. Det er en intensiv studie som har nærhet til feltet, og går i dybden for å utforske uklare forskerspørsmål. Ved å gi detaljerte beskrivelser kan man avdekke helhetlige beskrivelser av mekanismer og prosesser. Med andre ord, kan den beskrive hvordan hendelser påvirker hverandre.

## 6.1 Forskningsmål

Målet med studien står sentralt i forskningsdesignet. Før man kan designe en forskningsstudie må målet for studien være avklart [91]. Oppgaven har som mål å undersøke hvordan UHPC beskytter armeringen mot armeringskorrosjon i praksis. Hovedmålet er å se på dette fenomenet fra et innsideperspektiv, og prøve å studere hvordan ulike faktorer som rissvidde, overdekning og eksponeringsmiljø henger sammen.

Oppgaven er basert på personlige og intellektuelle mål. Personlige mål henger sammen med egen interesse for forskningsområdet, mens intellektuelle mål er knyttet til de mer vitenskapelige forholdene på området [91]. Fra litteraturstudien gjennomført i forprosjektet [52] ble det oppdaget at UHPC sin bestandighet i praksis er lite forsket på. Samtidig er det svært motiverende at flere aktører i byggebransjen viser engasjement for resultatene fra forsøket. Alle ønsker en dypere forståelse av materialet. Spesielt da bestandigheten, ettersom standard betong viser seg å støte på en del bestandighetsproblemer, noe som resulterer i høye driftskostnader. I tillegg kommer den personlige interessen inn når man får være med på noe revolusjonerende og spennende.

## 6.2 Teoretisk rammeverk

Det teoretiske rammeverket er selve grunnfjellet i et forskningsdesign [91]. Innsamlingsmetoden som velges vil påvirke dataens validitet og reliabilitet (pålitelighet) [92]. Alle typer forskning har en paradigmatisk og vitenskapsteoretisk forankring, som gir en innfallsvinkel til det som skal studeres [91]. Oppgaven baseres på et prosessteoretisk design rundt hvordan ting utvikler og endrer seg over tid i praksiskontekst. Prosessteoretiske spørsmål er hvordan-spørsmål som ikke ser på enten, men hvordan en endring oppstår.

Den viktigste funksjonen til en vitenskapelig teori, er å bringe sammen flere ulike faktorer under et felles sett av omgrep og prinsipper, slik at forskers oversikt over fagfeltet øker [91]. Oppgaven er opptatt av en eksplorativ og induktiv tilnærming til feltet, for å konstruere et solid teoretisk grunnlag av fenomener som man ikke har mye kunnskap om. Det ønskes ikke å prøve ut og teste en hypotese, men benytte den innsamlede dataen som en linse på forsøket. For å øke reliabiliteten er det viktig at teorien har god teoretisk robusthet og at den underbygger de faktorene som skal studeres. Samtidig er det kontrollert at det teoretiske rammeverket ikke blir for begrenset i kontakt med praksis. Det er dermed viktig å gjøre seg kjent med feltet før forsøket starter [93].

Sekundærdata er innhentet gjennom dokumentundersøkelse og kommunikasjon med erfarne fagfolk. Det er viktig å ha i fokus hvilken teori som svarer på forskerspørsmålene [91]. Dokumentundersøkelsen er basert på data innhentet fra lærebøker, fagtidsskrifter, fagleksika, standarder og forskningsrapporter. Teorigrunnlaget er presentert i kapittel 3. Under datainnsamlingen er det søkt etter både norske og engelske artikler. Nøkkelord som er brukt er blant annet: «Ultra-high performance concrete», «bestandighet», «armeringskorrosjon», «corrosion of steel reinforcement in concrete», «fiberreinforced concrete», «concrete in marine environment», «kloridinntrenging», «critical chloride content», «permeabilitet», «durability of Ultra-high performance concrete», «cracked concrete» og «electrochemical impedance spectroscopy». Alle nøkkelordene ble brukt om hverandre i ulike kombinasjoner for å finne relevante artikler. For videre innsnevring av relevante

artikler ble det først lest tittel, deretter sammendrag og nøkkelord, og dersom disse var interessante ble hele artikkelen lest gjennom.

Datainnsamlingen ga informasjon om følgende tema:

- Kort om standard betong (SV-40) og UHPC
- Eksponeringsmiljø og hva som påvirker betongens bestandighet
- Betongoverdekningens påvirkning
- Armeringskorrosjon og hvilke faktorer som påvirker dette fenomenet
- Karbonatisering og kloridinitiert armeringskorrosjon
- Permeabilitet og hvilke faktorer som påvirker
- Transportmekanismer
- Oppsprukket betongtverrsnitt, og hva som forårsaker rissdannelse
- Fibrenes påvirkning på rissvidden
- Korrosjonsmåling
- Elektrokjemisk impedansspektroskopi
- Kloridinnhold
- Volhards metode

Under hele prosessen er det lagt stor vekt på kildekritikk. Tiltak for å styrke oppgavens validitet er gjort rede for i kapittel 6.5.

### 6.3 Forskerspørsmål

Utgangspunktet for en empirisk undersøkelse er et tema, og når man skal utforme forskerspørsmål er det viktig å ha klart for seg hva som ønskes å studeres. Uklare forskerspørsmål kan ødelegge for reliabiliteten til oppgaven. Det er derfor viktig å stille åpne og ikke ledende spørsmål. Forskerspørsmålet er kjernen i modellen og er det viktigste elementet i designet [91].

Forskerspørsmålet som er definert er eksplorerende og er knyttet til fenomenet som det er lite kunnskap om. De hjelper til med å fokusere studien og viser vei for hvordan den skal utføres. Oppgavens overordnede forskerspørsmål er:

#### ***Hvordan beskytter Ultra-High Performance Concrete (UHPC) mot armeringskorrosjon i praksis?***

Det er et partikulært forskerspørsmål som knytter seg opp mot en spesiell kontekst, hvor det fokuseres på armeringskorrosjon, og ikke andre nedbrytingsmekanismer. Her er det vanskelig å sette opp klare hypoteser, og det er dermed et relativt åpent spørsmål. For å gjøre forskerspørsmålet mer «forskbar» må det foretas avgrensninger [92]. Blir det satt for mange forskerspørsmål, kan man støte på vanskeligheter med å se nye forbindelser på tvers av de forskjellige delene av datainnsamlingen og oppnå vellykket integrering av funn [91]. Avgrensninger kan gjøres ved å ta hensyn til følgende elementer [92]:

- *Hva* er vi interesserte i? Undersøkelsens variabler
- *Hvem* er vi interesserte i? Dette omhandler enhetene man ønsker å undersøke
- *Hvor* skal undersøkelsen finne sted? Avgrensning av undersøkelsens fysiske rammer
- *Når* skal undersøkelsen finne sted? Avgrensning i tid

De første to punktene illustrerer kjernen i undersøkelsen og de to siste utgjør rammene. Poenget er å konkretisere temaet ved å flytte seg fra et teoretisk til et operativt nivå. Distinkte spørsmål viser enkelt hva som må samles inn av teori, og hvordan den skal analyseres. Oppgaven utfører en slik konkretisering ved å formulere følgende underspørsmål:

1. Hvordan vil ulike overdekninger påvirke UHPC sin evne til å motstå armeringskorrosjon?
2. Hvilken påvirkning vil ulike rissvidder ha på armeringen med hensyn på korrosjon i UHPC?
3. Hvordan vil ulike marine miljø påvirke armeringen med hensyn på korrosjon i UHPC?

Antall underspørsmål er bestemt med fokus på å ikke skape problemer for helheten i forskningsstudien. Forskningen blir utført med et analytisk, kritisk perspektiv. Egne hypoteser og preferanser blir ikke innblandet i forskerspørsmålene, og det forsøkes å motbevise personlige fordommer [93]. Dette for å unngå trussel mot validitet og reliabilitet [91]. Faren for å blande inn personlige tanker reduseres ved kontinuerlig diskusjon og fokus på oppgavens kvalitet.

Et prosessteoretisk fundament krever løpende utvikling av forskerspørsmål og underspørsmål i relasjon til det som studeres. Dette for å unngå at spørsmålene blir for teorideterministiske, begrensede og lite praktisknære [91].

## 6.4 Metode

Valg av metode avhenger av målet og forskerspørsmålet i studien. Metoden er verktøyet som samler inn den nødvendige informasjonen for å svare på formålet med studien [91]. Skillet går mellom kvalitativ- og kvantitativ metode. Kvalitativ er en induktiv og eksplorerende tilnærming, som legger få føringer på dataene som samles inn for å identifisere relevante variabler. Motsetningen er kvantitativ metode, som legger store føringer på datainnsamlingen og definerer hva som er relevant informasjon [92].

Masteroppgaven er basert på prosessteoretiske spørsmål og benytter kvalitativ metode, noe som er forenlig med undersøkelsesdesignet beskrevet over. Kvalitativ metode har sin styrke i dybdeperspektiv og evne til å fange opp det som skjer i praksiskontekster. Det er en forskningsmetode som er preget av nærhet til feltet som studeres [91].

Videre må det velges en metode for å samle inn data, og det legges en strategi for hvordan datainnsamlingen skal skje, hvor omfattende den skal være og om det skal gjennomføres flere datainnsamlinger [91]. Innhenting av data gjennomføres ved en litteraturgjennomgang og observasjon. Observasjon dreier seg om å registrere fenomenets adferd [92]. Kvalitativ primærdata blir dermed hentet fra feltforsøk på UHPC, da det ønskes å studere hva som skjer i ulike settinger.

Utvalgsprosedyren er basert på hensiktsmessige utvalg, hvor det velges kun det som vil hjelpe med å svare på forskerspørsmålene [91]. Parametere som miljøforhold, overdekning, fibermengde, herdetiltak, riss, herdedøgn og blandemetode, er alle elementer som er interessante. Samtidig er det tatt hensyn til tidsrom, ressurser, tilgang og økonomi. Det ble dermed gjort avgrensning i antall parametere med bakgrunn i dette. Ulempen med feltarbeid er at de kan støte på noen ekstra validitetsutfordringer. Feilkilder er oppsummert i kapittel 8.8.

Feltarbeid skiller mellom observasjon i naturlige og kunstige omgivelser. Naturlige vil være den plassen en hendelse finner sted, mens kunstige omgivelser er ofte i laboratoriestudier hvor omgivelsene er utviklet av forsker [92]. Oppgaven tar for seg feltarbeid i naturlige omgivelser, og hvor lenge et feltarbeid skal foregå vil avhenge av testobjektet. Armeringskorrosjon er et fenomen som utvikler seg over tid, og det vil derfor være gunstig at forsøket varer så lenge tidsrommet tillater. Testobjektene vil dermed bli stående i eksponeringsmiljøene i 55 døgn før de tas opp og testes. I tillegg ble det besluttet å produsere noen ekstra testobjekt som kan bli stående for videre forskning.

Ved innsamling av primærdata er det en viss grad av kontroll over de forholdene som kan påvirke påliteligheten til dataene. Det er gjort rede for hva som er gjort og det kan reflekteres over hvordan dette kan påvirke påliteligheten. Dette blir forklart i kapittel 6.5. Planlegging av gjennomførelsen ble utført med innspill fra veileder og Peter Hugh Middleton. Videre er det gitt en detaljert beskrivelse for fremgangsmåten benyttet i forskningen.

#### 6.4.1 Bjelkedimensjonering

Alle bjelkene ble dimensjonert med samme bredde, høyde og lengde. For å oppfylle kriteriene gitt i standarden for overdekning, ble høyden på tverrsnittet dimensjonert til 110 mm. Bredden på bjelkene ble satt til 160 mm, som er minste tillatte dimensjon basert på kravet for minste avstand mellom armeringsjernene. Kravet er vist i formel (6.1) som definert i EC2 [8.2 (2)] [14].  $d_g + k_2$  blir her gjeldende, og det ble bestemt å sette  $a_h = 32 \text{ mm}$  for begge betongblandingene. Lengden på bjelkene ble satt til 1442 mm. Fullstendige dimensjonsberegninger er vedlagt i vedlegg 5.

$$a_h \geq \max\{k_1 \times \Phi, d_g + k_2, 20 \text{ mm}\} \quad (6.1)$$

Der [14]:

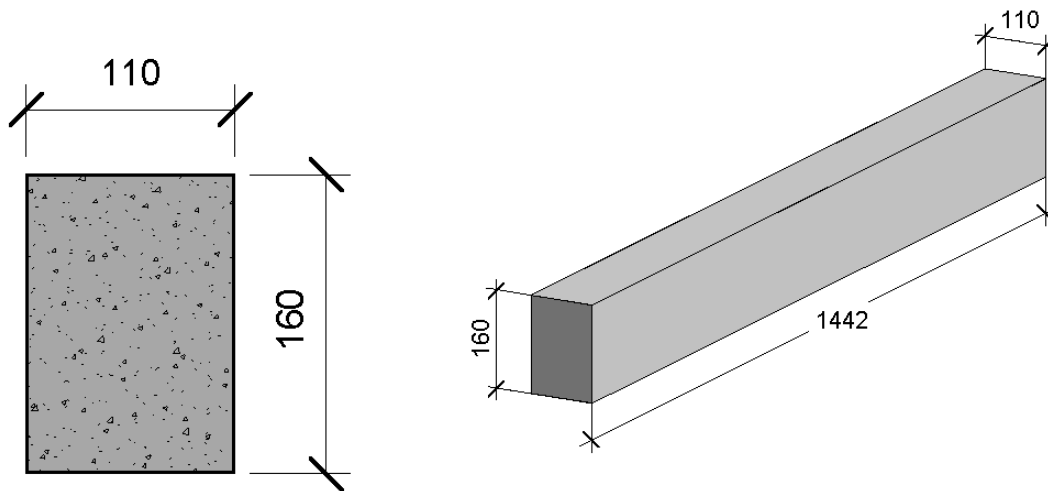
$$k_1 = 1$$

$$k_2 = 5$$

$d_g$  = største tilslagsstørrelse

En illustrasjon av bjelkens tverrsnitt og profil er vist i figur 6.2.





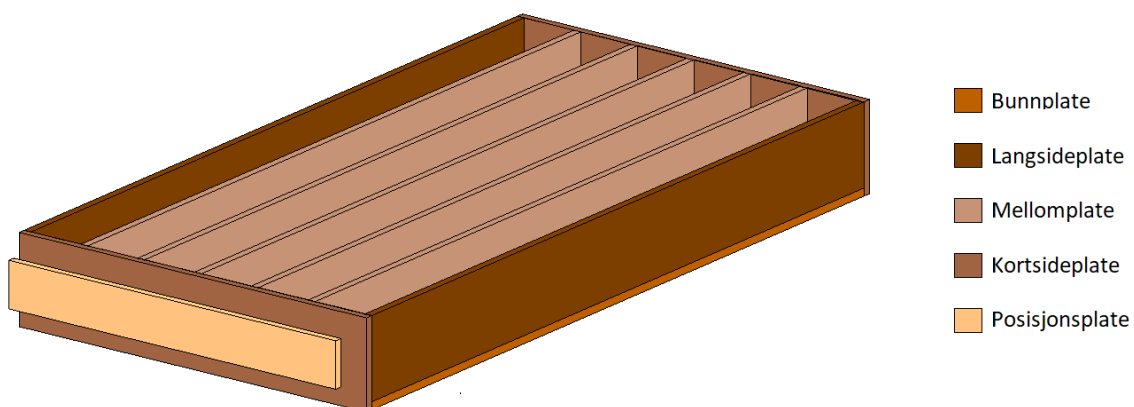
Figur 6.2: Prosjektet tverrsnitt og lengde på bjelkene. Privat figur

#### 6.4.2 Forskaling

Etter å ha beregnet dimensjonene til bjelkene, var neste steg å bygge forskalinger. I forskalingene ble det benyttet kryssfinérplater belagt med fenolfilm. Materialene funnet på lab, ble sagt med sirkelsag etter gitte mål. Figur 6.3 illustrerer navn og mål på de ulike forskalingsdelene og blir omtalt som dette videre. Ettersom forskalingsplatene besto av et hardt materiale, ble alle skruehullene forboret. Langsideplatene og mellomplatene ble skrudd fast fra undersiden av bunnplatene, før kortsidplatene kom på. Vinkelbeslag ble deretter festet på hvert hjørne for å sikre god støtte.

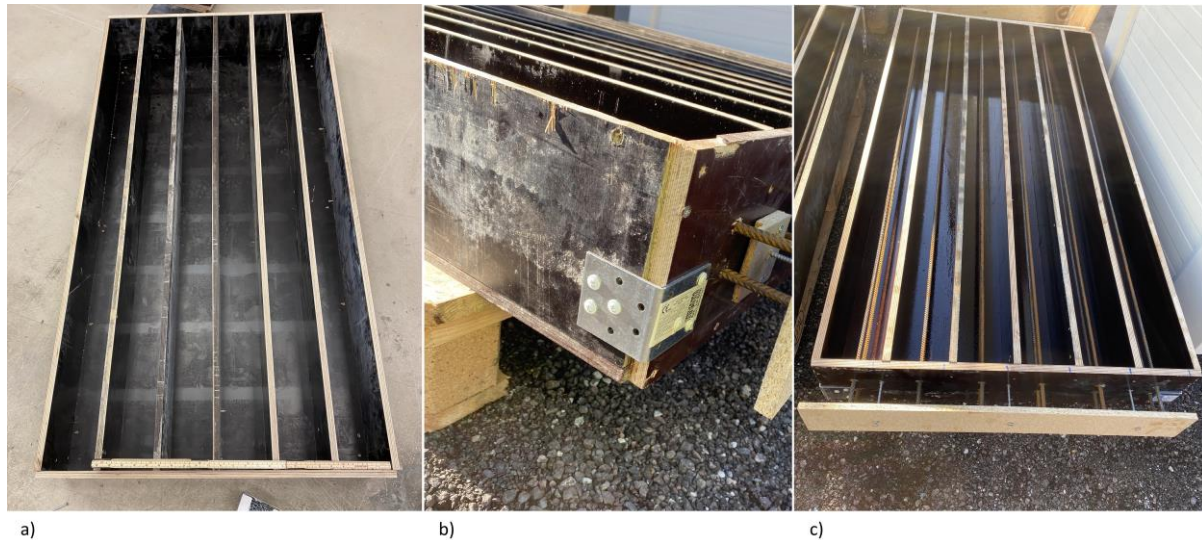
Bjelkene ble satt på høykant i forskalingsformene, slik at høyden ble lagt horisontalt. Dette for å ta hensyn til at armeringsjernene bøyer seg som følge av egenvekten. Slik vil overdekningen være konstant langs hele bjelkelengden, mens avstanden fra kant til jern kan variere noe i bredden.

Det ble boret to hull på 10 mm for hver bjelke, totalt tolv, i begge kortsidplatene. Hullene ble boret for å plassere armeringen med dimensjonerte avstander. Variasjonen i overdekningen ble tatt hensyn til ved å forskyve hullene horisontalt. Prosjektet løsning for hullplasseringene er vedlagt i vedlegg 6. Til slutt ble en posisjonsplate skrudd fast på hver side av formene, for å unngå at armeringsjernene flyttet seg ut av posisjon.



Figur 6.3: Navn og plassering av de ulike platene i forskalingsformen. Privat figur

Selve forskalingen fikk en dimensjon på  $765 \times 1472 \times 175 \text{ mm}$ . Dette inkluderer tykkelsen på platen. Ettersom det skal lages 15 konstruksjoner i UHPC, var det behov for 30 bjelker. Bredden og tykkelsen på bunnplatene fra bygglaben var på henholdsvis 750 og 15 mm, som resulterte i seks bjelker per plate. Dette tilsvarte fem forskalingsformer. Figur 6.4 a), b) og c) viser en ferdig forskalingsform og plassering av posisjonsplate og vinkelbeslag. Vedlegg 7 viser mer detaljerte prosjekteringstegninger av forskalingsformen, tegnet i Revit.



Figur 6.4: Ferdig bygget a) forskalingsform b) med vinkelbeslag og c) posisjonsplate. Privat foto

### 6.4.3 Støping

I samarbeid med betongleverandøren Unicon AS ble 30 UHPC-bjelker støpt på deres fabrikk. Betongresepten beskrives i kapittel 5.1.2. Alle bestanddelene til betongen, foruten fiberen, ble blandet i betongblanderen i ett minutt før den ble tappet på betongbilen. Fiberen ble så tilført direkte i trommelen og blandet sammen med betongen i syv minutter. Før plassering av armeringsjern og utstøping, ble alle forskalingene forhåndssmurt med formolje, for å unngå dårlig heft mellom jern og betong.

Støpingen ble utført ved at betongbilen rygget inn til forskalingene og betongen ble sluppet direkte ned på formen via en renne, se figur 6.5 a). Ved hjelp av murskjeer ble betongen jevnt fordelt i formene. For å redusere luftbobler og forsikre at betongen komprimerte seg godt rundt armeringen, ble det benyttet en jernstang for å stampe betongen. Stampingen ble gjennomført fem ganger i hvert hjørne. Overflødig betong ble så fjernet, før forskalingen ble dekket med plast, som vist på figur 6.5 b), og ble oppbevart i en garasje hos Unicon over natten. Det var tørre herdeforhold, men temperaturen sank helt ned til  $-3 \text{ }^\circ\text{C}$  i løpet av natten.



Figur 6.5: a) Støping av UHPC fra betongbil med renne og b) tildekking av testobjektene over natten. Privat foto

Forskalingene ble transportert til universitetet i Grimstad med en innleid lastebil. Den ene forskalingen ble transportert dagen etter støping, mens de resterende fire ble hentet neste dag, dette på grunn av transportkapasitet. Før bjelkene kunne løftes ut av forskalingen, ble begge kortsidene skrudd av, ettersom jernene stakk ut gjennom kortsideplatene, se figur 6.6. På grunn av bjelkenes tyngde, ble det vanskelig å få dem ut av forskalingen med håndkraft. De ble derfor løftet ut ved hjelp av en jekketralle som presset opp under armeringsjernene på begge sider av hver bjelke. Videre ble armeringsjernene kuttet med en vinkelsliper, slik at bjelkene fikk plass i herdekarene. Karene hadde en lengde på 1,5 m og jernene var på 1,6 m. På grunn av korrosjonsmåling, ble en liten lengde bevart på den ene siden, mens motsatt side ble kuttet helt inn til betongen. Herdekarene hadde en temperatur på 20 °C. For å kunne maksimere antall uker i eksponeringsmiljøet, ble det bestemt å korte ned herdeperioden mest mulig før utsettelse av testobjektene. I dette forsøket herdet bjelkene i syv døgn, før de ble tatt ut av herdekaret.



Figur 6.6: Demontering av kortsideplatene ved uthenting av bjelker. Privat foto

Totalt seks bjelker i standard betong ble støpt i samarbeid med Ribe Betong AS på deres fabrikk. Betongresepten er beskrevet i kapittel 5.1.1. Betongen ble blandet på tilsvarende måte som UHPC, men uten fiber, og ble oppbevart på bilen en kort periode før støping. På grunn av snøfall og dårlige støpeforhold, ble det støpt innendørs. Betongen ble derfor pumpet på trillebår før den deretter ble fordelt ut i forskalingen med et firkantet øsekar. En jernstang ble brukt til å stampe i hjørnene og langs sidelengdene av bjelkene. Betongen ble dekket av plast og herdet innendørs på fabrikk over natten, før bjelkene ble tatt ut av forskalingen dagen etter. Hver bjelke ble transportert på tilhenger til UiA i Grimstad og lagt i herdekar, som vist i figur 6.7.



Figur 6.7: SV-40 bjelke i herdekar. Privat foto

#### 6.4.4 Oppføring av testobjekter

Etter syv døgn i herdekaret ble bjelkene tatt ut og plassert på paller for å kunne lage testobjekter. Bjelkene ble fordelt slik at det lå to testobjekter, altså fire bjelker, på hver palle. Slik var det nok plass til å kunne sette sammen og risse opp testobjektene. Under fordeling av bjelkene var det viktig å være oppmerksom på at bjelker med samme overdekning ble satt sammen. I tillegg måtte det tas hensyn til at overdekningen vendte fra hverandre, på denne måten ville riss forekomme på riktig side. Tabell 6.1 og 6.2 viser konstruksjonsnummer for SV-40 og UHPC, og hvilke bjelker de er satt sammen av.

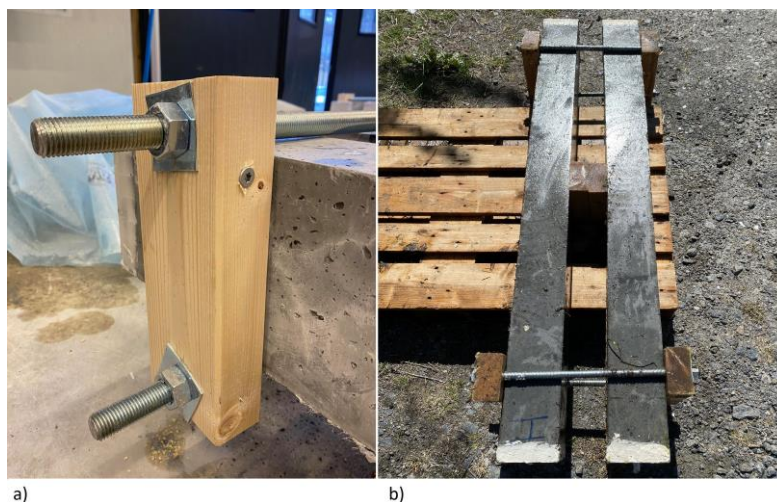
Tabell 6.1: SV-40 testobjekter med tilhørende overdekning, rissvidde og eksponeringsklasse

SV-40 testobjekter					
Testobjekt	Bjelke nummer	Overdekning	Rissvidde	Eksponeringsklasse	Kommentar
17	31-32	50	0,2	XS2	EIS-Testet
18	35-36	50	0,2	XS3	
19	33	50	0	XS2	Referanse
20	34	50	0	XS3	Referanse

Tabell 6.2: UHPC testobjekter med tilhørende overdekning, rissvidde og eksponeringsklasse

UHPC testobjekter					
Testobjekt	Bjelke nummer	Overdekning	Rissvidde	Eksponeringsklasse	Kommentar
1	1-3	50	0,4	XS2	EIS-Testet
2	2-4	50	0,2	XS2	
3	5-6	50	0,2	XS3	
4	13-14	50	0,2	XS3	Ekstra
5	26-30	50	0,8	XS3	
6	17-25	50	0,8	XS2	
7	27-29	50	0,6	XS2	
8	19-20	50	0,4	XS3	
9	15-16	50	0,6	XS3	
10	18	50	0	XS2	Referanse
11	28	50	0	XS3	Referanse
12	9-10	40	0,2	XS2	EIS-Testet
13	7-8	40	0,2	XS3	
14	11-12	40	0,2	XS3	Ekstra
15	23-24	30	0,2	XS3	
16	21-22	30	0,2	XS2	EIS-Testet

For å kunne deformere bjelkene slik at riss oppstår i strekksonen, var det nødvendig med et tvingesystem i hver ende. Ett tvingesystem bestod av to trestykker, to stenger og fire skiver med tilhørende muttere. Det ble boret to hull på 25 mm i hvert tvingesystem, for å kunne sette inn gjengestenger av forsinket stål på 20 mm. Deretter ble det skrudd inn en skrue under hver gjengestang, for å motvirke skade ved eventuell oppsvulming av treet. På grunn av mykhet i treverket, var det dessuten nødvendig med store skiver slik at mutterne ikke ble skrudd inn i treverket. Store firkantede skiver ble løsningen. M20 muttere ble brukt for å stramme gjengestengene og tvinge bjelkene sammen. Figur 6.8 a) viser den ene siden av tvingesystemet. For å kunne bøye bjelkene om midten, ble det som nevnt benyttet en avstandsknast. Ettersom høyden til bjelkene er 160 mm, fikk knasten en lengde på 180 mm, slik at faren for gjennomlokking ble fjernet. Knasten bestod av to trebiter med en total bredde på 92 mm for å sikre at det var nok avstand mellom bjelkene til at de kunne bøyes til ønsket rissvidde. Figur 6.8 b) viser fullstendig oppføring av testobjektene, og i tillegg ligger en skjematisk tegning av oppsettet i vedlegg 8.



Figur 6.8: a) Et tvingesystem med gjengestenger, skiver og muttere og b) fullstendig oppsett av testobjekt. Privat foto

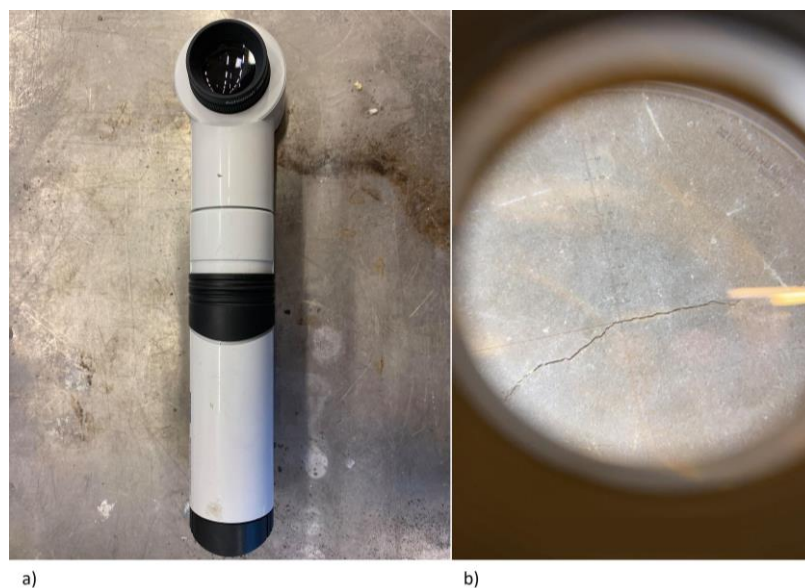
### 6.4.5 Oppsprekking

Selve utførelsen av oppsprekkingen ble gjennomført ved å benytte en pipenøkkel med langt skaft for å stramme mutterne vekselvis på hver side av testobjektene. Tvingesystemet ble plassert 170 mm inn på bjelkene fra ytterkanten. Avstandsknasten ble plassert i midten av bjelken, noe som tilsvarte 672 mm inn mot midten fra hver ende. Figur 6.9 a) og b) viser plassering av tvingesystemet og avstandsknasten. Der overflødig betong stakk ut, var det nødvendig å hakke det bort, slik at tvingesystemet lå helt inntil betongen. Dette ble også gjennomført i strekksonen hvor rissene ville oppstå. Til slutt ble mutterne festet så godt det var mulig med håndkraft.



Figur 6.9: Plassering av a) tvingesystem og b) avstandsknast. Privat foto

Metoden for å lage riss gikk ut på å stramme mutterne vekselvis på høyre og venstre side av bjelken. Rissene ble målt i strekksonen med en rissmåler, som vist på figur 6.10 a), og de ble regelmessig målt under oppsprekkingen for å hindre at rissvidden ble for stor. Figur 6.10 b) viser et riss gjennom rissmåleren. Den største sprekken ble dimensjonerende, og strammingen ble så avsluttet. Vedlegg 9 viser rissene for hvert enkelt testobjekt, henholdsvis venstre og høyre bjelke. Blått merke markerer hvor risset er avlest.

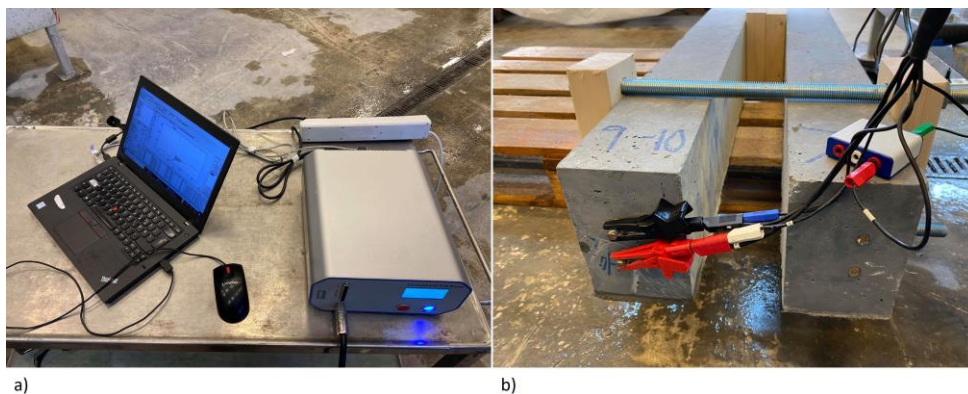


Figur 6.10: a) Rissmåleren benyttet til å måle rissvidde og b) riss på 0,1 mm gjennom rissmåler. Privat foto

#### 6.4.6 Korrosjonstesting før miljøeksponering

Totalt ble det testet tre testobjekter av UHPC og én av SV-40. Testene av testobjekt 1 og 16 ble gjennomført fire døgn etter at UHPC-bjelkene ble tatt opp av herdekaret. Fem døgn etter det igjen, ble testobjekt 12 og 17 testet, hvor sistnevnte som nettopp var tatt ut av herdekaret, ble testet våt. Til slutt ble testobjekt 17 testet i tørr tilstand, seks døgn etter at den ble tatt opp.

I samarbeid med Peter Hugh Middleton og Thomas Benjamin Ferriday, ble bjelkene testet med IviumStat XRi, et velegnet apparat som blant annet måler korrosjon som har oppstått på jernene ved å se på potensialforskjell i betongen. Kammene på armeringsjernene ble filt ned for å fjerne overflødig rust på overflaten og for å skape bedre kontakt mellom jernet og måleinstrumentet. To klyper ble festet på hvert sitt armeringsjern, vist på figur 6.11 b), og koblet til apparatet, vist i figur 6.11 a). EIS-målingene ble utført for å få et innblikk i armerings og betongens motstand før eksponering. Alle testene ble utført med galvanostatisk åpen krets med 1 mA forstyrrelse, 10 mA rekkevidde og en frekvensdispersjon på 10 per intervall fra  $10^7$  til  $10^{-1}$  Hz.



Figur 6.11: a) Testapparatet IviumStat XRi og b) klyper tilkoblet armering under korrosjonstesting. Privat foto

#### 6.4.7 Forberedelse til utsetting

For å unngå feilkilder og forstyrrelser på korrosjonsmålingene, var det nødvendig å dekke armeringsjernene og området rundt. Lett epoxysparkel fra Biltema ble påført i to lag for å forsegle området best mulig, som vist på figur 6.12. Sjøvann på armeringsjernene ville gi store avvik på resultatet, da eneste tilførsel av sjøvann til armeringen skal skje gjennom rissene.



Figur 6.12: Påføring av første lag med epoxy. Privat foto

For å spare tid og krefter, ble det bestemt at testobjektene som skulle ligge på sjøbunnen samles på én pall. En lastebil med kran kunne da enkelt frakte pallen til eksponeringsområdet og senke den ned ved hjelp av løftestropper. For å få plass til syv testobjekter og to referansebjelker på en pall, var det nødvendig å kutte overflødig gjengestenger med en vinkelsliper. Slik kunne testobjektene plasseres tettest mulig. Ved å kutte stengene ble det plass til tre testobjekter i bredden over to lag. Det syvende testobjektet lå i midten over der igjen, med to referansebjelker på hver side for å fordele vekten jevnt. For å sikre tilgang til sjøvann rundt hele testobjektet, ble det lagt treklosser mellom hvert lag. Dette sikret også bedre stabilitet ved at tvingesystemene ikke lå oppå hverandre, og samtidig ble det unngått at de ble presset ut av posisjon. Figur 6.13 a) viser plassering av testobjektene med tilhørende avstandsklosser. Jekkestropper ble lagt rundt testobjektene for å feste de sammen. Testobjektene for skvalpesonen ble fordelt på to paller, som vist på figur 6.13 c), og disse ble også festet med jekkestropper. Figur 6.13 b) viser ferdigstilte paller klare for utsetting.



Figur 6.13: a) Plassering av testobjekter og klosser på sjøbunnsballen, b) ferdigstilte paller og c) plassering av testobjektene på pallene i skvalpesonen. Privat foto/figur

#### 6.4.8 Utsetting og henting

Testobjektene ble satt ut i eksponeringsområdet 13.03.2020. Eksponeringsområdet ligger ved Vindholmen i Arendal, 40 minutter å kjøre fra UiA. Det ble bestemt å benytte dette området, da veileder eier en brygge der. Bjelkene kunne da ligge på et privat område med minimal tilgang for folk, slik at de kunne ligge urørt. Andre alternativer ble også vurdert, men ved bruk av kran var dette det mest optimale valget med tanke på tilkomst.

For å frakte pallene med testobjektene til eksponeringsområdet, ble det leid inn en bil med lasteplan og kran. Det ble satt krav til at bilen skulle tåle tilstrekkelig last for alle pallene, og kranen måtte være lang nok til å kunne løfte testobjektene ned i sjøen. Figur 6.14 viser prosessen med å løfte pallene på lasteplanet. Ved transport og utplassering var det viktig å forhindre at testobjektene fikk permanente skader, noe som kunne påvirke inntrenging av aggressive stoffer og resultatet av korrosjonsmålingene.





Figur 6.14: Testobjektene lastes på kranbil før utsetting. Privat foto

Fremme ved ankomststedet ble bilen rigget på plass før kranen kunne begynne å løfte. Pallen som skulle ned på sjøbunnen, ble senket ned på fire meters dyp ved flo. Opprinnelig plan var å legge pallen horisontalt på bunnen med testobjektene liggende oppå. På grunn av komplikasjoner under løftet, kantret pallen og bjelkene kom ut av posisjon. Dette ga ingen store konsekvenser for selve forsøket, men ville gi større utfordringer ved henting av testobjektene.

