

# Selvreparasjon og påvirkningen av riss på armeringens tilstand i opprisset betong

Undersøkelser av bjelker eksponert i marint miljø i 25 år

**Solveig Larsen Myklebust**  
**Ragnhild Moastuen**

Master i Bygg- og miljøteknikk  
Innlevert: juni 2018  
Hovedveileder: Mette Rica Geiker, KT  
Medveileder: Tobias Alexander Danner, KT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for konstruksjonsteknikk





## MASTEROPPGAVE 2018

FAGOMRÅDE: Betongteknologi	DATO: 08.06.18	ANTALL SIDER: 118 + 66
-------------------------------	-------------------	---------------------------

TITTEL:

**Selvreparasjon og påvirkningen av riss på armeringens tilstand i opprisset betong**

Self-healing and the Impact of Cracks on the Reinforcement in Cracked Concrete

UTFØRT AV:

Solveig Larsen Myklebust

Ragnhild Moastuen



SAMMENDRAG:

I dette prosjektet er det studert langtidsdata for tre bjelker som har stått eksponert marint i tidevannssonen i 25 år. Bjelkene har ulike betongresepter med ulikt innhold av bindemidler, henholdsvis 4,2 % silikastøv, 3,5 % silikastøv og 20 % flyveaske, samt 12,5 % silikastøv. Det er tatt ut åtte kjerner per bjelke; tre med riss, tre uten riss, samt to kjerner over riss med armering. Påvirkningen av miljø og bindertype på selvreparasjon av riss, samt påvirkningen av riss på armeringens tilstand ble undersøkt.

For å studere selvreparasjon av riss ble det foretatt visuell inspeksjon og analyser med  $\mu$ -XRF. Resultatene indikerer at miljøeksponering påvirker hvilke mekanismer som står bak selvreparasjon av riss. I atmosfære/skvalpesonen skyldes selvreparasjon utfelling av kalsium- og magnesium rike faser fra sjøvann. I tidevannssonen skyldes også selvreparasjon utfelling av kalsium- og magnesium rike faser fra sjøvann, i tillegg er det tegn på videre hydratiseringsprodukter. For nedsenket sone er det videre hydratisering samt andre uidentifiserte kalsium rike faser. Det var ingen tegn på at bindertype påvirker hvilken selvreparasjons-mekanisme som er til stede. Ut fra undersøkelsene i denne rapporten kan det ikke angis noe konkret rundt hvordan miljø og bindertype påvirker grad av selvreparasjon.

Armeringens tilstand ble vurdert ut fra kloridinntrengning og målinger av rissvidde, elektrokjemisk potensial og resistivitet. Resultatene viste ingen effekt av riss på armeringens tilstand. Ingen korrosjon ble oppdaget på armeringen fra kjerner som ble tatt over riss i tidevannssonen. Generelt forventes det ikke korrosjon for noen av bjelkene. EKP-målinger og visuelle undersøkelser indikerte derimot lokal korrosjon ved enkelte armeringsstoler.

FAGLÆRER: Mette Rica Geiker

VEILEDER(E): Mette Rica Geiker og Tobias Alexander Danner

UTFØRT VED: Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU





## SAMMENDRAG

I dette prosjektet er det undersøkt langtidsdata for tre bjelker som har stått eksponert marint i tidevannssonen i 25 år. Bjelkene har ulike betongresepter med ulikt innhold av bindemidler, henholdsvis 4,2 % silikastøv, 3,5 % silikastøv og 20 % flyveaske, samt 12,5 % silikastøv. Det er tatt ut åtte kjerner per bjelke; tre med riss, tre uten riss, samt to kjerner over riss med armering. Formålet med dette prosjektet har vært todelt. En av hensiktene var å undersøke hvordan miljø og bindertype påvirker selvreparasjons-mekanismen og graden av selvreparasjon. Den andre var å studere hvordan riss påvirker armeringens tilstand.

For å studere selvreparasjon av riss ble det foretatt visuell inspeksjon og analyser med  $\mu$ -XRF. Splittede kjerner over riss fra hver av eksponeringssonene; atmosfære/skvalpesone, tidevannssone og nedsenket sone, ble analysert med  $\mu$ -XRF. Resultatene indikerer at miljøeksponering påvirker hvilke mekanismer som står bak selvreparasjon av riss. I atmosfære/skvalpesonen skyldes selvreparasjon av rissene utfelling av kalsium- og magnesium rike faser fra sjøvann. I tidevannssonen skyldes også selvreparasjon utfelling av kalsium- og magnesium rike faser fra sjøvann, i tillegg er det tegn på videre hydratiseringsprodukter. For nedsenket sone er det videre hydratisering samt andre uidentifiserte kalsium rike faser. Det var ingen tegn på at bindertype påvirker hvilken selvreparasjons-mekanisme som er til stede. Ut fra undersøkelsene i denne rapporten kan det ikke angis noe konkret rundt hvordan miljø og bindertype påvirker grad av selvreparasjon.

Armeringens tilstand ble vurdert ut fra kloridinntrengning og målinger av rissvidde, elektrokjemisk potensial og resistivitet. Resultatene viste ingen effekt av riss på armeringens tilstand. Ingen korrosjon ble oppdaget på armeringen fra kjerner som ble tatt over riss i tidevannssonen. Generelt forventes det ikke korrosjon for noen av bjelkene. Målinger av elektrokjemisk potensial og visuelle undersøkelser indikerte derimot lokal korrosjon ved enkelte armeringsstoler.



## ABSTRACT

In this project, long-term data from three concrete beams exposed in a marine environment in the tidal zone for 25 years has been investigated. The beams have different binder compositions; 4,2% silica fume, 3,5% silica fume and 20% fly ash, and 12,5% silica fume, respectively. Eight cores were extracted from each beam. Of these cores three had cracks and three were whole. In addition, two cracked cores over the reinforcement were extracted from the tidal zone on each beam. The purpose of this project was twofold. One of the objectives was to study the impact of exposure and binder type on the self-healing mechanism, and on the extent of self-healing. The other objective was to study the impact of cracks on reinforcement corrosion.

To study self-healing of cracks, cores were investigated visually and analysed with  $\mu$ -XRF. Split cores from each exposure zone were analysed; atmospheric/splash zone, tidal zone and submerged zone. The results showed that the exposure conditions affect the type of mechanism responsible for self-healing of cracks. In the atmospheric/splash zone the precipitated self-healing material consists of calcium- and magnesium rich phases from sea water. In the tidal zone the precipitated material also consists of calcium-and magnesium rich phases, in addition to continued hydration. In the submerged zone the mechanism is continued hydration in addition to other unidentified calcium rich phases. There were no signs that type of binder had an impact on the self-healing mechanism present. Based on the investigations in this project, the impact of exposure conditions and binder type on the extent of self-healing cannot be stated.

The state of the reinforcement was examined on behalf of chloride ingress in addition to measurements of crack width, electrochemical potential and resistivity. The results showed no impact of cracks on the reinforcement. On the extracted cracked cores from the tidal zone, no corrosion on the reinforcement was detected. In general, no corrosion is expected for the beams. On the other hand, electrochemical potential measurements and visual inspection indicated local corrosion located by some of the spacers.



## FORORD

Denne masteroppgaven er utarbeidet ved Institutt for konstruksjonsteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, og er skrevet innen hovedprofilen betongteknologi. Arbeidet er utført fra januar til juni 2018. Arbeidet som ligger til grunn i oppgaven baserer seg på bjelker fra prosjektet “Ferjefri E39 - WP 7.1.1 Betydning av krav til rissvidder og trykkavlastning for bestandighet av armerte betongkonstruksjoner”. Vi føler oss veldig heldige som har fått lov til å bruke materiale fra dette prosjektet, og har hatt et stort læringsutbytte.

Det er flere parter og personer som har bidratt til oppgaven vår, og fortjener å nevnes i dette forordet. Først og fremst ønsker vi å takke våre veiledere Mette Rica Geiker og Tobias Alexander Danner og for svært god veiledning og oppfølging gjennom hele semesteret. De har vært svært hjelpelige og bidratt med stor faglig kompetanse. Tobias har utført alle  $\mu$ -XRF analyser, samt at han har bidratt på alle undersøkelser i laboratoriet.

Statens vegvesen anerkjennes for at ha gitt oss tillatelse til å benytte bjelker fra deres feltstasjon i Sandnessjøen, og utføre målinger og inspeksjoner på disse. Karla Hornbostel og Eva Rodum v/ Statens vegvesen hjalp til med rengjøring og spyling av bjelker, samt at de bistod på de innledende undersøkelsene i laboratoriet.

Avslutningsvis ønsker vi å takke Sintef som har stått for utboring og splittelse av kjerner, samt utarbeidelse av kloridanalyser. Vi vil også takke Andres Belda Revert for å ha bistått oss med faglig diskusjon rundt tolking av resultater. Ingeniør Steinar Seehus har vært til svært god hjelp i NTNUs laboratorium, og takket være Steinar gikk fremdriften etter planen.

Trondheim 08.06.18



---

Ragnhild Moastuen



Solveig Larsen Myklebust



# Innholdsfortegnelse

SAMMENDRAG .....	i
ABSTRACT .....	iii
FORORD.....	v
Symboler og forkortelser.....	ix
1. Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Formål .....	2
1.3 Avgrensninger .....	2
1.4 Disposisjon .....	3
2. Teori .....	5
2.1 Selvreparasjon av riss .....	5
2.2 Korrosjonsmekanismer .....	25
2.3 Overdekning .....	29
2.4 Elektrokjemisk potensial (EKP) .....	29
2.5 Resistivitet .....	32
2.6 Micro X-Ray Fluorescence ( $\mu$ -XRF) .....	35
3. Eksperimentelle undersøkelser .....	37
3.1 Materialer .....	37
3.2 Metode.....	44
4. Resultater.....	59
4.1 Visuell inspeksjon og kartlegging av riss på bjelker .....	59
4.2 Overdekning .....	63
4.3 EKP .....	65
4.4 Resistivitet .....	67
4.5 Karbonatisering og kloridinntrenging .....	69
4.6 Visuell inspeksjon og måling av riss på kjerner etter utboring .....	69
4.7 Kloridfordeling.....	74
4.8 Kloridprofiler.....	76
4.9 Inspeksjon av armering.....	78
4.10 Selvreparasjon av riss.....	79
5. Diskusjon.....	89
5.1 Påvirkning av miljø og bindertype på selvreparasjon av riss .....	89
5.2 Påvirkning av riss med hensyn på armeringens tilstand.....	102
6. Konklusjon .....	111
7. Forslag til videre arbeid.....	113