Pallene med testobjektene som skulle ligge i skvalpesonen, ble løftet ned i en skråning like ved bryggen som vist på figur 6.15. Slik kunne de ligge stødig delvis under vann, ved både flo og fjære. For å sikre at ytre krefter ikke flyttet på pallene underveis, ble de forankret i noen trær like ved.



Figur 6.15: Plassering og forankring av testobjekter i skvalpesonen. Privat foto

53 døgn etter utsetting ble de første bjelkene som lå nedsenket på sjøbunnen, hentet opp. Ettersom de falt av pallen, måtte de løftes opp enkeltvis. På grunn av mye algevekst, noe som førte til dårlig sikt, var det kun mulig å hente opp tre testobjekter. Disse ble lagt på en palle og sto urørt på land ved eksponeringsområdet til de ble hentet av kranbil. Bjelkenes rissvidde ble målt på nytt for å se om omgivelsene hadde en påvirkning. Resterende testobjekter som lå i skvalpesonen, ble løftet opp med

kran og plassert på lastebilen etter 55 døgn i eksponeringsmiljøet. Sammen med de tre nedsenkede testobjektene, ble de transportert til lagerbygningen til UiA på Østerhus.

#### 6.4.9 Korrosjonstesting etter miljøeksponering

Da testobjektene ankom lagerbygningen på Østerhus, ble de plassert ut for å ha best mulig tilgang til testing. Rissvidden for alle testobjektene som lå i skvalpesonen, ble målt med rissmåler og notert ned. For å forberede til testing, måtte epoxyen fjernes ved å file den bort med vinkelsliper på alle bjelkene. Den utstikkende armeringen ble dermed avdekket og klypene kunne få kontakt med jernet. Området rundt armeringsjernene ble tørket med en føner, for å sikre at armeringen var tørr før testing. Utstyret ble koblet til og EIS-målingene kunne starte. Alle bjelkene ble testet for å observere om det var variasjoner i de ulike overdekningene og rissviddene, samt miljø.

#### 6.4.10 Selvkurering

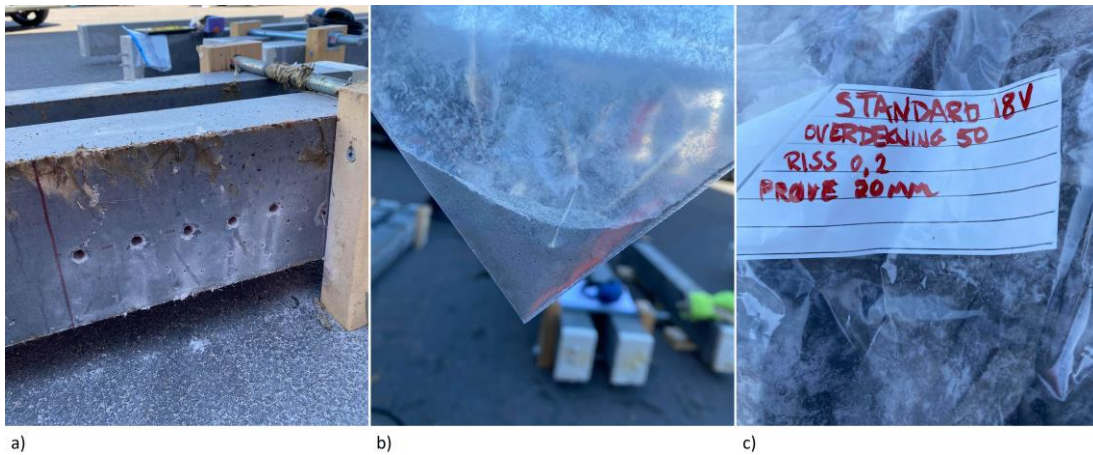
Rissene, for bjelkene med 0,1-0,3 mm rissvidde, i testobjektene 1, 4, 6, 8, 9, 13 og 16, ble undersøkt gjennom rissmåler for å observere om det har oppstått selvkurering. For testobjekt 13 ble både høyre og venstre bjelke undersøkt. Testobjekt 1, 6 og 16 var nedsenket på sjøbunnen, mens de resterende lå plassert i skvalpesonen. Testobjektene 4, 8 og 9 lå nederst på pallen og ble fullstendig dekket av sjøvann under flo, mens de øvre testobjektene ble utsatt for delvis tildekking og sjøsprøyt. Testobjekt 13 lå øverst på pallen i skvalpesonen. Rissene ble skylt med vann og tørket med papir for å se om stoffene løste seg opp. De faste stoffene kunne så evalueres. Bildene av rissene er presentert i resultatkapittelet 7.2.1. Tabell 6.3 viser rissvidden til de undersøkte bjelkene.

Tabell 6.3: Oversikt over riss undersøkt for selvkurering

Testobjekt	Rissvidde
1	0,2
4	0,1
6	0,35
8	0,2
9	0,2
13 venstre	0,2
13 høyre	0,1
16	0,2

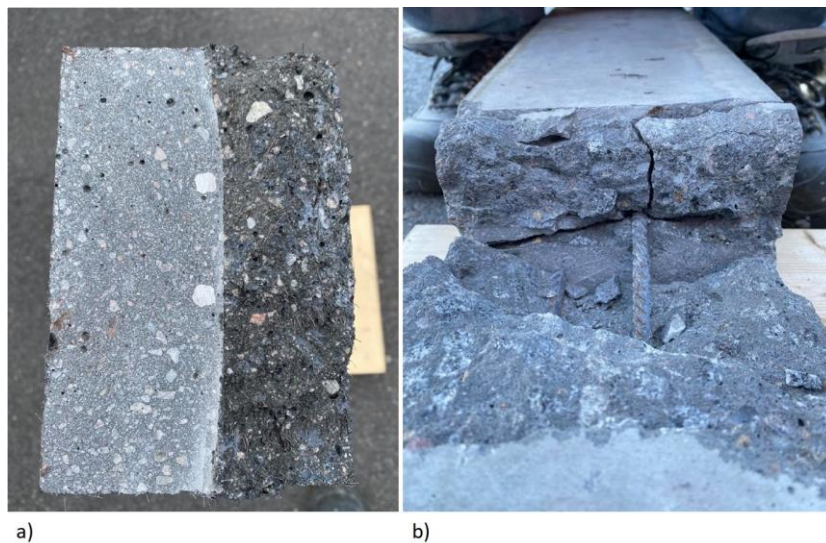
#### 6.4.11 Test av kloridinnhold

Volhards metode ble benyttet for å måle kloridinnholdet innover i betongen. Kloridinnholdet ble målt for én UHPC- og én SV-40 bjelke med 50 mm overdekning og 0,2 mm rissvidde. I første omgang ble det hentet betongpulver fra et område på bjelken hvor det ikke har oppstått riss. En horisontal linje ble markert midt på bjelken og en slagbor ble benyttet for å bore hull langs linjen. Fem hull ble boret, som vist på figur 6.16 a), for å sikre tilstrekkelig mengde. Det var nødvendig med omtrent fem gram betongpulver per prøve til titreringstesten. Det ble tatt ut fem prøver per bjelke, hvor det for hver tiende mm innover ble tatt ut betongpulver. Første prøve besto av betongpulver fra de første 10 mm inn i overdekningen. Deretter ble det hentet prøver hver tiende mm helt til slagboren traff armeringen, totalt 50 mm inn. Alle prøvene ble samlet i en glidelåspose og merket tydelig med navn og prøvenummer, som vist på figur 6.16 b) og c).



Figur 6.16: a) Prøveuttak av betongpulver i sonen utenfor rissområdet, b) betongpulver i glidelåse og c) merking av prøve. Privat foto

Neste steg var å hente ut betongpulver fra det dimensjonerende risset. Bjelken ble delt i risset for å hente ut pulver innover overdekningen. Dette ble utført ved å benytte en vinkelsliper til å lage et hakk ned og gjennom armeringen på baksiden av risset. En linje trukket fra risset og rundt bjelken, markerte hvor hakket ble laget. Bjelken ble så knekt i to ved at en bil kjørte over den. Figur 6.17 a) viser det oppsprukne tverrsnittet for UHPC-bjelken og figur 6.17 b) viser tverrsnittet til SV-40 bjelken.



Figur 6.17: Bjelke delt i to i det dimensjonerende risset for a) UHPC og b) SV-40. Privat foto

Det ble hentet ut 10 prøver fra UHPC-bjelken og 10 prøver fra SV-40-bjelken, altså totalt 20 prøver, til kloridtesting i dette forsøket. Tabell 6.4 viser en prøveplan for hvor dypt betongpulveret ble hentet for hver prøve.

Tabell 6.4: Oversikt over betongprøvene og tilhørende dybde for testing av kloridinnhold

Betongpulver utenfor rissområdet					
Betongtype	Prøve 1	Prøve 2	Prøve 3	Prøve 4	Prøve 5
UHPC	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm
SV-40	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm
Betongpulver i risset					
Betongtype	Prøve 1	Prøve 2	Prøve 3	Prøve 4	Prøve 5
UHPC	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm
SV-40	10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm

For å kunne utføre kloridtesten ble det satt opp en risikovurdering for alle kjemikaliene som skulle benyttes i forsøket. Risikovurderingen er vedlagt i vedlegg 10. Før testen kunne starte måtte betongpulveret bearbeides. Videre skulle betongpulveret tørkes og behandles før filtrering. Begerglass ble veid, før omtrent fem gram betongpulver ble tilsatt i hvert glass. Endelig vekt er vist i tabell 6.5. Prøvene ble deretter tørket ved 105 °C over natten, til konstant vekt var oppnådd. Avkjølte prøver ble veid på nytt, og differansen mellom vekt etter tørking og vekt på begerglassene ga betongpulverets endelige vekt. Videre ble det tilsatt 20 ml deionisert vann, hvor mineralene er fjernet, for så å røre rundt i to minutter. Partiklene begynte da å separere seg. Betongpulveret ble deretter tilsatt 10 ml salpetersyre ( $HNO_3$ ), med en konsentrasjon på 65%, før det ble rørt i 15 nye minutter. 50 ml deionisert vann ble så kokt opp og tilført prøveløsningen, før det hele ble avkjølt til romtemperatur under røring. Til slutt ble løsningen filtrert for å skille væsken med kloridionene fra betongpulveret. For å spare tid ble det benyttet en sentrifuge. Blandingen ble fordelt i små beholdere og sentrifugert i tre minutter, før den blanke væsken ble tømt tilbake i begerglasset. Prøvene var nå klar til å titreres.

Tabell 6.5: Endelig vekt på betongprøvene

Sjikt	SV-40		UHPC	
	Utenfor riss	I riss	Utenfor riss	I riss
10 mm	4,91 g	4,84 g	4,67 g	4,92 g
20 mm	4,91 g	4,89 g	5,02 g	4,53 g
30 mm	4,95 g	4,79 g	4,96 g	4,90 g
40 mm	4,96 g	4,92 g	4,99 g	4,84 g
50 mm	4,94 g	4,88 g	4,93 g	4,92 g

For å utføre titreringen, var det behov for profesjonell assistanse. Av den grunn måtte prøvene stå urørt i fire døgn, før igangsettelse. Prøvene ble oppbevart i et mørkt skap i romtemperatur.

Titreringen ble utført ved å benytte Volhards metode. Før selve titreringen kunne utføres, måtte de riktige konsentrasjonene på kjemikaliene, benyttet i metoden, prøves frem for å oppnå best mulig nøyaktighet. De endelige mengdene og konsentrasjonene av de ulike stoffene er presentert i tabell 6.6. Væsken fra betongpulver-prøvene ble overført til en kolbe for å lettest kunne rotere og mikse løsningen. Alle kjemikaliene ble målt opp ved hjelp av pipetter i tilhørende størrelser.  $AgNO_3$  ble først tilsatt prøveløsningen for å reagere med kloridionene og danne et fast stoff. Mer  $HNO_3$  ble deretter tilsatt i løsningen for å redusere pH-verdien. En indikator,  $FeNO_3$ , ble tilsatt for å danne grunnlag for fargeendring ved omslagspunktet. Løsningen var under konstant miksing for å blande kjemikaliene best mulig.

Tabell 6.6: Oversikt over kjemikalier brukt i titreringen

Kjemikalier	Konsentrasjon	Mengde [ml]
HNO <sub>3</sub>	65%	10
AgNO <sub>3</sub>	0,1 M	4
HNO <sub>3</sub>	30 %	1
Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0,1 M	1
KSCN	0,01 M	Titrant

Selve titreringen ble utført ved å tilsette titranten, *KSCN*, til løsningen. En byrette ble benyttet for å ha kontroll på mengde titrant som ble tilsatt. Mengde titrant før titrering, ble lest av og notert. Da  $SCN^-$ -ioner reagerte med  $Ag^+$ -ioner ble  $AgSCN$  dannet som et fast stoff. Fra overskuddet av titranten, reagerte  $SCN^-$ -ioner med  $Fe^{3+}$ -ioner fra indikatoren, og dannet produktet ammoniumjern(II)sulfat,  $[Fe(OH_2)_5SCN]^{2+}$ . Dette ga en rødfarget løsning, som definerte omslagspunktet, og er vist i figur 6.18. Titreringen ble stoppet og gjenstående mengde titrant i byretten ble lest av. Kloridinnholdet ble deretter beregnet etter formlene gitt i 3.7.1.



Figur 6.18: Farge ved omslagspunktet. Privat foto

#### 6.4.12 Litteraturstudium

I tillegg til feltforsøket er det gjennomført en litteraturgjennomgang. Her ble det studert artikler skrevet av andre forskere for å få et innblikk i hva som er gjort tidligere. Dette for å identifisere kunnskapshull og posisjonere oppgaven riktig. I tillegg gir det en målestokk ved å sammenligne resultatet mot andres funn [91]. Litteraturgjennomgangen er presentert i resultatkapittelet 7.5. For å begrense søket ble det fokusert på artikler som var relevante, og innenfor rammene og fokuset i studien. Det ble satt opp en strategi med fokus i fremgangsmåten formulert av Krumsvik [91]: 1) identifisere typiske begrep i feltet, 2) lokalisere og finne teori, 3) lese og kontrollere at litteraturen er relevant, 4) organisere litteraturen, og 5) skrive en kort litteraturgjennomgang. Det ble gjennomført konkrete søk slik at søkeordene ble avgrenset og fokusert, for å unngå mange treff på både relevante og irrelevante studier. Nøkkelord som ble brukt er mye det samme som ble nevnt i kapittel 6.2.

## 6.5 Validitet

Validitetsbegrepet går ut på om man har undersøkt hensikten med forsøket [91]. Undersøkelser skal alltid forsøke å minimere problemer knyttet til validitet og reliabilitet. I avslutningsfasen er det ifølge Jacobsen [92] tre spørsmål man må stille seg selv:

1. Har jeg fått tak i det jeg ønsket å få tak i (validitet)?
2. Kan jeg stole på de dataene som er samlet inn (reliabilitet)?
3. Med andre ord, er det vi har funnet og presentert sant?

Det skilles mellom intern og ekstern validitet. Intern validitet handler om i hvilken grad resultatene kan oppfattes som riktige [92], mens ekstern validitet handler om funnenes overføringsverdi og om de kan generaliseres [91]. Utgangspunktet for en kvalitativ undersøkelse er at forskeren ønsker å beskrive en virkelighet som ikke direkte kan observeres [92]. Ved å være bevisste under hele forskningsprosessen på hva som kan styrke og svekke validiteten, er det gjort grundige kvalitetskontroller underveis. Det er blant annet sikret at metoden er i samsvar med forskerspørsmål og underspørsmål. Samtidig er det studert tidligere forskning, aktuelle teorier og metodelitteratur på lignende studier.

Ingen kvalitative undersøkelser er bedre enn de dataene som samles inn. Det ble utført kritisk gjennomgang av litteraturen gjennom hele prosessen for å sikre riktig informasjon. Informasjonen som ble hentet fra kildene er listet opp i kapittel 6.2. Litteraturen får større troverdighet når forfatter har god kjennskap til det aktuelle temaet, og ikke er en utenforstående som ønsker mer kunnskap [93]. Det er dermed tatt utgangspunkt i litteratur hvor forfatter selv har deltatt i forsøket. Samtidig er det påsett at forfatteren er en fagperson innenfor sitt felt ved å undersøke grad og andre publikasjoner. For å minimere usannheter er det tatt utgangspunkt i flere litteraturer, for så å kontrollere de opp mot hverandre og se om det er en form for enighet. Samtidig sørges det for at de er uavhengige for å unngå påvirkning. Data fra gransket litteratur vil i stor grad kunne underbygge argumenter om at innsamlet data er gyldig [92]. Det er også blitt benyttet databaser med stor pålitelighet, som for eksempel Google Scholar, Scopus og Oria.

Videre omhandler validitet også hvordan man har tolket resultatene, og om det gir en sann representasjon av data [92]. Siden det teoretiske rammeverket er hentet fra dokumentundersøkelsen vil tiltakene over også være gjeldende her. For datainnsamling fra feltarbeid er det lagt stor vekt på å identifisere ulike feilkilder som kan ha oppstått. Det er fokusert på å gi en gyldig beskrivelse av hovedfunnene, slik at resultatene gjenspeiler virkeligheten. Funnene fra analysen ble satt opp mot teoribakgrunnen i diskusjonskapittelet. Veileder, Rein Terje Thorstensen, bidro med tett oppfølging gjennom hele prosessen. Ekspertisen til Peter Hugh Middleton og Thomas Benjamin Ferriday ble også benyttet innenfor deres fagfelt, da de har god erfaring med korrosjon. De har bistått med blant annet bruk av korrosjonsmåleutstyr, hvordan lese resultatene og hvordan beskytte armeringen når testobjektene er ute i felt.

Reliabilitet handler om påliteligheten i oppgaven, og i en forskningsprosess kan den være truet på flere måter [91]. Det er lagt vekt på god beskrivelse av hva som er gjort gjennom hele prosessen. Formålet er at andre skal ha muligheten til å etterprøve det som er blitt gjort og komme frem til samme resultat. Påliteligheten er et kriterium for kvaliteten i forsøket, og resultatene påvirkes gjennom hele

undersøkelsesprosessen. Problemet med kvalitativ forskning er at det er vanskelig å etterprøves [92]. Masteroppgaven har forsøkt å styrke troverdigheten ved å være åpen og reflektert.

## 6.6 Forskningsetikk

Forskningsetikk er vurdering av forskning i relasjon til normer og verdier i samfunnet. Korrekt kildebruk og referansestiler er en viktig del av den forskningsetiske bevisstheten til forskeren [91]. Forsker har plikt til å tenke gjennom hvordan forskningen kan påvirke det som forskes på, og hvordan forskningen vil oppfattes og bli brukt. Dette kan skape noen etiske dilemmaer, og etiske overveielser må klargjøres før man går i gang med undersøkelsen [92]. Valgene tatt gjennom hele undersøkelsesprosessen er grundig vurdert opp mot etiske prinsipper.

Oppgaven avhenger av praktisk arbeid for å gjennomføres, og dette krevde god planlegging og nøyaktighet. Samtidig er det lagt vekt på å ikke forfalske data, men presentere resultatene som de ble og ikke slik man selv ønsket at de skulle bli. Forskning skal være åpen og spennende, som er grunnleggende krav for forskerspørsmålet. Spennende betyr i denne sammenheng at forsker kan ende opp med overraskende resultater [92].

## 7 Resultat

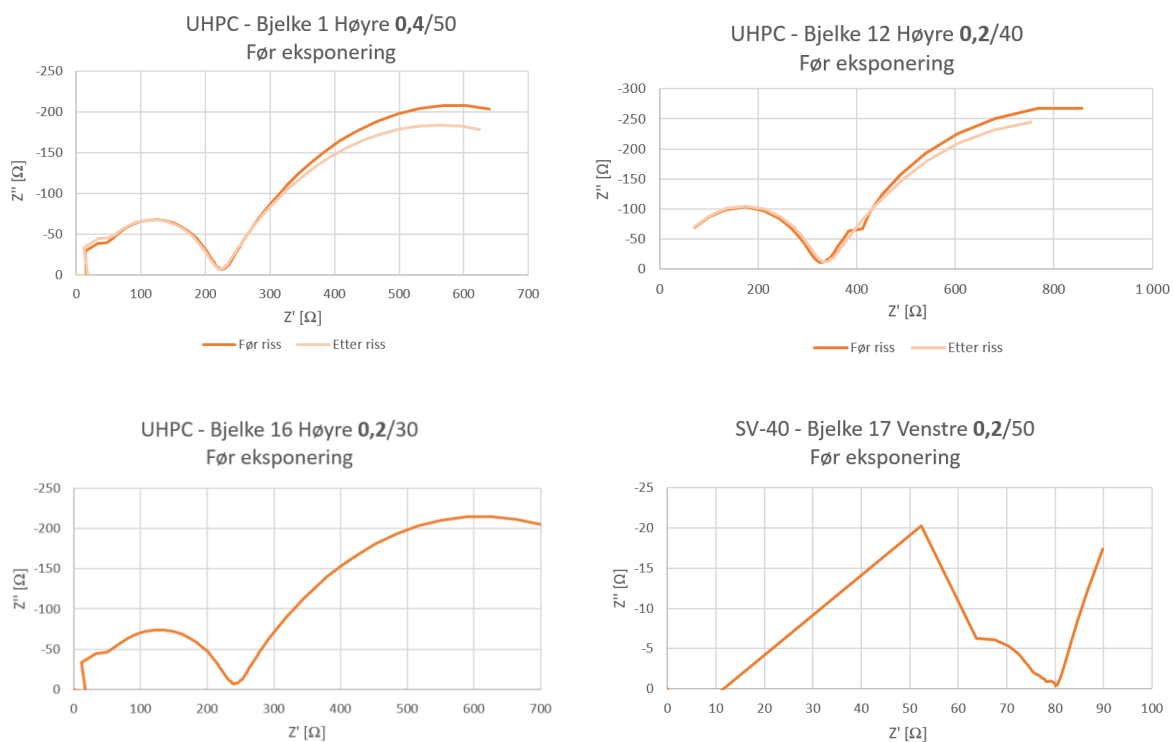
Resultatene fra forsøket presenteres i påfølgende kapittel. Alle bjelkene fra sjøbunnen ble ikke hentet opp, som en konsekvens av at testobjektene falt av pallen ved nedsenking og dårlig sikt ved opphenting. Dette gjorde det utfordrende å lokalisere de som lå dypest og hente de opp enkeltvis. Testobjekt 2, 7, 10, 12, 17 og 19, inkludert to referansebjelker, ble derfor ikke testet. I dette forsøket blir det sett på faktorer som rissvidde og overdekning, det vil derfor kun bli diskutert rundt de dimensjonerte bjelkene. Rådata fra forsøket ligger i vedlegg 11.

### 7.1 Elektrokjemisk impedansspektroskopi

Resultatene fra EIS-testen er presentert i dette underkapittelet. Figurene avbilder Nyquist-diagrammer for de dimensjonerende bjelkene. Resultatene fra alle bjelkene som ble testet, både før og etter eksponering, ligger i vedlegg 12.

#### 7.1.1 Før eksponering

Resultatet fra EIS-målingene for alle testobjektene før eksponering, er presentert i figur 7.1.



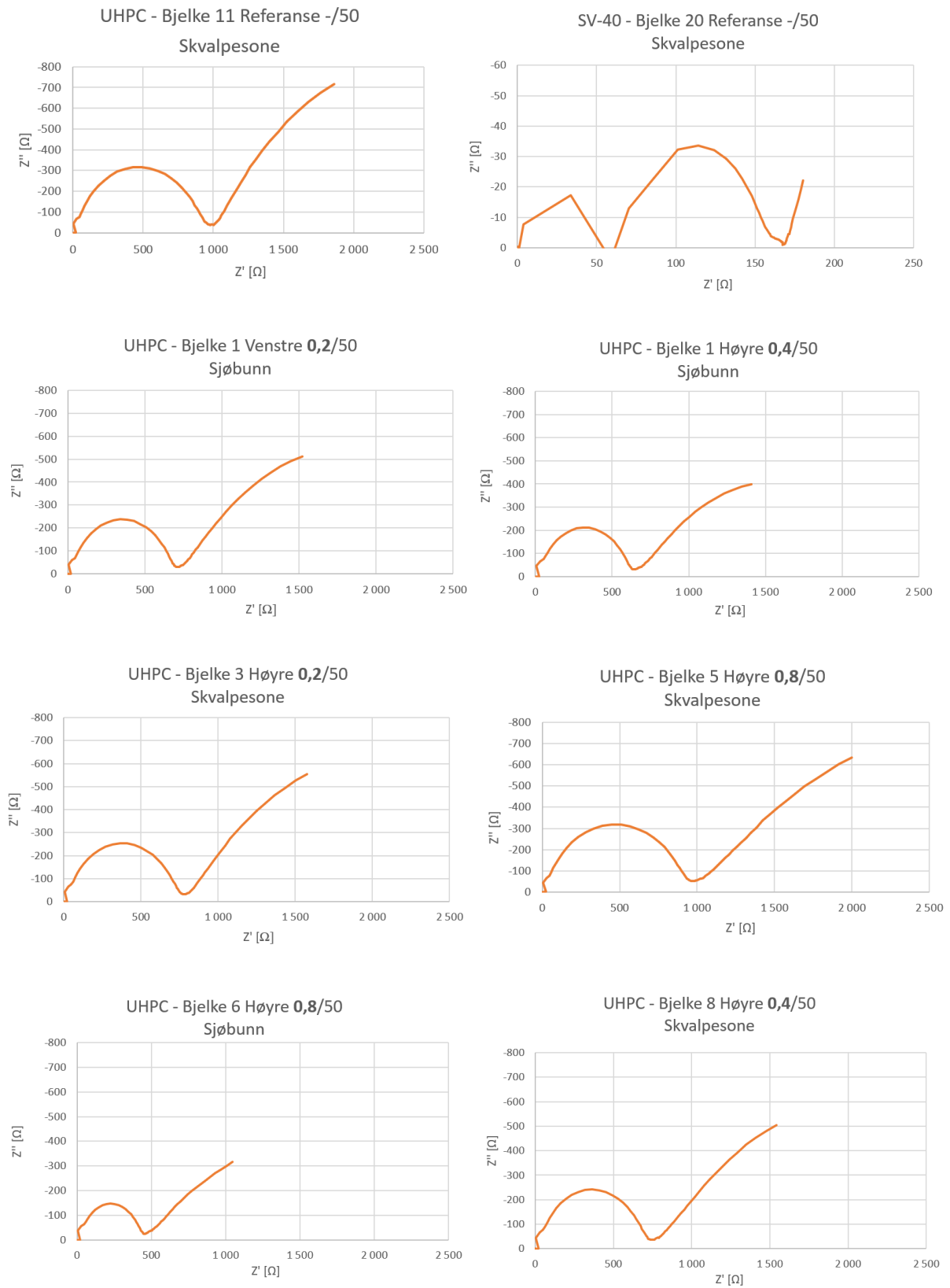
Figur 7.1: EIS-målinger før eksponering

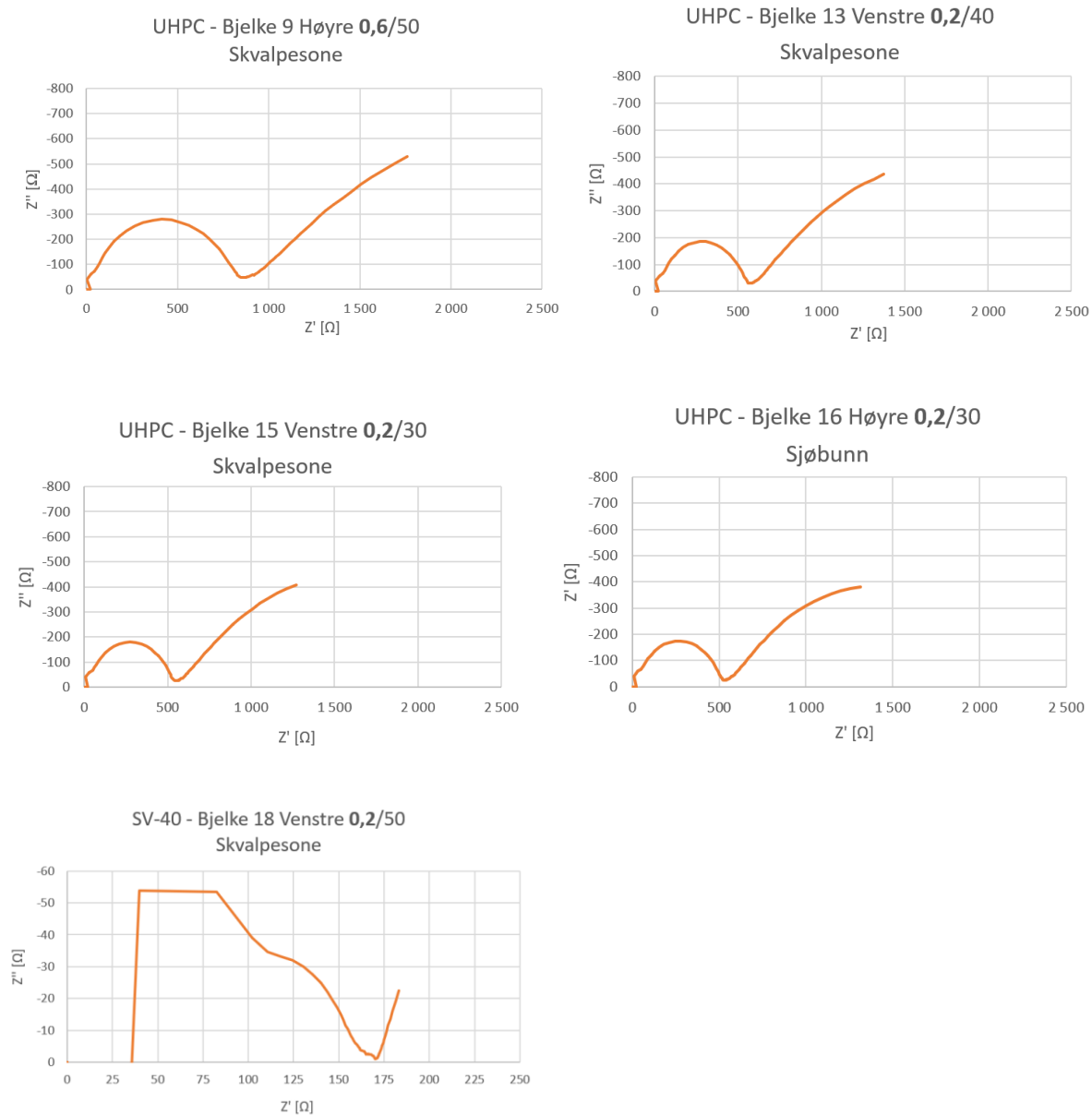
Bjelke 1 og 12 viser EIS-målinger fra før og etter oppsprekking.



### 7.1.2 Etter eksponering

Resultatet fra EIS-målingene for alle testobjektene etter eksponering, er fremstilt i figur 7.2.





Figur 7.2: EIS-målinger etter eksponering

De to øverste kurvene viser EIS-målingene for referansebjelkene plassert i skvalpesonen. Tabell 7.1 og 7.2 viser halvsirkelens diameter for de respektive bjelkene. Halvsirkelens diameter kjennetegner armeringens korrosjonsmotstand.

Tabell 7.1: Verdier for armeringens korrosjonsmotstand til de dimensjonerende bjelkene på sjøbunnen

Testobjekt	Betongtype	Riss/Overdekning [mm]/[mm]	Sjøbunn	
			EIS-resultat [ $\Omega$ ]	
			Før eksponering	Etter eksponering
1 Venstre	UHPC	0,2/50	215	685
1 Høyre	UHPC	0,4/50	215	625
6	UHPC	0,8/50	215	440
16	UHPC	0,2/30	215	506

Tabell 7.2: Verdier for armeringens korrosjonsmotstand til de dimensjonerende bjelkene i skvalpesonen

Testobjekt	Betongtype	Skvalpesone		
		Riss/Overdekning [mm]/[mm]	EIS-resultat [ $\Omega$ ]	
			Før eksponering	Etter eksponering
3	UHPC	0,2/50	215	750
5	UHPC	0,8/50	215	956
8	UHPC	0,4/50	215	725
9	UHPC	0,6/50	215	855
11	UHPC	-/50	215	978
13	UHPC	0,2/40	215	559
15	UHPC	0,2/30	215	539
18	SV-40	0,2/50	69	134
20	SV-40	-/50	69	109

## 7.2 Rissvidde før og etter

Tabell 7.3 viser målte rissvidder før og etter eksponering i marint miljø. Uthevet skrift representerer bjelken i testobjektet med dimensjonerende rissvidde. Bilder av rissviddene etter eksponering er lagt ved i vedlegg 13.

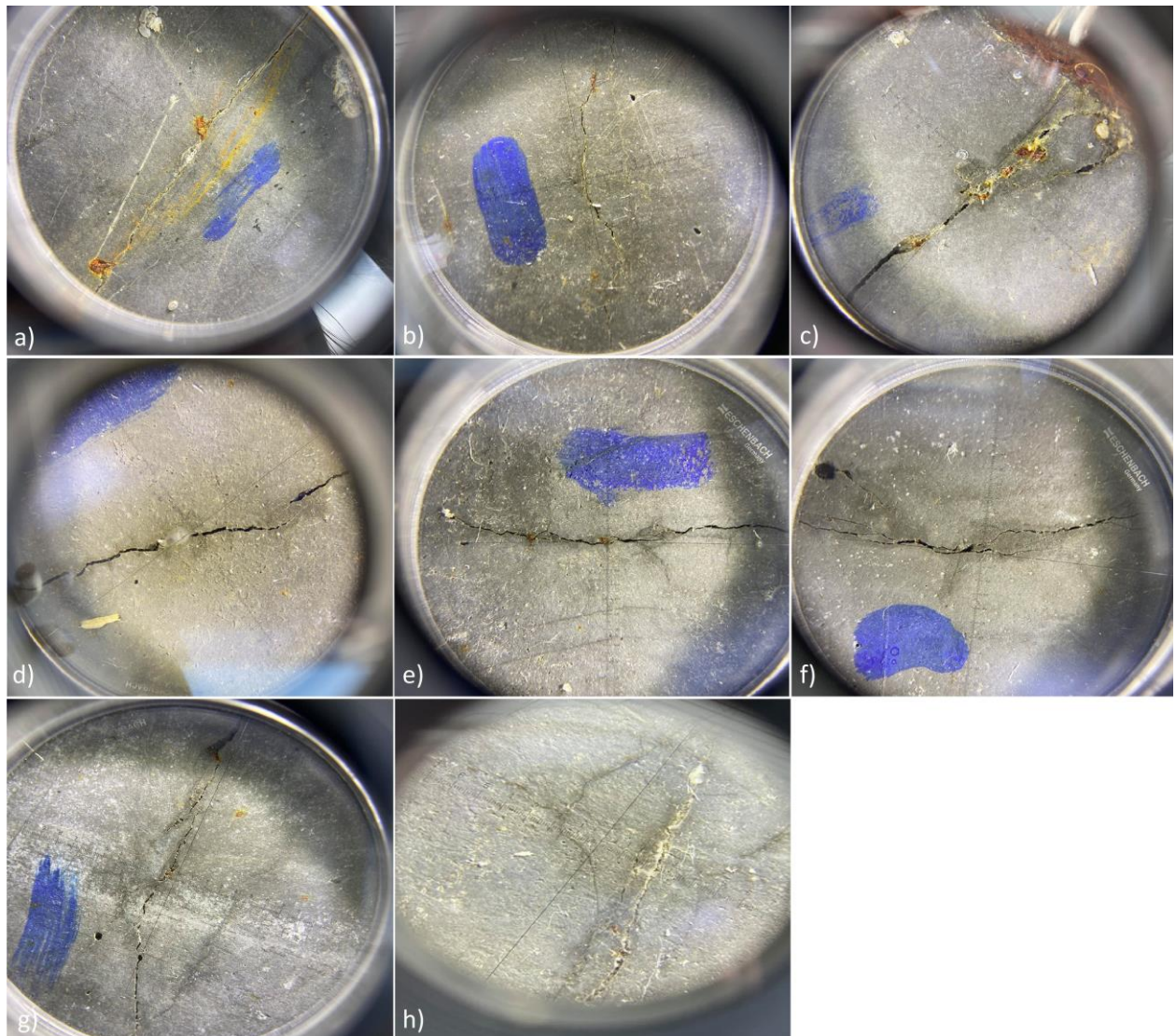
Tabell 7.3: Oversikt over rissviddene i hvert testobjekt før og etter eksponering

Testobjekt	Riss før og etter eksponering i marint miljø				Kommentar
	Før		Etter		
	Venstre bjelke	Høyre bjelke	Venstre bjelke	Høyre bjelke	
1	0,2	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>	
2	<b>0,2</b>	0,1	-	-	Ikke resultat
3	0,1	<b>0,2</b>	0,1	<b>0,2</b>	
4	0,1	<b>0,2</b>	0,1	<b>0,2</b>	Ekstra
5	0	<b>0,8</b>	0	<b>1,0</b>	
6	0,3	<b>0,8</b>	0,35	<b>1,0</b>	1,5 Kant
7	<b>0,6</b>	0,15	-	-	Ikke resultat
8	0,2	<b>0,4</b>	0,2	<b>0,4</b>	
9	0,2	<b>0,6</b>	0,2	<b>0,6</b>	
10	-	-	-	-	Referanse Ikke resultat
11	-	-	-	-	Referanse
12	0,1	<b>0,2</b>	-	-	Ikke resultat
13	<b>0,2</b>	0,1	<b>0,2</b>	0,1	
14	<b>0,2</b>	0,1	<b>0,2</b>	0,1	Ekstra
15	<b>0,2</b>	0,1	<b>0,2</b>	0,1	
16	0,1	<b>0,2</b>	0,1	<b>0,2</b>	
17	<b>0,2</b>	0,3	-	-	Ikke resultat
18	<b>0,2</b>	0,3	<b>0,3</b>	0,4	
19	-	-	-	-	Referanse Ikke resultat

Målingene viser at noen av rissviddene har økt under eksponeringen.