8. Referanser.....	115
Vedlegg .....	119
Vedlegg A – Tegninger av bjelker fra feltstasjonen.....	120
Vedlegg B – Betongresepter.....	121
Vedlegg C – Kjemisk sammensetning av sementene.....	122
Vedlegg D – Tidligere undersøkelser fra feltstasjon.....	123
Vedlegg E – Overflatebilder fra visuell inspeksjon .....	126
Vedlegg F – Detaljerte resistivitetmålinger .....	132
Vedlegg G – Bestemmelse av resistivitet på utborede kjerner.....	135
Vedlegg H – Detaljerte overdekningsmålinger .....	139
Vedlegg I – Detaljerte EKP-målinger .....	141
Vedlegg J – Kloridanalyser .....	162
Vedlegg K – Inspeksjon av armering .....	166
Vedlegg L - Inspeksjon av rengjort armering.....	182



## Symboler og forkortelser

BFS	Granulert råjernslag
C-S-H	Kalsiumsilikathydrat
CaCO <sub>3</sub>	Kalsiumkarbonat
Ca(OH) <sub>2</sub>	Kalsiumhydroksid
CO <sub>2</sub>	Karbondioksid
EKP	Elektrokjemisk potensial
FA	Flyveaske
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
mbar	Millibar
Mg(OH) <sub>2</sub>	Magnesiumhydroksid
PC	Portland Sement
SF	Silikastøv
v / c	Vann / sement forhold
v / b	Vann / binder forhold
μ- XRF	Mikro røntgen fluorescens
μA	Mikroampere



# 1. Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Bestandighet er et stort problem for mange betongkonstruksjoner. Flere konstruksjoner får levetiden kortet ned ved at nedbrytende stoffer, deriblant klorider, trenger inn i betongen. Dette kan føre til initiering av armeringskorrosjon. Når slikt skjer er ofte løsningen mekaniske eller elektrokjemiske reparasjoner. Disse reparasjonene kan forlenge levetiden for den aktuelle betongkonstruksjonen, men er ofte svært kostbare (Huang *et al.*, 2016).

Riss blir sett på som en iboende del av armert betong, og ansees som uunngåelig (de Rooij *et al.*, 2013). Riss oppstår både under herding og i betongkonstruksjonens levetid. Det er konsensus i litteraturen om at riss fremmer inntrengning av CO<sub>2</sub> og kloridioner for korttids observasjoner, og dermed fremmer initiering av armeringskorrosjon (Hornbostel og Geiker, 2017). Det er derimot mangelfulle data rundt langtidsvirkningen av riss på videre armeringskorrosjon.

Selvreparasjon er beskrevet som betongens evne til å reparere seg selv, og kan sees i sammenheng med spørsmålet rundt alvorlighetsgraden til riss over tid. Ved selvreparasjon av riss kan ulike mekanismer føre til at risset forsegles helt eller delvis. Forsegling av riss kan hindre inntrengning av aggressive ioner, og kan bety at riss ikke nødvendigvis fører til videre armeringskorrosjon i et langtidsperspektiv (Huang *et al.*, 2016). Fenomenet er enda ikke fullstendig forstått, da det er mangel på langtidsdata rundt selvreparasjon og påvirkende faktorer (Danner og Geiker, 2017).

I dette prosjektet skal det samles langtidsdata for bjelker som har vært eksponert i tidevannssonen i marint miljø i 25 år. Fokuset vil være å se på selvreparasjon av riss, samt at påvirkningen av riss på armeringens tilstand skal undersøkes.

## 1.2 Formål

Formålet med dette prosjektet er å benytte langtidssdata fra bjelkene til å undersøke:

- A. Påvirkning av miljø og bindertype på selvreparasjon av riss.
- B. Påvirkningen av riss med hensyn på armeringens tilstand.

## 1.3 Avgrensninger

De faktiske eksponeringsforholdene og betongsammensetningene for bjelkene som skal undersøkes setter avgrensninger for dette prosjektet. Påvirkning av miljø begrenses til å se på de ulike eksponeringssonene som følger av bjelkenes plassering i tidevannssonen, henholdsvis atmosfære/skvalpesone, tidevannssone og nedsenket sone. Påvirkning av bindertype begrenses til gitt mengde FA og SF, som benyttes i de aktuelle reseptene for bjelkene.

Selvreparasjon av riss begrenses til å studere hvordan miljø og bindertype påvirker mekanismene bak selvreparasjon, samt om dette påvirker maks rissvidde som er fullstendig reparert. Det skal utføres visuell inspeksjon for å se etter utfelling av riss. Utvalgte kjerner med riss analyseres med  $\mu$ -XRF.  $\mu$ -XRF har begrenset oppløsning og kan kun si noe om kjemien i utfellingen, men ikke mineralogien. Den kjemiske sammensetningen skal benyttes for å kunne si noe om mulig mekanisme for forsegling av riss. Omfanget rundt selvreparasjon av riss begrenses av både type riss og rissvidde som fra før er produsert på bjelkene. Rissene er av typen bøyeriss som er produsert med rissvidder fra 0,1 - 0,2 mm.

Påvirkningen av riss på armeringens tilstand skal undersøkes ved å betrakte kloridinntrengning og måling av rissvidder, EKP og resistivitet. Ut fra disse målingene skal det anslås om det forventes korrosjon. Det skal i tillegg tas ut kjerner med armering for å undersøke armeringens tilstand. Det vil kun bli gjort for kjerner med armering i tidevannssonen.

## 1.4 Disposisjon

- Kapittel 2: I første del av kapitlet blir det presentert en litteraturstudie som omhandler påvirkende faktorer på selvreparasjon av riss i betong. Oversikt over drøftede eksperimenter fremstilles i en tabell. I resten av kapitlet blir det presentert teori med hensyn på korrosjon og ulike korrosjonsmekanismer. Relevante målemetoder som benyttes senere i oppgaven presenteres.
- Kapittel 3: Dette kapitlet omhandler materialer og metoder. Kapitlet starter med bakgrunnsinformasjon rundt bjelkene som skal undersøkes. Det gis beskrivelse av geometri og materialer for de aktuelle bjelkene, samt eksponeringsforhold. Resten av kapitlet omhandler metodebeskrivelse, og gir blant annet en oversikt over hvilke metoder som skal benyttes til å svare på de to formålene. Planlagte og utførte undersøkelser beskrives med presisering av fremgangsmåte og forhold av betydning for tolkning av resultatene.
- Kapittel 4: Her fremstilles resultater for det meste ved hjelp av enkle skisser og grafer. Korte kommentarer som senere benyttes til å tolke resultatene trekkes frem. Resultatene presenteres i underkapitler som svarer til de ulike undersøkelsene som har blitt utført.
- Kapittel 5: Resultatene diskuteres med hensyn på observasjoner som er relevante for formålet. Observasjonene diskuteres opp mot forventninger som var gjort opp på forhånd.
- Kapittel 6: Konklusjon presenteres for hvert av formålene.
- Kapittel 7: Forslag til videre arbeid legges frem.



## 2. Teori

### 2.1 Selvreparasjon av riss

I denne rapporten skal autogen selvreparasjon tas i betraktning. Autogen selvreparasjon er en naturlig prosess i betongen som fyller eller forsegler riss. Fenomenet vil for enkelthets skyld videre kun omtales som selvreparasjon. Det er observert at selvreparasjon kan oppstå som følge av en rekke ulike prosesser innad i materialet (de Rooij *et al.*, 2013). Fenomenet har vært studert lenge, men på grunn av få langtidsobservasjoner er det ikke enighet rundt hvilke faktorer som påvirker dette og i hvilken grad. Det er i dette kapittelet presentert en litteraturstudie for å gi en oversikt over ulike funn rundt selvreparasjon.

#### 2.1.1 Årsaker til selvreparasjon

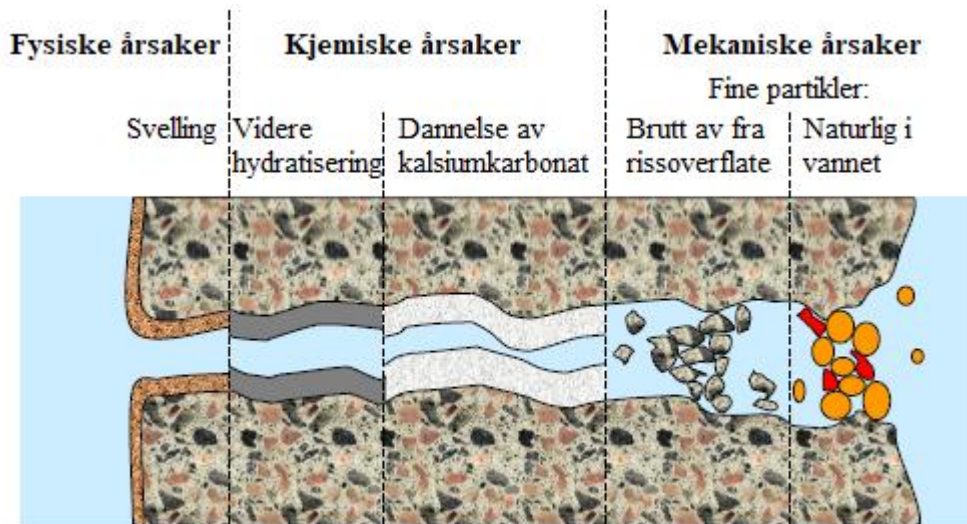
I litteraturen diskuteres det flere årsaker som kan forårsake selvreparasjon av riss. Disse kan deles inn i kjemiske, fysiske og mekaniske årsaker som igjen består av ulike selvreparasjons-mekanismer (de Rooij *et al.*, 2013):

- Fysiske årsaker:
  - Svelling av hydratisert sementpasta
- Kjemiske årsaker:
  - Videre hydratisering av ureagert sement
  - Utfelling av kalsiumkarbonat-krystaller
- Mekaniske årsaker:
  - Blokkering av risset på grunn av urenheter i vannet
  - Blokkering av risset fra betongpartikler som blir brutt av rissoverflaten på grunn av opprissing

Svelling av hydratisert sementpasta kan oppstå når vann absorberes av den hydratiserte sementpastaen. Det har derimot vist seg at effekten av denne fysiske prosessen er marginal. De mekaniske årsakene anses på samme måte å være av mindre viktighet.

De kjemiske prosessene omfatter generelt videre hydratisering og utfelling av kalsiumkarbonat. I herdet betong vil det alltid være igjen noe sement som ikke har reagert på grunn av mangel på vann. Ved tilgang på fukt kan det derfor oppstå videre hydratisering, der de nye reaksjonsproduktene som dannes kan fylle risset og bidra til selvreparasjon.

Utfelling av kalsiumkarbonat-krystaller i risset kan oppstå dersom kalsiumioner ( $\text{Ca}^{2+}$ ) fra porevannet i betongen reagerer med karbonationer ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) fra vannet i risset. Det kan da dannes kalsiumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), også kalt kalsitt, som utfelles i risset. Figur 2.1 illustrerer de nevnte fysiske, kjemiske og mekaniske årsakene. (de Rooij *et al.*, 2013)



Figur 2.1: Ulike årsaker som kan føre til selvreparasjon av riss. Gjengitt etter (de Rooij *et al.*, 2013).

I tillegg til disse kjemiske årsakene til selvreparasjon av riss, beskriver Huang *et al.* (2016) rekrystallisering av kalsiumhydroksid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) som en av hovedmekanismene for PC fullstendig nedsenket i vann. Dette bekreftes i forsøk utført av Jacobsen, Marchand og Hornain (1995) der kalsiumhydroksid ble observert lokalt i riss som hadde blitt reparert. Magnesiumhydroksid (brucitt) er også observert som en av mekanismene bak selvreparasjon av riss (Hearn og Morley (1997); Palin, Jonkers og Wiktor (2016); Maes, Snoeck og De Belie (2016)).

Det er konsensus i litteraturen om at de kjemiske prosessene bak selvreparasjon er av størst betydning. De kjemiske prosessene er som nevnt avhengig av vann, noe som gjør tilgangen på vann i risset til den viktigste faktoren for selvreparasjon (de Rooij *et al.*, 2013). Observasjoner har vist at hvilken mekanisme som har størst kapasitet for selvreparasjon av riss avhenger av betongens alder når opprissingen skjer. de Rooij *et al.* (2013) nevner at på grunn av det relativt høye innholdet av uhydratiserte sementpartikler er videre hydratisering hovedmekanismen for selvreparasjon av riss i ung betong. Dette samsvarer med Neville (2002), men strider imot det Palin, Jonkers og Wiktor (2016) observerte om at videre hydratisering ikke er hovedmekanismen i ung betong. Ung betong i denne sammenhengen vil si 56 dager. Videre hevder Neville (2002) at for riss i eldre betong er hovedmekanismen



utfelling av kalsiumkarbonat. Det tyder på at dette ikke er basert på eksperimentelle undersøkelser, men antagelser gjort av forfatteren selv ut i fra annen litteratur.

I tillegg til alderen til betongen, vil miljøeksponering ha noe å si for hvilken selvreparasjonsmekanisme som er fremtredende i betongen. Maes, Snoeck og De Belie (2016) hevder at tiden det tar fra et riss oppstår til det repareres tydelig avhenger av miljøpåvirkningene. For betong eksponert for tidevannsendringer vil riss repareres relativt raskt, mens for betong som er permanent nedsenket vil riss repareres langsommere. Dette blir forklart med at riss som er utsatt for væting/tørke sykluser oftere kommer i kontakt med CO<sub>2</sub> fra lufta som løser seg opp i vannet i risset, som deretter reagerer med Ca<sup>2+</sup> fra de sementholdige materialene og danner kalsiumkarbonat. Når uhydratiserte sementpartikler kommer i kontakt med vann/fukt fra miljøet induseres videre hydratisering som i hovedsak oppstår ved permanent nedsenking. Pågående hydratisering fører som nevnt også til reparasjon av riss, men prosessen er langsommere sammenlignet med utfelling av kalsiumkarbonat. Maes, Snoeck og De Belie (2016) oppsummerer med at hovedmekanismen for selvreparasjon ved permanent nedsenking er videre hydratisering, mens kalsiumkarbonat er hovedmekanismen ved væting/tørke sykluser. Det påpekes at i tilfeller med eksponering for væting/tørke sykluser vil faktisk begge mekanismene bidra til reparasjonsprosessen.

Selvreparasjons-fenomenet er som nevnt blitt undersøkt av flere forfattere. Alle forsøkene som er omdiskutert i denne rapporten består av ulike parametere. De ulike forsøkene er fremstilt i Tabell 2.1 og Tabell 2.2, der de to tabellene tar for seg forsøk utført av ulike forfattere. Dette er gjort for at leser underveis i rapporten kan gå tilbake til hit for å lettere kunne se hvilke parametere som varierer i forsøkene.

Tabell 2.1: Oversikt over forsøk som omhandler selvreparasjon av riss. Tabellen inneholder informasjon rundt materiale, prøvestykke, herding, riss, eksponering og utførte målinger for de ulike forsøkene. Informasjon om forsøkene strekker seg over to tabeller, slik at tabellen bør leses sammen med tabellen som fortsetter på neste side. (-) indikerer at informasjon ikke er tilgjengelig

Referanse	Materiale						Prøvestykke		
	Testmateriale	v/b	Binder				Alder <sup>1</sup>	Overdekning	Dimensjon [mm]
			PC	BFS	SF	FA			
Edvardsen, 1999	Betong	-	x	x			-	Ingen arm.	200x200x(200,300 og 400)
Termkhajorknit et al., 2009	Sementpasta	0,48, 0,49, 0,53	x			15,25, 50 %	28-365 dager	-	Sylinder h =200, d=100
Hearn og Morley, 1997	Betong	0,9	x		x		26 år	-	Sylinder h= 200 d= 100
Jacobsen, Marchand og Hornain, 1995	Betong	0,4	x			5 %	10 uker	-	Terning 100x100x100
Palin, Jonkers og Wiktor, 2016	Mørtel	0,5		x			28 dager	-	Sylinder h= 60 d= 33,5
Ramm og Bis coping, 1998	Betong	0,55	x			x	-	Ø 16 (antall: 1-6)	700x180x180 600x300x300 600x300x600
WuMan og HengJing, 2012	Betong	0,35	x	20,30, 40 %		5, 10%	28 dager	Ingen arm.	Sylinder h= 300 d=95

Tabell 2.1: Fortsettelse

Referanse	Herding		Riss			Eksponering		Målinger	
	Varighet	Type	Alder <sup>2</sup>	Opprinnelse	Rissvidde v/ overflate [mm]	Orientering <sup>3</sup>	Varighet		Miljø
Edvardsen, 1999	-	-	-	Strekk	0,10, 0,20, 0,30	Horisontal	5-20 uker	Vann med ulik hardhet	VP, SEM, XRD, OM
Termkhajorknit et al., 2009	-	Forseglet	-	Svinn	Ukjent, mikroriss	Ukjent (innvendig riss)	-	Tørket v/ 105 °C	TF, P, KDK, HR, HP, XRD
Hearn og Morley, 1997	26 år	Vann	-	Tørking	Ukjent	Ukjent	-	Nedsenket i vann, så tørket v/ 105 °C	VP, BSE, SEM
Jacobsen, Marchand og Hornain, 1995	10 uker	Vann	10 uker	Fryse/tine	0,001-0,01	Ukjent	3 måneder	Fryse/tine i vann, så nedsenket i vann v/ 20 °C	SEM
Palin, Jonkers og Wiktor, 2016	28 dager	Forseglet, romtemperatur	28 dager	Strekk	0,2, 0,4	Horisontal langs overflate sylinder	28 og 56 dager	Nedsenket i syntetisk sjøvann v/ 20 °C	VP, FTIR, ESEM, EDS
Ramm og Biscopping, 1998	-	-	-	-	0,1, 0,2, 0,3, 0,4	Langsgående langs hele lengden	2 år	Vann med syreholdige løsninger (pH=6,1 og 5,2)	VP, KT
WuMan og HengJing, 2012	28 dager	20°C i alkalisk løsning	-	-	-	-	5 pålastninger, 40 og 80 % av f <sub>c</sub>	-	KM, TF

Tabell 2.2: Oversikt over forsøk som omhandler selvreparasjon av riss. Tabellen inneholder informasjon rundt materiale, prøvestykke, herding, riss, eksponering og utførte målinger for de ulike forsøkene. Informasjon om forsøkene strekker seg over to tabeller, slik at tabellen bør leses sammen med tabellen som fortsetter på neste side. (-) indikerer at informasjon ikke er tilgjengelig

Referanse	Materiale						Prøvestykke		
	Testmateriale	v/b	Binder				Alder <sup>1</sup>	Overdekning	Dimensjon [mm]
			PC	BFS	SF	FA			
Zhou et al., 2011	Betong	-	x	20,30, 40 %			20,30, 40 %	Ingen arm.	Terning 100x100x100
Maes, Snoeck og De Belie, 2016	Mørtel	0,45	x	50 %				Ingen arm.	Sylinder h=50, d=100 mm
Palin, Wiktor og Jonkers, 2015	Mørtel	0,5	x					Kun for prisme: 30 mm	Terning 40, prisme 40x40x160
Reinhardt og Jooss, 2003	Betong	0,37	x				x	-	Sirkulære skiver d= 150, t= 50
Mohammed,Otsuki og Hamada, 2003	Betong	0,45	x	5-30, 30-60, 60-70%			5-10%	45,5 mm	100x100x600
Østnor, Haugen og De Weertd, 2015	Betong	-0,4	x	4,12 %			20 %	25 mm	Sylinderkjerner h= 51, d= 75
Van Tittelboom et al, 2012	Sementpasta, mørtel	0,4, 0,5	x	50,70, 85 %			30, 50%	Mørtel: 10 mm	Mørtel: prisme, 10x40x160 , Sement: sylinder h=20, d=76

Tabell 2.2: Fortsettelse

Referanse	Herding		Riss			Eksposering		Målinger	
	Vareighet	Type	Alder <sup>2</sup>	Opprinnelse	Rissvidde v/ overflate [mm]	Orientering <sup>3</sup>	Vareighet	Miljø	Metode
Zhou et al., 2011	28 dager - trykktest-reherding 28 dager	Standard fukt rom, 20 °C	-	Ikke spesifisert	ukjent	ukjent	-	-	TF, SEM
Maes, Snoeck og De Belie, 2016	24 dager	Etter herding: temp 20 °C, RH=95 %	24 dager	Splitteles test	0,1 og 0,3	Fullstendig over diameter og hele høyden	196 dager fullstendig nedsenket, 98 dager i tidevannssone: 12 t vætting/ 12 t tørking (kun PC)	Fullstendig nedsenket v/ 20 °C 4 ulike løsninger: destillert vann, samt ulike blandinger syntetisk sjøvann	MS, KL, KP
Palin, Wiktor og Jonkers, 2015	28 dager	Forsøket, romtemperatur	28 dager	Strekking av prismer	Opp til 1	-	56 og 140 dager	Nedsenket i både ferskvann og syntetisk sjøvann	ESEM, EDS, TF, FTIR
Reinhardt og Jooss, 2003	28 dager	Vann i 6 dager, deretter lagret ved 20 °C og RH = 65 %	-	Strekk (splittelestest)	0,05, 0,10, 0,15	-	336 timer	Vann temp: 20,40, 80 °C	VP
Mohammed, Otsuki og Hamada, 2003	-	-	-	-	0 - 0,5, 1,5 - 5	-	15 år, tidevannsbasseng (7 t vætting, 5 t tørking)	Syntetisk sjøvann, pH= 7,7	SEM, EPMA, MCK
Østnor, Haugen og De Weerd, 2015	-	-	-	4 punkts bøyetest	0,02, 0,03, 0,08, 0,15	Horisontal	21 år	Marint, tidevannssone	TS, EL, EM, KP, DS, KA
Van Tittelboom et al, 2012	28, 55, 70 og 100 dager	20 °C, RH > 95%	28 og 55 dager	3-punkts bøyetest og splittelestest	0 - 0,25	-	1-42 dager	Noen prøver nedsenket i tappevann	IK, VP, MS

De følgende forkortelsene er forklaring til forkortelsene som beskriver målemetodene som er benyttet i de ulike forsøkene i Tabell 2.1 og Tabell 2.2.