### 7.2.1 Stoffer i rissene

Figur 7.3 viser rissene gjennom rissmåleren for testobjekter undersøkt for selvkuring.



Figur 7.3: Riss undersøkt for selvkuring i bjelke a) 1, b) 4, c) 6, d) 8, e) 9, f) 13 venstre, g) 13 høyre og h) 16. Bildene ble tatt etter at bjelkene ble skylt

Figuren viser at det har oppstått en større ansamling av stoffer i enkelte riss.

### 7.3 Temperatur

Tabell 7.4 viser minimum og maksimum målte lufttemperaturer for alle 55 døgnene testobjektene var utsatt i eksponeringsmiljøene. Temperaturene er hentet fra Torungen Fyr 7,1 km fra Vindholmen, som er den nærmeste registrerte værstasjonen med temperaturhistorikk. Temperaturene er hentet fra historikkdata for Vindholmen hos yr.no.

Tabell 7.4: Oversikt over lufttemperaturen under eksponeringstiden

Dato	Laveste temperatur [°C]	Høyeste temperatur [°C]	Dato	Laveste temperatur [°C]	Høyeste temperatur [°C]
13.03.20	-0,5	4,3	10.04.20	1,1	8,0
14.03.20	-3,3	5,2	11.04.20	3,7	6,5
15.03.20	4,9	6,7	12.04.20	5,8	12,1
16.03.20	2,9	6,0	13.04.20	2,6	7,7
17.03.20	5,1	10,1	14.04.20	0,9	11,0
18.03.20	3,8	8,4	15.04.20	6,6	13,9
19.03.20	3,3	9,0	16.04.20	6,4	12,7
20.03.20	0,4	5,7	17.04.20	3,1	10,0
21.03.20	-0,1	4,6	18.04.20	3,1	8,2
22.03.20	-1,6	5,0	19.04.20	4,0	9,5
23.03.20	2,6	5,4	20.04.20	4,6	12,0
24.03.20	4,9	6,2	21.04.20	6,5	13,2
25.03.20	5,5	7,2	22.04.20	6,9	13,6
26.03.20	3,8	6,6	23.04.20	6,0	13,0
27.03.20	2,0	10,4	24.04.20	7,3	12,2
28.03.20	2,2	8,8	25.04.20	4,9	12,0
29.03.20	-0,5	6,6	26.04.20	4,6	10,1
30.03.20	0,7	5,2	27.04.20	6,6	11,5
31.03.20	2,1	8,0	28.04.20	4,4	9,8
01.03.20	5,5	10,1	29.04.20	4,7	7,6
02.04.20	3,9	8,1	30.04.20	4,3	7,9
03.04.20	2,8	6,7	01.05.20	2,8	9,1
04.04.20	1,0	5,7	02.05.20	4,2	10,2
05.04.20	3,3	9,2	03.05.20	6,0	14,4
06.04.20	3,3	7,8	04.05.20	5,2	11,4
07.04.20	5,9	13,8	05.05.20	5,0	10,4
08.04.20	3,7	9,3	06.05.20	5,0	14,7
09.04.20	3,8	10,8	07.05.20	6,8	13,2

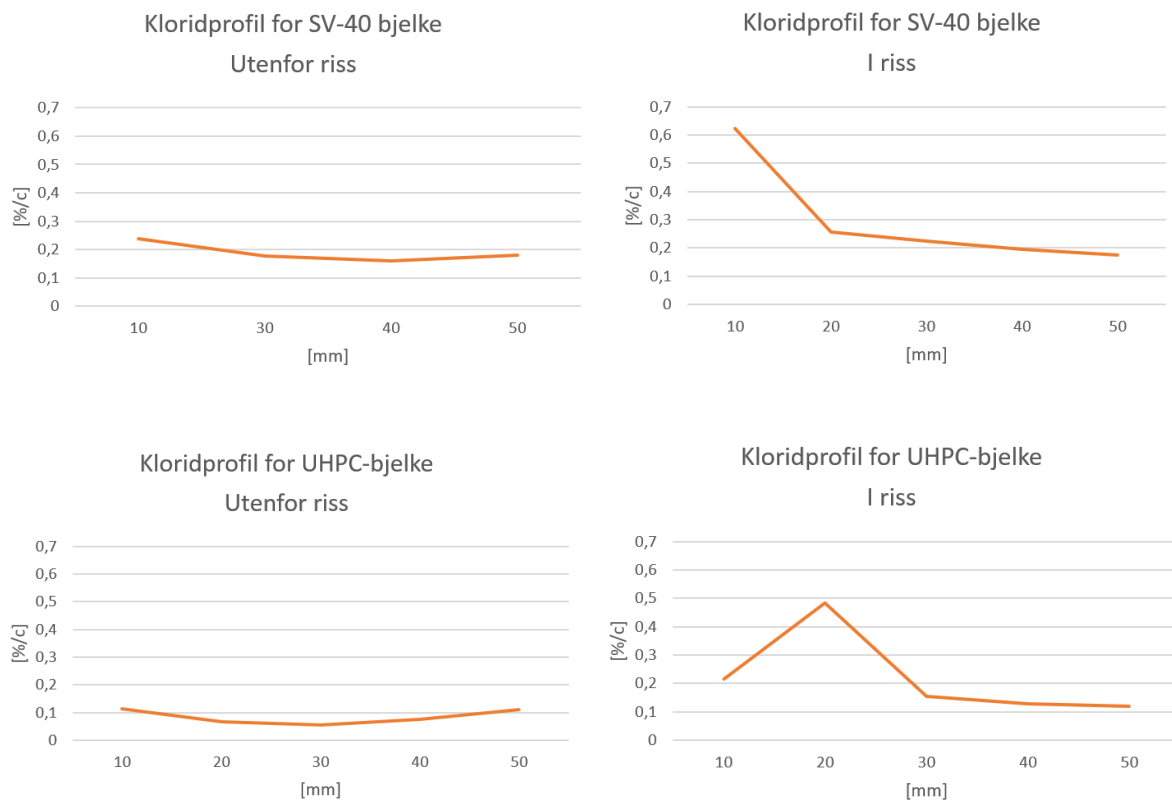
## 7.4 Klorid

Tabell 7.5 viser den nødvendige mengden titrant og beregnet prosent kloridinnhold av sementvekt for de ulike betongprøvene.

Tabell 7.5: Titrantmengde og kloridinnhold for de ulike betongprøvene

Kloridinnhold		10 mm	20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	
SV-40	Utenfor riss	Titrant [ml]	34,1	40,6	35,6	36,0	35,5
		Klorid [%/c]	0,24	-0,02	0,18	0,16	0,18
	I riss	Titrant [ml]	24,8	33,7	34,6	35,2	35,7
		Klorid [%/c]	0,62	0,26	0,22	0,19	0,18
UHPC	Utenfor riss	Titrant [ml]	35,1	36,9	37,5	36,6	35,0
		Klorid [%/c]	0,11	0,07	0,06	0,07	0,11
	I riss	Titrant [ml]	30,3	29,2	33,0	34,3	34,7
		Klorid [%/c]	0,22	0,48	0,16	0,13	0,12

Figur 7.4 viser resultatet for kloridinnholdet presentert som en kloridprofil, hvor konsentrasjonen vises per tiende millimeters dybde. Beregninger av prosent kloridinnhold av sementvekt er lagt ved i vedlegg 14.



Figur 7.4: Kloridprofiler for de ulike betongtypene i og utenfor rissområdet

SV-40 bjelken viser større kloridinnhold i ytterste sjikt i begge områdene, sammenlignet med UHPC. Kloridinnholdet for 20 mm sjiktet i riss for både SV-40 og UHPC-bjelken viser avvikende utvikling, og neglisjeres i diskusjonen.

## 7.5 Litteraturstudium

### 7.5.1 Overdekning

L. Yu et al. [94] observerte at kloridkonsentrasjonen ved armeringsjernet ble effektivt redusert med økt betongoverdekning. Dette kommer av at korrosjonshastigheten begrenses ved økt overdekning, som følge av redusert oksygentilførsel ved den katodiske reaksjonen. Videre ble det funnet at initieringsperioden og korrosjonshastigheten avhenger av flere faktorer, slik som eksponeringsforhold, rissorientering, overdekning og skadegrad. Ved alvorlig klorideksponering øker kloridoverflatekonsentrasjonen og fører til høyere kloridinntrenging.

Artikkelen skrevet av R. B. Polder [95] viser til et forsøk hvor seks betongkonstruksjoner eksponert for marint miljø i Nederland, ble undersøkt for ulike faktorer. Felles for konstruksjonene er at de alle var over 30 år, samt sementen inneholdt masovnslagg. Inspeksjon av konstruksjonen med prefabrikkerte og plastøppte elementer viste tegn til korrosjon for overdekning mellom 20-25 mm for prefabrikkerte elementer og 35 mm for plastøppte. Prefabrikkerte elementer med overdekning på 30-35 mm viste ingen synlig tegn til korrosjon. Studien viste også til at hydratisering av slaggpartiklene i sementen for konstruksjoner eksponert i marint miljø, bidro til reduksjon av kapillærporene og dermed økte bestandigheten.

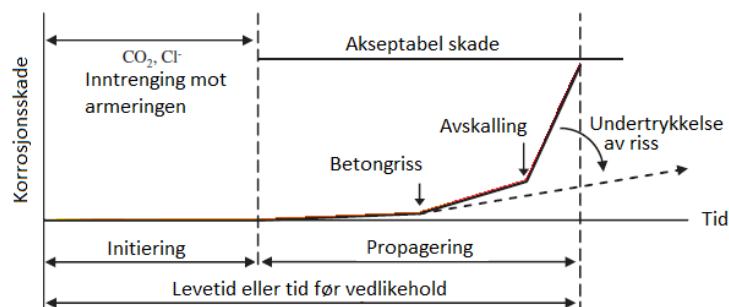
### 7.5.2 Rissvidde

W. Nguyen et al. [96] observerte en økning i tiden til korrosjonsinitiering for fiberarmert betong sammenlignet med standard betong. I forsøket ble prøvene utsatt for bøyepening for å undersøke den langsiktige påvirkningen av betongriss på materialenes elektrokjemiske oppførsel. Videre ble det målt en lavere korrosjonsstrømtetthet ( $i_{corr}$ ) for fiberarmert betong, noe som indikerer en gunstig bestandighetsytelse etter at aktiv korrosjon har inntruffet. Prøvene ble utsatt for en NaCl-løsning i omtrent 2,5 år, hvor det ble gjennomført ulike elektrokjemiske undersøkelser for overvåking. EIS ble gjennomført som en avsluttende test for å evaluere endringer i impedansresponsen grunnet riss. W. Nguyen et al. [96] konkluderte med at korrosjonsoppførselen for fiberarmert og standard betong avhenger av den sprukne tilstanden til betongen. Risskontroll som følger av fiberarmeringen, begrenset den maksimale åpningen av induerte riss, noe som medførte begrenset hastighet for inntrenging av NaCl-løsning. Kritiske riss langs lengden av armeringsjernet var dermed mer utbredt for standard betong.

C.G. Berrocal et al. [97] observerte ikke store variasjoner i kloridinntrengingskoeffisienten for prøver med ulik mengde fiber. Dette kommer av at grensesnittet mellom fiber og sementpasta ikke fungerer som en foretrukket vei for de aggressive stoffene. Mikrostrukturen i dette grensesnittet med fiber, med diameter over 0,1 mm, har vist seg å være lik grensesnittet rundt tilslaget i standard betong. Dette er en sone med høyere porøsitet sammenlignet med sementpastaen. Videre ble det observert at initieringsperioden vil reduseres dramatisk for sprukne betongelement sammenlignet med ikke sprukket element, uansett tilsetning av fiber i betongen.

G. Jen og C.P. Ostertag [98] observerte at fiberarmering i betong kan forlenge levetiden og gi økt bestandighet. Ved inkludering av fiber ble de langsgående rissene redusert og det ga betydelig bestandighetsforbedring. Tilstedeværelsen av riss økte kloridinntrengingshastigheten, men resulterte ikke i en utvikling av forskjellige korrosjonsstrømtettheter når begge prøvetypene var depassivert (med

og uten riss). Videre ble det oppdaget at den mest effektive konsekvensen av fiberarmeringen, ved armeringskorrosjon, er undertrykkelsen av korrosjonsinduserte splittingsriss. Observert fra figur 7.5, fremgår det at propageringsperioden er sterkt påvirket av den akselererende dannelsen av korrosjonsskader når rissene former seg og videre utvikler seg til avskalling av overdekningen. Den stiplede linjen er effekten av implementering av fiberarmering på propageringsperioden. Grunnen er den lave porøsiteten som medfører at korrosjonsproduktet har vanskeligheter for å spre seg over store områder, og påføre større skader. Dette medfører betydelig gevinst i betongens levetid, da det vil ta lengre tid før den overskrider akseptabel terskelverdi. Det konkluderes med at fiber begrenser korrosjonshastigheten til håndterbare nivåer under forhold standard betong har vanskeligheter med å motstå. Samtidig vil betongoverdekningen ha innflytelse på initieringsperioden.



Figur 7.5: Korrosjonsskademodell for betongbjelker [98]

I.S. Yoon [44] observerte lav kloridinntrenging for UHPC som følge av at stålfiberen skaper forsinkelsesbelastning på rissutbedringen. Stålfibrene reduserte effektiv rissdybde, men ved kritiske riss mistet betongen sin beskyttelsesevne på alvor. Det ble derfor konkludert med at en studie på UHPC utsatt for marint miljø er nødvendig for å kartlegge bestandigheten.

Feng et al. [99] gjennomførte et forsøk hvor betongbjelker ble utsatt for varierte bøyingspenninger for klorideksponering. Forsøket ble modellert som et element i en ekvivalent elektrisk krets. De oppdaget at ved økt belastning økte korrosjonen av armeringen betydelig.

M. Ismail et al. [100] utførte en studie på kloridinntrenging i opprisset betongprøver. Resultatene viser at rissvidden påvirker kloriddiffusjonen betydelig langs rissdybden. Kloriddiffusjonen avtar langs dybden.

### 7.5.3 Marint miljø

M. Maes et al. [101] gjennomførte en studie på betongens evne til å helbrede 0,1-0,3 mm riss autogent i marine miljø. De oppdaget at sementholdige materialer er i stand til å helbrede eller forsegle rissvidder opp til 0,1 mm. Autogen helbredelse oppnås ved kontinuerlig hydrering og kalsiumkarbonatutfelling. Motstanden mot klorider ble forbedret som følge av denne helbredelsen. Videre ble det observert at prøver i skvalpesonen oppnår raskere kurering enn betong som er kontinuerlig nedsenket. Riss over 0,1 mm vil også kunne helbredes, men ikke fullstendig.

S. Pyo et al. [102] observerte at UHPC har en overordnet evne til å motstå inntrenging av klorider på grunn av dens tette mikrostruktur. Denne forhindrer veksten av rustkrystaller.



A. Aguilar et al. [25] oppdaget at aktiv korrosjon ikke inntraff før etter 100-150 dager eksponering for bjelker med v/c-forhold på 0,5, og omtrent 235 dager for bjelker med v/c-forhold på 0,3. Videre observerte de at armeringen depassiverte først for elementer over sjølinjen. Etter ett år oppnådde kloridkonsentrasjonen over sjølinjen en verdi på omtrent det dobbelte av det som oppstod for de nedsenkede elementene. I tillegg oppdaget de at når korrosjon starter for bjelker nedsenket i sjøen, vil det sannsynligvis finne sted med mindre anodisk polarisering på grunn av lett tilgjengelig elektrolytt. For delvis nedsenket betong vil korrosjonsinitieringen på armeringen oppstå der kloridene samler seg. Dette området finner sted rett over sjølinjen som et resultat av kapillærtransport og fordamping av vann.

#### 7.5.4 Bestandighet

W. Nguyen et al. [103] gjennomførte et forsøk på fiberarmert betong og standard betong utsatt for et kloridmiljø i litt over 2 år, for å gjøre rede for riss som er til stede i praksis. Det ble observert at fiberarmert betong oppnådde lengre tid til korrosjonsinitiering enn standard betong. Ved aktiv korrosjon ble massetapet av armeringsjernet redusert hos fiberarmert betong som følge av lav porøsitet, og bidrar til mindre spredning av korrosjonen enn for standard betong.

Studie gjort av M. Farzad et al. [104] ser på omfanget av makrocelleutvikling mellom betongmaterialer. Dette for å identifisere mulige fordeler og utfordringer ved å bruke UHPC som reparasjonsmateriale for armerte betongbruer i marint miljø. UHPC viste større bulkresistivitet enn standard betong.

C.G. Berrocal [97] konkluderte med at bjelker laget av fiberarmert betong viste lignende eller forbedret oppførsel med tanke på korrosjonsinitieringstiden, sammenlignet med standard betong.

J.A. Grubb et al. [105] observerte at betong, tilført stålfiber, er mer motstandsdyktig mot korrosjon enn standard betong, til tross for høye kloridkonsentrasjoner.

R.B. Holland et al. [106] har i en litteraturstudie funnet ut at strukturelle bjelker i UHPC, som er sprukket i bøyning, fikk en kloridinntrenging i ett  $5 \mu m$  bredt riss på  $5 mm$ . Det henvises til at en så liten rissdannelse er typisk og at materialets motstand mot både kloridinntrenging og karbonatisering er høy. Det konkluderes med at UHPC er meget holdbart og gir utmerket beskyttelse av innstøpt stålarmering.

H.R. Russell og B.A. Graybeal [107] gjennomførte et eksperiment hvor de utsatte UHPC for et marint miljø ved Treat Island i 5 til 15 år. De observerte at den tette matrisen til UHPC forhindret aggressive stoffer i å trenge inn, og at bestandighetsegenskapene er betydelig bedre enn for standard betong.

S. Abbas et al. [28] observerte at UHPC har høyere bestandighetsegenskaper på grunn av betydelig reduksjon i antall og størrelse på porene. Dette bidrar til en lavere klorid diffusjonskoeffisient for UHPC enn for standard betong, noe som resulterer i redusert korrosjonsrisiko.

I følge litteraturstudien gjort av M.B Eide og J. -M. Hisdal [11], kan overdekningen reduseres med  $10 mm$  sammenlignet med standard betong, og samtidig gi tilsvarende korrosjonsbeskyttelse for armeringen. Videre observerte de at grensesnittet mellom sementpasta og grove tilslag eller stålfiber

kan redusere betongens bestandighet. Bestandighetsegenskapene til UHPC er betydelig bedre enn for standard betong, og materialet egner seg godt for marine miljø.

## 8 Diskusjon

### 8.1 Metode

#### 8.1.1 Bjelkedimensjonering

For å forenkle prosessen med å bygge forskalingene, ble det bestemt at høyden på bjelkene for alle de forskjellige overdekningene skulle være konstant. Beregningene tok derfor utgangspunkt i bjelken med størst overdekning. Bjelkene ble bøyd om svak akse, for å enklere risse opp, og bredden ble dermed større enn høyden. For å overholde kriteriene gitt i standarden for overdekning, ble tverrsnittets høyde dimensjonert til  $110\text{ mm}$ , som nevnt i kapittel 6.4.1. Dette på grunnlag av at største overdekning er  $50\text{ mm}$  og resterende avstand fra jern til overflate må være større enn denne. For å unngå for massive bjelker ble høyden begrenset til minimum avstand på  $50\text{ mm}$ . De resterende  $10\text{ mm}$  ble lagt til for å dekke tykkelsen på armeringsjernet.

I henhold til kravet, forklart i kapittel 6.4.1, ble bredden på bjelken satt til  $160\text{ mm}$  med utgangspunkt i at avstanden inn til armeringsjernet må være større enn overdekningen. I tillegg måtte tykkelsen til to armeringsjern og avstanden mellom de legges til. Å benytte  $a_h = 32\text{ mm}$  ble sett på som til sikker side. Dette ettersom  $32\text{ mm}$  er den største kornstørrelsen i en standard siktesats, og betongreseptene var ikke kjent på dette tidspunktet. Med overdekning på  $52\text{ mm}$  på begge sider, samt to armeringsjern på  $\varnothing 8$ , ble total bredde på  $152\text{ mm}$  inkludert avstand mellom jernene. Bredden ble dermed rundet opp til  $160\text{ mm}$ .

Lengden på bjelken ble begrenset etter tilgjengelige materialer og lengden på herdekarene. I tillegg måtte det være plass til utstikkende armeringsjern, for korrosjonsmålinger senere. Platene ble funnet på bygglåben fra tidligere forskalingsformer, slik at alt materiell ble gjenbrukt. Bunnplatene hadde en lengde på  $1442\text{ mm}$  og ble dermed den definerte lengden på bjelkene.

#### 8.1.2 Forskaling

Når betong fylles i forskaling, blir den utsatt for til dels store belastninger. Ved dårlig utførelse av forskalingen, er det fare for at den gir etter og bryter sammen. Det var derfor viktig å ta hensyn til forskalingstrykket under planlegging av støpearbeidet. Ved rask utstøping ville trykket øke proporsjonalt med dybden, og vinkelbeslag ble dermed festet nede på hvert hjørne av forskalingen. Løsningen viste seg å være en sikker og holdbar metode.

#### 8.1.3 Støping

En langsgående støperetning ville vært foretrukket, men støpeforholdene gjorde at det ikke var mulig å overholde en bestemt orientering under utstøping. Betongen ble dermed fordelt utover forskalingsformene i alle retninger. Dette kan ha påvirket betongens struktur og egenskaper negativt. Fasthetsutviklingen ble ikke undersøkt, da dette ble sett bort fra i denne oppgaven, men kunne vært gjort ved å utføre tester på mindre prøvelegemer.

På grunn av forskalingens størrelse og vekt var det utfordrende å få utført en akseptabel vibrering, for å redusere andel luftbobler og forsikre god komprimering. Metoden som ble brukt, fra kapittel 6.4.3, ble i ettertid observert å være en tilstrekkelig løsning, da alle hjørner var fullt utstøpt.

I ettertid ble det observert at det kunne vært gunstig å plassere jernene i flukt på den ene kortsiden av forskalingen, for å unngå å måtte bruke tid på å kutte armeringen for å få plass i herdekaret. I tillegg ville det vært fordelaktig å bruke armeringsjern som ikke overskrider lengden på karet.

For å kunne maksimere antall uker i eksponeringsmiljøet ble det bestemt å korte ned herdetiden i herdekaret mest mulig før utsettelse av testobjektene. Det ble besluttet å hente opp bjelkene etter syv døgn, ettersom størsteparten av hydratiseringsprosessen vil foregå de første dagene etter støping. Dette viste seg likevel å ha en innvirkning på EIS-målingene, utdypet i kapittel 8.2.

#### 8.1.4 Oppføring av testobjekter

Hensikten med tvingesystemet var å skape en belastning som dannet riss, og som holdt de konstante gjennom eksponeringen. For tvingesystemet ville stål vært det mest gunstige valget med tanke på påført kraft som kreves for å bøye bjelkene. På grunn av pris ble det benyttet treverk. En konsekvens av dette er at tre svulmer opp og kan bli svakere i kontakt med vann, som kan medføre en forskjell i rissvidde på bjelkene i testobjektene. For å motvirke effekten av oppsvulmingen på tvingesystemet ble det skrudd inn en skrue under hver mutter for å klemme treverket mer sammen. Dette var også for å unngå gjennomlokking av gjengestengene. I tillegg ville det vært ideelt å ha en rund avstandsknast for å oppnå mest mulig jevnt fordelte riss langs begge bjelkene.

#### 8.1.5 Oppsprekking

Tanken bak å lage riss i bjelkene med et tvingesystem, se kapittel 5, var å få mer naturlige rissforgreninger gjennom tverrsnittet på realistiske områder. Andre alternativer ble vurdert, som å benytte en maskin til å utføre trepunkts bøyestrek, samt å benytte sag. Sistnevnte ble raskt sett bort ifra da det ville gi mindre realistiske riss. På grunn av bjelkenes størrelse og vekt ble det bestemt å finne en enkel måte å lage riss og løsningen med tvingesystemet ble dermed valgt.

Det er ikke publisert en standard på UHPC, som forklart i kapittel 5. På grunn av betongens uforutsigbarhet når det kommer til eksakt styrke, var det ikke mulig å beregne nødvendig kraft som måtte til for å lage en bestemt rissvidde. Rissene måtte derfor lages på øyemål ved hjelp av en rissmåler. Ettersom rissvidden ikke vil være konstant langs hele risset ble den største rissvidden antatt. Metoden egnes ikke dersom nøyaktighet er viktig, men for forsøkets formål var dette tilstrekkelig.

På grunn av lengden på gjengestengene og pipenøkkelenes begrensede dybde, kunne mutterne bare skrues fra ene siden av tvingesystemet. For å fordele trykket best mulig ble mutterne plassert på motsatt side av hverandre, som ved oppstramming skulle gi en jevn deformasjon.

#### 8.1.6 Korrosjonstesting før miljøeksponering

EIS-målingene ble gjennomført både før og etter oppsprekking av testobjektene. Ettersom det ikke ble observert betydelig forskjell på testene før og etter oppsprekking, ble det besluttet å utføre kun én test for hver overdekning av UHPC og én av standard betong. Dette ville gi et tilstrekkelig sammenligningsgrunnlag.

### 8.1.7 Forberedelse til utsetting

For å beskytte den utstikkende armeringen fra å korrodere, ble det påført to lag med epoxy. Dette for å hindre at det slo ut på EIS-målingene som en falsk korrosjon. På testobjekt 17 ble ikke det siste laget påført, på grunn av COVID-19, og kan ha innvirkning på resultatet. Dette ble ikke undersøkt, da dette testobjektet ikke var mulig å få tak i ved opphenting, som forklart i kapittel 6.4.8.

### 8.1.8 Utsetting og henting

Pallen med testobjektene som skulle på sjøbunnen kantret ved utsetting, som forklart i kapittel 6.4.8, og ga store komplikasjoner ved opphenting. I forhold til forsøket, medførte dette til et svakere sammenligningsgrunnlag.

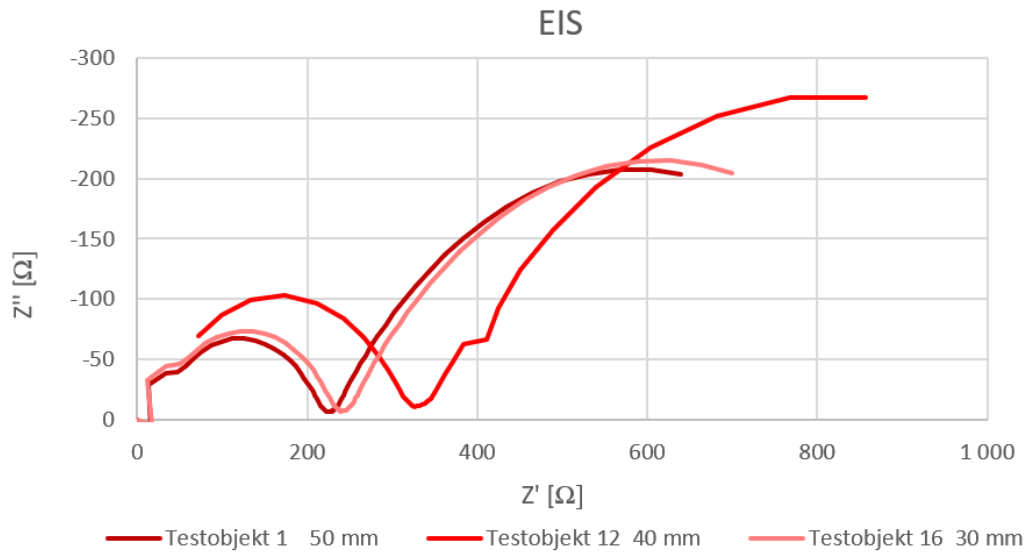
## 8.2 Før og etter eksponering

Figur 7.1 viser korrosjonsmotstanden for utvalgte UHPC- og SV-40 bjelker før eksponering i miljø. Kurvene uttrykker både armeringsjernet og betongens motstand i henholdsvis første og andre halvsirkel, som forklart i kapittel 3.6.1. For armeringsjernet uttrykkes korrosjonsmotstanden i form av passivfilmens tykkelse. Dette er det beskyttende laget som dannes rundt armeringen når jernet kommer i kontakt med betongens basiske miljø, som beskrevet i kapittel 3.4.2. En større halvsirkel gir en tykkere passivfilm, og dermed en bedre korrosjonsmotstand.

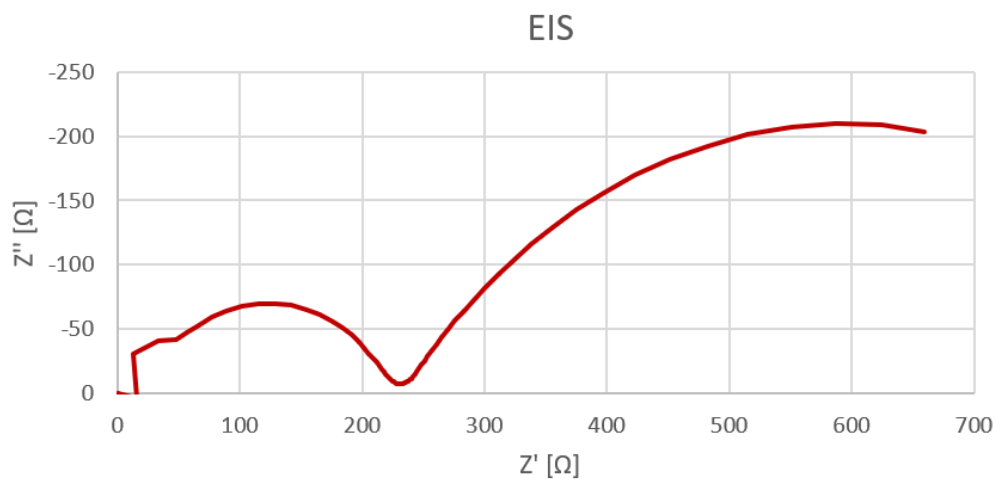
For bjelkene på sjøbunnen er det observert en tynnere passivfilm, enn for de i skvalpesonen, og kan skyldes redusert tilgang på oksygen. At passivfilmen er tynnere indikerer ikke at den vil oppleve aktiv korrosjon tidligere, det hele avhenger av miljøet konstruksjonen er utsatt for. I kapittel 3.2.1 er det forklart at konstruksjoner nedsenket på sjøbunnen har lav diffusjonskoeffisient sammenlignet med de som er delvis nedsenket. Dette skyldes at konstruksjoner på sjøbunnen har porer fylt med vann slik at det blir vanskeligere for å få diffusjon gjennom betongen til å skje. Konstruksjoner som er delvis dekket med sjøvann vil fortsatt ha en tørr betongoverflate hvor et kritisk område ved sjølinjen vil kunne føre til korrosjon. Ved dette kritiske punktet vil vann fordampe og klorider ansamles, slik at det legges til rette for å skape et korrosivt miljø. På bakgrunn av dette kan det dermed ta lengre tid for testobjektene på sjøbunnen å korrodere, enn for de i skvalpesonen. Passivfilmen i skvalpesonen er tykkest og har dermed størst korrosjonsmotstand, men ettersom den er utsatt for et mer aggressivt miljø, vil filmen brytes ned raskere når depassivering først er i gang. Dette samsvarer også med teorien i kapittel 3.2.1, som sier at korrosjonskader vanligvis oppstår over sjølinjen.

Kurven for testobjekt 12, vist i figur 8.1, er valgt å neglisjeres i sammenligningsgrunnlaget. Dette er basert på at målingen viser stort avvik sammenlignet med bjelkene med overdekning på 30 og 50 mm. Det antas at innstillingene på IviuStat XRi har vært stilt inn for å måle med mindre nøyaktighet, ettersom det observeres at det er færre inputer i rådata. Dette gjelder også for testobjekt 17. Det var kun de to nevnte testobjektene som ble målt samme dag, noe som indikerer at det kan være instrumentet som medfører avviket og ikke betongen. På grunnlag av at det er neglisjerbar forskjell på kurvene for bjelkene med 30 og 50 mm overdekning benyttes disse verdiene, representert som en gjennomsnittsverdi. Kurven vil være referansen for korrosjonshastigheten før eksponering, for alle UHPC-bjelkene. Gjennomsnittsverdien er presentert i figur 8.2, og benyttes videre i sammenligningen.

Dette kan antas som akseptabelt ettersom bjelken med overdekning på 40 mm forventes å ligge mellom de to kurvene.



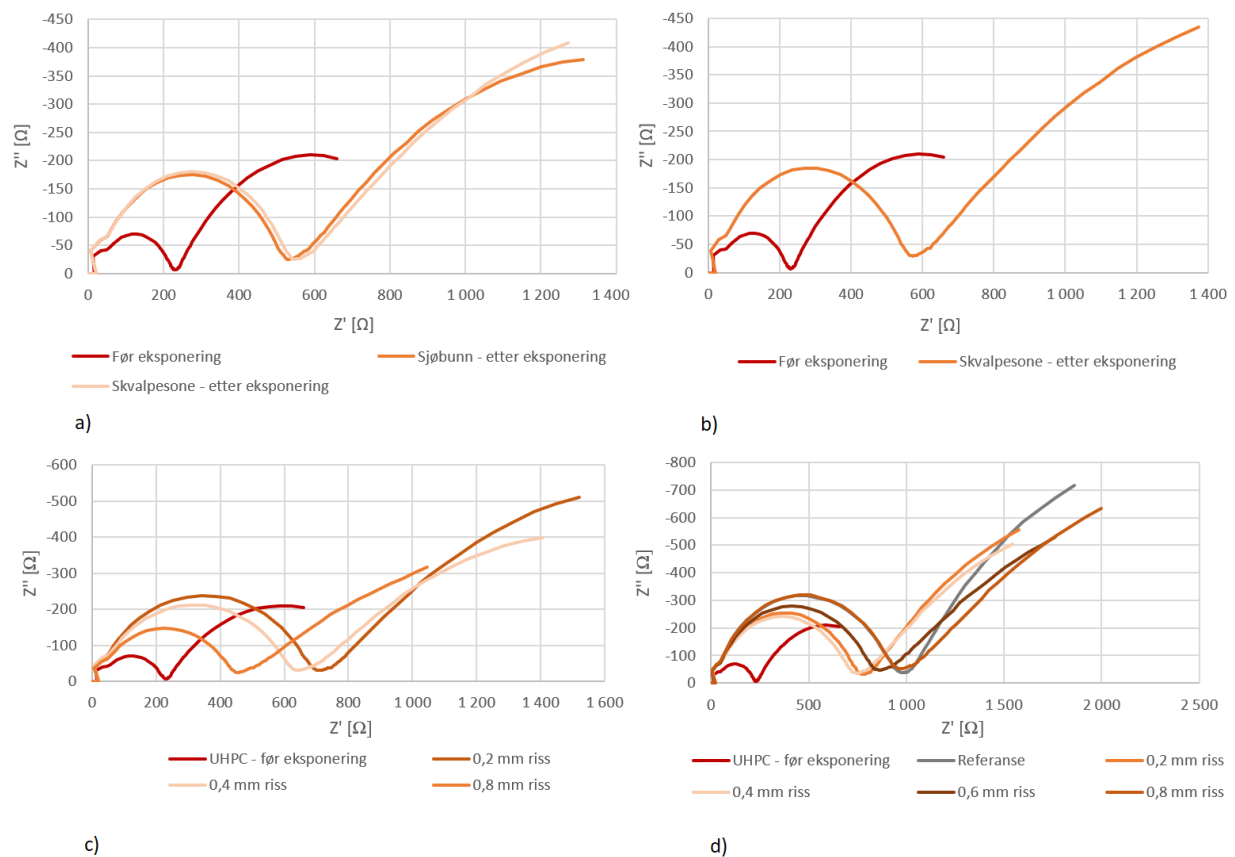
Figur 8.1: Korrosjonsmotstand før eksponering for UHPC-bjelker



Figur 8.2: Gjennomsnittlig korrosjonsmotstand før eksponering for UHPC-bjelker

Det observeres, for alle kurvene i figur 8.3, at korrosjonsmotstanden for bjelkene målt før eksponering har lavere verdi sammenlignet med etter eksponering. Dette kan skyldes at betongens struktur ikke er ferdig utviklet, etter så kort tid, da testene ble utført. Sementhydratiseringen har bidratt til å gi en tettere struktur, samt øke produksjon av portlanditt som gjør betongen mer basisk og dermed gir økt korrosjonsmotstand, se kapittel 3.3. R. B. Polders [95] studie om inspeksjon av konstruksjoner i marint miljø, viser at slaggpartikler i sementen har hydratisert i kontakt med sjøvann og dermed redusert permeabiliteten, som følge av reduksjon i andel kapillærporer. Dette bekrefter at prinsippet om sementhydratisering over tid vil bidra til økt bestandighet. Denne forskjellen kunne kanskje vært unngått dersom målingene før eksponering ikke hadde blitt utført før etter 28 døgn. Ved dette tidspunktet har SV-40 oppnådd sine forventede mekaniske egenskaper, som forklart i kapittel 3.1.1.

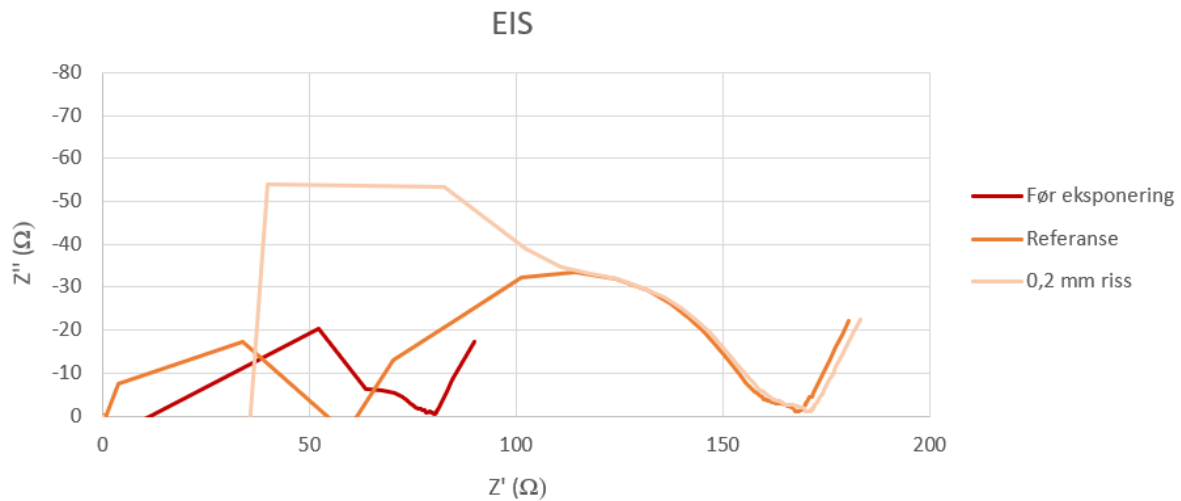
## EIS



Figur 8.3: Korrosjonsmotstand for UHPC-bjelkene før og etter eksponering for a) 30 mm overdeking, b) 40 mm overdeking, c) 50 mm overdeking på sjøbunnen og d) 50 mm i skvalpesonen

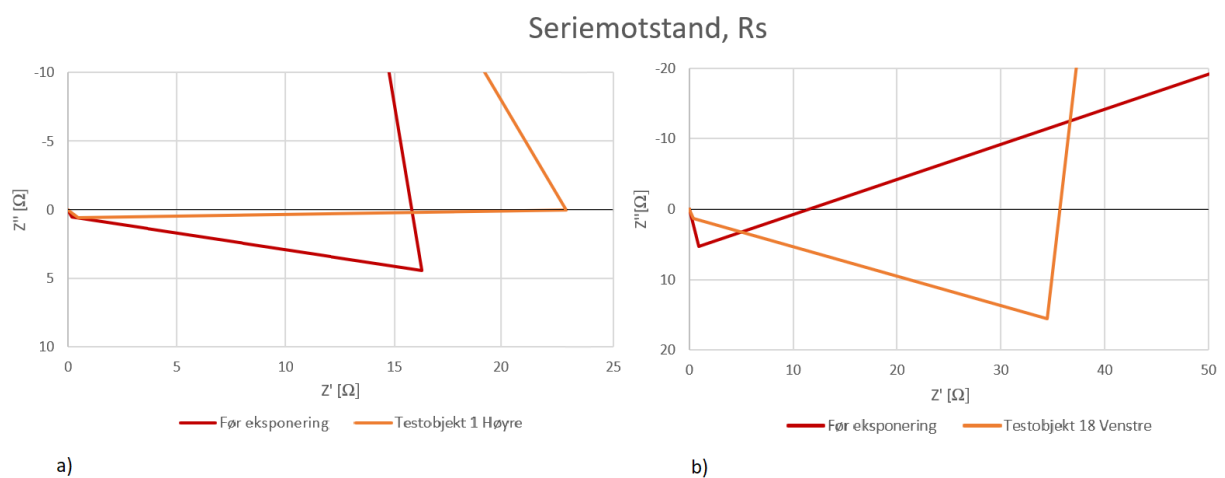
Fra figur 8.3 og 8.4 observeres det en tydelig forskjell i økning på korrosjonsmotstanden til referansen målt før og bjelkene målt etter eksponering. UHPC og SV-40 har en differanse i korrosjonsmotstand på henholdsvis omtrent 800 og 45  $\Omega$ . Dette tyder på at UHPC har en raskere fasthetsutvikling enn SV-40, og kan begrunnes med at UHPC har en høyere andel sement og silikastøv som kan reagere. En annen utslagsfaktor kan være eksponeringsmiljøet. Bjelkene ble lagt ut tidlig i herdefasen, og miljøet kan dermed ha innvirkning på herdingen. Det kan tenkes at herdeprosessen for bjelken på sjøbunnen vil ha mindre vanntap under hydratiseringen og dermed få en enda tettere porestruktur, sammenlignet med bjelkene i skvalpesonen. Dette baseres på teorien, forklart i kapittel 3.3, som omhandler strukturens påvirkning av vanntap. Uten referansebjelken fra sjøbunnen kan dette ikke bekreftes, men det antas at den vil ha en tettere struktur som følge av dette.

SV-40 referansebjelken, som vist i figur 8.4, krysser ikke x-aksen på tilsvarende måte som SV-40 bjelken med 0,2 mm riss. Dette kan skyldes innstillingen av nøyaktigheten på EIS-målingen. Hadde referansebjelken blitt testet flere ganger, ville den sannsynligvis oppnådd en lignende kurve som SV-40 bjelken, noe likheten i resten av kurvene indikerer.



Figur 8.4: Korrosjonsmotstand for SV-40 bjelker før og etter eksponering i skvalpesonen

Området frem til kurven krysser x-aksen, omtales som  $R_s$  og representerer seriemotstanden til elektroden, se kapittel 3.6.1. Verdien sier noe om ladningsoverføringen langs jernet, og figur 8.5 a) og b) viser at det for både UHPC og SV-40 er en større seriemotstand etter eksponering, enn det var før. Dette betyr at det har skjedd en reduksjon i ladningsoverføringen, som indikerer at elektrolytten har blitt tettere under eksponeringen. En årsak til denne endringen er at betongen, ved måling før eksponering, ikke var ferdig herdet som nevnt tidligere.

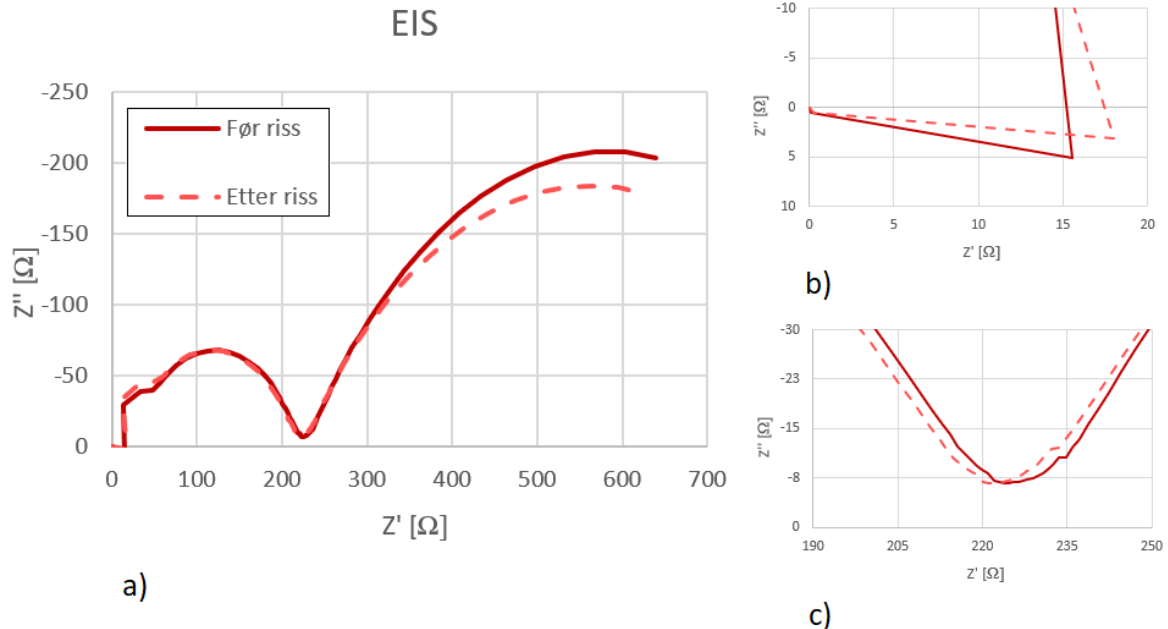


Figur 8.5: Seriemotstanden i armeringsjernet før og etter eksponering for a) UHPC- og b) SV-40 bjelken

Ved nærmere inspeksjon av testobjekt 1 er det merkbart at kurven, som illustrerer seriemotstanden, etter oppsprekking er delvis forskjøvet mot høyre, som vist i figur 8.6 a). Denne forskyvningen kan være tilfeldig, men kan ikke bekreftes, da det er utilstrekkelig med data til å trekke en beslutning om dette gjelder for alle tilfeller. Figur 8.6 c) viser også tydelig at hele den første halvsirkelen, før oppsprekking, er forskjøvet mot høyre. Den andre halvsirkelen starter på en verdi rundt 220  $\Omega$ . Noe som sannsynligvis oppstår som en kombinasjon av faradaisk strøm og diffusjonsprosess, tilsvarende endelig diffusjon på en elektrode. Selv om den laveste målte frekvensen er noe høy for at disse effektene er synlige, er det sannsynligvis fortsatt årsaken. Flere faktorer spiller inn i denne typen diffusjon, og kan bidra til å synliggjøre denne prosessen selv ved høye frekvenser. Figur 8.6 a) viser at



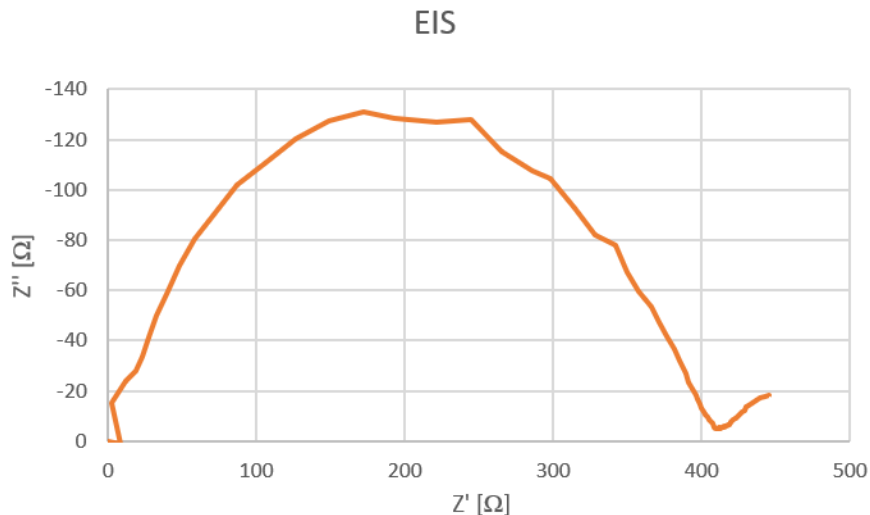
den andre halvsirkelen reduseres etter oppsprekking. Flere bjelker ble testet gjentatte ganger for å sikre reproduserbarhet for hvert resultat, hvor alle resultater med avvik kan ha oppstått som følge av forstyrrelser på målingene. Basert på troverdigheten til impedansspektrumet, kan derfor effekten om redusert betongmotstand skyldes oppsprekkingen.



Figur 8.6: Forskjell i a) korrosjonsmotstand, b) seriemotstand og c) betongmotstand for UHPC-bjelken før og etter oppsprekking

### 8.3 Korrosjon

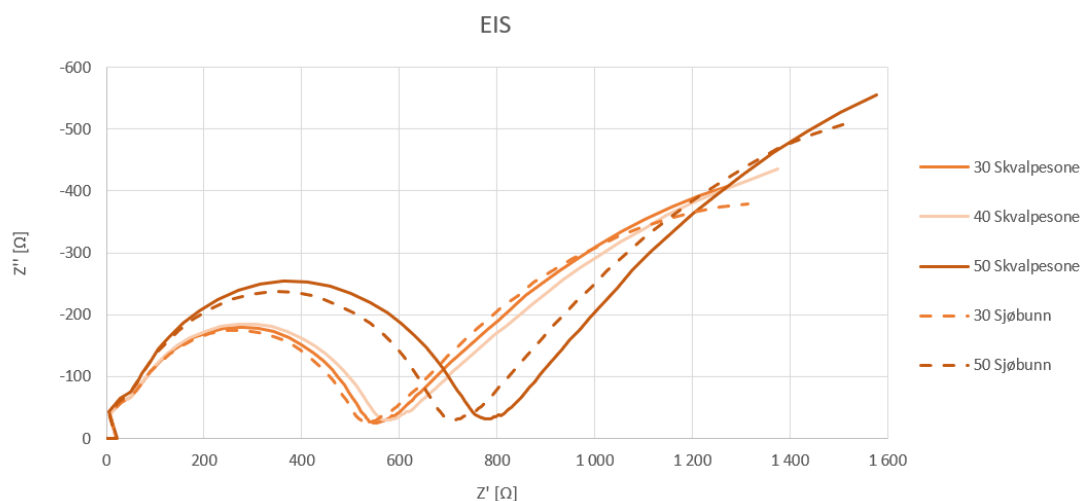
Figur 8.7 viser en EIS-måling av et korroderende armeringsjern, med sjøvann som elektrolytt. Ut ifra kurven skal både SV-40, med 0,2 mm riss og 50 mm overdekning, og referansebjelken av SV-40 i skvalpesonen være utsatt for korrosjon. Dette som følge av at målingene viser en mindre korrosjonsmotstand enn armeringsjernet som er korrodert. Resultatet indikerer dermed at passivfilmen er brutt ned, og at aktiv korrosjon er påbegynt. Dette motstrider observasjon gjort av A. Aguilar et al. [25], som fant ut at aktiv korrosjon ikke inntraff før 100-150 og 235 dager i et tilsvarende aggressivt miljø, for betong med v/c-forhold på henholdsvis 0,5 og 0,3. Da SV-40 bjelken ble delt i to for å hente ut kloridprøver, ble det dessuten observert at armeringsjernene ikke var begynt å korrodere. Armeringsjernet testet i sjøvann har ikke vært dekket av betong. Resultatet fra EIS-målingen kan derfor avvike fra målingene for jern som ligger i betong, på grunn av ulike elektrolytter. Utgangspunktet for de forskjellige målingene er ikke det samme. For målingene med betong vil armeringsjernene være påvirket av passivfilmen, og det er dens motstand som betegnes i første halvsirkel. EIS-målingene med sjøvann som elektrolytt, vil ikke danne passivfilm. Kurven med korroderende armeringsjern kan tenkes å benyttes mer som et forholdstall enn en direkte sammenligning. Med utgangspunkt i dette kan det derfor ikke trekkes en fullstendig konklusjon om aktiv korrosjon har inntruffet eller ikke. For å få et akseptabelt sammenligningsgrunnlag burde det vært produsert en bjelke med større rissvidde, hvor aktiv korrosjon vil inntreffe.



Figur 8.7: Korrosjonsmotstand for korrodert armeringsjern med sjøvann som elektrolytt

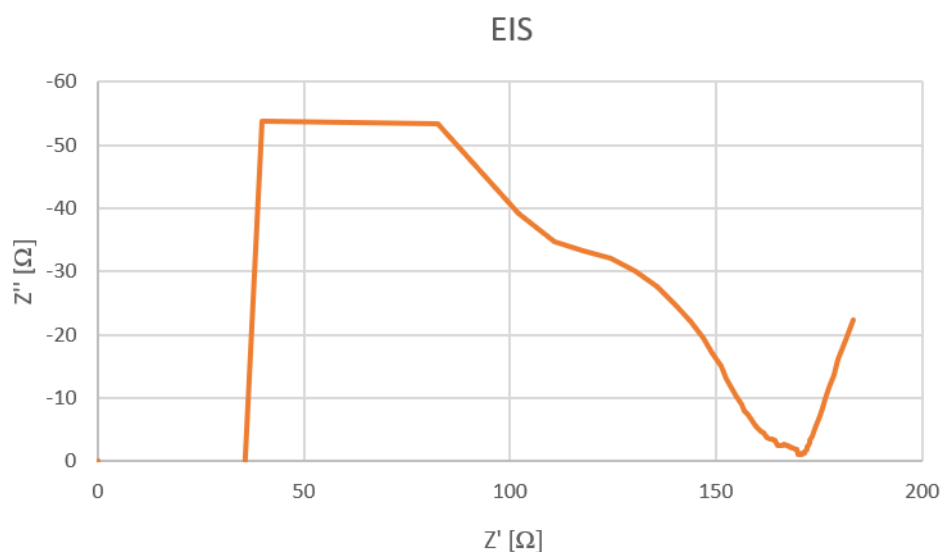
## 8.4 Overdekning

Figur 8.8 viser at den elektrokjemiske motstanden er betydelig høyere i UHPC-bjelken med en overdekning på  $50\text{ mm}$ , sammenlignet med bjelkene på  $30$  og  $40\text{ mm}$ . Dette gjelder for både skvalpesonen og sjøbunnen, men korrosjonsmotstanden for bjelkene på sjøbunnen viser seg å være lavest. Disse resultatene samsvarer med forsøk gjort av L. Yu et al. [94] og G. Jen et al. [98], hvor det ble observert at overdekningen har innflytelse på initieringsperioden, ettersom korrosjonshastigheten begrenses ved redusert tilførsel av oksygen ved katoden. Dette samsvarer også med teorien i kapittel 3.4.3. Videre viser figuren at det er minimal forskjell mellom korrosjonsmotstanden for bjelkene med overdekning på  $30$  og  $40\text{ mm}$  i skvalpesonen, og bjelken med  $30\text{ mm}$  overdekning på sjøbunnen. Et forsøk i artikkelen skrevet av R. B. Polder [95] viser samtidig til at prefabrikkerte elementer kan ha en mindre overdekning enn plasstøpte konstruksjoner før tegn til korrosjon, der begge tilfeller var utsatt for et marint miljø i over  $30$  år. Resultatene fra forsøket viste tegn til korrosjon ved henholdsvis  $20\text{-}25$  og  $35\text{ mm}$  overdekning.



Figur 8.8: Korrosjonsmotstand for UHPC-bjelker etter eksponering for ulike overdekninger og miljø med rissvidder på  $0,2\text{ mm}$

SV-40 bjelken, med overdekning på 50 mm, har en elektrokjemisk motstand på omtrent 170  $\Omega$ , sett fra figur 8.9. Tilsvarende viser figur 8.8 at UHPC har en motstand på omtrent 550-800  $\Omega$ , avhengig av overdekning og miljø. Det legges merke til at bjelken på sjøbunnen med overdekning på 50 mm har en større korrosjonsmotstand enn bjelken i skvalpesonen med 40 mm overdekning. Den sistnevnte var plassert øverst på palle 2, og har dermed ikke blitt like mye påvirket av sjøvann. Dette kan medføre at ytterligere vann har fordampet under herdefasen, og det kan være større tilstedeværelse av porer i strukturen. Transport av aggressive stoffer avhenger av porene, som forklart i kapittel 3.3.1. Bjelkene med 30 og 50 mm overdekning, i både skvalpesonen og på sjøbunnen, har nesten like korrosjonsmotstander. Dette kan skyldes at bjelkene i skvalpesonen har ligget nederst på pallen og dermed vært mer tildekket av sjøvann, sammenlignet med de øverst på pallen. Eksponeringsforholdene for de to marine miljøene vil med dette være mer like. Denne likheten kan tyde på at miljøet ikke har stor innvirkning ved korttidseksponering.



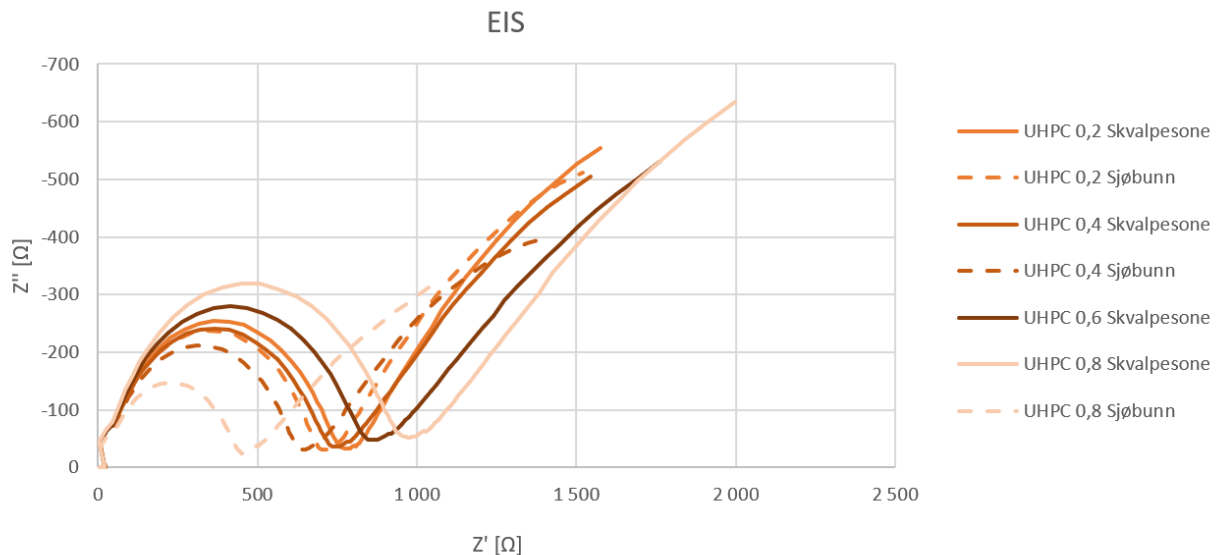
Figur 8.9: Korrosjonsmotstand for SV-40 bjelke etter eksponering med overdekning 50 mm og rissvidde på 0,2 mm

## 8.5 Riss

Det observeres at begge bjelkene i testobjekt 6 og 18, samt høyre bjelke i testobjekt 5 har fått en økning i rissvidden, vist i tabell 7.3. Økningen kan skyldes at det er benyttet treverk fremfor stål i tvingesystemet, som medfører oppsvulming av trefibre og dermed påføre en overbelastning på bjelkene, som forklart i kapittel 3.5. Dette gjelder i høyeste grad testobjekt 6. Andre grunner til økt rissvidde kan i tillegg være uforsiktig behandling av testobjektene under utsetting og henting, samt under selve eksponeringen i miljø. Økt rissvidde kan medføre ekstra inntrenging av væsker og stoffer i betongen. Testobjekt 5 og 18 er mer sårbare for ytterligere påkjenninger ettersom testobjekt 5 allerede er påført stor kraft, og testobjekt 18 består av en svakere betong.

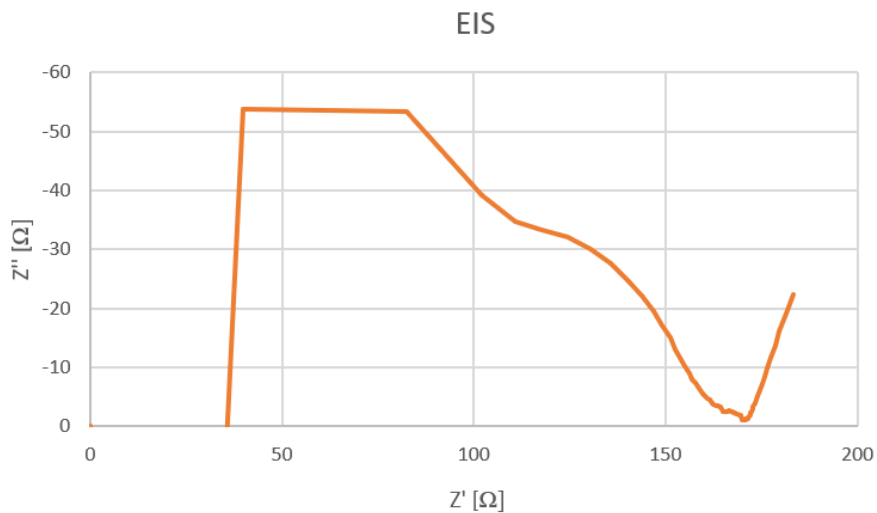
Figur 8.10 bekrefter at økt rissvidde vil bidra til å øke angrepsarealet i betongen og medføre høyere diffusjonskoeffisient, som forklart i kapittel 3.4.7. W. Nguyen et al. [96] konkluderte i tillegg med at korrosjonsoppførselen for fiberarmert- og standard betong avhenger av den sprukne tilstanden til betongen. Videre observerte C. G. Berrocal et al. [97] og G. Jen et al. [98] at tilstedeværelsen av riss

reduerte initieringsperioden ved at rissene økte kloridinntrengingshastigheten. Dessuten viser også figur 8.10 at sjøbunnen er et mer aggressivt miljø sammenlignet med skvalpesonen, med tanke på korrosjonsmotstand. Testobjekt 6, referert som UHPC 0,8 Sjøbunn i figuren, viser betraktelig lavere korrosjonsmotstand sammenlignet med de resterende bjelkene eksponert på sjøbunnen. En årsak til den store avstanden til nærmeste kurve kan være at rissvidden har økt med ytterligere 0,2 mm, som vist i tabell 7.3.



Figur 8.10: Korrosjonsmotstand for UHPC-bjelker etter eksponering for ulike rissvidder og miljø med overdekning på 50 mm

Figur 8.11 viser at SV-40 bjelken har en minimal elektrokjemisk motstand, sammenlignet med UHPC-bjelkene i figur 8.10. I størrelsesorden har SV-40 bjelken en motstand på omtrent 135  $\Omega$ , mens UHPC-bjelkene har nærmest tidoblede verdier på omtrent 1000  $\Omega$ . Resultatene viser dermed at SV-40 bjelken har lavere motstand mot mulig korrosjon. Dette samsvarer med funn gjort i teoribakgrunnen og litteraturstudiet, i henholdsvis kapittel 3 og 7.5. En forklaring på den økte korrosjonsmotstanden kan være at UHPC, med sitt lave v/b-forhold, har en tettere mikrostruktur uten kapillærporer. Porene vil være så små at de bidrar til lite transport av væsker og gasser, som forklart i kapittel 3.1.2 og 3.3. Dessuten vil tilføring av fiber og dens effekt på rissdannelse, medføre reduksjon av permeabilitet, som beskrevet i kapittel 3.5.1. Samtidig observerte I. S. Yoon [44] at stålfibre i UHPC kan skape forsinkelsesbelastning på rissutbedringen og redusere effektiv rissdybde. Studien utført av W. Nguyen et al. [96] viser også til at fiberarmering begrenser den maksimale åpningen av induerte riss og medfører begrenset tilgang til inntrenging av kloridholdig væske. Det vil med dette være troverdig at UHPC har en høyere motstand mot korrosjon enn SV-40.



Figur 8.11: Korrosjonsmotstand for SV-40 bjelken etter eksponering i skvalpesonen med rissvidde 0,2 mm

En svakhet i resultatet, presentert i figur 8.10, er at bjelken i skvalpesonen med 0,8 mm riss viser størst korrosjonsmotstand. Dette stemmer ikke ifølge kapittel 3.4.7, da det var forventet at kurven skulle ligge mellom bjelken på sjøbunnen med 0,2 mm riss og bjelken i skvalpesonen med 0,6 mm riss, samt under bjelkene med 0,2 og 0,4 mm riss. Bjelken i skvalpesonen med 0,6 mm riss ligger derfor heller ikke som forventet. Som nevnt i kapittel 8.4, kan resultatet være en konsekvens av testobjektene plassering på pallen i skvalpesonen. Bjelkene med rissvidde 0,2, 0,4 og 0,6 mm lå nederst på pallen, og påvirkes dermed av vekslende tidevann med bjelkene helt og delvis dekket av sjøvann. Bjelken med 0,8 mm riss, testobjekt 5, lå derimot plassert øverst på palle 1 og ble ikke fullstendig dekket av sjøvann ved flo. Dette kan være årsaken til hvorfor bjelken har størst korrosjonsmotstand.

Om bjelkene kan dimensjoneres med større rissvidde, kan ikke direkte besvares med resultatene gjort i dette forsøket. På bakgrunn av manglende sammenligningsgrunnlag for korrosjon, kan det ikke forsvares at en økt rissvidde ikke vil medføre korrosjon av armeringsjernet. Studie gjort av Feng et al. [99] observerte at en økt belastning økte korrosjonen av armeringen betydelig. Dette kan vise seg å stemme ved lengre eksponering, men kan ikke bekreftes i denne studien.

### 8.5.1 Selvkuring

På bakgrunn av litteraturstudiet i kapittel 7.5 er det undersøkt om det har oppstått selvkuring i rissene med rissvidde 0,1-0,3 mm. Selvkuring kommer av at vann trenger seg inn i rissene og reagerer med uhydrert sement, se kapittel 3.4.7. Det kan observeres, fra figur 7.3, at det har oppstått større forekomster av stoffer for bjelkene på sjøbunnen, sammenlignet med de i skvalpesonen. Dette motstrider med forskning gjort av M. Maes et al. [101], der de oppdaget at prøvene i skvalpesonen oppnådde raskere selvkuring enn betongen som var kontinuerlig nedsenket. Etter å ha skylt bjelkene med vann, forsvant mye av stoffene på overflaten. Det antas at dette er salter og andre mikroorganismer som la seg under eksponering, og kan utelukkes fra videre vurdering.

Ved kun observasjon gjennom rissmåleren er det utfordrende å avgjøre hva som faktisk har lagt seg i rissene. Det vil være størst sannsynlighet for at det har oppstått selvkuring i bjelke 1 og 16, sammenlignet med de resterende. Et gråliggende stoff har lagt seg i rissene, noe som kan antyde at det er rehydrert sement. Alternativt kan det også være kalkutfelling, som kan påvises ved tilførsel

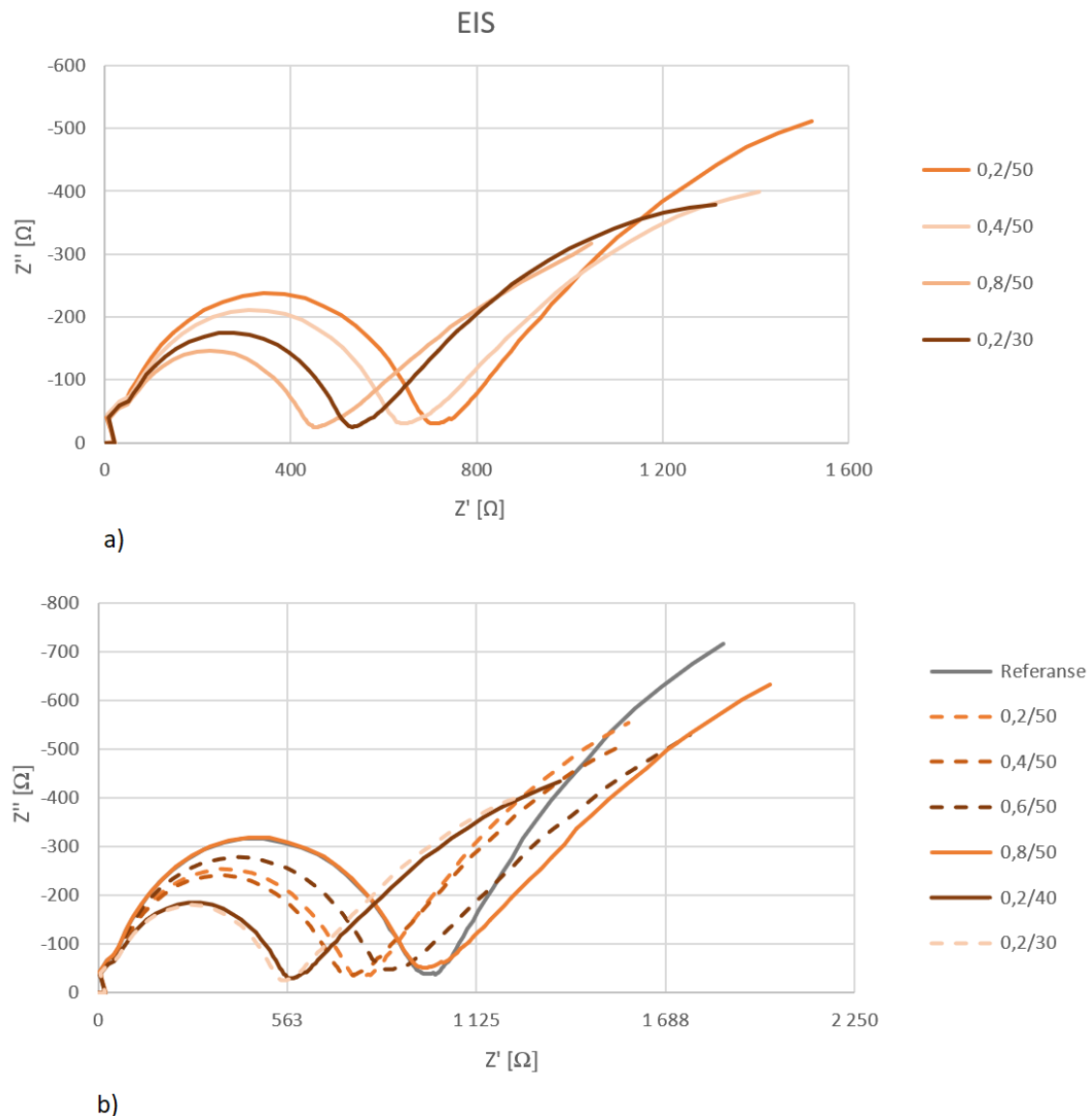
av saltsyre. Videre observeres det at en økning i rissvidde på  $0,15\text{ mm}$  kan tyde på at større partikler har trengt seg inn, som vist på figur 7.3 c). Dette må undersøkes videre med mikroskop for å trekke en konklusjon om hva stoffet kan være. Ut ifra øyemål er det ikke mulig å bekrefte at det har oppstått selvkuring, og videre undersøkelser er derfor nødvendig.

## 8.6 Marint miljø

Det er forventet at bjelkene i skvalpesonen skal ha lavere korrosjonsmotstand i motsetning til bjelkene på sjøbunnen. Dette skyldes, ifølge 3.4.4, at skvalpesonen skal være et mer aggressivt miljø sammenlignet med sjøbunnen. Det er som følge av større tilgjengelighet på oksygen, som er et viktig element i korrosjonsprosessen. Resultatene i dette forsøket strider mot denne teorien. Her er det verdt å merke seg at testobjektene i dette forsøket kun er blitt eksponert i miljøet i kort tid og resultatene kan endres ved lengre eksponering. Dessuten er testobjektene plassert i et avskjermet område for betydelig vind og bølger, som kan ha en dempende effekt på den vekslende påvirkningen av klorider, oksygen og store slagkrefter fra bølger i form av sjøsprøyt. Testobjekter plassert i et mer aggressivt miljø med større påkjenninger vil dermed kunne få andre resultater.

Testobjektene i skvalpesonen kan utsettes for både karbonatisering og kloridinitiert korrosjon. Karbonatisering er, som forklart i kapittel 3.4.5, en prosess som trenger seg gradvis innover mot armeringsjernet med en redusert hastighet jo lenger inn karbonatiseringsfronten kommer. Dette er en mindre aggressiv nedbryting, sammenlignet med kloridinitiert korrosjon, og den vil derfor bruke lengre tid før den påvirker armeringen. Dermed antas det at karbonatisering ikke har forekommet på dette tidspunktet, noe som samsvarer med kapittel 3.2.1, om at kloridinitiert armeringskorrosjon er den desidert største skademekanismen. Samtidig vil karbonatisering med tiden, fra kapittel 3.4.5, bidra til at konstruksjonen blir tettere, og det er derfor ikke mulig å si noe på dette tidspunktet om hvordan situasjonen vil endre seg over tid. Dette gjelder kun for testobjektene i skvalpesonen som har tilgang på luft.