DS	Vannmetningsgrad
EDS	Energidispersiv spektroskopi
EL	Elementmapping
EM	Elektrisk motstand
EPMA	Elektronmikrosonde analyse
ESEM	Environmental scanning elektron mikroskopi
FTIR	Infrarød spektroskopi
HP	Hydratiseringsprodukter
HR	Hydratiseringsreaksjoner
IK	Isoterm kalorimetri
KA	Karboniseringsdybde
KDK	Kloriddiffusjons-koeffisient
KL	Kolorimetrisk målinger
KM	Kloriddiffusjons-test
KP	Kloridprofiler
KT	Kalsium titrasjon
MCK	Mikrocelle korrosjons-måling
MS	Mikroskopiske målinger
OM	Optisk mikroskop
P	Porøsitet
TF	Trykkfasthet
TS	Tynnslipanalyse
VP	Vannpermeabilitets-test
XRD	Røntgendiffraksjon

### **2.1.2 Påvirkende faktorer**

Mye av det som fortsatt diskuteres rundt fenomenet selvreparasjon omhandler hvilke faktorer som påvirker dette. I Tabell 2.1 og Tabell 2.2 ble det fremstilt en oversikt over alle eksperimentelle forsøk som er drøftet i denne rapporten. De fleste forsøk er forskjellige i den forstand at ulike parametere er knyttet til forsøkene. Dette fører ofte til ulike resultater og konklusjoner rundt forhold som påvirker selvreparasjon. Tabell 2.3 gir en oppsummering over funn gitt i de ulike forsøkene.

Videre i dette kapitlet vil noen av faktorene som trolig har en påvirkning trekkes frem, etterfulgt av en kort tabell som oppsummerer ulike funn fra litteraturen rundt de aktuelle faktorene.

Tabell 2.3: Oppsummering av observasjoner fra de ulike forsøkene som er omtalt. (x) står i ruter hvor type binder finnes, men hvor det ikke er angitt hvor store prosentandeler som er tilstede. (-) betyr at det ikke finnes informasjon i rapporten fra de ulike forsøkene. Tabellen fortsetter på neste side med andre forfattere

Referanse	Binder				Eksponering	Rissvidde v/ overflate [mm]	Maks reparert rissvidde [mm]	Utfelling	Mest effektive binder mhp. Selvparasjon	Sjøvann/ferskvann
	PC	BFS	SF	FA						
Edwardsen, 1999	x	x		x	Vann med ulik hardhet	0,10, 0,20, 0,30	0,2	Kalsiumkarbonat	Neglisjerbar	Ferskvann
Termkhajorknit et al., 2009	x			15, 25, 50 %	Tørket v/ 105 °C	Ukjent, mikroriss	-	-	FA	-
Hearn og Morley, 1997	x		x		Nedsenket i vann, så tørket v/ 105 °C	Ukjent	-	-	-	Ferskvann
Jacobsen, Marchand og Hornain, 1995	x		5 %		Fryse/tine i vann, så nedsenket i vann v/ 20 °C	0,001-0,01	0,005 - 0,01	CSH, Ettringitt, Ca(OH) <sub>2</sub>	PC	Ferskvann
Palin, Jonkers og Wiktor, 2016		x			Nedsenket i syntetisk sjøvann v/ 20 °C	0,2, 0,4	0,2	Aragonitt, brucitt	-	Sjøvann
Ramm og Biscopping, 1998	x			x	Vann med syreholdige løsninger (pH=6,1 og 5,2)	0,1, 0,2, 0,3, 0,4	-	-	-	-
WuMan og HengJing, 2012	x	20, 30, 40 %	5, 10 %		-	-	-	-	-	-
Zhou et al, 2011	x	20, 30, 40 %		20, 30, 40 %	-	ukjent	-	CSH	-	-



Tabell 2.3: Fortsettelse

Referanse	Binder				Eksponering	Rissvidde v/ overflate [mm]	Maks reparert rissvidde [mm]	Utfelling	Mest effektive binder mhp. Selvparasjon	Sjøvann/ferskvann
	PC	BFS	SF	FA						
Maes, Snoeck og De Belie, 2016	x	50 %			Fullstendig nedsenket v/ 20 °C 4 ulike løsninger: destillert vann, samt ulike blandinger syntetisk sjøvann	0,1 og 0,3	0,1	Kalsiumkarbonat, kalsiumhydroksid, brucitt	Neglisjerbar for permanent nedsenket sone	Sjøvann
Palin, Wiktor og Jonkers, 2015	x	x			Nedsenket i både fersk- vann og syntetisk sjøvann	Opp til 1	0,6 i sjøvann (OPC), 0,4 i ferskvann (BFS)	Brucitt, aragonitt (sjøvann), Kalsiumkarbonat (ferskvann)	OPC i sjøvann, men BFS i ferskvann	Sjøvann og ferskvann
Reinhardt og Jooss, 2003	x	x	x	x	Vann temp: 20,40, 80 °C	0,05, 0,10, 0,15	0,1	-	-	Ferskvann
Østnor, Haugen og De Weerd, 2015	x		4,2, 3,5, 12,5 %	20 %	Marine forhold, tidevannssone	0,02, 0,03, 0,08, 0,15	-	Karbonat og uidentifisert materiale. Ettringitlignende materiale	-	Sjøvann
Mohammed et al, 2003	x	5-30, 30-60, 60-70 %		5-10 %	Tidevannsbasseng (7 t væting, 5 t tørking). Syntetisk sjøvann, pH= 7,7	0 - 0,5 1,5 - 5	0,5	Kalsitt, brucitt, ettringitt	Neglisjerbar for små rissvidder	Sjøvann
Van Tittelboom et al, 2012	x	50, 70, 85 %		30, 50 %	Noen prøver nedsenket i tappevann	0 - 0,25	0,2	Kalsiumkarbonat	BFS eller FA forbedrer selvrep. ved videre hydratisering	Ferskvann

### 2.1.2.1 Rissvidde

Flere forsøk hevder at hvorvidt riss kan repareres fullstendig avhenger av rissvidden. Det er derimot motstridende konklusjoner rundt hvor store rissvidder som kan repareres fullstendig. Noen eksperimentelle tall på maksimal rissvidde som har blitt fullstendig selvreparert er 0,1 mm (Reinhardt og Jooss (2003)); Maes, Snoeck og De Belie (2016)) og 0,2 mm (Palin, Jonkers og Wiktor (2016); Edvardsen (1999); Van Tittelboom *et al.* (2012)). Palin, Wiktor og Jonkers (2015) observerte at etter 56 dager nedsenket i sjøvann ble riss opp til 0,1 mm reparert fullstendig for sement tilsatt BFS, mens for PC ble rissvidder helt opp til 0,6 mm reparert fullstendig. I ferskvann ble rissvidder opp til 0,4 mm reparert fullstendig for BFS, mens for PC ble rissvidder opp til 0,17 mm reparert fullstendig. Mohammed, Otsuki og Hamada (2003) har observert at riss opp til 0,5 mm ble reparert.

Det finnes altså til nå ikke en felles bestemt grense på hva som er maksimal rissvidde for fullstendig reparasjon, da flere forfattere antyder ulike verdier på bakgrunn av forsøk hvor ulike parametere og påvirkende faktorer er benyttet.

Tabell 2.4: Sammenfatning av resultater fra forsøk som angår maks rissvidde som kan repareres fullstendig.

Referanse	Binder	Rissvidde [mm]	Eksponering	Maks rissvidde [mm]
Maes, Snoeck og De Belie, 2016	PC, 50 % BFS	0,1, 0,3	Ferskvann, syntetisk sjøvann	0,1
Edvardsen, 1999	PC, BFS, FA	0,1, 0,20, 0,3	Vann med ulik hardhet	0,2
Reinhardt og Jooss, 2003	PC, SF, FA	0,05, 0,10, 0,15	Vann temp: 20,40, 80 °C	0,1
Palin, Jonkers og Wiktor, 2016	PC, BFS	0,2, 0,4	Nedsenket i syntetisk sjøvann v/ 20 °C	0,2
Van Tittelboom et al., 2012	PC, BFS, FA	0 – 0,25	Nedsenket i tappevann	0,2
Palin, Wiktor og Jonkers, 2015	PC, BFS	Opptil 1	Nedsenket i både ferskvann og syntetisk sjøvann	0,6
Mohammed et al. 2003	PC, BFA, FA	0-0,5 og 1,5-5	Tidevannsbasseng med syntetisk sjøvann, pH= 7,7	0,5

### **2.1.2.2 Orientering**

Det hadde vært interessant å undersøke om rissets orientering på prøvestykket i forhold til eksponert overflate har noen innvirkning på selvreparasjon av riss. Det er dessverre mangelfull informasjon om orientering i samtlige forsøk.

### **2.1.2.3 Temperatur**

Reinhardt og Jooss (2003) har undersøkt permeabilitet og selvreparasjon av opprisset betong som funksjon av temperatur og rissvidde. Det ble konkludert med at selvreparasjonsprosessen går raskere ved høyere temperaturer. Foreslått selvreparasjons-mekanisme foreligger ikke. Ved hjelp av termodynamiske betraktninger rundt dannelse av kalsiumkarbonat har det vist seg at økende vanntemperatur er fordelaktig for utfelling av kalsiumkarbonat i riss (Edvardsen, 1999).

### **2.1.2.4 Binder**

Det har blitt normal praksis å erstatte sement med ulike bindemidler. Pozzolaner er et bindemiddel som tilsettes betongen for å oppnå ønskede egenskaper. I Norge benyttes for eksempel Standardsement FA som inneholder 18 % FA (Norcem, 2017). FA er et pozzolanmateriale som reagerer med kalsiumhydroksid fra sementhydratiseringen og produserer C-S-H gel. Termkhajornkit *et al.* (2009) observerte at FA-sement har en selvreparerende evne for mikrosprekker som oppstår fra svinn. Alle resultatene i forsøket viste at selvreparasjonsevnen til FA-sement økte når andelen FA økte. Mikrorissene som ble undersøkt i dette eksperimentet var iboende riss som det ble forventet at stammer fra autogent svinn, og det er dermed ikke oppgitt noen spesifikk rissvidde. (Termkhajornkit *et al.*, 2009)

Til tross for funn i enkelte forsøk er det fortsatt uklart hvorvidt det alltid stemmer at sement tilsatt pozzolaner påvirker selvreparasjon av riss. Noen eksperimenter viser at ulike pozzolaner har liten eller ingen betydning (Edvardsen (1999); Maes, Snoeck og De Belie (2016)), mens andre viser at det er fordelaktig (Termkhajornkit *et al.* (2009); Zhou *et al.* (2011); Van Tittelboom *et al.* (2012)). De fleste av disse eksperimentene er utført på relativt ung betong, det vil her si fra 28 dager til 365 dager gammel betong. Det er fortsatt behov for flere undersøkelser som gjelder langtidseksponert betong.

Zhou *et al.* (2011) har utført forsøk med ulike erstatningsforhold av BFS og FA i sement. BFS-sement er sement tilsatt slagg. Slagg sine latent hydrauliske egenskaper aktiveres av kalsiumhydroksid, som frigjøres fra sementen når den blandes med vann (Palin, Jonkers og Wiktor, 2016). Evnen til selvreparasjon ble undersøkt ved styrkemåling og SEM-analyse etter 28 dagers herding. Ut fra trykktestene var det tydelig at både sement erstattet med henholdsvis slagg og FA viste økt selvreparasjonsevne.

Van Tittelboom *et al.* (2012) har også undersøkt hvordan sementblandinger med BFS eller FA påvirker selvreparasjon av riss. Dette ble utført med fokus på mekanismene videre hydratisering og utfelling av kalsiumkarbonat. Resultatene viste at erstatning av noe sement med BFS eller FA forbedrer selvreparasjon av riss når videre hydratisering er mekanismen, men at det ikke påvirker mengden kalsiumkarbonat-utfelling. Det ble vist at PC hadde best reparasjonseffektivitet. Det ble begrunnet med at mer kalsiumhydroksid er tilgjengelig enn ved bruk av binder, som dermed kan reagere med CO<sub>2</sub> fra lufta for å utfelle kalsiumkarbonat-krystaller. Dette virker litt motsigende mot konklusjonen om at binder ikke påvirker kalsiumkarbonat-utfelling.

I en undersøkelse utført av Palin, Wiktor og Jonkers (2015) ble det fokusert på selvreparasjonsevnen for PC mørtel og BFS mørtel, hvor prøvestykkene var nedsenket i både ferskvann og sjøvann. Det ble observert mer selvreparasjon av riss for BFS i ferskvann, mens lavere i sjøvann. For PC ble det observert motsatt; økt selvreparasjon i sjøvann mens mindre selvreparasjon i ferskvann.

Jacobsen, Marchand og Hornain (1995) undersøkte påvirkningen av SF på betong som ble utsatt for frostnedbrytning. Betong med v/b-forhold lik 0,4 med 0 % og 5 % SF ble undersøkt ved hjelp av SEM-analyse. Det ble observert mindre selvreparasjon i betongen som inneholdt 5 % SF. Dette ble observert i form av at det var mindre nye hydratiseringsprodukter i betongblandingen med SF enn for PC-blandingen. Det finnes ingen begrunnelse på dette ut fra forsøkene som ble gjort i rapporten. Forfatterne foreslo at en årsak kan være at SF konsumerer mer kalsiumhydroksid enn ordinær betong, og dermed reduserer selvreparasjons-potensialet, men at det ikke er grunnlag nok for å påstå det ut fra deres eksperimenter.

Det ble i de foregående avsnittene presentert eksperimenter som viste at både FA og BFS er fordelaktig når det gjelder selvreparasjon av riss, mens SF muligens kan ha en negativ

påvirkning. På den andre siden hevder Edvardsen (1999) at type sement er en av de faktorene som er av mindre betydning for selvreparasjon av riss. Dette støttes opp av Maes, Snoeck og De Belie (2016) som påstår at binderens påvirkning på selvreparasjon er neglisjerbar når prøvene er kontinuerlig nedsenket.

Tabell 2.5: Sammenfatning av resultater fra forsøk som angår påvirkningen av ulike binder på selvreparasjon av riss. (-) betyr at det ikke finnes informasjon i rapporten fra de ulike forsøkene.

Referanse	Binder	Alder <sup>1</sup>	Eksponering	Varighet	Mest effektive binder
Termkhajornkit et al., 2009	PC, (15, 25, 50 %) FA	28-365 dager	Tørket v/105 °C	-	FA
Maes, Snoeck og De Belie, 2016	PC, 50 % BFS	28 dager	Fullstendig nedsenket v/20°C destillert vann, syntetisk sjøvann	196 dager fullstendig nedsenket, 98 dager tidevannssone	Neglisjerbar for permanent nedsenket sone
Edvardsen, 1999	PC, BFS, FA	-	Vann med ulik hardhet	5-20 uker	Neglisjerbar
Zhou et al., 2011	PC, FA, BFS	28 dager	-	-	Ikke sammenlignet
Van Tittelboom et al. 2012	PC, (50, 70, 85 %) BFS, (30, 50%) FA	28, 55, 70, 100 dager	Noen prøver nedsenket i tappevann	1-42 dager	BFS eller FA forbedrer selvrep. ved videre hydratisering. BFS mest effektivt
Mohammed, Otsuki og Hamada, 2003	PC, (5-30, 30-60, 60-70%) BFS, 5-10% FA	-	Tidevannsbasseng Syntetisk sjøvann, pH= 7,7	15 år	Neglisjerbar for små rissvidder
Jacobsen, Marchand og Hornain, 1995	PC, 5 % SF	10 uker	Fryse/tine i vann, så nedsenket i vann v/ 20 °C	3 måneder	PC
Palin, Wiktor og Jonkers, 2015	PC, BFS	28 dager	Nedsenket i både ferskvann og syntetisk sjøvann	56 og 140 dager	PC i sjøvann, men BFS i ferskvann
Palin, Jonkers og Wiktor, 2016	BFS	28 dager	Nedsenket i syntetisk sjøvann v/ 20 °C	28 og 56 dager	-

<sup>1</sup> Angir alder av betong ved eksponering

### 2.1.2.5 Eksponering

Ved å betrakte hvordan miljø påvirker mekanismene bak selvreparasjon, er det fra tidligere blitt utført eksperimenter med både ferskvann og sjøvann. På grunn av få forsøk med like faktorer, er det valgt å presentere forsøk utført med både ferskvann og sjøvann. Dette gjøres for å kunne betrakte eventuelle likheter mellom funn fra forsøkene, sett i sammenheng med dette prosjektet.

#### **Eksperimenter utført med ferskvann**

Utfelling av kalsiumkarbonat i riss har blitt grundig undersøkt av Edvardsen (1999). Det hevdes at dette er den viktigste faktoren som bidrar til selvreparasjon av riss. I eksperimentene som ble utført var det mulig å bevise tilstedeværelse av kalsiumkarbonat i alle rissene, også i riss med større rissvidde enn 0,3 mm. Dannelse av kalsiumkarbonat i riss kan sees som en karakteristisk hvit utfelling. (Edvardsen, 1999)

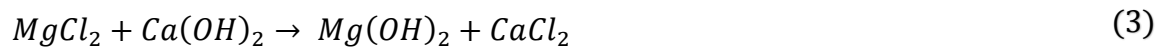
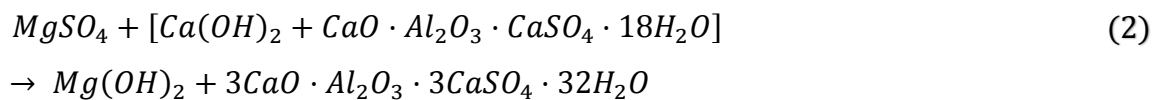
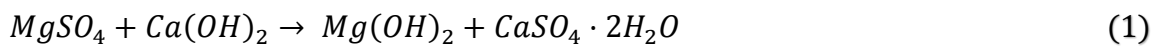
Fra forsøkene til Edvardsen kom det frem at krystallveksten av kalsiumkarbonat består av to forskjellige krystallvekst-prosesser som bestemmes av de kjemiske og fysiske forholdene i risset, henholdsvis overflate-kontrollert og diffusjons-kontrollert prosess. Overgangen fra overflate-kontrollert krystallvekst til diffusjons-kontrollert krystallvekst skaper den karakteristiske selvreparasjonsoppførselen til vannførende riss. Så lenge det er tilstrekkelig kalsiumioner direkte på rissveggen, finner en veldig rask krystallvekst sted. Etter kalsiumionene på rissveggen er brukt opp, vil en diffusjon av kalsiumioner fra betongen utvikle seg på grunn av konsentrasjonsgradienten. (Edvardsen, 1999)

Edvardsen (1999) konkluderer med at selvreparasjons-prosessen i betraktelig grad er påvirket av rissvidden og det aktuelle vanntrykket. Analyser fra Edvardsens eksperimenter viste at karbonat-innholdet i vannet ikke er den begrensende faktoren for kalsiumkarbonat utfellingen. I tillegg hevder Edvardsen at innvirkningen av svellet sementpasta samt de mekaniske årsakene som tetter riss er av mindre viktighet. Dette samsvarer med de Rooij *et al.* (2013), som omtalt i kapittel 2.1.1.

I tillegg til utfelling av kalsiumkarbonat, er det også gjort andre funn i forsøk som er utført ved nedsenkning av prøver i ferskvann. Van Tittelboom *et al.* (2012) observerte også utfelling av kalsiumkarbonat, samt nye hydratiseringsprodukter. Jacobsen, Marchand og Hornain (1995) fant ikke utfelling av kalsiumkarbonat, men nylig dannet CSH-gel, ettringitt og kalsiumhydroksid.