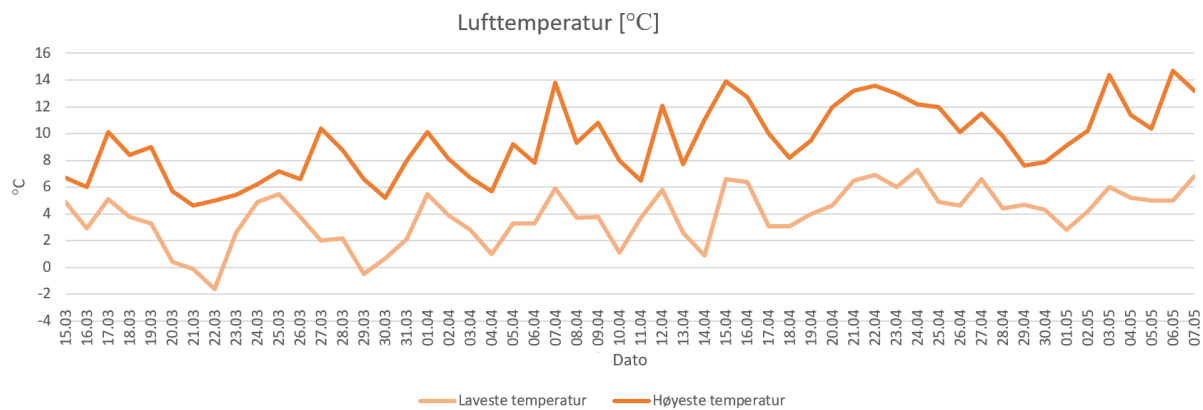
Figur 8.12 a) viser tydelig at UHPC-bjelken på sjøbunnen, som er dimensjonert etter kravene gitt for standard betong i NS 3473 for miljøklassen MA, i kapittel 3.2, har høyest korrosjonsmotstand. En videre reduksjon i korrosjonsmotstanden samsvarer med en økende rissvidde. Det kommer også frem av figur 8.12 a) at bjelken, med  $0,2\text{ mm}$  riss og  $30\text{ mm}$  overdekning, har høyere korrosjonsmotstand enn bjelken med  $0,8\text{ mm}$  riss og  $50\text{ mm}$  overdekning. Dette kan komme av at riss vil forkorte avstanden inn til jernet, som forklart i kapittel 3.4.7, og medføre en redusert overdekning. Bjelken med  $0,8\text{ mm}$  riss og  $50\text{ mm}$  overdekning vil derfor tilsvare en konstruksjon med overdekning mindre enn  $30\text{ mm}$ . Å trekke en slik beslutning for skvalpesonen kan derimot være vanskelig, fordi kurvene i figur 8.12 b) avviker fra teorien over, om at økende riss reduserer korrosjonsmotstanden. Her vil det være nødvendig å studere hvordan risset forgrener seg innover i betongen. En metode for å observere dette kan være å tilføre blekk i betongen og deretter sprekke den opp. Dette kan styrke vurderingen om at rissvidden har stor innflytelse på væskeinntrenging.



Figur 8.12: Korrosjonsmotstand for UHPC-bjolkene a) på sjøbunnen og b) i skvalpesonen, hvor de stiplede kurvene illustrerer bjolkene plassert nederst på pallene

### 8.6.1 Temperatur

Figur 8.13 viser at 14. mars 2020 var det eneste døgnet temperaturen kunne påvirke testobjektene med tanke på frost. En faktor som må tas med i betraktning er at den kaldeste temperaturen forekom første natten testobjektene var eksponert. For urisset betong vil det være minimalt til ikke eksisterende inntrenging av vann på så kort tid. Etersom bjelkene ble risset opp før utsetting, kan det likevel antas at vann har begynt å trenge inn i betongen på grunn av økt angrepsareal, se kapittel 3.4.7. Det er derfor vesentlig å inkludere temperaturpåvirkningen. Temperaturen var på det kaldeste  $-3,3\text{ °C}$ , se tabell 8.1, noe som tilsier at testobjektene i skvalpesonen kan ha vært utsatt for frysing. Dette forutsetter imidlertid at sjøvannet ble kjølt ned av lufttemperaturen kaldere enn  $-2\text{ °C}$ , som nevnt i kapittel 7.3. Det er verdt å merke seg at temperaturene er hentet fra Torungen Fyr og kan vise noe lavere temperaturer enn den realistiske inne ved eksponeringsområdet. Dette bidrar til ytterligere redusert sjanse for betydelig frysepåkjennelser. Basert på dette er det antatt at rissene ikke er påvirket av frysing på disse seks timene.



Figur 8.13: Lufttemperaturen under 55 døgns eksponering

Tabell 8.1: Oversikt over tidsperioden lufttemperaturen kunne føre til frysing av sjøvann 14. mars 2020. Tabellen viser også variasjon i temperatur innad per time

Klokkeslett	Laveste temperatur [°C]	Høyeste temperatur [°C]
04	-2,2	-1,6
05	-2,6	-2,1
06	-3,0	-2,5
07	-3,2	-2,9
08	-3,3	-2,2
09	-2,2	-0,9

### 8.6.2 Kloridinnhold

Resultatene fra tabell 7.5 viser at økende mengde titrant gir lavere kloridinnhold i prøvene. Dette samsvarer med teorien i kapittel 3.7.1, ettersom den definerte andel  $Ag^+$ -ioner har mindre klorider å binde seg til. Dette medfører økende overskudd av  $Ag^+$ -ioner som må titreres tilbake for å oppnå omslagspunktet. Tre blankprøver, løsninger uten klorider, ble utført som referanse opp mot prøvene. Det observeres at de fleste resultatene har en lavere titrantmengde enn blankprøvene. Dette tilsier at det er en viss mengde klorid i nesten alle prøvene. Basert på resultatet i studien av S. Pyo et al. [102], som omhandler UHPC sin evne til å motstå kloridinntrenging grunnet dens tette mikrostruktur, gir dette et overraskende resultat. Ved lett sjekk av armeringsjernet i SV-40 bjelken, som tidligere nevnt i kapittel 8.5, kan det øyeblikkelig ikke observeres noen form for korrosjon. Det bidro også til å underbygge en forventning om at det ikke skulle være klorider i de innerste sjiktene ved armeringen etter så kort tid. Studien av J. A. Grubb et al. [105] legger frem at det målte kloridinnholdet ikke nødvendigvis vil føre til korrosjon. Resultatet viser at fiberbetong er mer motstandsdyktig mot korrosjon enn standard betong, til tross for høye kloridkonsentrasjoner.

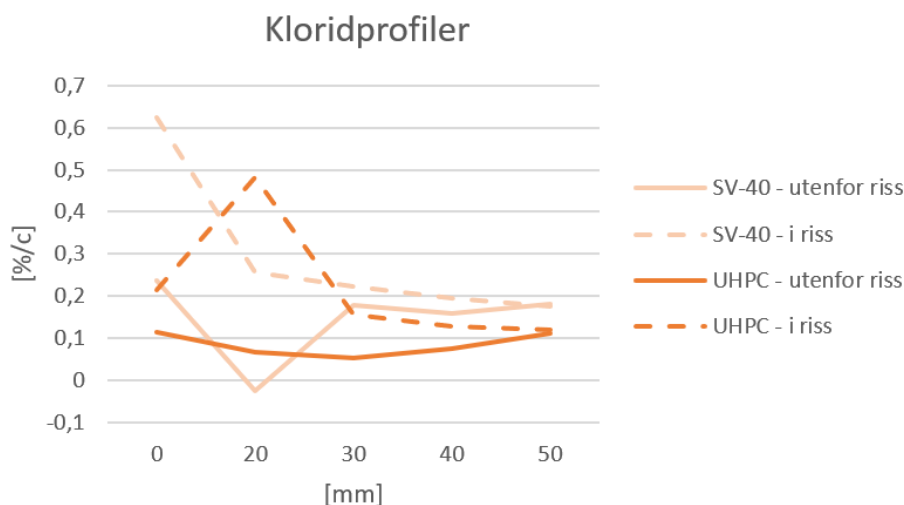
Ut ifra titrantmengden i tabell 7.5 kan det anerkjennes at det har skjedd en kloridinntrenging for begge betongtypene i begge tilfeller, i og utenfor rissområdet. Det kan legges merke til at forskjellene i titrantmengde er liten, men at det likevel kan observeres en trend som samsvarer med forventet



utvikling. Noen avvik er forekommet, men prinsippet om at kloridinnholdet reduseres innover betongen, er gjeldende. Vekt på betongpulveret vil også ha en innvirkning på beregnet kloridinnhold.

For SV-40 er det tydelig at kloridinnholdet i rissområdet starter med en høyere verdi sammenlignet med utenfor rissområdet, men videre inn i betongen utjevnes denne forskjellen. Dette kan begrunnes med at det ytterste sjiktet i rissområdet, definert som 10 mm, vil få inntrenging av klorider fra to overflater. Inntrengingen vil skje både på tvers av betongoverdekningen og inn i risstverrsnittet. Resultatet fra rissområdet for SV-40, i figur 7.4, viser at differansen mellom de to ytterste sjiktene er større enn differansen mellom de resterende. Kloriddiffusjonen gjennom overdekningen ved risset, vil ha mindre innvirkning på kloridinnholdet dypere inn i betongen, og indikerer hvorfor denne differansen er større. Verdien vil med dette avta innover sjiktene, som samsvarer med funn gjort i studien av M. Ismail et al. [100] og L. Yu et. al [94]. Dette leses også av tabell 7.5, som viser at endelig kloridinnhold i innerste sjikt, er omtrent det samme for alle områdene. Det noteres også at kloridinnholdet i sjiktet på 50 mm for SV-40 utenfor rissområdet, som vist i figur 7.4, har høyere verdi enn 40 mm-sjiktet. Dette kan komme av flere årsaker, men det tenkes at den største kilden er at det kan være dårlig rengjøring i hullet mellom hvert prøveuttak. Slik kan noe betongpulver fra tidligere sjikt ha kommet med.

Det observeres samme trend som for SV-40 bjelken, at prøvene for UHPC-bjelken i rissområdet har et høyere kloridinnhold i det ytterste sjiktet, men avtar lenger inn i betongen. Også her er det avvik i både 40- og 50 mm-sjiktet, utenfor riss, hvor kloridinnholdet er litt høyere enn sjiktene utover. Dette kan begrunnes med samme forklaring som for SV-40 bjelken. Det oppstår også en tilsvarende økning i kloridinnhold i det ytterste sjiktet. Det er tydelig at SV-40 betongen er en mer permeabel betong sammenlignet med UHPC, ut ifra figur 8.14. Dette på grunnlag av at det er større mengde klorider i 10 mm-sjiktet i SV-40 bjelken. Denne bjelken har en differanse i kloridinnhold, i og utenfor risset, på 0,39 %, mens UHPC-bjelken har 0,10 %. Betongens motstand mot inntrenging av klorider avhenger blant annet av rissvidde og -mengde, samt dens permeabilitet. Redusert permeabilitet vil gi mindre kloridinntrenging, som underbygget i kapittel 3.7. Tilsetningen av fiber i UHPC vil bidra til å redusere videre utvikling av riss og vil holde sementen sammen som en bru, som forklart i kapittel 3.5.1. Studiene av I. S. Yoon [44] og R. B. Holland et al. [106] observerte lav kloridinntrenging for UHPC. Videre konkluderer sistnevnte med at UHPC er meget holdbart og gir utmerket beskyttelse av innstøpt armeringsjern.



Figur 8.14: Kloridprofiler for SV-40 og UHPC prøver, i og utenfor rissområdet

På grunn av COVID-19 og redusert bemanning på naturfaglaben, ble ikke kloridtesten gjennomført fullstendig etter oppskriften på Volhards metode. En del av prosedyren var å tilsette benzylalkohol i prøveløsningen for å hindre  $AgCl_{(s)}$  i å løse seg opp. Dette er mer løselig enn utfellingsproduktet,  $AgSCN$ , som forklart i kapittel 3.7.1. Det var ikke mulig å få tak i benzylalkohol, på grunn av manglende tilgang til kjemikalierommet, så titreringen ble utført uten denne komponenten. Dette kan medføre at  $AgCl_{(s)}$  har løst seg opp slik at  $Ag^+$ -ioner, som skulle vært bundet, nå er fri til å reagere med  $SCN^-$ -ioner. Dette kan føre til en stor feilkilde, da mer titrant enn nødvendig må til for å oppnå omslagspunktet. Det ble likevel antatt at dette ikke ville føre til betydelig utslag, på grunn av forventet lavt kloridinnhold i betongprøvene.

En annen faktor som kan ha spilt inn på resultatene, og spesielt på blankprøvene, er at det begynte å gå tomt for deionisert vann. På grunn av begrenset tilgang til bygglaben, var det ikke mulig å få tak i mer. Resten av vannet benyttet i forsøket, til bruk i blankprøver og skylling av kolben mellom testene, måtte derfor hentes fra springen. Vannet skal i utgangspunktet være rent for klorider, men kunne ikke undersøkes på kort tid. Det ble antatt at denne andelen kunne være liten til neglisjerbar, og ble derfor ikke tatt hensyn til i dette forsøket.

Verdien for prøven SV-40 i 20 mm-sjiktet utenfor riss, i tabell 7.5, er betydelig høyere sammenlignet med de nærliggende verdiene. Fra resultatet skal det ikke være klorider i denne prøven sammenlignet med blankprøvene. Basert på de omliggende verdiene og forventet kloridutvikling, neglisjeres derfor dette resultatet ettersom det antas at det har skjedd en feil med prøven. Dette avviket kan forekomme av at den tilfeldig ble benyttet som en test for å finne ut hvordan ekstraheringen skulle gjennomføres. Ifølge prosedyren skulle det tilsettes 50 ml kokende, deionisert vann, noe som ikke ble gjort for denne prøven. 10 ml  $HNO_3$  ble tilsatt som anvist i tabell 6.6, kapittel 6.4.11. Det var ikke prognostisert at dette ville ha en stor påvirkning, men det viste seg å være tilfelle. Det kan også nevnes at denne prøven ble bearbeidet noen dager før de resterende prøvene ble ekstrahert.

Basert på feilkildene nevnt i avsnittene over, er det viktig å merke seg at resultatene kun kan brukes som en indikasjon på om det er klorider i begge betongtypene. Ettersom det er såpass mange og store feilkilder, vil dette påvirke nøyaktigheten på resultatene. Det er likevel valgt å benytte resultatene som grunnlag for å besvare forskerspørsmålet da de illustrerer en forventet utvikling. Fordi det ikke var mulig å hente opp SV-40 bjelken på sjøbunnen, kunne ikke betongpulver fra bjelken hentes ut og testes for kloridinnhold. Dette ville vært interessant å undersøke, begrunnet med at bjelker fullstendig tildekket i sjøvann vil være mer utsatt for klorider sammenlignet med bjelkene i skvalpesonen. For å oppnå mer nøyaktige kloridprofiler bør denne testen gjennomføres på nytt.

## 8.7 Bestandighet

Betongens bestandighet mot armeringskorrosjon avhenger av betongoverdekning og betongkvalitet, som forklart i kapittel 3.2, noe som tydelig kommer frem fra resultatet. Bjelker med overdekning på 50 mm viser høyere korrosjonsmotstand, men økningen i rissvidden medfører reduksjon i denne motstanden. Studiene gjennomført av W. Nguyen et al. [103] og C. G. Berrocal et al. [97] konkluderte med at fiberarmert betong oppnådde lengre tid til korrosjonsinitiering. UHPC har en høyere betongkvalitet enn SV-40, og resultatene viser at UHPC har omtrent ti ganger høyere

korrosjonsmotstand enn SV-40. En høyere korrosjonsmotstand vil øke tiden på korrosjonsinitieringen, og samsvarer med litteraturstudiene i denne oppgaven.

Studien gjennomført av H. R. Russell og B. A. Graybeal [107] viser til at den tette matrisen til UHPC forhindrer aggressive stoffer i å trenge inn, og at bestandighetsegenskapene er betydelig bedre enn for standard betong. M. B. Eide og J. -M. Hisdal [11] bekrefter dette og utdyper at materialet egner seg godt for marine miljø. Videre viser også S. Abbas et al. [28] at UHPC sin betydelige reduksjon i antall og størrelse av porer vil gi en lavere kloriddiffusjonskoeffisient enn for standard betong. Dette vil medføre høyere bestandighetsegenskaper, grunnet en redusert korrosjonsrisiko. Resultatene i denne oppgaven bekrefter dette, da UHPC viser betydelig forbedret korrosjonsmotstand, sammenlignet med SV-40.

Dersom det blir sett bort fra at det har oppstått korrosjon, kan det basert på resultatene i dette forsøket dimensjoneres UHPC-bjelker med overdekninger ned til 30 mm. Dette til forskjell fra 50 mm, som er kravet til standard betong i EC2 [14]. Sammenlignet med SV-40 viser UHPC-bjelkene, ned mot 30 mm overdekning, en tilstrekkelig korrosjonsmotstand. Dette støttes opp av funn gjort av M. B. Eide og J. -M. Hisdal [11], som observerte at UHPC kan dimensjoneres med en overdekning på 10 mm mindre enn kravet for standard betong. Videre, så fremt det ikke har skjedd en korrosjon, kan det tenkes at UHPC kan dimensjoneres for rissvidder opp mot 0,8 mm. Dette baseres på resultatene presentert i figur 8.10. Kurvene viser at UHPC har flere ganger så stor motstand som SV-40 betongen i skvalpesonen, og er dermed overlegen motstandsdyktig. Figur 8.10 viser også tydelig at alle variasjoner i rissviddene for UHPC vil være akseptable, sett opp mot korrosjonsmotstanden til SV-40 bjelken i figur 8.11. Det kan likevel ikke trekkes en beslutning om overdekning kan reduseres og rissvidde kan økes, da det er uvisst om det er fare for korrosjon. Utvikling av korrosjonsmotstanden ved lengre eksponeringstid kan gi andre resultater, og det bør ikke tas en endelig vurdering basert på resultatene fra forsøkets 55 døgns eksponering.

Selv om det observeres at det er klorider i alle sjikt for begge betongtypene, betyr ikke dette nødvendigvis at det vil starte korrosjon. Ettersom korrosjon ikke var å se på armeringen i SV-40 bjelken, er det rimelig å anta dette, og det forventes også at det ikke har skjedd korrosjon på armeringen i UHPC-bjelkene i skvalpesonen. Dette kan underbygges med at passivfilmen for UHPC-bjelkene i skvalpesonen er betydelig tykkere enn for SV-40 bjelken. Videre kan det antas at armeringen i UHPC-bjelkene på sjøbunnen heller ikke har startet aktiv korrosjon. Dette på grunn av tykkere passivfilm rundt armeringen enn for SV-40 bjelken i skvalpesonen. Selv om det observeres et tynnere sjikt for bjelkene på sjøbunnen enn for bjelkene i skvalpesonen, kan det som nevnt tidligere, tenkes at det ikke har oppstått korrosjon som følge av mangelen på oksygen. Den høye mengden klorid, som også nevnt tidligere, trenger derfor ikke å indikere at det har skjedd en korrosjon, så lenge porevannet i kontakt med armeringen ligger under en bestemt terskelverdi, som forklart i kapittel 3.4.3.

Sammenlignet med laboratorieforsøkene gjort av G. Jen et al. [98], M. Farzad et al. [104] og R. B. Holland [106], viser dette feltforsøket at UHPC har en overlegen korrosjonsmotstand i forhold til standard betong. Om dette resultatet vil opprettholdes gjennom levetiden er vanskelig å fastslå. Dette begrunnes i kapittel 3.2.1, hvor det står forklart at det i praksis har vist seg å være vanskelig å finne en tilstrekkelig sammenheng mellom elektrisk motstand og kloriddiffusivitet i tidlig alder. En konsekvens av dette er at betongens bestandighet er under stor utvikling, som nevnt tidligere. Denne oppgaven

studerer kun en veldig liten del av en konstruksjons gjennomsnittlig forventet levetid. Å trekke endelige beslutninger vil derfor ikke være pålitelig, men kan gi en god indikasjon på forventet bestandighet. I så fall er UHPC en fremragende betong med ypperlige kvaliteter som gir gode mekaniske egenskaper.

## 8.8 Feilkilder oppsummert

- Det ble ikke tatt hensyn til støperetning.
- Det kan ha forekommet ulikheter i herdeforholdene første døgnet. I tillegg stod mesteparten av UHPC-bjolkene mer enn et døgn under plast før de ble lagt i herdekar.
- Etter syv døgn i herdekar ble bjolkene plassert på paller, hvor de lå og tørket med ulik varighet før EIS-målingene ble gjennomført.
- Avlesning av rissvidder med rissmåler kan ha vært unøyaktig.
- Rissene innover betongen kan være større enn den dimensjonerte rissvidden, på grunn av ujevnheter i betongen.
- Tvingesystemet i tre kan svulme opp ved tilførsel av vann, noe som kan påvirke rissviddene under eksponering.
- Testobjekt 17 fikk et lag mindre epoxy grunnet COVID-19. Samtidig ble det ikke tatt på et siste lag med smøremiddel for å sikre ytterligere beskyttelse.
- Bjolkene nedsenket på sjøbunnen ble tatt opp to døgn før EIS-målingene ble utført etter eksponering, og det kan ha ført til variasjoner i målingene når det kommer til betongmotstand.
- Ved prøveuttak for kloridtester kan det være unøyaktigheter ved boreddybden. I tillegg kan noe pulver fra tidligere sjikt ligge igjen innover i hullet.
- Nøyaktig mengde titrant brukt for å oppnå omslagspunktet i titreringen kan være feilvurdert. Benzylalkohol ble ikke benyttet, og det gikk tomt for deionisert vann.
- Det kan gjennomføres en grundigere kloridtesting, for å undersøke påvirkningen av de ulike parameterne.

## 9 Konklusjon

Resultatene fra EIS-målingene ga en god forståelse av hvordan korrosjonsmotstanden for de ulike testobjektene er i praksis. Gjennom feltforsøk og litteraturstudium ble det hentet inn data for å kunne besvare underspørsmålene under:

*Hvordan vil ulike overdekninger påvirke UHPC sin evne til å motstå armeringskorrosjon?*

- Alle variasjoner i overdekningen for UHPC-bjelkene, i både skvalpesonen og på sjøbunnen, viser overlegen korrosjonsmotstand sammenlignet med SV-40 bjelken, med overdekning på 50 mm, i skvalpesonen.
- En reduksjon i standardens krav til overdekning, ned til 40 og 30 mm, ga betydelig redusert korrosjonsmotstand for UHPC-bjelken i skvalpesonen, sammenlignet med overdekning på 50 mm.
- UHPC-bjelkene i skvalpesonen med overdekning på 30 og 40 mm viste minimal forskjell i korrosjonsmotstand.

*Hvilken påvirkning vil ulike rissvidder ha på armeringen med hensyn på korrosjon i UHPC?*

- Resultatet konstaterer at en økende rissvidde fra 0,2-0,8 mm, reduserer den tilsvarende korrosjonsmotstanden for UHPC-bjelkene på sjøbunnen.
- Det observeres en lignende trend for UHPC-bjelkene i skvalpesonen, men er ikke like åpenbart som følge av avvik for bjelkene med 0,6 og 0,8 mm riss.
- For rissvidder på 0,1-0,2 mm må det undersøkes nærmere med et mer nøyaktig instrument om det har oppstått selvkurering.

*Hvordan vil ulike marine miljø påvirke armeringen med hensyn på korrosjon i UHPC?*

- Resultatene fra EIS-målingene viser at sjøbunnen er et mer aggressivt miljø enn skvalpesonen etter kort eksponeringstid.
- Passivfilmen er tykkere for UHPC-bjelkene i skvalpesonen enn for UHPC-bjelkene på sjøbunnen, men på grunn av tilgang på oksygen, kan propageringsperioden inntreffe tidligere for bjelkene i skvalpesonen.
- Temperaturen viser seg å ikke ha innvirkning på UHPC-bjelkene i løpet av forsøkets eksponeringsperiode.
- For UHPC-bjelken ble det observert kloridinnhold i alle sjiktene inn til armeringen. Dette fører ikke nødvendigvis til korrosjon, så lenge terskelverdien ikke er overskredet. Det oppstod mange feilkilder og resultatet kan kun benyttes som en indikasjon på forventet kloridinnhold.

De tre underspørsmålene har ledet frem til å kunne besvare det overordnede forskerspørsmålet i oppgaven:

***Hvordan beskytter Ultra-High Performance Concrete (UHPC) mot armeringskorrosjon i praksis?***

EIS-målingene viser at UHPC-bjelkene har en betydelig større korrosjonsmotstand sammenlignet med SV-40 bjelkene. I størrelsesorden har UHPC en motstand på nærmest det tidobbelte av SV-40 betongen. Resultatet fra EIS-målingen for det korroderende armeringsjernet medfører et for svakt sammenligningsgrunnlag, slik at det ikke er mulig å trekke en konklusjon for om det har skjedd en

korrosjon for bjelkene i de ulike eksponeringsområdene. Sett bort ifra at det kan ha oppstått en korrosjon av armeringen, kan det dimensjoneres UHPC-bjelker med overdekning ned til 30 mm og risssidde opp til 0,8 mm . Oppsummert viser dette forsøket at UHPC har en overlegen korrosjonsmotstand i praksis, sammenlignet med SV-40.

## 10 Anbefalinger

Etter å ha gjennomført forsøket, oppstod det en del problemstillinger som burde vært sett videre på for å oppnå et enda bedre resultat. Disse er beskrevet i avsnittene under.

Det vil være interessant å undersøke korrosjonsmotstanden i bjelkene etter langtidseksponering, for å få et mer realistisk bilde av hvordan betongen beskytter armeringen mot korrosjon. Ettersom det i dette forsøket ikke var mulig å observere om og når korrosjonen startet, ville det vært fordelaktig å støpe inn sensorer for kontinuerlig overvåking av korrosjonsutviklingen dersom det støpes nye testobjekter. Sensorene vil måle korrosjonsstrømmen, og en endring i denne vil vise når korrosjonsinitieringen er over og propageringsperioden inntreffer. Dette ville gitt oppgaven et bedre sammenligningsgrunnlag for å besvare forskerspørsmålet. Samtidig ville det vært relevant å undersøke fiberens effekt på betongen. Det ble observert at fibrene korroderte på overflaten, men ble ansett å ha neglisjerbart utslag for EIS-målingene i denne oppgavens tidsrom. I tillegg kunne en produsere en UHPC-blanding uten fiber, for å se om fiberen gir utslag på EIS-målingene.

En annen metode for å danne en bedre korrosjonssammenligning, ville vært å produsere en bjelke som risses helt opp til armeringen, for å garantere at armeringen korroderer. Resultatet fra EIS-målingen kan dermed benyttes for å sjekke om armeringen, i bjelkene som forskes på, har korrodert eller ikke.

For bjelkene som skal eksponeres over lengre tid, ville det etter eksponering vært interessant å undersøke hvordan rissdybden forgrener seg innover i betongen. Dette kan studeres ved å tilsette et stoff som trenger inn i rissene og avgir farge, før betongen sprekkes opp. En slik test vil avdekke om fibrene har påvirkning på rissdybden innover betongen. Svaret kan fortelle om et 0,2 mm riss i UHPC vil forgrene seg like dypt som for standard betong.

Til slutt kunne det vært aktuelt å undersøke kloridinnholdet i bjelkene som ligger på sjøbunnen, og sammenligne med bjelkene i skvalpesonen. Dette vil kunne vise hvilke bjelker som er mest utsatt for kloridinitiert korrosjon, med tanke på eksponeringsmiljø.

## 11 Referanser

- [1] SINTEF. *Betong* [Online]. Hentet fra: <https://www.sintef.no/betong/>. Lastet ned: 30.03.20.
- [2] M. M. Kamal, M. A. Safan, Z. A. Etman og R. A. Salama, "Behavior and strength of beams cast with ultra high strength concrete containing different types of fibers," *HBRC Journal*, vol. 10, nr. 1, s. 55-63, 2019.
- [3] PEAB, Ferdig-betong, Lättklinker betong AB og Skandinaviske byggelement, "Betong - framtidens byggemateriale."
- [4] J. P. Broomfield, *Corrosion of steel in concrete: Understanding, investigation and repair*. (London: E & FN Spon). London: E & FN Spon, 1997.
- [5] J.-K. Kim, S.-H. Kee, C. M. Futral og J.-J. Yee, "Corrosion monitoring of reinforced steel embedded in cement mortar under wet-and-dry cycles by electrochemical impedance spectroscopy," *Sensors*, vol. 20, nr. 1, s. 199, 2020.
- [6] Kontrollrådet. 2020. *Betongens historie* [Online]. Hentet fra: <https://www.kontrollbetong.no/betongens-historie/>. Lastet ned: 13.03.20.
- [7] Norcem, "God betong er bestandig," s. 1-28, 2018.
- [8] S. Chandra Paul, "A review on reinforcement corrosion mechanism and measurement methods in concrete," *Civil Engineering Research Journal*, vol. 5, nr. 3, 2018.
- [9] D. Nolte, R. Gaarder, T. A. Hammer og O. Ø. Knudsen, "Nye materialer for bruk i tunnel og bru: Etatsprogrammet varige konstruksjoner 2012-2015," *Statens Vegvesens Rapporter*, vol. 557, 2016.
- [10] Byggeindustrien. 2013. *Nedbrytning og vedlikehold av betongkonstruksjoner - hvordan redusere kostnadene* [Online]. Hentet fra: <http://www.bygg.no/article/2165>. Lastet ned: 27.11.19.
- [11] M. B. Eide og J.-M. Hisdal, "Ultra high performance fibre reinforced concrete (uhpfrc) - state of the art," *SINTEF Building and Infrastructure*, vol. 12, nr. 44, s. 1-40, 2012.
- [12] B. Kristiansen *et al.*, "Nb publikasjon 35: Bestandighet av betongkonstruksjoner i marint miljø," *Norsk betongforening*, 2011.
- [13] R. Kompen, "Betong regelverk 2006 : Standarder og prosesskode," vol. nr 2467, 2006.
- [14] *Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner*, 1, 2004.
- [15] Unicon AS. *Betongtyper og løsninger* [Online]. Hentet fra: <https://www.unicon.no/ferdigbetong/betongtyper-og-losninger/>. Lastet ned: 15.04.20.
- [16] Unicon AS. *Nyttig ordliste* [Online]. Hentet fra: [unicon.no/radgivende-ingenior/betongtyper-og-losninger/nyttig-ordliste/](http://www.unicon.no/radgivende-ingenior/betongtyper-og-losninger/nyttig-ordliste/). Lastet ned: 15.04.20.
- [17] U.S. Department of Transportation. 2019. *Ultra-high performance concrete* [Online]. Hentet fra: <https://highways.dot.gov/research/structures/ultra-high-performance-concrete/ultra-high-performance-concrete>. Lastet ned: 10.04.20.
- [18] TAKTL. *About uhpc* [Online]. Hentet fra: <https://www.taktl-llc.com/what-is-ultra-high-performance-concrete/>. Lastet ned: 10.04.20.
- [19] D. Nolte, R. Gaarder, T. A. Hammer og O. Ø. Knudsen, "Nye materialer for bruk i tunnel og bru: Etatsprogrammet varige konstruksjoner 2012-2015," 2016.
- [20] I. Löfgren, *Fibre-reinforced concrete for industrial construction-a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis*. Chalmers University of Technology, 2005.
- [21] K. H. Khayat, W. Meng, K. Vallurupalli og L. Teng, "Rheological properties of ultra-high-performance concrete — an overview," *Cement and Concrete Research*, vol. 124, 2019.
- [22] E. Juliebø, *Armeringsboka 1*. utg. Oslo: Universitetsforlaget AS, 1997.
- [23] SINTEF, "Viktige parametere for prosjektering og utførelse av bestandige betongkonstruksjoner," *Byggforskserien*, vol. 520.026, s. 1-6, 2004.
- [24] P. Gjerp og M. Opsahl, *Grunnleggende betongteknologi*, 1. utg. Oslo: Bygg og Anlegg Media AS, 1998.



- [25] A. Aguilar, A. A. Sagüés og R. G. Powers, "Corrosion measurements of reinforcing steel in partially submerged concrete slabs," i *Corrosion rates of steel in concrete*: ASTM International, 1990.
- [26] S. Jacobsen, "Betongens permeabilitet: Vurdering av måleprinsipper og metoder," *Byggforskserien*, vol. 206, s. 1-14, 1996.
- [27] H. Fossen. 2009. *Portlanditt* [Online]. Hentet fra: <https://snl.no/portlanditt>. Lastet ned: 31.03.20.
- [28] S. Abbas, M. L. Nehdi og M. A. Saleem, "Ultra-high performance concrete: Mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 10, nr. 3, s. 271-295, 2016.
- [29] B. Time, T. Kvande, K. Terjesen og Ø. Sæter, "Fukttransport i mineralske bygningsmaterialer - materialegenskaper," *Byggforskserien*, vol. 369, s. 1-29, 2004.
- [30] A. Poursaee, "Corrosion of steel in concrete structures," i *Corrosion of steel in concrete structures*, 2016, s. 19-33.
- [31] C. Fang, K. Lundgren, L. Chen og C. Zhu, "Corrosion influence on bond in reinforced concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, nr. 11, s. 2159-2167, 2004.
- [32] G. Peng, T. Y. Hao, F. G. Leng og J. Zhang, *High performance concrete - innovation and utilization*, 1 utg. (Key engineering materials). Trans Tech Publications, 2014.
- [33] S. Deb, "Causes evaluation and repair of cracks in concrete structures," *The Masterbuilder*, s. 88-96, 2012.
- [34] S. Byggforsk, "Armeringskorrosjon," *Byggforskserien*, nr. 520.061, s. 1-8, 2009.
- [35] NOR entreprenør. 2018. *Betongskader* [Online]. Hentet fra: <https://norentreprenor.no/betongskader/>. Lastet ned: 08.10.19.
- [36] A. Rafiee, *Computer modeling and investigation on the steel corrosion in cracked ultra high performance concrete*. kassel university press GmbH, 2012.
- [37] Y. Zhao og W. Jin, "Steel corrosion in concrete," i *Steel corrosion-induced concrete cracking*, 2016, s. 19-29.
- [38] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli og R. Polder, *Corrosion of steel in concrete*. Die Deutsche Bibliothek: Wiley Online Library, 2004.
- [39] G. Markeset og R. Myrdal, "Modelling of reinforcement corrosion in concrete - state of the art," *COIN Project report no7, SINTEF Building and Infrastructure*, s. 1-48, 2008.
- [40] Y. Cao, C. Gehlen, U. Angst, L. Wang, Z. Wang og Y. Yao, "Critical chloride content in reinforced concrete — an updated review considering chinese experience," *Cement and Concrete Research*, vol. 117, s. 58-68, 2019.
- [41] K. Tuutti, *Corrosion of steel in concrete*. Cement-och betonginst., 1982.
- [42] J. P. Broomfield, *Corrosion of steel in concrete: Understanding, investigation and repair*. CRC Press, 2006.
- [43] E. Bardal, *Korrosjon og korrosjonsvern*, 2. utg. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag, 2011.
- [44] I.-S. Yoon, "Chloride penetration through cracks in high-performance concrete and surface treatment system for crack healing," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2012, s. 1-8, 2012.
- [45] H.-L. Wang, J.-G. Dai, X.-Y. Sun og X.-L. Zhang, "Characteristics of concrete cracks and their influence on chloride penetration," *Construction and Building Materials*, vol. 107, s. 216-225, 2016.
- [46] A. C. B. Käthler, U. M. Angst, M. Wagner, C. K. Larsen og B. Elsener, "Effect of cracks on chloride-induced corrosion of steel in concrete - a review," *Statens Vegvesens Rapporter*, nr. 454, s. 1-37, 2017.
- [47] B. Espelid et al., "Ofu gimsøystraumen bru: Instrumentering, dokumentasjon og verifikasjon," *Vegdirektoratet Veglaboratoriet*, nr. 86, s. 1-128, 1998.
- [48] Bluey Technologies, "Evaluating cracks in concrete," s. 1-10.
- [49] B. Kristiansen, J. Lindland og T. Østmoen, *Betongrehabilitering - metode og utførelse* 1. utg. Oslo: Bygg og Anlegg Media AS 1998.

- [50] G. M. Ji, T. Kanstad og Ø. Bjøntegaard, "Crack risk evaluation of submerged concrete tunnel during hardening phase," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, s. 1-14, 2018.
- [51] Ø. Bjøntegaard, "Volumendringer og risstendens i betong," *Vegdirektoratet Tegnologirapport*, vol. 2565, 2009.
- [52] V. P. Hovland, "Armeringskorrosjon og ultra-high performance concrete (uhpc)," s. 1-73, 28.11.2019 2019.
- [53] H. K. S. El-Din, H. A. Mohamed, M. A. E.-H. Khater og S. Ahmed, "Effect of steel fibers on behavior of ultra high performance concrete," *First International Interactive Symposium on UHPC*, s. 1-10, 2016.
- [54] C. G. Berrocal, K. Lundgren og I. Löfgren, "Corrosion of steel bars embedded in fibre reinforced concrete under chloride attack: State of the art," *Cement and Concrete Research*, vol. 80, nr. C, s. 69-85, 2016.
- [55] H. Singh, *Steel fiber reinforced concrete: Behavior, modelling and design* (Behavior, modelling and design). Singapore: Springer Singapore, Singapore, 2017.
- [56] SINTEF, "Betongkonstruksjoner i driftsbygg. Skader og utbedring," *Byggforskserien*, vol. 720.114, s. 1-6, 2000.
- [57] L. Yang, *Techniques for corrosion monitoring*. Cambridge, England: Woodhead Publisher, 2008.
- [58] R. B. Figueira, "Electrochemical sensors for monitoring the corrosion conditions of reinforced concrete structures- a review," *Applied Sciences*, vol. 7, nr. 1157, s. 1-29, 2017.
- [59] SINTEF, "Kloridinnhold i betong. Prøveuttak og analysemetoder," *Byggforskserien*, vol. 520.034, s. 1-5, 2015.
- [60] H.-W. Song og V. Saraswathy, "Corrosion monitoring of reinforced concrete structures - a review," *International Journal of Electrochemical science*, vol. 2, 2007.
- [61] S. K. Verma, S. S. Bhadauria og S. Akhtar, "Review of nondestructive testing methods for condition monitoring of concrete structures," *Journal of Construction Engineering*, vol. 2013, s. 1-11, 2013.
- [62] D. Ribeiro og J. Abrantes, "Application of electrochemical impedance spectroscopy (eis) to monitor the corrosion of reinforced concrete: A new approach," *Construction and Building Materials*, vol. 111, s. 98-104, 2016.
- [63] R. Baboian, *Corrosion tests and standards : Application and interpretation* (Astm manual series). Philadelphia, PA: ASTM, 1995.
- [64] A. Zaki, H. K. Chai, D. G. Aggelis og N. Alver, "Non-destructive evaluation for corrosion monitoring in concrete- a review and capability of acoustic emission technique," *Sensors*, vol. 15, 2015.
- [65] B.-q. Dong *et al.*, "Electrochemical impedance measurement and modeling analysis of the carbonation behavior for cementitious materials," *Construction and Building Materials*, vol. 54, s. 558-565, 2014.
- [66] S. G. Millard, D. Law, J. H. Bungey og J. Cairns, "Environmental influences on linear polarisation corrosion rate measurement in reinforced concrete," *NDT&E International*, vol. 34, s. 409-417, 2001.
- [67] F. Kuang *et al.*, "Electrochemical methods for corrosion monitoring: A survey of recent patents," *Recent Patents on Corrosion Science*, vol. 2, s. 34-39, 2010.
- [68] C.-Q. Ye *et al.*, "Eis analysis on chloride-induced corrosion behavior of reinforcement steel in simulated carbonated concrete pore solutions," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 688, s. 275-281, 2013.
- [69] A. Akhavan og F. Rajabipour, "Evaluating ion diffusivity of cracked cement paste using electrical impedance spectroscopy," *Materials and structures*, vol. 46, nr. 5, s. 697-708, 2013.
- [70] J.-K. Kim, S.-H. Kee, C. M. Futral og J.-J. Yee, "Corrosion monitoring of reinforced steel embedded in cement mortar under wet-and-dry cycles by electrochemical impedance spectroscopy," *Sensors*, vol. 20, nr. 1, s. 1-14, 2020.
- [71] Ø. Grøn. 2019. *Impedans - fysikk* [Online]. Hentet fra: <https://snl.no/impedans - fysikk>. Lastet ned: 24.10.19.