## **Eksperimenter utført med marine eksponeringsforhold**

Palin, Jonkers og Wiktor (2016) undersøkte selvreparasjonsevnen til opprisset BFS-mørtel nedsenket i syntetisk sjøvann i henholdsvis 28 og 56 dager. Det ble her observert at reparasjons-materialet i rissene var dannet av kalsium og magnesium. Sjøvann inneholder hovedsakelig magnesiumklorid, magnesiumsulfat og karbonationer. Opprissing av marine betongkonstruksjoner tillater sjøvannet å trenge inn i rissene der det kommer i kontakt med eksponert sementpasta. Kalsiumhydroksid fra sementpastaen, som er løselig i sjøvann, lekkes ut i risset der hydroksidionene reagerer med magnesiumioner i sjøvannet. I henhold til reaksjonsligningene (1) – (3) vil det da dannes enten brucitt ( $Mg(OH)_2$ ) og gips ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), brucitt og ettringitt ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) eller brucitt og kalsiumklorid ( $CaCl_2$ ) (Mehta, 1991):



Brucitt er mineralformen til magnesiumhydroksid. Det er ikke løselig med vannet i risset og dannes raskt. I sjøvann utfelles det ofte aragonitt til fordel for kalsitt. Aragonitt er et kalsiumkarbonat med samme kjemiske sammensetningen som kalsitt, men forskjellig struktur (St John, Poole og Sims, 1998).

Det ble som nevnt observert at reparasjons-materialet i rissene var dannet av kalsium (indikerer aragonitt) og magnesium (indikerer brucitt), og ikke silika (uhydratiserte sementpartikler). Mangelen på silika indikerte at dannelsen av reparasjons-materialene ikke var et resultat av videre hydratisering av ureagerte sementpartikler. Dannelsen av et brucitt-lag på overflaten til betong i marine eksponeringsforhold ble også påvist av Maes, Snoeck og De Belie (2016). Videre analyser viste at dette laget med brucitt forseglet risset for videre kloridinntrengning, og var dermed ansvarlig for selvreparasjon av risset. Her ble det derimot påpekt at brucitt-laget vil bli ødelagt ved et visst tidspunkt, og antagelig føre til mye raskere

kloridinntrengning siden risset ikke faktisk er reparert, men kun forseglet ved overflaten (Maes, Snoeck og De Belie, 2016). Bakgrunnen for denne påstanden presenteres ikke.

Maes, Snoeck og De Belie (2016) undersøkte sementholdige materialers evne til å reparere 0,1 mm og 0,3 mm brede riss i marint miljø. Prøvestykkene ble utsatt for væting/tørking sykluser både i destillert vann og kloridløsninger. Effekten av eksponering i dette forsøket viste at prøvestykkene som er utsatt for væting/tørke sykluser repareres raskere enn permanent nedsenkede prøver, uavhengig om det er klorider i løsningen eller ikke.

Palin, Wiktor og Jonkers (2015) undersøkte selvreparasjon for betong nedsenket i både ferskvann og sjøvann. Forskjellen i reparasjonshastigheten mellom prøvene nedsenket i ferskvann og sjøvann var merkbar; rissene ble reparert dobbelt så fort i sjøvann. Det hevdes at det er mengden karbonationer i ferskvannet som begrenser utfellingen av kalsiumkarbonat. Dette samsvarer ikke med konklusjonen til Edvardsen (1999).

Forsøkene som har vært nevnt i de foregående avsnittene har omhandlet korttidsforsøk for betong eksponert for marine forhold. Mohammed, Otsuki og Hamada (2003) presenterer et av få langtidsforsøk der betong har vært eksponert for marine eksponeringsforhold. Forsøket omhandler 15 år gammel opprisset betong eksponert for marint miljø i et tidevanns-basseng. Det skilles ikke på nedsenket, tidevanns- og atmosfærisk sone i resultatene fra forsøket. Betongblandinger med ulik binder, henholdsvis PC, BFS og FA, ble benyttet. Vannet som ble benyttet inneholdt klorider, sulfater og magnesium. Ved elementanalyser av disse rissene ble det påvist en utfelling i rissene som bestod av en blanding av ettringitt, brucitt og kalsitt. Utfelling av ettringitt og brucitt forklares med samme reaksjonsligninger som presentert i ligning (1), (2) og (3). (Mohammed, Otsuki og Hamada, 2003).

Østnor, Haugen og De Weerd (2015) foretok i 2014 undersøkelser av bjelker fra samme feltstasjon som denne rapporten omhandler. Bjelkene som ble undersøkt hadde samme betongresept, henholdsvis B, E og F. Det henvises til kapittel 3 for mer info om de aktuelle reseptene. Selvreparasjon av riss i betongkjerner fra tidevannssonen ble undersøkt ved tynnslipanalyse og elementfordeling. Det ble observert ettringitt-lignende materiale, karbonat samt stedvis uidentifisert utfelling i rissene. Det ble også funnet antydning til magnesium anrikning. Da dette er undersøkelser utført på de samme bjelkereseptene som i



denne rapporten er det valgt å legge ytterligere informasjon i Vedlegg D – Tidligere undersøkelser fra feltstasjon.

Tabell 2.6: Sammenfatning av resultater fra forsøk som omhandler betong eksponert for ferskvann. (-) betyr at det ikke finnes informasjon i rapporten fra de ulike forsøkene.

Referanse	Binder	Alder <sup>1</sup>	Varighet eksponering	Utfelling
Edwardsen, 1999	PC, BFS, FA	-	5-20 uker	Kalsiumkarbonat
Palin, Wiktor og Jonkers, 2015	PC, BFS	28 dager	56 og 140 dager	Kalsiumkarbonat
Van Tittelboom et al., 2012	PC, (50, 70, 85 %) BFS, (30, 50%) FA	28, 55, 70, 100 dager	1-42 dager	CSH, kalsiumhydroksid, kalsiumkarbonat
Jacobsen, Marchand og Hornain, 1995	PC, 5 % SF	10 uker	3 måneder	CSH, Ettringitt, kalsiumhydroksid

<sup>1</sup> Angir alder av betong ved eksponering

Tabell 2.7: Sammenfatning av resultater fra forsøk som omhandler betong eksponert for sjøvann. (-) betyr at det ikke finnes informasjon i rapporten fra de ulike forsøkene.

Referanse	Binder	Alder <sup>1</sup>	Varighet eksponering	Utfelling
Maes, Snoeck og De Belie, 2016	PC, 50 % BFS	28 dager	196 dager fullstendig nedsenket, 98 dager i tidevannssone	Kalsiumkarbonat, kalsiumhydroksid, brucitt
Palin, Wiktor og Jonkers, 2015	PC, BFS	28 dager	56 og 140 dager	Kalsiumkarbonat (aragonitt) og magnesiumhydroksid (brucitt)
Palin, Jonkers og Wiktor, 2016	BFS	28 dager	28 og 56 dager	Kalsiumkarbonat (aragonitt), magnesiumhydroksid (brucitt)
Mohammed, Otsuki og Hamada, 2003	PC, (5-30, 30-60, 60-70%) BFS, (5-10%) FA	-	15 år	Ettringitt, magnesiumhydroksid (brucitt) og kalsiumkarbonat (kalsitt)
Østnor, Haugen og De Weerd, 2015	PC, (4,2, 3,5, 12,5 %) SF, 20 %FA	-	21 år	Karbonat og uidentifisert materiale. Ettringitt-lignende materiale

<sup>1</sup> Angir alder av betong ved eksponering

## 2.2 Korrosjonsmekanismer

### 2.2.1 Grunnleggende om korrosjon

Armeringskorrosjon er en prosess som er gitt av elektrokjemiske reaksjoner. Det betyr at det er kjemiske reaksjoner som overfører elektriske ladninger ved grenseflaten mellom armeringsjernet og vann. Vann og oksygen er nødvendig for at korrosjon skal oppstå. Reaksjonsproduktet kan bestå av ulike typer jernoksider, avhengig av eksponeringsforholdene. (Markeset og Myrdal, 2008)

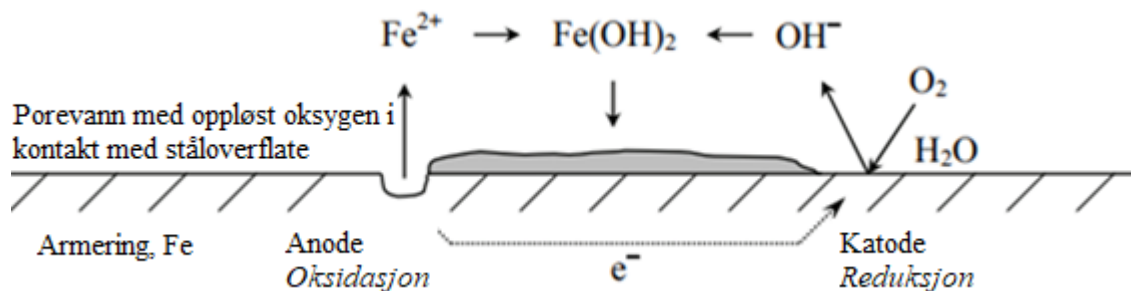
Korrosjons-reaksjonen kan igjen deles inn i to halvcellereaksjoner. De to halvcellereaksjonene blir kalt anode- og katode reaksjoner. Ved anodereaksjonen skjer det en oksidasjon av jernet, slik at det dannes jernholdige ioner mens det etterlates elektroner i armeringen. Reaksjonsligningen for denne oksidasjonen ved anoden skrives som (Markeset og Myrdal, 2008):



Ved den katodiske reaksjonen blir de frigjorte elektronene fra oksidasjonen konsumert med oksygen ved tilstedeværelse av vann. Dersom det ikke finnes noen ekstern elektrisk kilde til elektroner, må den anodiske reaksjonen generere elektroner i samme hastighet som den katodiske reaksjonen forbraker dem. Reaksjonsligningen for denne reduksjonen ved katoden skrives som (Markeset og Myrdal, 2008):



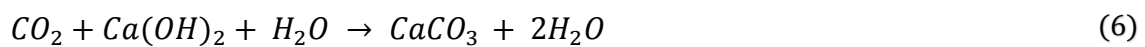
Figur 2.2 illustrerer korrosjonsprosessen. Oksidasjonen av jernet skjer ved anoden, og etterlater frie elektroner i armeringen. Disse frie elektronene forbrukes av oksygenet ved katoden når det er tilstedeværelse av vann.



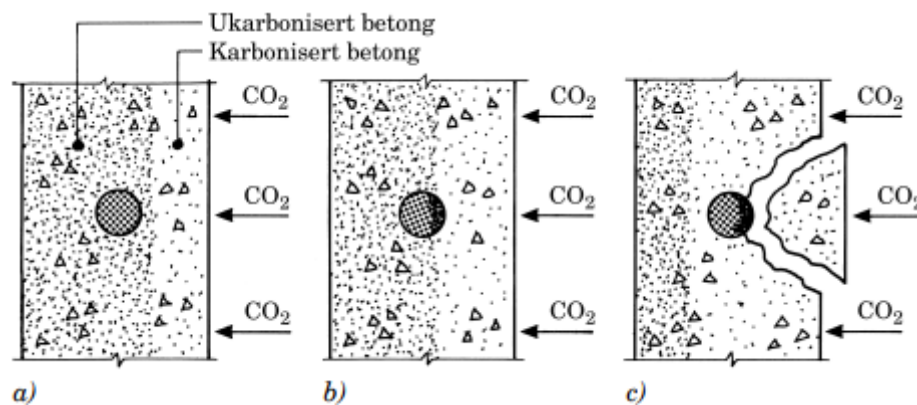
Figur 2.2: Korrosjonsprinsippet for stål i betong, ref. beskrivelse i tekst. Gjengitt etter (Markeset og Myrdal, 2008).

## 2.2.2 Karbonatisering

Karbonatisering er en kjemisk prosess som oppstår når betong kommer i kontakt med luft. Luften diffunderer inn i betongoverflaten, der karbondioksid fra luften og vann reagerer kjemisk med kalsiumhydroksid i betongen. Ut fra denne reaksjonen dannes det kalsiumkarbonat, som medfører at betongens pH synker fra 13,5 til 8-9. Ved så lav pH vil den korrosjonsbeskyttende oksidfilmen rundt armeringen brytes ned, og armeringen er ikke lenger beskyttet. Ved tilstrekkelig tilgang på fuktighet ( $RH > 65\%$ ) og luft vil armeringen korrodere. Reaksjonsligning for karbonatisering er gitt ved ligning (6). (Vinje og Vennesland, 2007)



Skillet mellom karbonatisert og ukarbonisert betong kalles karbonatiseringsfronten. Karbonatiseringsfronten tilsvarer området som har redusert pH, og armeringen kan korrodere først når karbonatiseringsfronten når armeringsjernet. Figur 2.3 er hentet fra betongelementboken og illustrerer hvordan karbonatiseringsprosessen brer seg innover i betongen.



Figur 2.3: Karbonatiseringsprosess i betong, ref. beskrivelse i teksten. Kopi fra (Vinje og Vennesland, 2007).

Bilde a) viser at karbonatiseringsfronten ikke har nådd inn til armeringen, og armeringen er fortsatt korrosjonsbeskyttet. Bilde b) viser at karbonatiseringsfronten har nådd inn til armeringen. Armeringen kan nå begynne å korrodere. Bilde c) illustrerer at karbonatiseringsfronten er større enn armeringens overdekning. Korrosjonsproduktene har et større volum enn armeringsjernet, der denne volumøkningen kan medføre avskallinger og sprekkdannelser. (Vinje og Vennesland, 2007)

Det finnes flere metoder for å måle faktisk omfang av karbonisert betong på konstruksjoner. Metoden med påføring av pH-indikator beskrives videre. Ved måling av karboniseringsdybden spryes det på en pH-indikator for å kunne kartlegge inntrengningsdybden. Det er viktig at betongoverflaten er fersk, og ikke for tørr ved prøvetaking. pH-indikatoren skiller mellom karbonisert og ukarbonisert betong ved å gi den ukarboniserte betongoverflaten en blålig farge, mens karbonisert betong forblir grå. Figur 2.3 illustrerer dette. Inntrengningsdybden måles fra betongoverflaten og inn til fargeendringen.



Figur 2.4: Illustrasjon for påvisning av karbonisert betong.  $X_{c,i}$  viser karboniseringsdybden, det vil si avstanden fra overflaten og inn til ikke-karbonisert betong. Gjengitt etter (Revert et al., 2016).

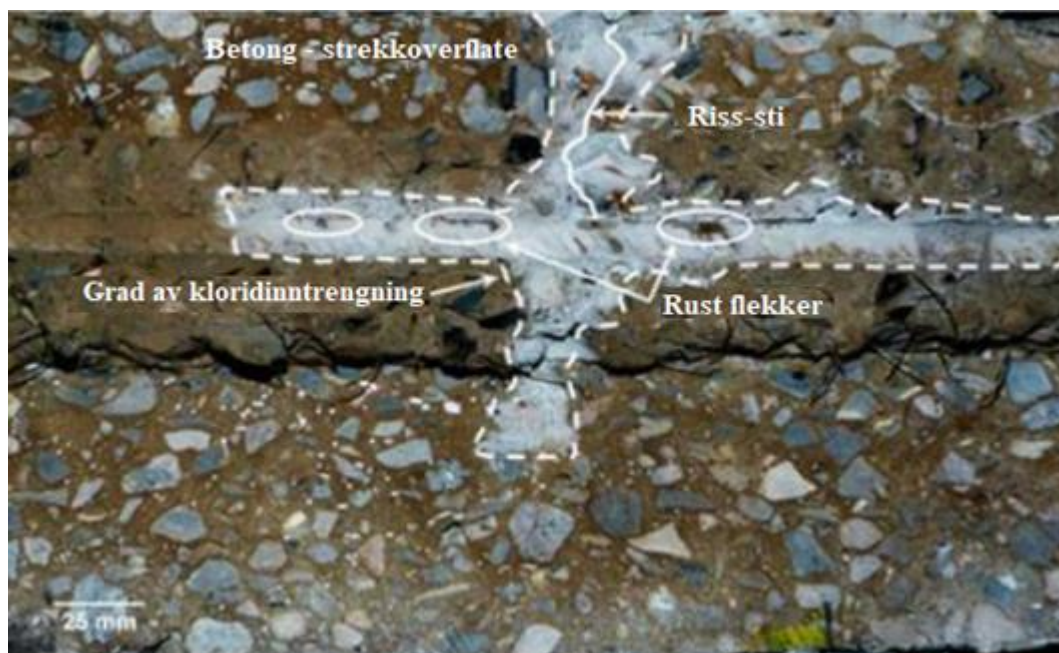
### 2.2.3 Kloridinntrengning

Tilstedeværelse av klorider i betong kan enten skyldes kloridholdige delmaterialer i betongen eller inntrengning utenfra. Inntrengning av klorider i betongen kan skje gjennom diffusjon av kloridioner eller kapillær transport av væske. Kloridene stammer da ofte fra sjøvann eller salting av konstruksjoner. (Vinje og Vennesland, 2007)

Kloridinntrengning vil forårsake armeringskorrosjon dersom kloridkonsentrasjonen på nivå med armeringen blir for høyt (Statens vegvesen, 2014). Da vil korrosjon oppstå som følge av at den korrosjonsbeskyttende oksidfilmen rundt armeringen brytes ned. Korrosjon forårsaket av klorider foregår lokalt der kloridene har trengt inn, og med større hastighet enn korrosjon forårsaket av karbonisering. Lokal armeringskorrosjon kalles også for groptæring, og forårsaker betydelig tverrsnittsreduksjon av armeringsjernet. Denne typen armeringskorrosjon kan være svært alvorlig da den påvirker styrken til armeringen betraktelig siden tverrsnittet reduseres i så stor grad. (Vinje og Vennesland, 2007)

Hvor høyt kloridinnhold som kan føre til armeringskorrosjon kalles grense for kritisk kloridinnhold. Den kritiske kloridgrensen er en mye omdiskutert verdi, som tidligere ble antatt å være ca. 0,4 % av sementvekten. I følge erfaringer gjort av Statens vegvesen tyder det imidlertid på at grensen for kritisk kloridinnhold kan være mye høyere uten at det pågår skadelig armeringskorrosjon. (Statens vegvesen, 2014).

Det finnes flere metoder for å undersøke kloridinntrengning i betongprøver. Dette kan blant annet gjøre med  $\mu$ -XRF analyse. Det fastslås hvor intens spredningen er, men mengden kan ikke bestemmes. Se kapittel 2.6 for utdypende informasjon om  $\mu$ -XRF. En annen metode for å påvise tilstedeværelsen av kloridioner er å spraye sølvnitrat-løsning ( $\text{AgNO}_3$ ) på en fersk splittet betongoverflate. Det er da viktig at overflaten ikke er for tørr. Mulige klorider i poreløsningen reagerer med sølvet i løsningen, og det utfelles hvitt sølvklorid ( $\text{AgCl}$ ) dersom det finnes kloridioner i prøven. Figur 2.4 illustrerer den hvite utfellingen hvor det er påvist tilstedeværelse av kloridioner. Tilstedeværelsen av klorider bekreftes eller avkreftes, men kloridkonsentrasjonen kan heller ikke bestemmes ut fra denne målingen.



Figur 2.5: Identifisering av kloridinntrengning ved bruk av sølvnitrat. Den hvite utfellingen indikerer tilstedeværelse av klorider. Gjengitt etter (Michel et al., 2013).

### 2.3 Overdekning

Betongoverdekningen beskytter armeringen i den grad at det tar lenger tid for aggressive ioner å nå inn til armeringen. Når aggressive ioner har nådd armeringen vil den beskyttende oksidfilmen brytes ned, og korrosjon kan oppstå. (Vennesland og Maage)

Ved måling av faktisk overdekning for armeringsstål i eksisterende betongkonstruksjoner brukes det målere basert på magnetisme. Måleren som benyttes i denne oppgaven er et profometer fra Proceq SA. Avlesningen avhenger av ståldiameteren og dybden (Vennesland og Maage).

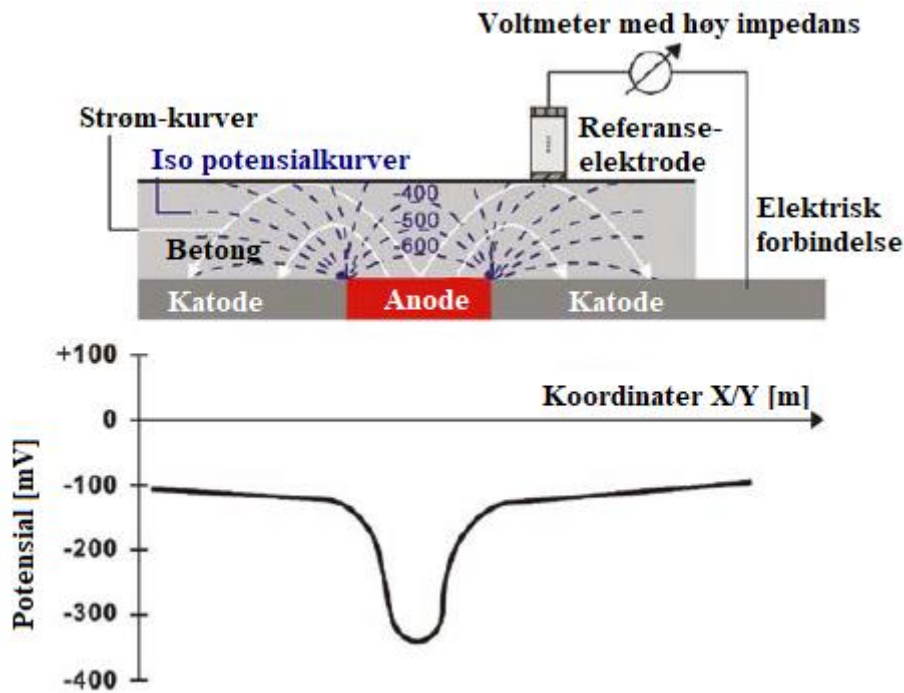
### 2.4 Elektrokjemisk potensial (EKP)

Det å kartlegge EKP for armeringen i en betongkonstruksjon, kan gi en indikasjon på om armeringen er utsatt for korrosjon. Når armeringsstål korroderer oppstår det elektriske felter på grunn av den elektrokjemiske prosessen. Ved å måle EKP måles spenningsforskjellen i mV mellom de elektriske feltene. Den målte spenningen indikerer om armeringsstålet er aktivt (korroderende) eller passivt (ikke korroderende). (Kristiansen, Lindland og Østmoen, 1998).