- [72] D. Ribeiro *et al.*, "Effect of red mud on the corrosion of reinforced concrete studied by electrochemical impedance spectroscopy," *ISRN Materials Science*, vol. 2011, s. 1-11, 2011.
- [73] M. Otieno, H. Beushausen og M. Alexander, "Chloride-induced corrosion of steel in cracked concrete—part ii: Corrosion rate prediction models," *Cement and concrete Research*, vol. 79, s. 386-394, 2016.
- [74] T. Holtebekk. 2019. *Resistivitet* [Online]. Hentet fra: <https://snl.no/resistivitet>. Lastet ned: 13.05.20.
- [75] K. Hofstad. 2017. *Reaktans* [Online]. Hentet fra: <https://snl.no/reaktans>. Lastet ned: 13.05.20.
- [76] Ø. Grøn. 2020. *Induktans* [Online]. Hentet fra: <https://snl.no/induktans>. Lastet ned: 13.05.20.
- [77] J. Sandstad. 2018. *Kapasitans* [Online]. Hentet fra: <https://snl.no/kapasitans>. Lastet ned: 13.05.20.
- [78] M. G. Sohail *et al.*, "Electrochemical behavior of mild and corrosion resistant concrete reinforcing steels," *Construction and Building Materials*, vol. 232, s. 117205, 2020.
- [79] The Constructor. *Chloride attack on concrete structures - cause and prevention* [Online]. Hentet fra: <https://theconstructor.org/concrete/chloride-attack-concrete-structures-cause-prevention/7802/>. Lastet ned: 08.05.2020.
- [80] G. Wibetoe. 2020. *Titrimetri* [Online]. Hentet fra: <https://snl.no/titrimetri>. Lastet ned: 08.05.20.
- [81] H. C. Gran, "Measurement of chloride in concrete " *NBI Project Rapport*, vol. 110, s. 1-21, 1992.
- [82] N. M. Azmee og N. Shafiq, "Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 9, s. 1-15, 2018.
- [83] B. Pedersen. 2017. *Frysepunktsnedsettelse* [Online]. Hentet fra: <https://snl.no/frysepunktsnedsettelse>. Lastet ned: 23.04.20.
- [84] B. Lie. *Det fryser til: - en døgnmiddeltemperatur på minus 5 grader produserer 1,2 centimeter is pr døgn* [Online]. Hentet fra: <http://www.verogvind.net/readmore.asp?readmoreid=3959>. Lastet ned: 23.04.20.
- [85] Norcem AS. *Produktinformasjon norcem standardsement fa* [Produktblad]. Hentet fra: [https://www.norcem.no/no/Standard\\_FA](https://www.norcem.no/no/Standard_FA). Lastet ned: 27.04.20.
- [86] Finnfjord AS. *Silika* [Online]. Hentet fra: <http://www.finnfjord.no/no/produkter/25-silika>. Lastet ned: 27.04.20.
- [87] Mapei. *Mapeair 25: Luftporedannende tilsetningsstoffer* [Produktblad]. Hentet fra: [https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider60/products-documents/6908-mapeair25-no.pdf?sfvrsn=118d880\\_0](https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider60/products-documents/6908-mapeair25-no.pdf?sfvrsn=118d880_0).
- [88] Mapei. *Dynamon sx-n: Superplastiserende tilsetningsstoff* [Produktblad]. Hentet fra: [https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider60/products-documents/6392-dynamonsxn-no.pdf?sfvrsn=2c621c85\\_0](https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider60/products-documents/6392-dynamonsxn-no.pdf?sfvrsn=2c621c85_0). Lastet ned: 27.04.20.
- [89] Aalborgportland. *Rapid aalborg cement* [Online]. Hentet fra: <https://www.aalborgportland.dk/produkter/rapid-aalborg-cement/>. Lastet ned: 27.04.20.
- [90] BASF. *Masterset r 433: Retarderende tilsetningsstoff* [Produktblad]. Hentet fra: <https://assets.master-builders-solutions.basf.com/nn-no/basf-masterset-r-433-db.pdf?hstc=169658366.8d68127bb2fb049e628ade35065eaaae.1587983356290.1587983356290.1&hssc=169658366.1.1587983356291&hsfp=2699542555>. Lastet ned: 27.04.20.
- [91] R. J. Krumsvik, *Forskningsdesign og kvalitativ metode : Ei innføring*. Bergen: Fagbokforl., 2014.
- [92] D. I. Jacobsen, 3., red. *Hvordan gjennomføre undersøkelser?* Latvia: Cappelen Damm AS, 2015.
- [93] O. Dalland, *Metode og oppgaveskriving* 6. utg. Polen: Gyldendal Norsk Forlag AS, 2017.
- [94] L. Yu, R. François, V. H. Dang, V. l'Hostis og R. Gagné, "Development of chloride-induced corrosion in pre-cracked rc beams under sustained loading: Effect of load-induced cracks, concrete cover, and exposure conditions," *Cement and Concrete Research*, vol. 67, s. 246-258, 2015.
- [95] R. B. Polder og M. R. De Rooij, "Durability of marine concrete structures: Field investigations and modelling," *Heron*, vol. 50, nr. 3, 2005.

- [96] W. Nguyen, J. F. Duncan, T. M. Devine og C. P. Ostertag, "Electrochemical polarization and impedance of reinforced concrete and hybrid fiber-reinforced concrete under cracked matrix conditions," *Electrochimica Acta*, vol. 271, s. 319-336, 2018.
- [97] C. G. Berrocal, I. Löfgren, K. Lundgren og L. Tang, "Corrosion initiation in cracked fibre reinforced concrete: Influence of crack width, fibre type and loading conditions," *Corrosion Science*, vol. 98, s. 128-139, 2015.
- [98] G. Jen og C. P. Ostertag, "Experimental observations of self-consolidated hybrid fiber reinforced concrete (sc-hyfr) on corrosion damage reduction," *Construction and Building Materials*, vol. 105, s. 262-268, 2016.
- [99] X. Feng, X. Lu, Y. Zuo, N. Zhuang og D. Chen, "Electrochemical study the corrosion behaviour of carbon steel in mortars under compressive and tensile stresses," *Corrosion Science*, vol. 103, s. 66-74, 2016.
- [100] M. Ismail, A. Toumi, R. François og R. Gagné, "Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in cracked mortar samples," *Cement and concrete research*, vol. 38, nr. 8-9, s. 1106-1111, 2008.
- [101] M. Maes, D. Snoeck og N. De Belie, "Chloride penetration in cracked mortar and the influence of autogenous crack healing," *Construction and building materials*, vol. 115, s. 114-124, 2016.
- [102] S. Pyo, M. Tafesse, H. Kim og H.-K. Kim, "Effect of chloride content on mechanical properties of ultra high performance concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 84, s. 175-187, 2017.
- [103] W. Nguyen, J. F. Duncan, G. Jen og C. P. Ostertag, "Influence of matrix cracking and hybrid fiber reinforcement on the corrosion initiation and propagation behaviors of reinforced concrete," *Corrosion Science*, vol. 140, s. 168-181, 2018.
- [104] M. Farzad, S. F. Fancy, D. Garber, A. Azizinamini og K. Lau, "Corrosion durability of reinforced concrete utilizing uhpc for abc applications," Accelerated Bridge Construction University Transportation Center (ABC-UTC)2019.
- [105] J. Grubb, J. Blunt, C. P. Ostertag og T. Devine, "Effect of steel microfibers on corrosion of steel reinforcing bars," *Cement and concrete research*, vol. 37, nr. 7, s. 1115-1126, 2007.
- [106] R. Holland, K. Kurtis og L. Kahn, "Effect of different concrete materials on the corrosion of the embedded reinforcing steel," i *Corrosion of steel in concrete structures*: Elsevier, 2016, s. 131-147.
- [107] H. G. Russell og B. A. Graybeal, "Ultra-high performance concrete: A state-of-the-art report for the bridge community," s. 1-105, 2013.

## 12 Vedlegg

### Vedlegg 1: Eksponeringsklasser

Eksponeringsklasser og eksempler på hvilke miljøforhold de gjelder under, fra NS 3473 og nasjonalt tillegg (NA) til NS-EN 206-1.

Eksponeringsklasse	Beskrivelse av miljø	Eksempler på hvor eksponeringsklassene kan forekomme (informativt)
<b>1. Ingen risiko for korrosjon eller nedbryting</b>		
<b>X0</b>	Betong uten armering eller innstøpt metall: Alle miljøer, unntatt der det er frysing/tining, slitasje eller kjemisk angrep. For betong med armering og innstøpt metall: meget tørt.	Betong inne i bygninger med meget lav luftfuktighet.
<b>2. Korrosjon framkalt av karbonatisering</b>		
<b>XC1</b>	Tørt eller permanent vått	Betonger inne i bygninger med lav luftfuktighet. Betong som permanent er neddykket i vann.
<b>XC2</b>	Vått, sjelden tørt	Betongoverflater i kontakt med vann over lengre tid. Fundamenter
<b>XC3</b>	Moderat fuktighet	Betong inne i bygninger med moderat eller høy luftfuktighet. Utvendige konstruksjoner som er beskyttet mot regn.
<b>XC4</b>	Vekselsvis vått og tørt	Betongoverflater i kontakt med vann, som ikke er eksponeringsklasse XC2.
<b>3. Korrosjon framkalt av klorider som ikke stammer fra sjøvann</b>		
<b>XD1</b>	Moderat fuktighet	Betongoverflater utsatt for luftbårne klorider
<b>XD2</b>	Vått, sjelden tørt	Betong utsatt for industrivann som inneholder klorider. Svømmebasseng
<b>XD3</b>	Vekselsvis vått og tørt	Brudeler utsatt for sprut som inneholder klorider Veidekke Deler av parkeringsanlegg i kontakt med klorider
<b>4. Korrosjon framkalt av klorider fra sjøvann</b>		
<b>XS1</b>	Utsatt for luftbårne klorider, men ikke i direkte kontakt i sjøvann	Konstruksjoner nær eller på kysten
<b>XS2</b>	Permanent neddykket	Deler av marine konstruksjoner

<b>XS3</b>	Tidevannssoner, skvalpesoner og sprutsoner	Deler av marine konstruksjoner
<b>5. Fryse-/tineangrep med og uten avisingsmiddel</b>		
<b>XF1</b>	Moderat vannmetning, uten avisingsmiddel	Vertikale betongoverflater utsatt for regn og frost
<b>XF2</b>	Moderat vannmetning, med avisingsmiddel	Vertikale betongoverflater i veikonstruksjoner utsatt for frost og luftbårne avisingsmidler
<b>XF3</b>	Høy vannmetning, uten avisingsmiddel	Horisontale betongoverflater utsatt for regn og frost
<b>XF3</b>	Høy vannmetning, med avisningsmiddel eller sjøvann	Vei- og brudekker utsatt for avisingsmidler Betongoverflater utsatt for frost og direkte sprut som inneholder avisingsmidler Skvalpesoner i marine konstruksjoner utsatt for frost
<b>6. Kjemiske angrep</b>		
<b>XA1</b>	Lite kjemisk aggressivt miljø iht. NS-EN 206-1	
<b>XA2</b>	Moderat kjemisk aggressivt miljø iht. NS-EN 206-1	
<b>XA3</b>	Meget kjemisk aggressivt miljø iht. NS-EN 206-1	
<b>7. Kjemiske angrep fra husdyrgjødsel</b>		
<b>XA4</b>	Konstruksjoner i kontakt med husdyrgjødsel	Klassen omfatter blant annet konstruksjoner som spalteplank og gjødselskjellere
<b>8. Særlig aggressivt miljø</b>		
<b>XSA</b>	Konstruksjoner utsatt for sterkt kjemisk angrep som ikke er dekket av de andre eksponeringsklassene, og som gjør særskilte beskyttelsestiltak påkrevd. Dette kan kreve spesialkomponert betong, membraner e.l.	Klassen omfatter blant annet konstruksjoner som er i kontakt med væsker med lav pH, for eksempel fôrsiloer.

## Vedlegg 2: Bestandighetsklasser

Eksponeringsklassens relevans for betongsammensetning, fra NS-EN 206-1 og NS 3473

Eksponeringsklasse	Laveste bestandighets-klasse	Største masseforhold	Laveste bindemiddel-mengde [kg/m <sup>3</sup> ]
X0	M90	0,90	225
XC1	M60	0,60	250
XC2	M60	0,60	250
XC3	M60	0,60	250
XC4	M60	0,60	250
XD1	M45	0,45	300
XD2	M40	0,40	330
XD3	M40	0,40	330
XS1	M45	0,45	300
XS2	M40	0,40	330
XS3	M40	0,40	330
XF1	M60	0,60	250
XF2	MF45 <sup>1)</sup>	0,45	300
XF3	MF45 <sup>1)</sup>	0,45	300
XF4	MF45 <sup>1)</sup>	0,45	300
XA1	M45	0,45	300
XA2 <sup>2)</sup>	M45	0,45	300
XA3 <sup>2)</sup>	M40	0,40	300
XA4 <sup>3)</sup>	M45	0,40	330
XSA	Fastsettes særskilt. Minimum krav som for M40		

- 1) Bestandighetsklasse MF45 og MF40 krever frostsikkert tilslag og bruk av luftinnførende tilsetningsstoffer (minste luftinnhold i fersk betong, 4%)
- 2) Om det i eksponeringsklasse XA2, XA3 eller XSA er mulighet for kontakt med sulfater i konsentrasjoner høyere enn grenseverdien for XA2, skal det i produksjonsunderlaget presiseres at det skal anvendes sulfatbestandig sement.
- 3) For konstruksjoner utsatt for husdyrgjødsel skal det i produksjonsunderlaget angis at det skal anvendes minst 4% silikastøv.

## Vedlegg 3: SV-40 resept



## Kundeopplysninger

Kunde nr.	:		Plass nr.	:	
Kunde navn	:		Plassnavn	:	
Adresse	:		Adresse	:	
Post nr.	:		Post nr.	:	
By	:		By	:	
Telefon	:		UnderpladsNr	:	
Prosjekt nr.	:		Underplass nav:	:	
Attensjon	:		Underskrift	:	Nei
Internt prosjekt nr.	:		Kontakt info.	:	Nei

## Bilag

Type	Nr	Navn	Dato	Konsistens
Resept	101850	B45 SV-Standard D16 STD FA	16-10-2019	200

## Reseptopplysninger

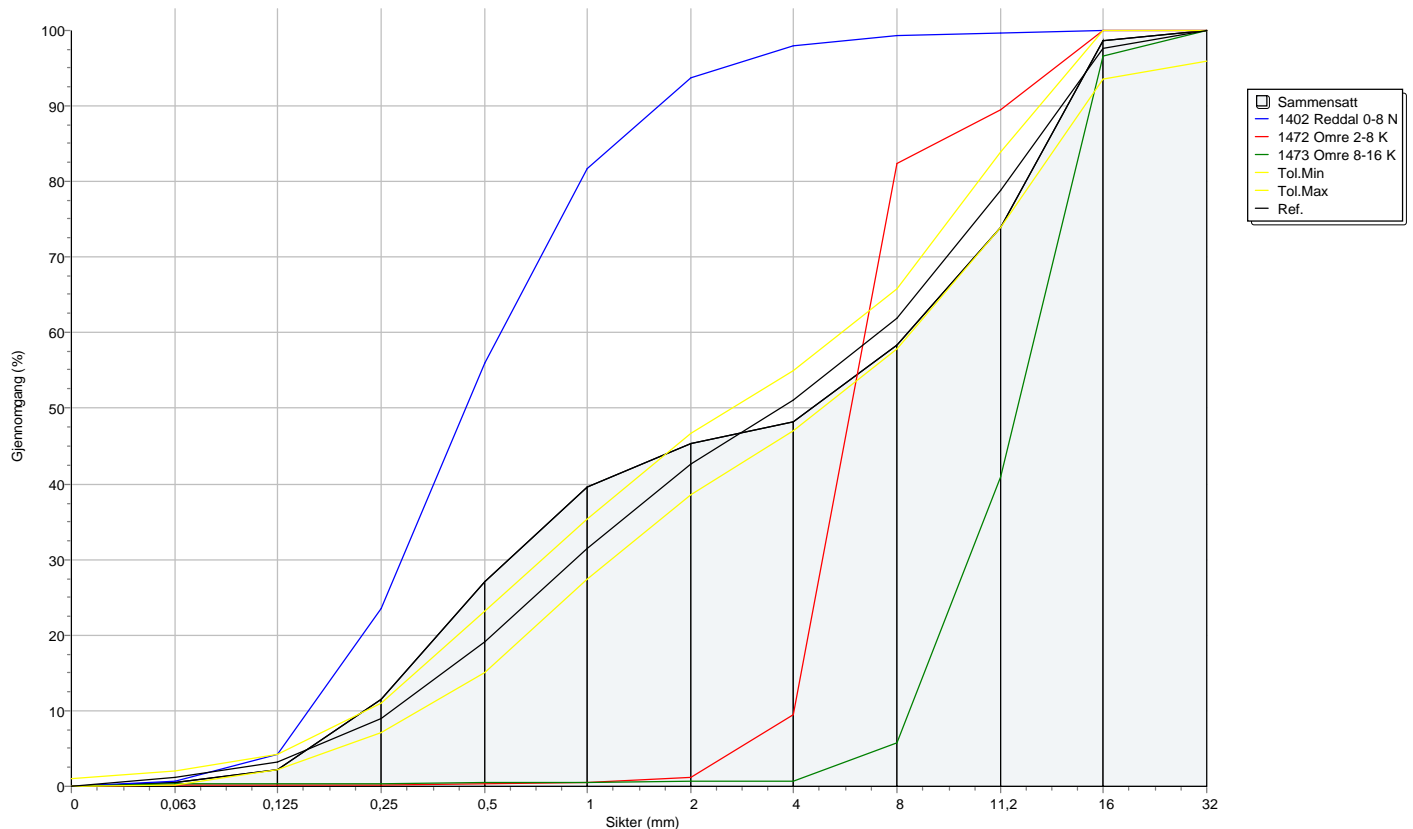
Resept	: 101850 ~ B45 SV-Standard D16 STD FA		
Konsistens (mm)	: 200	V/(c+ks)-forhold	: 0,39
Luftinnhold (%)	: 4,0	Ekv. sementmengde (kg)	: 438
Sementpastavolum (l)	: 314	Fritt vanninnhold (Effektivt)	: 171
V/p-forhold	: 0,37	Matriksvolum eks. luft (l)	: 328
Alkalier (kg/m <sup>3</sup> )	: 5,9	Kloridinnhold (% av sement)	: 0,09
Andel reakt. bergarter (%)	: 0,0	Silika K-verdi	: 2,00
Bestandighetsklasse	: SV:Standard MF40	Referansestandard	: NS206
Fasthetsklasse	: B45	Sertifiseringsorgan	: Kontrollrådet
Kloridklasse	: Cl 0,10	Sertifikat nr.	:
Kornstørrelse D, (mm)	: 16 MM	Spesifikasjon av betong	: Designet
Konsistens måletype	: Synkmål		
Exponeringsklasse	: X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XF1, XD1, XS1, XA1, XA2, XA4, XF2, XF3, XF4, XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XSA		

## Betongsammensetning ved valgt synkmål

Materiale	Kg/m <sup>3</sup>
1402 Reddal 0-8 N	813,85
1472 Omre 2-8 K	173,49
1473 Omre 8-16 K	728,64
2001 Norcem STD.FA.	412,92
3001 Silica	12,77
Vann (*)	167,10
6087 Mapeair 25 1:19	1,28
6014 Dynamon SX-23	3,41
Proporsjoneret betongdensitet	2313,46

(\*) Ekskl. evt. vann i tilsetningsstoff og slurry.  
Inkl. evt. tørstoff i resirkulert vann

## Siktekurve



## Vedlegg 4: UHPC resept

# Betonkontrollattest

v. 1.14

side 1 d. 24.02.2020 kl. 09:48



Inspec.lot no.: 040012232013 Prod. Id, SKAKO: 2020021920042

Salgsordre 2342263 Recept US64B-B200

Prod.ordre 107580461

Debitorkonto 1015532

Adresse Unicon AS (region Sør)

Ringdalveien 25

3270 Larvik

Lars Hundekilen

98027466

Fabrik 0305 Larvik

Følgeseddel 8926

Ønsket temperatur 20 °C

Ønsket konsistens 200

Blandemester bla

Blander 000

Voggnr. 001

Produceret (m<sup>3</sup>) 1,52

Blandedato 19.02.2020

Blandetidspunkt 12:41

Sammensætning	Materialenavn	Fugt %	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Tilsat(bør)	Blandet kg	1 m <sup>3</sup> (bør)	V.O.T.er
Pulver	Aalborg Portland CEM I 52,5 N		3 160	1 150	1 161	767	766
Pulver	Silikastøv k=1		2 200	227	230	152	152
Tilslag	0-8 mm Skyggestein	6,4	2 656	1 964	1 975	1 231	1 225
Additiver	ViscoCrete 6120	80,0	1 040	25,30	25,15	16,87	16,59
Additiver	MasterSet R 433 Retarder	90,0	1 040	5,75	5,80	3,83	3,83
Vand	Kaldt vann		1 000	29	29	98	19
Vand	Varmt vann		1 000	130	137	87	90
			Total fugt i tilslag				78
			Total kg	3 531	3 563	2 355	2 351
			Volumen (liter)	1 499	1 523	1 000	1 008

	Bør verdi	Målt / bereg.	
Temperatur	20	22,000	°C
Total vand	202	202,0	l/m <sup>3</sup>
Ækivalent cement målt/beregnet	918	918,2	kg/m <sup>3</sup>
Ækivalent V/C- forhold målt/beregnet	0,220	0,220	
Konsistens	200	540	mm
Blandetid målt/beregnet	60	556	sec
Målt luftindhold på frisk beton	2,0	2,8	%
Wattmeter målt/beregnet			
Beregning af densitet	2 351		kg/m <sup>3</sup>

# Betonkontrolltest

v. 1.14

side 2 d. 24.02.2020 kl. 09:48



Inspection lot no.: 040012232013 Prod. Id, SKAKO: 2020021920042

---

	Bør værdi	Målt / bereg.
Trykprøvning 1 døgn MPa		MPa
Middelværdi 1 døgn MPa		MPa
Trykprøvning 2 døgn MPa		MPa
Middelværdi 2 døgn MPa		MPa
Trykprøvning 7 døgn MPa		MPa
Middelværdi 7 døgn MPa		MPa
Trykprøvning 28 MPa		MPa
Middelværdi 28 døgn MPa		MPa
Sylinderfasthet 28 d		MPa
Trykprøvning 90 døgn MPa		MPa
Middelværdi 90 døgn MPa		MPa
Vekt terning 1 døgn		kg
Vekt terning 2 døgn		kg
Vekt terning 7 døgn		kg
Vekt terning 28 døgn		kg
Densitet 1 døgn [kg/m <sup>3</sup> ]		kg/m <sup>3</sup>
Densitet 2 døgn [kg/m <sup>3</sup> ]		kg/m <sup>3</sup>
Densitet 7 døgn [kg/m <sup>3</sup> ]		kg/m <sup>3</sup>
Densitet 28 døgn [kg/m <sup>3</sup> ]		kg/m <sup>3</sup>
Densitet 90 døgn [kg/m <sup>3</sup> ]		kg/m <sup>3</sup>

## Vedlegg 5: Dimensjonsberegninger utført i Mathcad

# Dimensjonering av bjelketverrsnitt:

Armering:

$$\phi := 8 \text{ mm}$$

Overdekning:

$$C_{min.dur} := 40 \text{ mm}$$

$$C_{min} := C_{min.dur}$$

$$\Delta C_{dev} := 10 \text{ mm}$$

$$C_{nom} := C_{min} + \Delta C_{dev} \quad \Rightarrow \quad C_{nom} = 50 \text{ mm}$$

Avstand mellom armeringsjernene:

$$a.h \geq \max\{k1 \cdot \phi; dg + k2; 20\text{mm}\}$$

$$k1 := 1$$

$$\phi = 8 \text{ mm}$$

$$d.g := 32 \text{ mm}$$

$$k2 := 5 \text{ mm}$$

Ettersom betongresepten og største kornstørrelse ikke er kjent på dette tidspunktet, antas den største stangdiameteren som til sikker side:

$$a.h := d.g \quad \Rightarrow \quad a.h = 32 \text{ mm}$$

Resterende avstand på motsatt side av armeringen må være større enn overdekningen

$$\Rightarrow \quad C.r > C_{nom}$$

$$C.r := 52 \text{ mm}$$

## Bjelkens bredde:

$$b := C.r + \phi + a.h + \phi + C.r = 152 \text{ mm}$$

Velger dermed å sette bredden lik:

$$b := 160 \text{ mm}$$

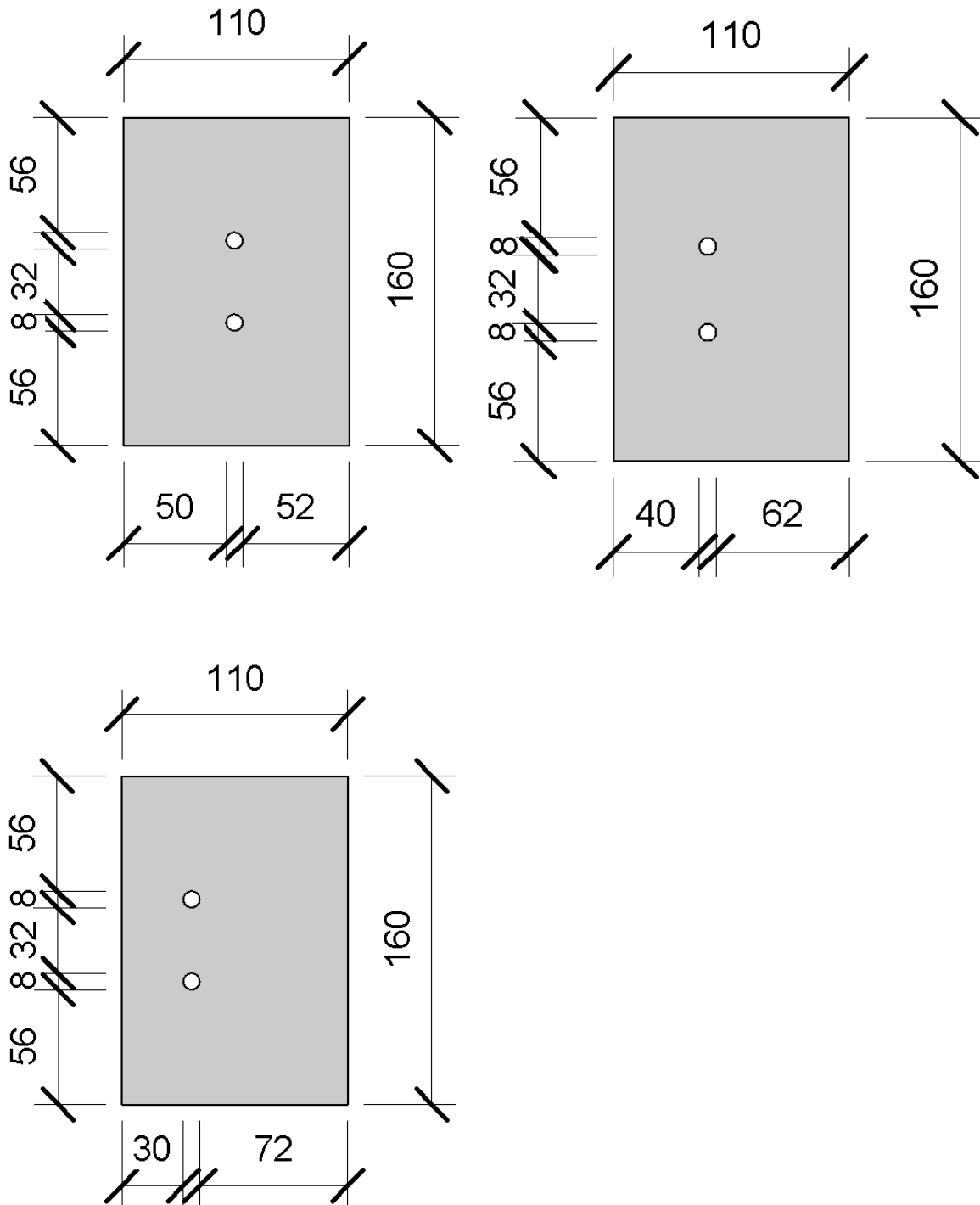
## Bjelkens høyde:

$$h := C.nom + \phi + C.r = 110 \text{ mm}$$

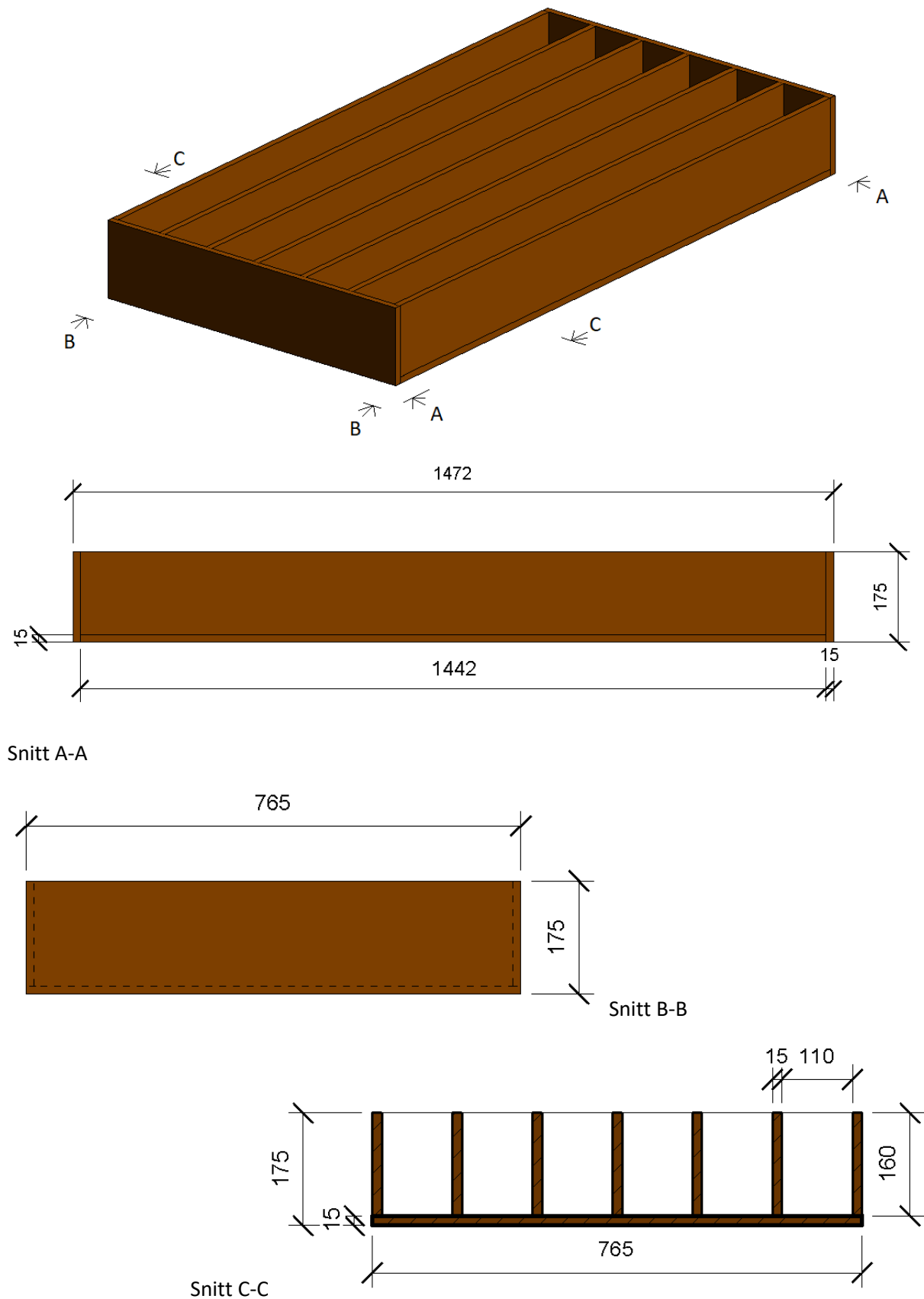
$$h = 110 \text{ mm}$$



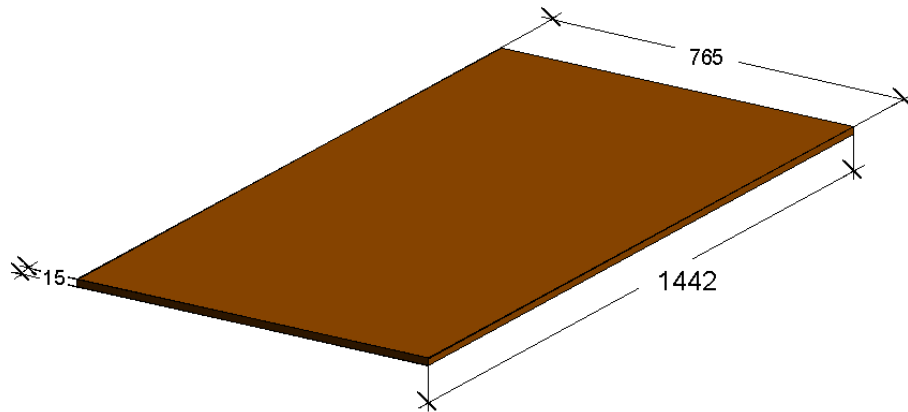
### Vedlegg 6: Prosjekteringstegninger av plassering av hull til armeringen



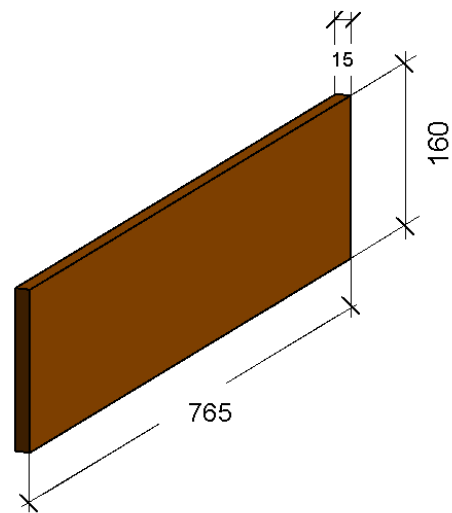
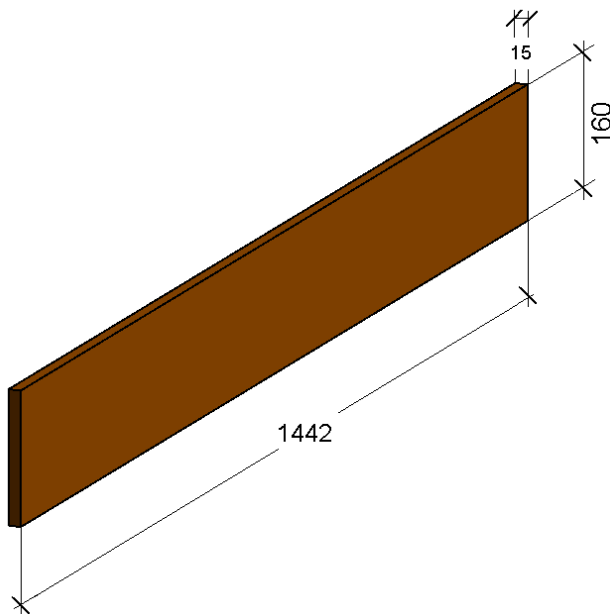
## Vedlegg 7: Prosjekteringstegninger av forskaling gjort i Revit



Mål på de ulike platene i forskalingen



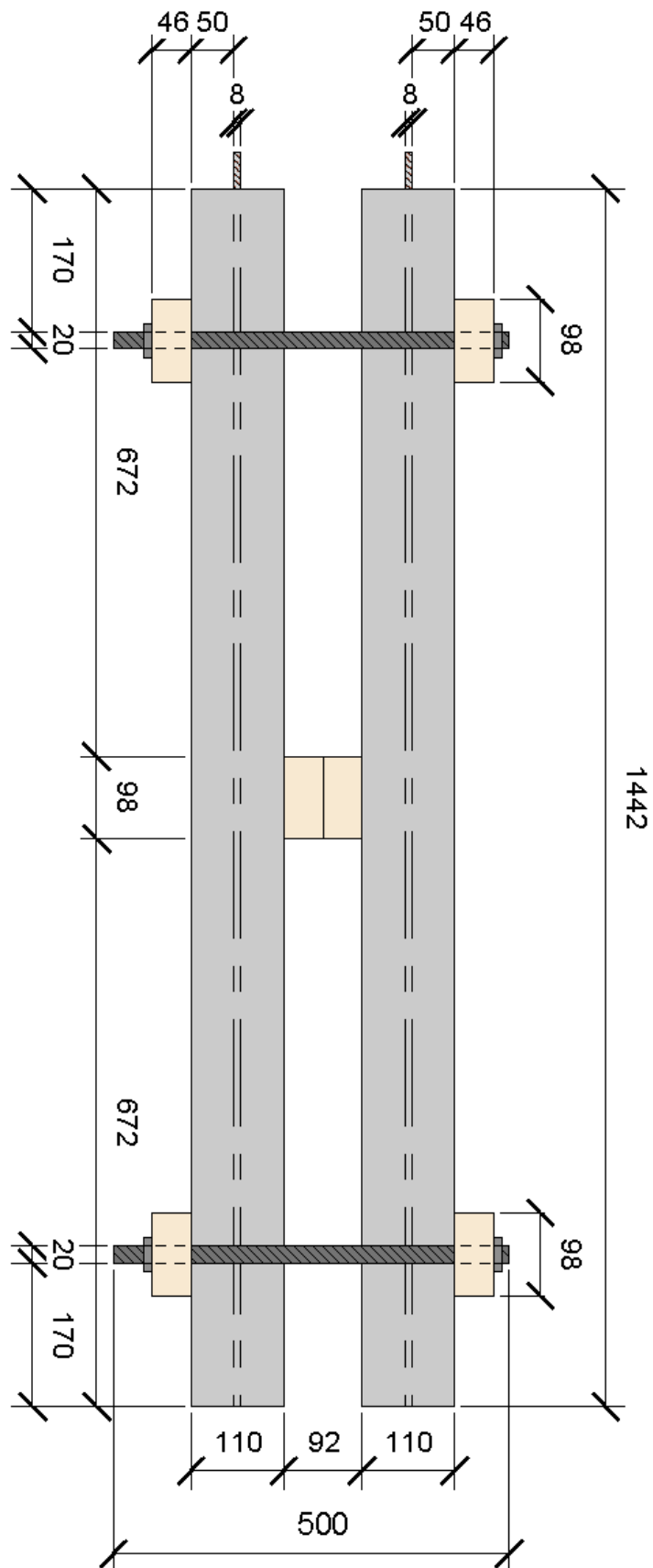
Mål på bunnplate



Mål på langside- og mellomplatene

Mål på kortsiden

Vedlegg 8: Skjematisk tegning av testobjektet



## Vedlegg 9: Bilder av største riss på bjelkene før eksponering i marint miljø

### Testobjekt 1



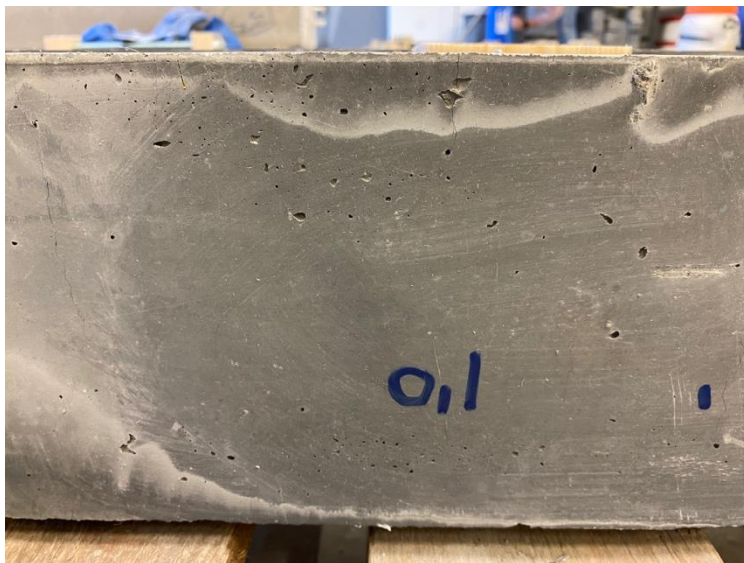
Testobjekt 2



Testobjekt 3



Testobjekt 4

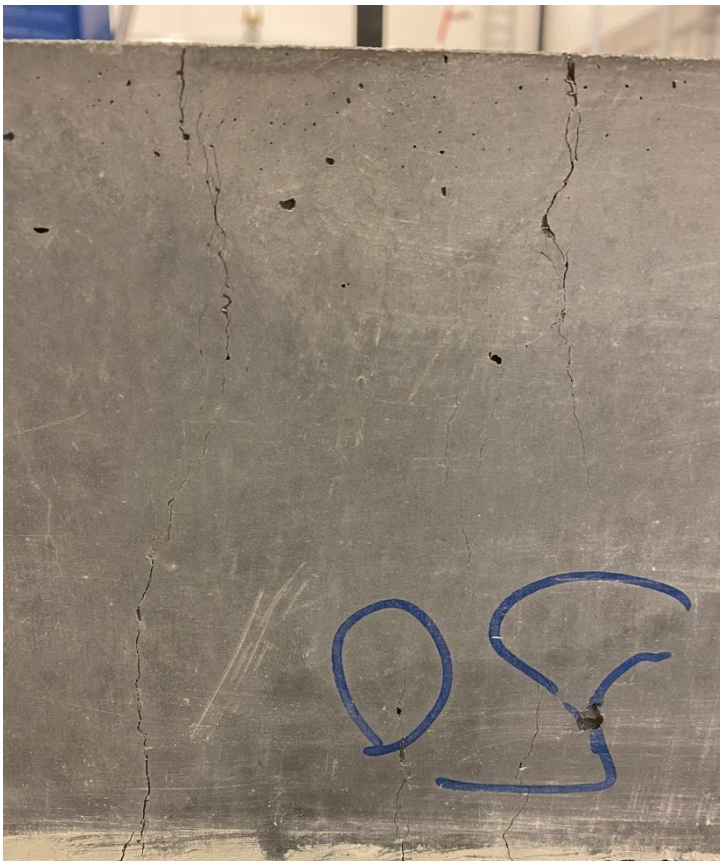




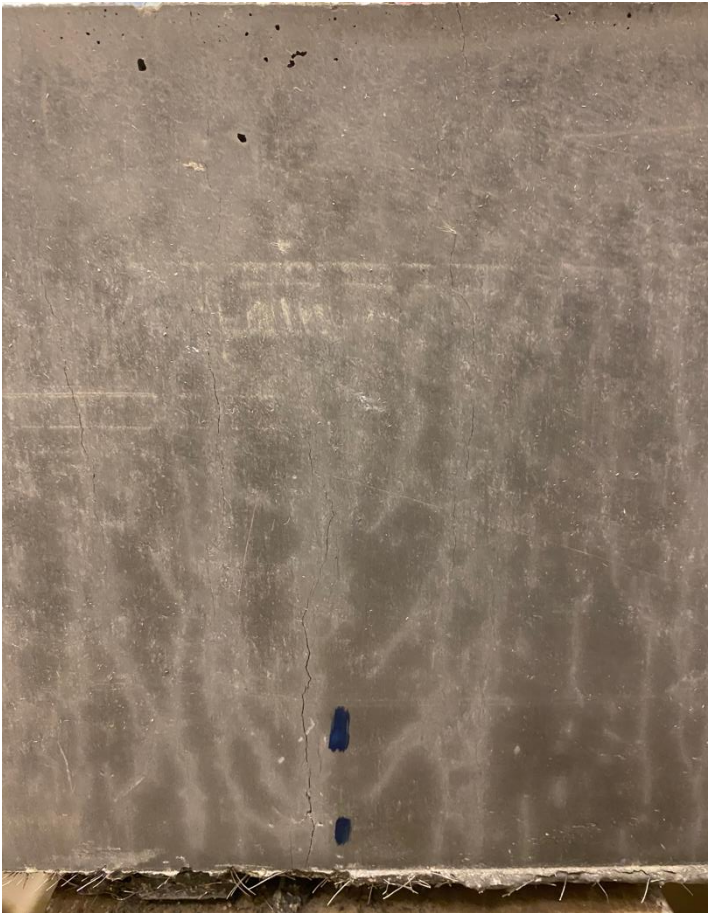
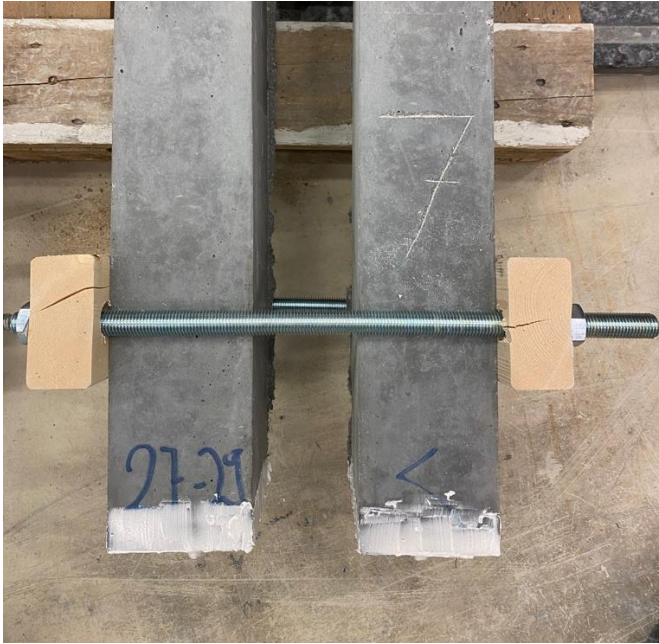
Testobjekt 5



Testobjekt 6



Testobjekt 7



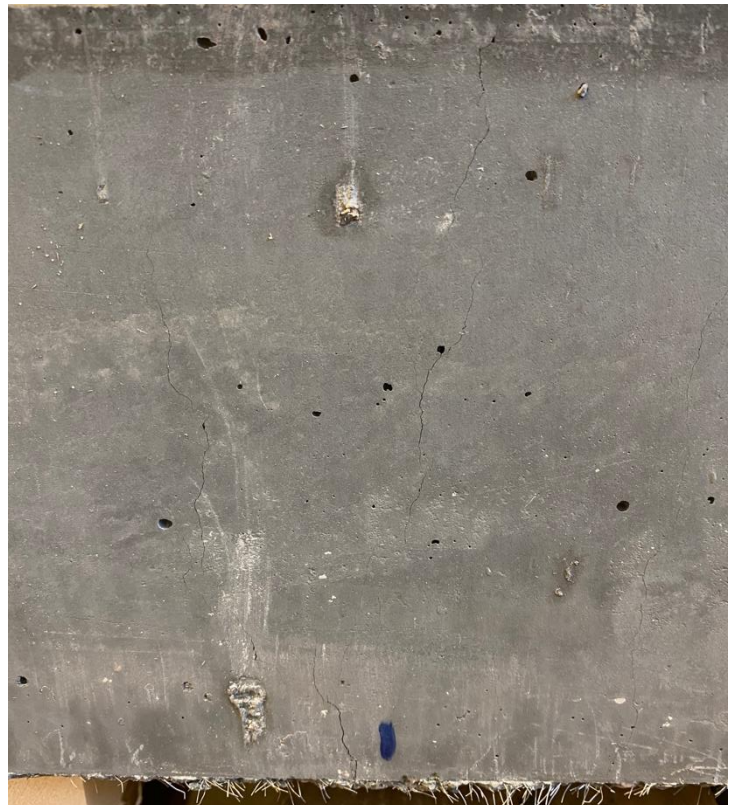
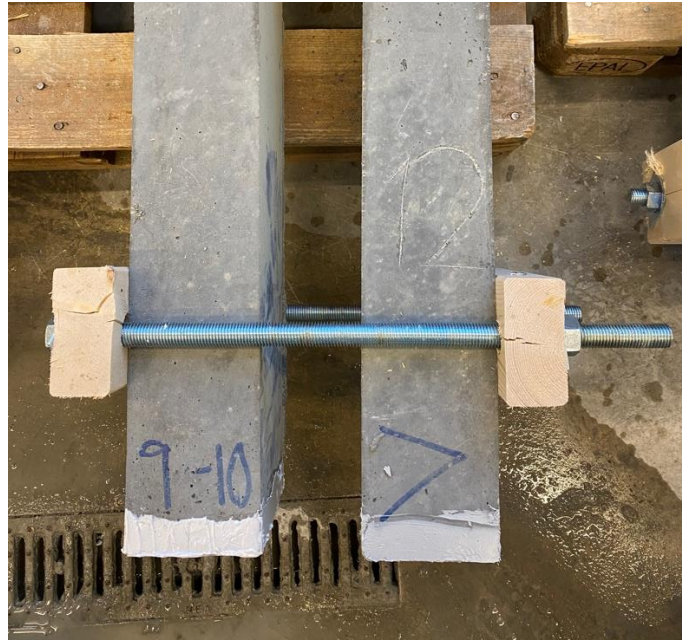
Testobjekt 8



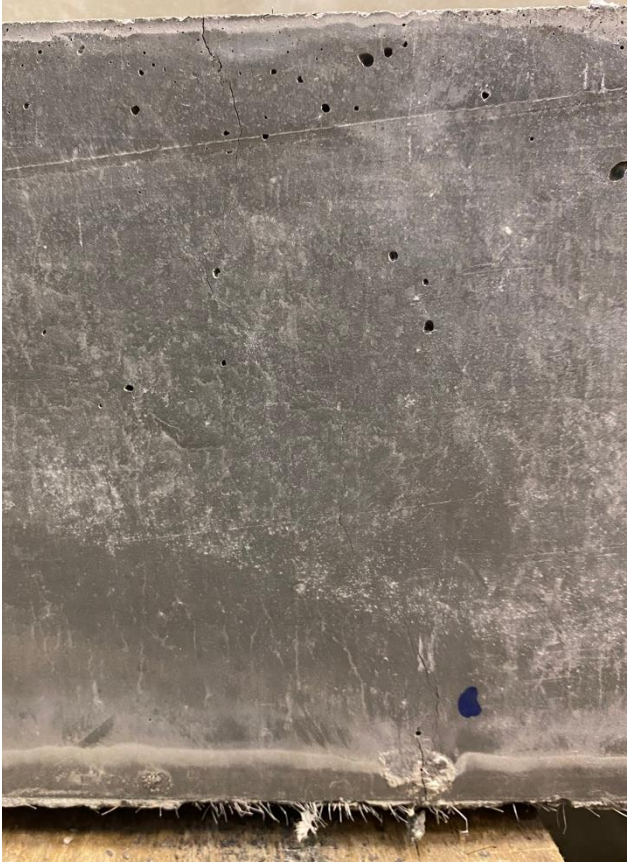
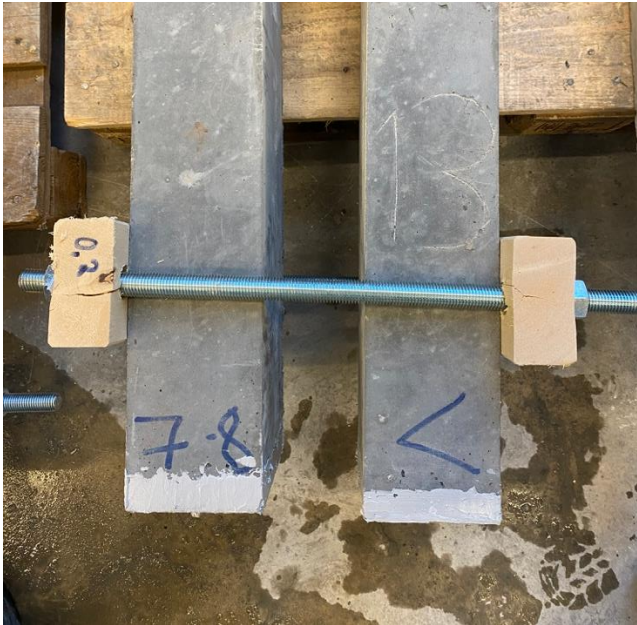
Testobjekt 9



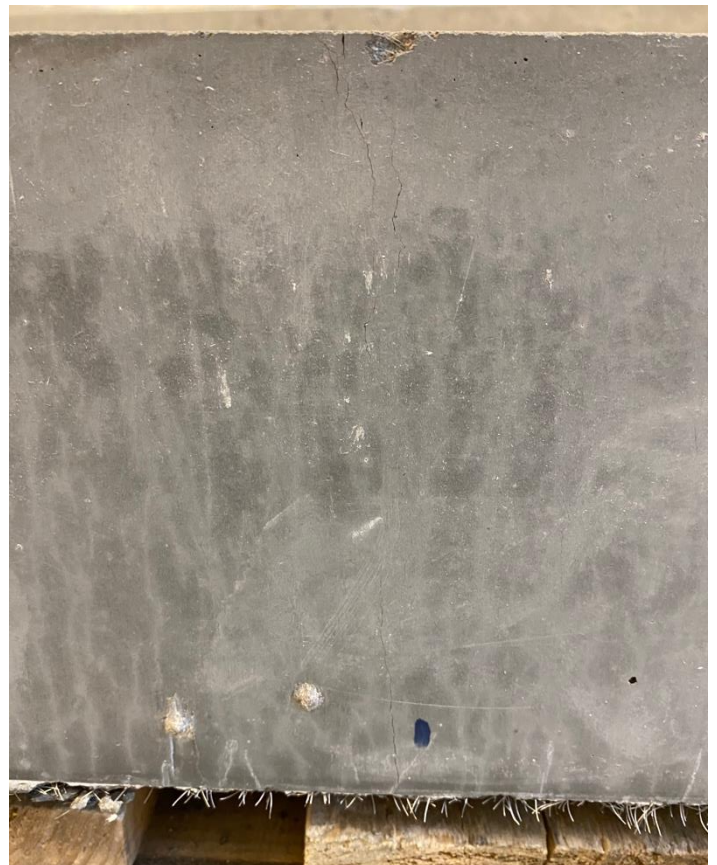
Testobjekt 12



Testobjekt 13

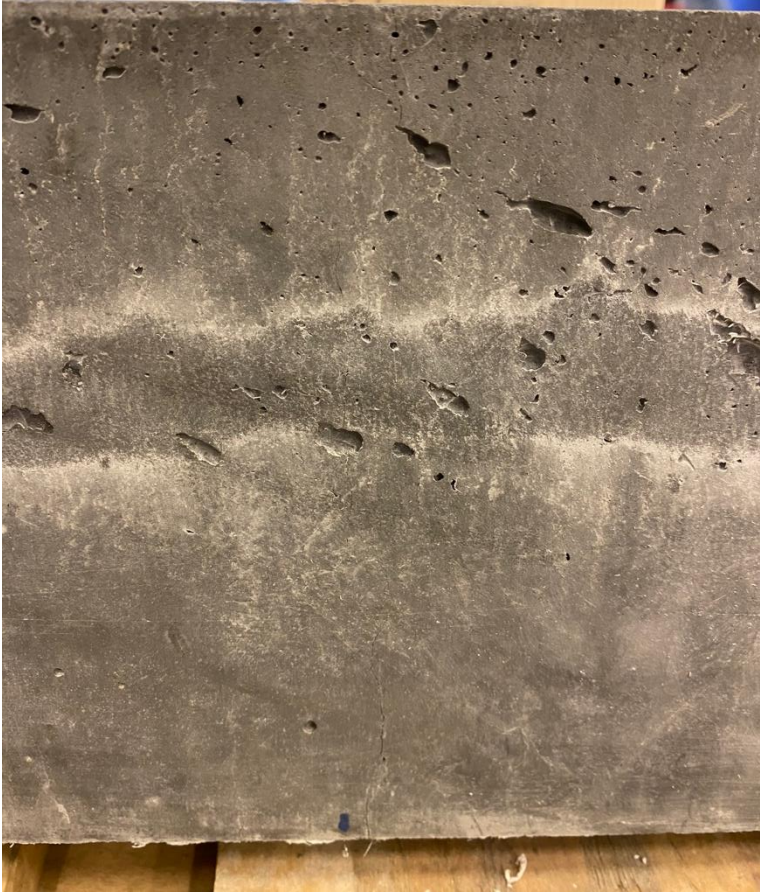


Testobjekt 14

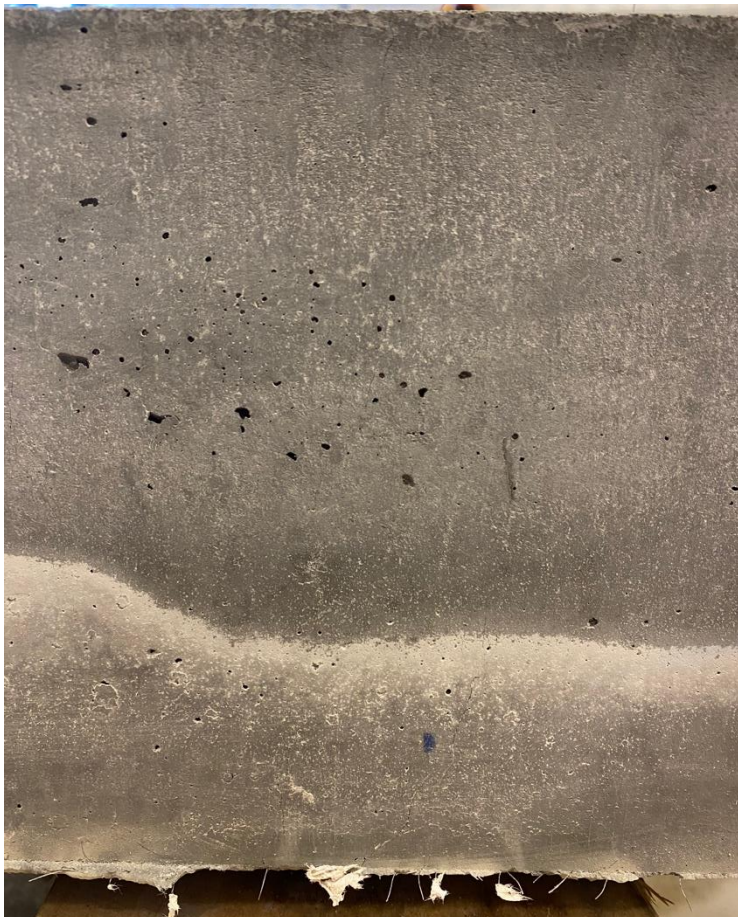




Testobjekt 15



Testobjekt 16



Testobjekt 17



Testobjekt 18



## Vedlegg 10: Risikovurdering for kloridtest

# Risikovurdering for kloridtest

Utarbeidet av [Thea Birkedal, Vilde Hovland, Victoria Netland], Universitetet i Agder

Kjemikalie	Risiko	Forebyggende tiltak	Konsekvensreduksjon	Avfall
Salpetersyre (20-65%)	Innånding, hudkontakt, øyekontakt, svelging	Være varsom Bruke lukkede vernebriller eller ansiktsskjerm, hansker og labfrakk Benytt en «kjemikaleskap»	Innånding: frisk luft, evt. oksygentilførsel Hudkontakt: skyll med store mengder vann i 15 min, fjern tilsølte klær. Etseskader behandles av lege. Øyekontakt: skyll med store mengder vann i 30 min. Dra til legen og skyll til man ankommer. Svelging: Drikk litt vann for å skylle svelg og spiserør. Skyll deretter munnen med mye vann, men unngå brekninger. Kontakt lege	Leveres som farlig avfall til godkjent behandler/innsamler.
Kaliumklorid (KCl)	Kvalme, oppkast, hjertearytmer	Bruk åndedrettsvern, øyevern, håndvern, verneklær.	For innånding, hudkontakt, øyekontakt og svelging gjelder tiltakene som beskrevet over.	Behandles som farlig avfall. Leveres i samsvar med gjeldene bestemmelser.
Benzylalkohol	Svelging eller innånding	Unngå innånding Ikke spis eller drikk ved bruk av produktet. Bruk lukkede vernebriller, hansker og åndedrettsvern.	Innånding: frisk luft og en stilling som letter åndedrettet. Fjern tilsølte klær, skyll hud og øyer med vann. Svelging: skyll munnen med vann og kontakt lege.	Behandles som farlig avfall. Leveres i samsvar med gjeldene bestemmelser.
Sølvnitrat	Etsende og miljøskadelig	Bruk åndedrettsvern, øyevern, håndvern, verneklær.	For innånding, hudkontakt, øyekontakt og svelging gjelder tiltakene som beskrevet over.	Fjern i samsvar med lokale myndigheters bestemmelser. Snakk med ansvarlig renovatør om avhenting av avfall.

Kaliumtiocyanat (KSCN)	Giftig ved svelging, hudkontakt og innånding. Fare for vannmiljøet.	Unngå innånding av støv. Benytt vernehansker, vernekær, vernebriller og ansiktsskjerm.	Hudkontakt: vask med mye såpe og vann. For innånding, øyekontakt og svelging gjelder tiltakene som beskrevet over.	Behandles som farlig avfall. Leveres i samsvar med lokale myndigheters bestemmelser.
------------------------	---	--	--	--

## Vedlegg 11: Rådata fra forsøket



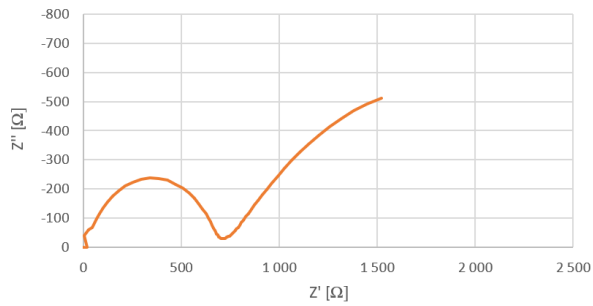
Testobjekt	Bjelkenummer	Betong	Overdekning	Eksponeringsmiljø	Type	Riss før		Riss etter		Kommentar
						Venstre bjelke	Høyre bjelke	Venstre bjelke	Høyre bjelke	
1	1-3	UHPC	50	Sjøbunn		0,2	<b>0,4</b>	0,2	<b>0,4</b>	
2	2-4	UHPC	50	Sjøbunn		<b>0,2</b>	0,1	-	-	Kunne ikke hentes opp igjen
3	5-6	UHPC	50	Skvalpesone		0,1	<b>0,2</b>	0,1	<b>0,2</b>	
4	13-14	UHPC	50	Skvalpesone	Ekstra	0,1	<b>0,2</b>	0,1	<b>0,2</b>	
5	26-30	UHPC	50	Skvalpesone		0	<b>0,8</b>	0	<b>1,0</b>	
6	17-25	UHPC	50	Sjøbunn		0,3	<b>0,8</b>	0,35	<b>1,0</b>	Største riss observert på overflaten 1,5 mm
7	27-29	UHPC	50	Sjøbunn		<b>0,6</b>	0,15	-	-	Kunne ikke hentes opp igjen
8	19-20	UHPC	50	Skvalpesone		0,2	<b>0,4</b>	0,2	<b>0,4</b>	
9	15-16	UHPC	50	Skvalpesone		0,2	<b>0,6</b>	0,2	<b>0,6</b>	Største sprekk observert på overflaten 1,8 mm
10	18	UHPC	50	Sjøbunn	Referanse	-	-	-	-	Kunne ikke hentes opp igjen
11	28	UHPC	50	Skvalpesone	Referanse	-	-	-	-	
12	9-10	UHPC	40	Sjøbunn		0,1	<b>0,2</b>	-	-	Kunne ikke hentes opp igjen
13	7-8	UHPC	40	Skvalpesone		<b>0,2</b>	0,1	<b>0,2</b>	0,1	
14	11-12	UHPC	40	Skvalpesone	Ekstra	<b>0,2</b>	0,1	<b>0,2</b>	0,1	
15	23-24	UHPC	30	Skvalpesone		<b>0,2</b>	0,1	<b>0,2</b>	0,1	
16	21-22	UHPC	30	Sjøbunn		0,1	<b>0,2</b>	0,1	<b>0,2</b>	
17	31-32	SV-40	50	Sjøbunn		<b>0,2</b>	0,3	-	-	Kunne ikke hentes opp igjen
18	35-36	SV-40	50	Skvalpesone		<b>0,2</b>	0,3	<b>0,3</b>	0,4	
19	33	SV-40	50	Sjøbunn	Referanse	-	-	-	-	Kunne ikke hentes opp igjen
20	34	SV-40	50	Skvalpesone	Referanse	-	-	-	-	Kunne ikke hentes opp igjen

Testobjekt	Bjelkenummer	Betong	Overdekning	Eksponeringsmiljø	Type	EIS før eksponering		EIS etter eksponering	
						Venstre bjelke	Høyre bjelke	Venstre bjelke	Høyre bjelke
1	1-3	UHPC	50	Sjøbunn		ok	ok	ok	ok
2	2-4	UHPC	50	Sjøbunn		-	-	-	-
3	5-6	UHPC	50	Skvalpesone		-	-	ok	ok
4	13-14	UHPC	50	Skvalpesone	Ekstra	-	-	ok	ok
5	26-30	UHPC	50	Skvalpesone		-	-	ok	ok
6	17-25	UHPC	50	Sjøbunn		-	-	ok	ok
7	27-29	UHPC	50	Sjøbunn		-	-	-	-
8	19-20	UHPC	50	Skvalpesone		-	-	ok	ok
9	15-16	UHPC	50	Skvalpesone		-	-	ok	ok
10	18	UHPC	50	Sjøbunn	Referanse	-	-	-	-
11	28	UHPC	50	Skvalpesone	Referanse	-	-	-	-
12	9-10	UHPC	40	Sjøbunn		ok	ok	-	-
13	7-8	UHPC	40	Skvalpesone		-	-	ok	ok
14	11-12	UHPC	40	Skvalpesone	Ekstra	-	-	ok	ok
15	23-24	UHPC	30	Skvalpesone		-	-	ok	ok
16	21-22	UHPC	30	Sjøbunn		ok	ok	ok	ok
17	31-32	SV-40	50	Sjøbunn		ok	ok	-	-
18	35-36	SV-40	50	Skvalpesone		-	-	ok	ok
19	33	SV-40	50	Sjøbunn	Referanse	-	-	-	-
20	34	SV-40	50	Skvalpesone	Referanse	-	-	ok	ok

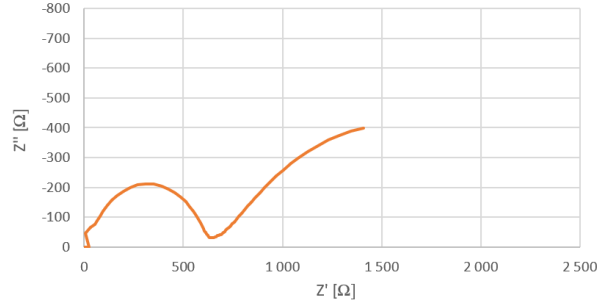
Kloridinnhold												
Sjikt	SV-40						UHPC					
	Utenfor riss			I riss			Utenfor riss			I riss		
	Vekt [g]	Titranst [ml]	Kloridinnhold [%/c]	Vekt [g]	Titranst [ml]	Kloridinnhold [%/c]	Vekt [g]	Titranst [ml]	Kloridinnhold [%/c]	Vekt [g]	Titranst [ml]	Kloridinnhold [%/c]
10 mm	4,91	34,1	0,238	4,84	24,8	0,624	4,67	35,1	0,114	4,92	30,3	0,215
20 mm	4,91	40,6	-0,024	4,89	33,7	0,256	5,02	36,9	0,067	4,53	29,2	0,482
30 mm	4,95	35,6	0,177	4,79	34,6	0,224	4,96	37,5	0,055	4,90	33,0	0,155
40 mm	4,96	36,0	0,160	4,92	35,2	0,194	4,99	36,6	0,074	4,84	34,3	0,128
50 mm	4,94	35,5	0,181	4,88	35,7	0,175	4,93	35,0	0,110	4,82	34,7	0,12
	<b>Titranst</b>	[%/c]-prosent kloridinnhold per kg sement										
Blank prøve 1	38,5											
Blank prøve 2	39,8											
Blank prøve 3	40,8											
Gj.snitt blank prøve	39,7											

## Vedlegg 12: Nyquist-diagrammer for alle bjelkene

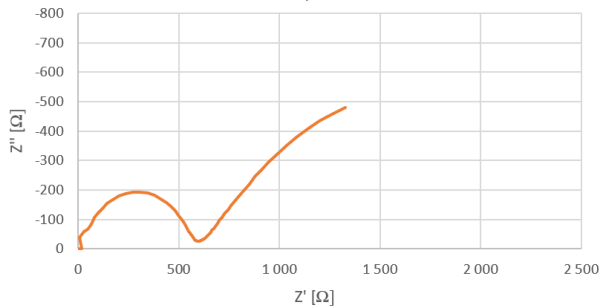
UHPC - Bjelke 1 Venstre 0,2/50  
Sjøbunn



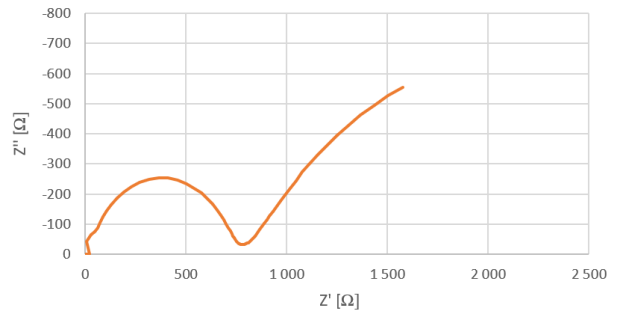
UHPC - Bjelke 1 Høyre 0,4/50  
Sjøbunn



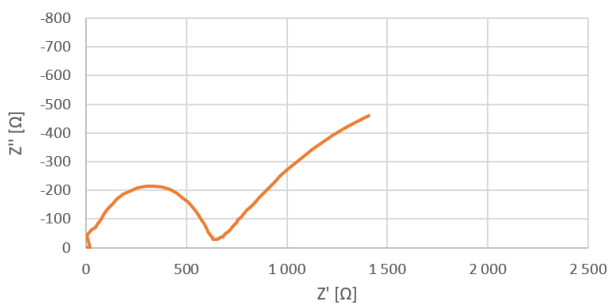
UHPC - Bjelke 3 Venstre 0,1/50  
Skvalpesone



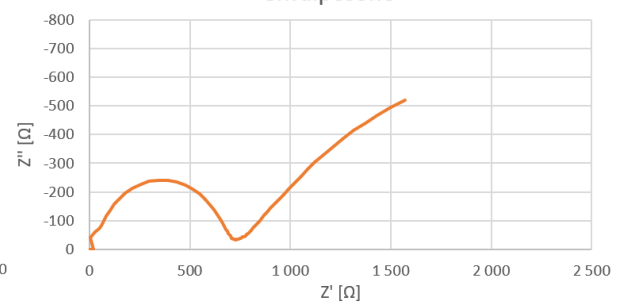
UHPC - Bjelke 3 Høyre 0,2/50  
Skvalpesone



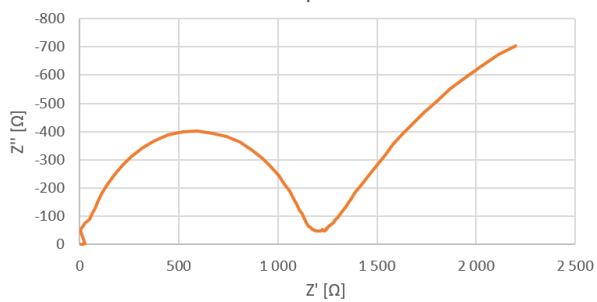
UHPC - Bjelke 4 Venstre 0,1/50  
Skvalpesone



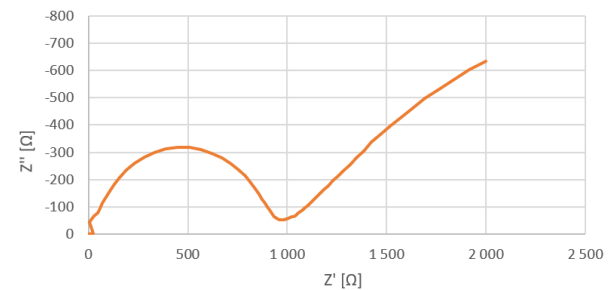
UHPC - Bjelke 4 Høyre 0,2/50  
Skvalpesone



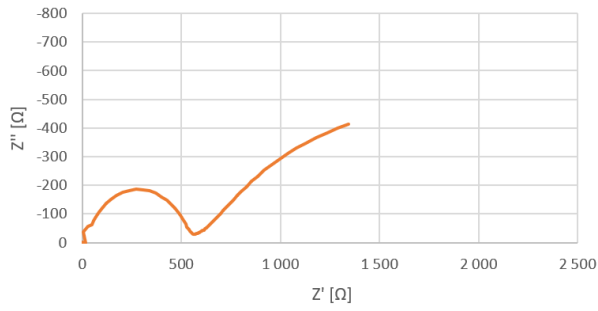
UHPC - Bjelke 5 Venstre 0,0/50  
Skvalpesone



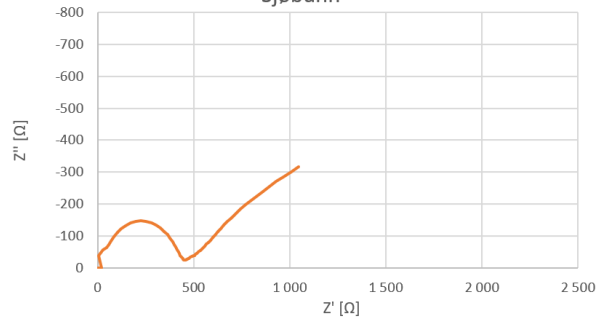
UHPC - Bjelke 5 Høyre 0,8/50  
Skvalpesone



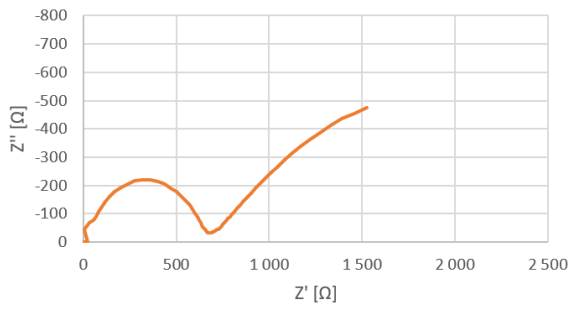
UHPC - Bjelke 6 Venstre 0,3/50  
Sjøbunn



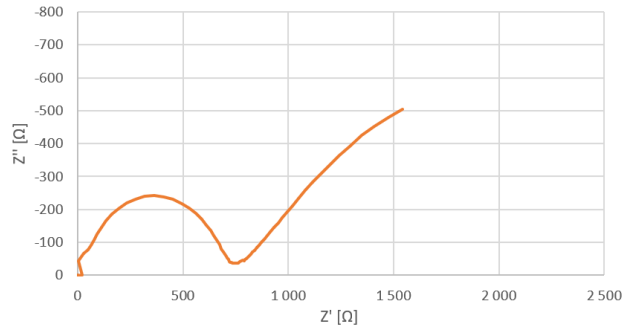
UHPC - Bjelke 6 Høyre 0,8/50  
Sjøbunn



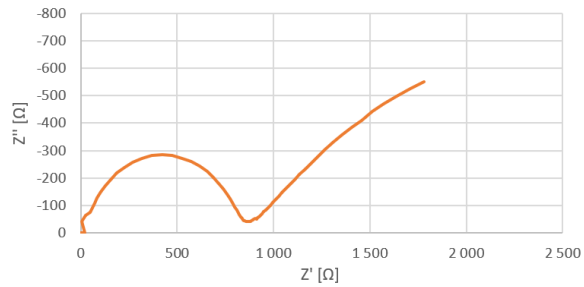
UHPC - Bjelke 8 Venstre 0,2/50  
Skvalpesone



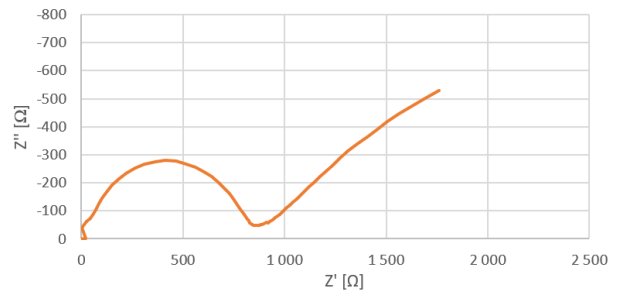
UHPC - Bjelke 8 Høyre 0,4/50  
Skvalpesone



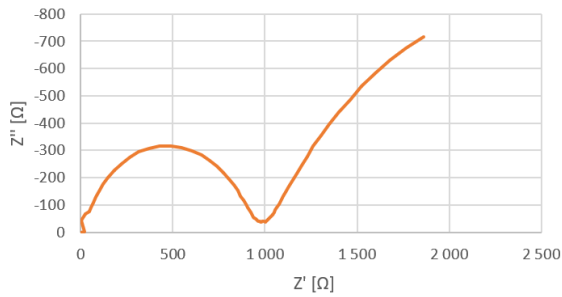
UHPC - Bjelke 9 Venstre 0,2/50  
Skvalpesone



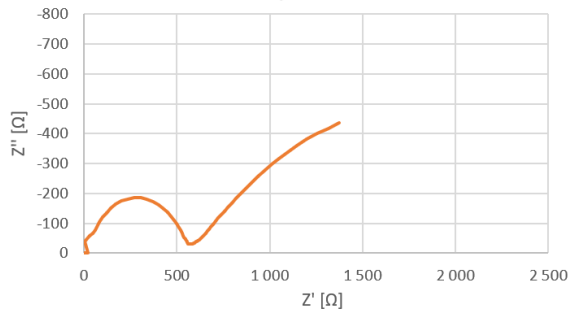
UHPC - Bjelke 9 Høyre 0,6/50  
Skvalpesone



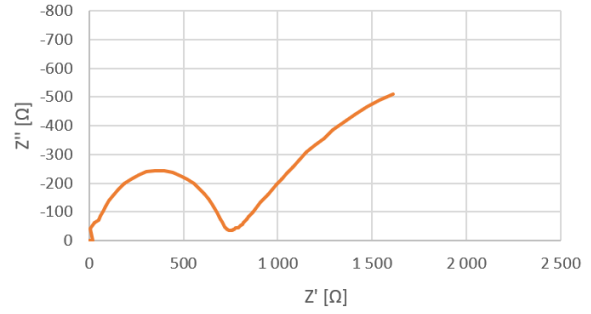
UHPC - Bjelke 11 Referanse -/50  
Skvalpesone



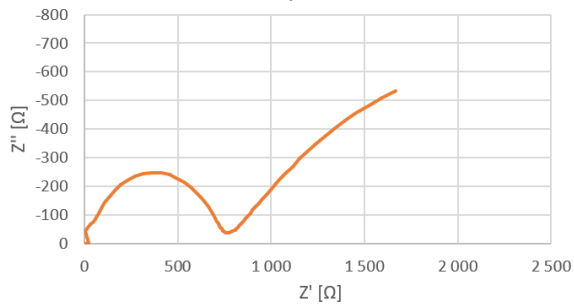
UHPC - Bjelke 13 Venstre **0,2/40**  
Skvalpesone



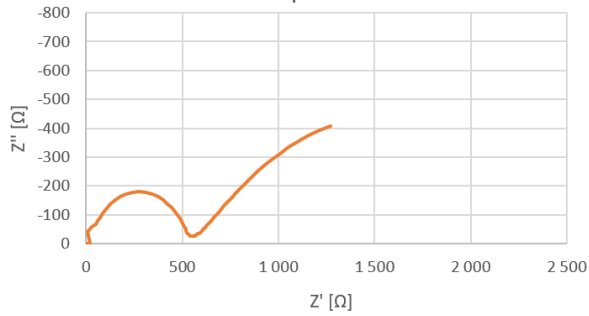
UHPC - Bjelke 13 Høyre **0,1/50**  
Skvalpesone



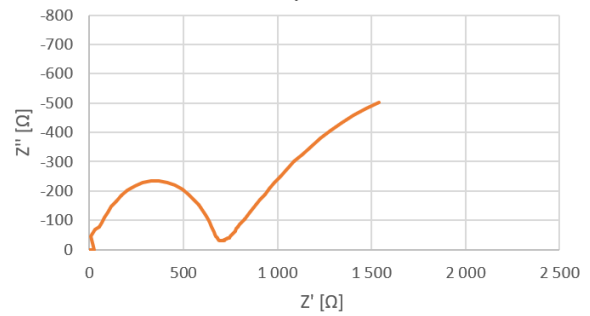
UHPC - Bjelke 14 Venstre **0,2/40**  
Skvalpesone



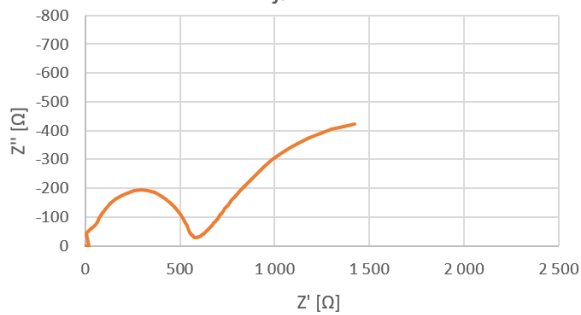
UHPC - Bjelke 15 Venstre **0,2/30**  
Skvalpesone



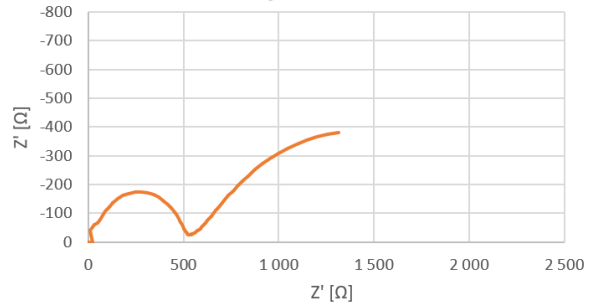
UHPC - Bjelke 15 Høyre **0,1/30**  
Skvalpesone



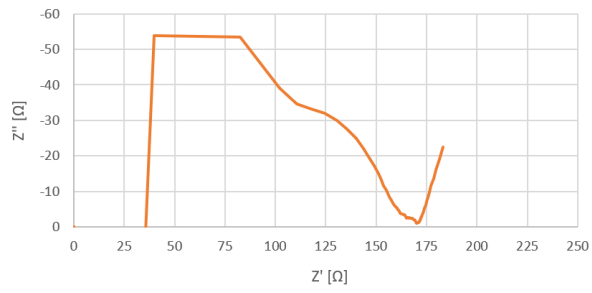
UHPC - Bjelke 16 Venstre **0,1/30**  
Sjøbunn



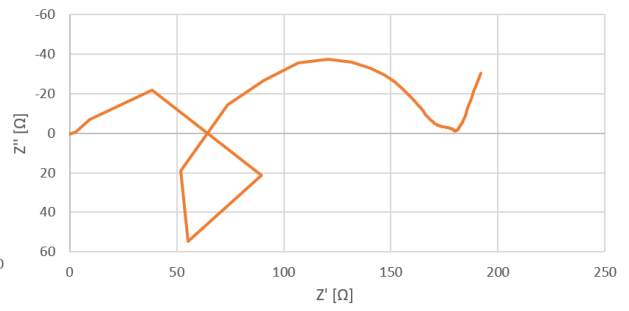
UHPC - Bjelke 16 Høyre **0,2/30**  
Sjøbunn



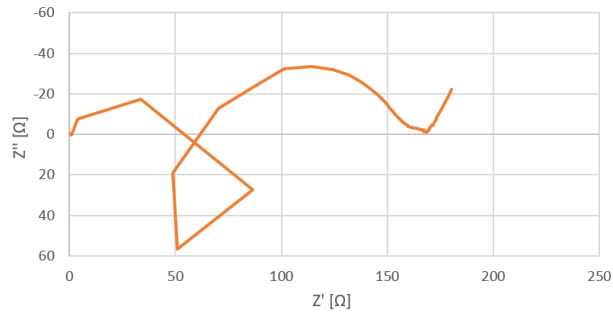
SV-40 - Bjelke 18 Venstre 0,2/50  
Skvalpesone



SV-40 - Bjelke 18 Høyre 0,3/50  
Skvalpesone



SV-40 - Bjelke 20 Referanse -/50  
Skvalpesone



## Vedlegg 13: Bilder av største riss på bjelkene etter eksponering i marint miljø

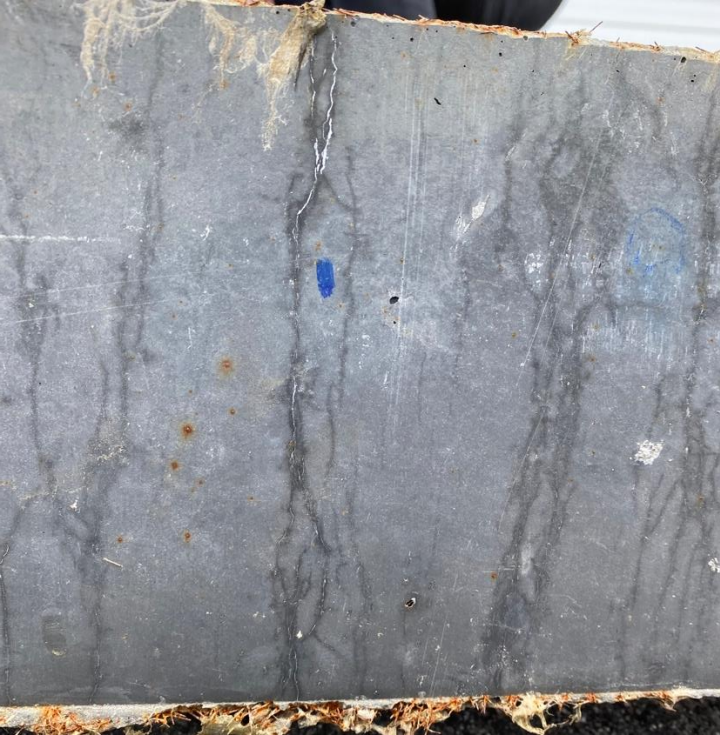
Figurene avbilder området på bjelken med størst riss, og er markert med blå tusj.

### Testobjekt 1





Testobjekt 3



Testobjekt 4



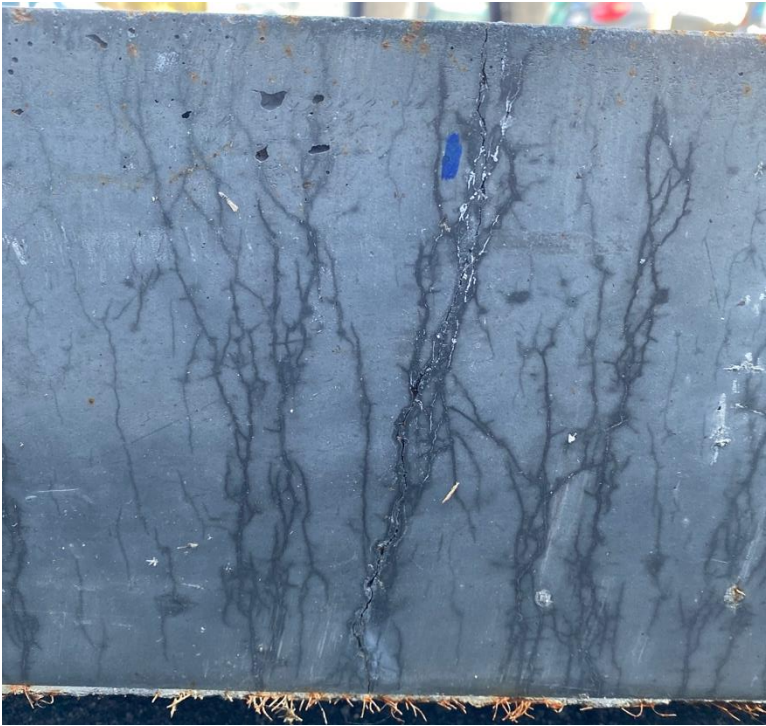
Testobjekt 5



Testobjekt 6



Testobjekt 8



Testobjekt 9



Testobjekt 13

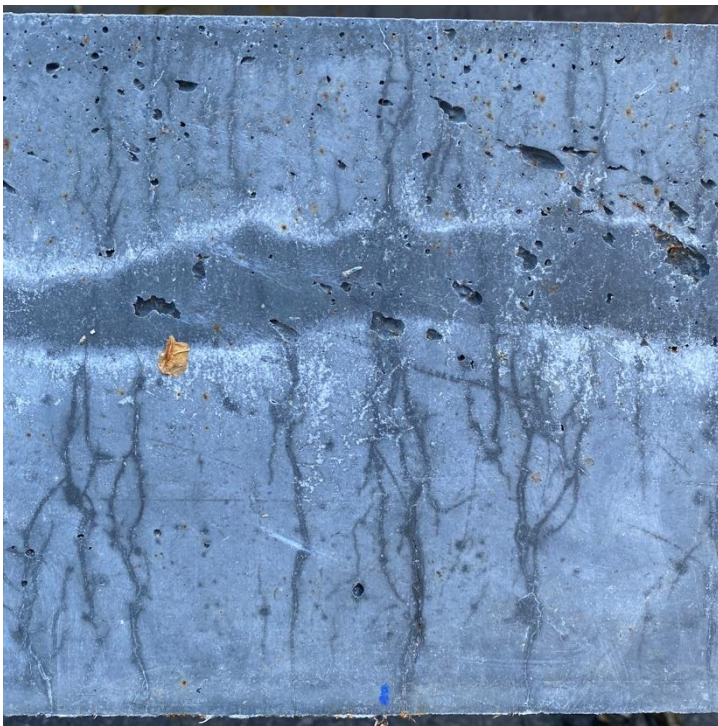


Testobjekt 14





Testobjekt 15



Testobjekt 16



Testobjekt 18



## Vedlegg 14: Beregninger av kloridinnhold gjort i Mathcad

# Kloridinnhold i betong

## Kloridinnhold i SV-40:

$$\text{Betongdensitet:} \quad \rho_{sv40} := 2313.46 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Sementvekt:} \quad m_{cem} := 412.92 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$n_{ag} := 0.1 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \cdot 0.004 \text{ L} = (4 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$C_{kscn} := 0.01 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

$$Mm_{cl} := 35.45 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

## SV-40 10 mm utenfor riss

$$V_{kscn} := 34.1 \text{ mL}$$

$$m_{pr\ddot{o}ve} := 4.91 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (3.41 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (5.9 \cdot 10^{-5}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := Mm_{cl} \cdot n_{cl} = 0.002 \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{pr\ddot{o}ve}} = 4.26 \cdot 10^{-4}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{sv40}}{m_{cem}} \cdot 100$$

$$\text{Prosent kloridinnhold av sementvekt} = Cl_{cem} = 0.239$$

### SV-40 20 mm utenfor riss

$$V_{kscn} := 40.6 \text{ mL}$$

$$m_{pr\ddot{o}ve} := 4.91 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (4.06 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = -6 \cdot 10^{-6} \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = -2.127 \cdot 10^{-4} \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{pr\ddot{o}ve}} = -4.332 \cdot 10^{-5}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{sv40}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt =  $Cl_{cem} = -0.024$

### SV-40 30 mm utenfor riss

$$V_{kscn} := 35.6 \text{ mL}$$

$$m_{pr\ddot{o}ve} := 4.95 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (3.56 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (4.4 \cdot 10^{-5}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = 0.002 \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{pr\ddot{o}ve}} = 3.151 \cdot 10^{-4}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{sv40}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt =  $Cl_{cem} = 0.177$

### SV-40 40 mm utenfor riss

$$V_{kscn} := 36.0 \text{ mL}$$

$$m_{pr\ddot{o}ve} := 4.96 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (3.6 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (4 \cdot 10^{-5}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = 0.001 \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{pr\ddot{o}ve}} = 2.859 \cdot 10^{-4}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{sv40}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt =  $Cl_{cem} = 0.16$

### SV-40 50 mm utenfor riss

$$V_{kscn} := 35.5 \text{ mL}$$

$$m_{pr\ddot{o}ve} := 4.94 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (3.55 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (4.5 \cdot 10^{-5}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = 0.002 \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{pr\ddot{o}ve}} = 3.229 \cdot 10^{-4}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{sv40}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt =  $Cl_{cem} = 0.181$

### SV-40 10 mm i riss

$$V_{kscn} := 24.8 \text{ mL}$$

$$m_{prøve} := 4.84 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (2.48 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (1.52 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = 0.005 \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{prøve}} = 0.001$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{sv40}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt =  $Cl_{cem} = 0.624$

### SV-40 20 mm i riss

$$V_{kscn} := 33.7 \text{ mL}$$

$$m_{prøve} := 4.89 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (3.37 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (6.3 \cdot 10^{-5}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = 0.002 \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{prøve}} = 4.567 \cdot 10^{-4}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{sv40}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt =  $Cl_{cem} = 0.256$



### SV-40 30 mm i riss

$$V_{kscn} := 34.6 \text{ mL}$$

$$m_{prøve} := 4.79 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (3.46 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (5.4 \cdot 10^{-5}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = 0.002 \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{prøve}} = 3.996 \cdot 10^{-4}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{sv40}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt =  $Cl_{cem} = 0.224$

### SV-40 40 mm i riss

$$V_{kscn} := 35.2 \text{ mL}$$

$$m_{prøve} := 4.92 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (3.52 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (4.8 \cdot 10^{-5}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = 0.002 \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{prøve}} = 3.459 \cdot 10^{-4}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{sv40}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt =  $Cl_{cem} = 0.194$

## SV-40 50 mm i riss

$$V_{kscn} := 35.7 \text{ mL}$$

$$m_{prøve} := 4.88 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (3.57 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (4.3 \cdot 10^{-5}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = 0.002 \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{prøve}} = 3.124 \cdot 10^{-4}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{sv40}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt:

=

$$Cl_{cem} = 0.175$$

## Kloridinnhold i UHPC:

Betongdensitet:  $\rho_{uhpc} := 2355 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Sementvekt:  $m_{cem} := 767 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$$n_{ag} := 0.1 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \cdot 0.004 \text{ L} = (4 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$C_{kscn} := 0.01 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

$$M_{m_{cl}} := 35.45 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

### UHPC 10 mm utenfor riss

$$V_{kscn} := 35.1 \text{ mL}$$

$$m_{pr\ddot{o}ve} := 4.67 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (3.51 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (4.9 \cdot 10^{-5}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = 0.002 \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{pr\ddot{o}ve}} = 3.72 \cdot 10^{-4}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{uhpc}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt =  $Cl_{cem} = 0.114$

### UHPC 20 mm utenfor riss

$$V_{kscn} := 36.9 \text{ mL}$$

$$m_{pr\ddot{o}ve} := 5.02 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (3.69 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (3.1 \cdot 10^{-5}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = 0.001 \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{pr\ddot{o}ve}} = 2.189 \cdot 10^{-4}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{uhpc}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt =  $Cl_{cem} = 0.067$

### UHPC 30 mm utenfor riss

$$V_{kscn} := 37.5 \text{ mL}$$

$$m_{prøve} := 4.96 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (3.75 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (2.5 \cdot 10^{-5}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = (8.863 \cdot 10^{-4}) \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{prøve}} = 1.787 \cdot 10^{-4}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{uhpc}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt =  $Cl_{cem} = 0.055$

### UHPC 40 mm utenfor riss

$$V_{kscn} := 36.6 \text{ mL}$$

$$m_{prøve} := 4.99 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (3.66 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (3.4 \cdot 10^{-5}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = 0.001 \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{prøve}} = 2.415 \cdot 10^{-4}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{uhpc}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt =  $Cl_{cem} = 0.074$

### UHPC 50 mm utenfor riss

$$V_{kscn} := 35.0 \text{ mL}$$

$$m_{prøve} := 4.93 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (3.5 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (5 \cdot 10^{-5}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = 0.002 \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{prøve}} = 3.595 \cdot 10^{-4}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{uhpc}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt =  $Cl_{cem} = 0.11$

### UHPC 10 mm i riss

$$V_{kscn} := 30.3 \text{ mL}$$

$$m_{prøve} := 4.92 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (3.03 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (9.7 \cdot 10^{-5}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = 0.003 \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{prøve}} = 6.989 \cdot 10^{-4}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{uhpc}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt =  $Cl_{cem} = 0.215$

### UHPC 20 mm i riss

$$V_{kscn} := 29.2 \text{ mL}$$

$$m_{pr\ddot{o}ve} := 4.53 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (2.92 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (1.08 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = 0.004 \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{pr\ddot{o}ve}} = 8.452 \cdot 10^{-4}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{uhpc}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt =  $Cl_{cem} = 0.259$

### UHPC 30 mm i riss

$$V_{kscn} := 33.0 \text{ mL}$$

$$m_{pr\ddot{o}ve} := 4.9 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (3.3 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (7 \cdot 10^{-5}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = 0.002 \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{pr\ddot{o}ve}} = 5.064 \cdot 10^{-4}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{uhpc}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt =  $Cl_{cem} = 0.155$

### UHPC 40 mm i riss

$$V_{kscn} := 34.3 \text{ mL}$$

$$m_{pr\ddot{o}ve} := 4.84 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (3.43 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (5.7 \cdot 10^{-5}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = 0.002 \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{pr\ddot{o}ve}} = 4.175 \cdot 10^{-4}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{uhpc}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt =  $Cl_{cem} = 0.128$

### UHPC 50 mm i riss

$$V_{kscn} := 34.7 \text{ mL}$$

$$m_{pr\ddot{o}ve} := 4.82 \text{ g}$$

$$n_{kscn} := C_{kscn} \cdot V_{kscn} = (3.47 \cdot 10^{-4}) \text{ mol}$$

$$n_{cl} := n_{ag} - n_{kscn} = (5.3 \cdot 10^{-5}) \text{ mol}$$

$$m_{cl} := M_{m_{cl}} \cdot n_{cl} = 0.002 \text{ g}$$

$$Cl_{con} := \frac{m_{cl}}{m_{pr\ddot{o}ve}} = 3.898 \cdot 10^{-4}$$

$$Cl_{cem} := Cl_{con} \cdot \frac{\rho_{uhpc}}{m_{cem}} \cdot 100$$

Prosent kloridinnhold av sementvekt =  $Cl_{cem} = 0.12$

## Vedlegg 15: Møtereferrat

### **MØTEREFERAT 14.01.20**

Vi startet med å diskutere mulighetene rundt temaet vårt. Hvordan vi kunne angripe oppgaven, og hvordan vi kunne vinkle den.

Vi gikk også gjennom eventuelle samarbeidspartnere som Unicon, Ribe og HI. Der skal veileder, Rein Terje Thorstensen, sette oss i kontakt. UHPC fra Unicon, standard betong fra Ribe og se om vi får satt ut et hummerrev utenfor reservatet til HI. Veileder skal kontakte HI om et samarbeid.

Det ble også snakket om metoden som kan brukes for å måle korrosjon i armeringen. Linear polarisation resistance method (LPR).

Delta i Betongindustridagene 29.-31. januar. Foredrag om UHPC.

Veiledning fremover blir annenhver mandag partallsuker.

Kan få data fra UHPC-tester fra en Bachelorgruppe fra UiA.

Stor interesse for dette prosjektet i Norge, kan være mulighet for presentasjon dersom god oppgave.

Må diskutere hvordan testobjektet skal formes og settes sammen. Kraft som er nødvendig. Størrelse på riss.

Frem til mandag skal vi ha grovt utkast av dimensjonene og antall testbjelker.

Forslo dato til støping av UHPC 5. februar. Veileder skal kontakte Unicon.

Interessante personer:

Hugh

### **MØTEREFERAT 20.01.20**

Vi diskuterte hvordan vi kunne designe forskalingen med tanke på armering og størrelse. Gikk på lab for å se hva som var av materialer til forskaling, dimensjoner. 750x15x1500

Avklarte at vi må ha ferdig plan for mengde betong før vi sender mail til Unicon og Ribe.

Fikk se bjelkene, fire stk. To hos Hugh, to i basseng.

Snakket med Cecilie angående trepunkts bøyetest for bjelkene for å få en pekepinn på strekkfastheten til UHPC. Skal kontakte henne for å bestille tid til test. Må ha klart spennvidde og pålastningshastighet.

Gikk gjennom beregninger som ble gjort på fredag. Kan være fornuftig. Diskuterte ulike måter å måle kraften på boltene. Veileder skal ta med momentnøkkel til å måle moment på boltene.

Veileder skal også sende NB38, "standard" for fiberbetong.



### **MØTEREFERAT 27.01**

Presenterte dimensjonsberegningene vi hadde kalkulert. Ble enig om å ta utgangspunkt i overdekning og øke tversnittet på bjelken for å kunne overholde standard. Måtte dermed regne på nytt.

Diskuterte kulan i midten, litt liten. Hente større på maskinlaben.

Vi må regne på ca påført last. Må også regne på moment som kreves.

Fikk momentnøkkel og liten gjennomgang.

Oppdaget at det kan bli problematisk å feste bjelkene med momentnøkkel, da pipenøkkelen ikke kommer til pga. jernstang.

Forberedte til strekktest med Cecilie. Delte bjelken i 5 deler med lengde 280 mm. Markerte hvor opplagrene skulle være med spennvidde på 240mm.

Sendte mail til Unicon, Berit. Vi ble lagt på kopi

Ringte Jørn, og bestille rissmåler

Skal kontakte Ribe Betong, må minne han på mandag

### **MØTEREFERAT 17.02.20**

Første halvtimen av møtet var sammen med BSc for å diskutere tur til Unicon. Der ble det avtalt transport bort til Larvik, og hvilke utstyr vi trengte.

Deretter hadde vi en privat veiledning. Startet med å gå gjennom fremdriftsplanen for å sette opp tidspunkt for utsetting av testobjekter. Vi har sett bort i fra muligheten til å legge de ut hos HI. Grunnen er at det blir for tidkrevende å se på hummerrev i tillegg. Bjelkene skal derfor settes ut ved privat brygge hos veileder.

Videre kom vi frem til at det må planlegges hvordan testobjektene skal forankres i eksponeringsområdet. Tenke ut en løsning med tau og bøye.

Må kontakte Ribe Betong for å avtale når det passer at vi kommer å støper. Dersom det ble på Mjåvann kunne vi låne bil.

Til slutt ble det diskutert litt oppsett av rapport. Hvor fremgangsmåten ved forsøket skal plasseres, og hva som skal være med i case-kapittelet.

### **MØTEREFERAT 02.03.20**

Første møte med Peter Hugh Middleton og veileder.

Viste frem de ferdigstøpte UHPC-bjelkene og den lille konstruksjonen fra i fjor som allerede var sprukket opp. Den foreløpige planen er som følger:

De fire "små" UHPC-bjelkene fra i fjor:

- To stk i konstruksjonen er sprukket opp og levert tilbake til Hugh. Den ene ønsker han å måle rissdybde med phenolphtalein. Den andre ønsker han å måle Cl-konsentrasjonen i.
- En bjelke, som er testet hos Cecilie, leveres til Hugh om den er å finne igjen
- En bjelke, som ligger i herdekaret på lab, ønsker han å kutte opp tverrsnittet for å se fuktighetsnivået.

Det vil bli 14 UHPC-konstruksjoner ettersom to enkle bjelker vil fungere som referanse til de oppsprukne konstruksjonene. Det vil være to standard betongkonstruksjoner ettersom to enkle bjelker vil fungere som referanse.

Betongmotstanden i en UHPC-konstruksjon med overdekning på 50, 40 og 30 skal testes før oppsprekking før alle konstruksjonene skal testes etter skvalpesonen og sjøbunnen.

Endene på bjelkene skal dekkes med bivoks for å holde armeringsjernene beskyttet i havet.

Hugh er ellers fornøyd med oppsettet og planen som nå er lagt sammen.

Planen er å sette ut bjelkene tirsdag 10.03 og hente de opp med senest mulig dato 01.05.

### **MØTEREFERAT 18.03.20**

Snakket om utsetting fredagen før og fikk se bilder. Testobjektene som skulle nedsenkes på sjøbunnen kantret. Diskuterte kort hvordan de kunne hentes opp igjen. Skal i utgangspunktet gå fint.

Veileder kan bestille lastebil med kran på relativ kort varsel for å transportere de til Campus.

Må holde kontakt med Hugh angående testing og har dialog med han via mail.

Diskuterte situasjonen videre i forbindelse med Koronaviruset. Alle blir hjemme frem til testing.

Skal ikke bli noe problem å få testet selv om Campus er stengt.

### **MØTEREFERAT 01.04.20**

Anette var med i starten av møtet for å avklare hvordan forprosjektet kan brukes i masteroppgaven i forhold til teori og kildehenvisning.

Veileder skal prøve å skaffe NB35 og ettersende betongresept og blanding fra Øystein "straks". Får både betongresept og blandelogg.

- Resept er planlagt blandeforhold
- Loggen er det som kom ut (automatisk anlegg, det måles opp, så ikke 100%, kan bli avvik)

Blir ikke gjennomlesing av rapportutkast. Kan sende inn oppsett/spørsmål om ønskelig.

Ikke nødvendig å skaffe en kompressor til strømforsyning som Hugh mente vi måtte ha dersom teste ute. Kan bruke utvendige stikkontakter.

Før det bestilles transport må vi få stropper rundt konstruksjonene på havbunnen. Skal gå fint å gjøre i løpet av en dag. Sannsynligvis første uken i mai (etter hva vi ønsker og passer med testing for Hugh).

Interessant å måle kloridinnhold i bjelkene, kanskje mulig. Veileder lurer på om det kan være mulig å ta ut utstyret fra lab. Veileder sender mail til Tore (kjemiker på skolen) om han kan gi oss en introduksjon slik at vi kan lese oss opp på internett.

Kloridinnhold-test:

- Borer først hull på 2mm inn i bjelken på overflaten og tar vare på det støvet (i en liten pose). Så borer man 2mm til, og tar vare på det støvet. Og slik fortsetter man inn til man tror det ikke har noen funksjon lengre. Viktig å merke posen NØYE.
- Deretter løses så dette pulveret (borestøvet) opp. Det inneholder både betongstøv og salt. Så benyttes en kjemisk metode, som vil løse ut saltet ved bruk av en syre. Løser ut saltet slik at det kommer i veskefasen.
- Deretter brukes en teknikk som heter titrering. Det tilsettes kjemikalier som feller ut saltet. (veldig forenklet forklart).
- Har en slik halvautomatisk titreringsrigg på skolen. Trenger da noen syrer og kjemikatorer, veileder tror det er tre løsninger som kreves. Disse er tilgjengelig på skolen. Veileder mener at man bare trenger å trykke på en knapp etter å ha forsynt apparatet med kjemikalier, så får man ut kloridkonsentrasjonen.
- Kan gjøres manuelt, men da må man ha kontroll på hvor mye man drypper.

Eventuelt prøve å brette opp bjelken i risset og få ut prøver fra risset, samt et annet sted på betongen for å sammenligne. Måle kloridinntrengingen.

Neste veiledning tirsdag etter påske. Avtal tidspunkt nærmere.

### **MØTEREFERAT 21.04.20**

Instituttet har søkt om tillatelse for noen avgangsstudenter til å få tilgang på lab. Fortsatt under vurdering. I såfall fra 27.04. Veileder skal purre og høre når eventuelt

Diskuterte å få hentet opp bjelkene tirsdag 5. mai. Veileder bestiller transport til ettermiddagen.

Måle rissene etter opphenting for å kontrollere om de har blitt større under belastningen.

Tore var interessert i å hjelpe med kloridtest. Må forhøre en gang til når vi vet om skolen åpner for oss.

De nederste bjelkene i skvalesone blir fullstendig tildekket i flo. Viktigste å få tilkomst av oksygen og sjøvann vekslende

Veileder har vist bildene til forskningsprosjektet. Stor interesse. Kan legge tilbake de bjelkene som ikke ble risset under fôrøprisset.

Send mail til Hugh om testing onsdagen 6. mai.

Spurt om å få tilgang til NB publikasjonen. Skal skaffe den uansett.

Vær nøye med å oppgi kilden hvor bildet kommer fra. Kan sende tittel på dokumentet så kan veileder be om tilgang til artikkelen.

Diskuterte forskjell på v/c og v/b. V/b er mengden sement + bindemiddeltilskudd og eventuelt gange sin virkningsfaktor. Rube resepten sier v/b. Skriv formelen og skriv k faktor. Dette er i henhold til leverandørens spesifisering  $v/(c+ks) = v/b$

Ingen krav til antall litteraturstudie. Forskyv så mye til resultat og diskusjon. Funn av litteraturstudie i resultat. Alt i diskusjon må ligge i resultatkapittelet.

Må nevne hvem og hva og resultat fra studiene

- i diskusjon skal man trekke tråder mellom tidligere litteratur og vårt studie
  - o i tråd med...
  - o i motsetning til...
  - o sammenlignet med...

### **MØTEREFERAT 11.05.20**

Planlagte å møte på Østerhus tirsdag 12.05 kl. 11 for å fortsette knekking av den ene UHPC-bjelken og å få ut noe mer betongstøv til kloridtesting.

Veileder bringer utstyr til kloridtesting, torsdag 14.05, og sender mail til Tore ang. hvilke kjemikalier som trengs til titreringstesting.

Diskuterte plassering av fremgangsmåte i masteroppgaven og beskrivelse av strategi for litteraturstudier.

### **MØTEREFERAT 28.05.20**

Snakket med veileder om status på oppgaven og hva som er av resultater.

Videre ble det diskutert bruk av kildereferering til egne bilder og at Kildekompasset gir gode henvisninger. Sannsynligvis kan det brukes "privat foto", med eller uten parentes, i bildeteksten.

I forhold til resultatkapittelet ble det snakket om at det kan være veldig kort og at det skal gi en fin oversikt over forsøkets resultater. Behandlede resultater skal derimot inn i diskusjonskapittelet.

Noen tips til selve oppgaven er å være nøye med å inkludere feilkildene og bruke tid på "anbefaling til videre arbeid" som er et viktig kapittel i denne oppgaven, da det skal brukes til ny forskning senere. Ellers vil det være lurt å få hjelp til å se over det språklige av venner og familie.

Vedlegg 16: Fremdriftsplan [vedlagt i ZIP-fil]

Vedlegg 17: A3-poster [vedlagt i ZIP-fil]