EKP-målinger foregår ved bruk av voltmeter, ledning og referanseelektrode. Figur 2.6 illustrerer prinsippet for måling av EKP. Det henvises til kapittel 2.2.1 for forklaring av anode- og katode. Det er først nødvendig å etablere elektrisk kontakt med armeringen. Dette gjøres ved å bore et hull ned til armeringen og deretter koble til ledningen som igjen kobles til voltmeteret. En referanseelektrode kobles så til voltmeteret. En referanseelektrode, også kalt en halvcelle, er en elektrode med kjent potensial. Dette er viktig å påpeke, da alle målinger som blir foretatt er relative til dette kjente potensialet. Når instrumentet er klargjort med alle tilkoblinger fører man referanseelektroden over betongoverflaten, og man fanger dermed opp ulike EKP-verdier. Før dette gjøres er det viktig at betongoverflaten er fuktig slik at det blir god elektrisk kontakt. (Geiker og Michel, 2017a)

EKP gir ikke informasjon om korrosjonshastigheten armeringen er utsatt for. Det angir kun sannsynligheten for en eventuell korrosjon. Resultatene bør derfor tolkes sammen med informasjon fra konstruksjonen som blant annet karbonatisering, kloridinnhold og porøsitet. (Elsener *et al.*, 2003)





Figur 2.6: Prinsipp for måling av EKP. Figuren viser en referanseelektrode på en betongoverflate. Det fanges opp potensialverdier fra armeringen, og man ser at forhøyede negative potensialverdier fanges opp i nærheten av anoden. Gjengitt etter (Proceq, 2016a).

#### 2.4.1 Påvirkende faktorer

Tabell 2.8 angir hvilke EKP-verdier som tilsier risiko for korrosjon i henhold til ASTM-standarden. Verdiene gjelder for konstruksjoner i marint miljø.

Tabell 2.8: Retningslinjer for EKP-verdier gjengitt etter (ASTM, 1990). Potensialet i mV er gitt i forhold til en  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  referanseelektrode.

Marine konstruksjoner ASTM STP 1065	Risiko for korrosjon
$x > -200$	Ingen
$-200 > x > -400$	10 %
$-400 > x > -550$	10 til 90 %
$-550 > x$	90 %

Tabellen kan imidlertid ikke tolkes direkte, da det er en rekke faktorer som kan påvirke potensialverdiene og som må tas hensyn til (Geiker og Michel, 2017a). I Tabell 2.9 vises det at EKP-verdiene varierer ettersom hvilke forhold som gjelder for den aktuelle betongen.



Tabell 2.9: Typiske EKP-verdier for normalt stål i betong. Verdiene gjelder for en Cu/CuSO<sub>4</sub> referanseelektrode. Verdiene varierer ut fra fuktighetsforhold i betongen, om den er karbonatisert og om den inneholder klorider. Gjengitt etter (Elsener et al., 2003).

Forhold i betongen	EKP (mV)
Vannmettet betong uten oksygen	-900 til -1000
Våt, kloridforurenset betong	-400 til -600
Fuktig, kloridfri betong	+100 til -200
Fuktig, karbonatisert betong	+100 til -400
Tørr, karbonatisert betong	+200 til 0
Tørr betong	+200 til 0

Dersom det for eksempel er korrosjon på grunn av karbonatisering ser man at potensialverdiene generelt er litt høyere (mer positive) enn sammenlignet med korrosjon på grunn av klorider. Betongens fuktinnhold påvirker også målingene på den måten at veldig høy fuktighet later til å gi mer negative verdier enn en tørr betong. Andre faktorer som bør vies oppmerksomhet er betongens resistivitet og overdekning. Jo større resistivitet desto mindre variasjon vil det bli i potensialmålingene (Geiker og Michel, 2017a). Ved økende betongoverdekning vil potensialforskjellen mellom anoden og katoden bli mindre. Dette impliserer at det blir vanskeligere å lokalisere et lite område med rust jo større overdekningen er (Elsener et al., 2003). Det munner ut i at alle disse faktorene er viktige å ta hensyn til før man skal tolke eventuelle resultater, og at det ikke gir et pålitelig resultat å tolke EKP-målingene alene.

## 2.5 Resistivitet

Armeringskorrosjon kan som nevnt oppstå dersom for eksempel kloridioner fraktes gjennom betongens poresystem og kommer i kontakt med armeringen. Ioner har en elektrisk ladning, og det sies at materialets evne til å motstå denne transporten av elektrisk ladning avhenger av betongens resistivitet. Måleenheten for resistiviteten angis som  $\rho$  ( $\Omega\text{m}$ ). (Hornbostel, Larsen og Geiker, 2013)

Generelt er det slik at lav resistivitet relateres til stor risiko for korrosjon, da lav resistivitet vil si at betongen har lav evne til å motstå transport av ioner. Ved å måle resistiviteten til betongen vil man kunne påvise områder med lav resistivitet hvor det er mulig at kloridinntrengningen er raskere, og dermed forhøyet risiko for korrosjon. Disse resultatene bør ikke tolkes alene, og bør med fordel sees sammen med resultatet fra EKP-kartlegging som nevnt i kapittel 2.4. (Polder, 2001)

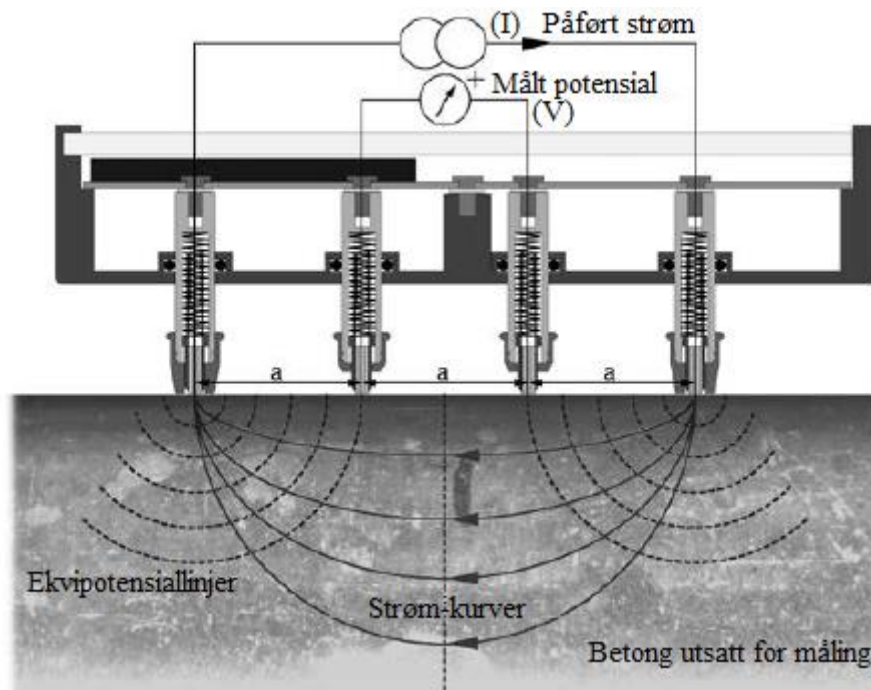
Det er viktig å påpeke at forholdet mellom betongens resistivitet og korrosjonshastigheten er et tema som fortsatt undersøkes. I Tabell 2.10 gis noen generelle retningslinjer som viser hvordan man grovt sett kan tolke resultatene fra en resistivitetsmåling med hensyn på risiko for korrosjon.

Tabell 2.10 Betong-resistivitet og risiko for armeringskorrosjon ved 20°C for PC-betong. Gjengitt etter (Proceq, 2016b).

Betongens resistivitet, $\rho$ ( $\text{k}\Omega\text{cm}$ )	Risiko for korrosjon
< 10	høy
10-50	moderat
50-100	lav
> 100	neglisjerbar

Måling av resistivitet foregår ofte ved bruk av et måleinstrument med 4 sonder, en såkalt Wenner Probe. Et slik instrumentet med navn Resipod benyttes i denne oppgaven. Frekvensen for apparatet er 40 Hz. Figur 2.7 viser prinsippet for måling av resistiviteten. Den viktigste faktoren som er avgjørende for å få pålitelige målinger er å ha god kontakt mellom betongoverflaten og målesondene (Proceq, 2016b). Dette kan gjøres ved å benytte medfølgende svamper utenpå sondene som hele tiden holdes fuktige ved å dyppes i vann.

Betongens resistivitet avhenger av faktorer som betongens porøsitet, kjemisk sammensetning, poreløsninger og porestruktur (Polder, 2001). Pozzolaner som SF, BFS og FA bidrar til mindre porøsitet og finere porestruktur. Som en følge vil da resistiviteten øke.

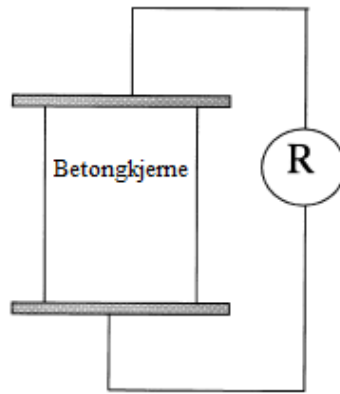


Figur 2.7: Prinsipp for måling av resistivitet ved bruk av Resipod. Strøm påføres de to ytterste sondene, og potensialforskjellen måles mellom de to midterste sondene. Strømmen føres av ioner i poreløsningen. Den beregnede resistiviteten avhenger av avstanden  $a$  mellom sondene. Gjengitt etter (Proceq, 2016b).

Resistivitet kan også bestemmes ut fra målt motstand på utborede kjerner fra en konstruksjon. Motstandsmåling på utborede kjerner gjøres ved å plassere kjernen mellom to metallplater, der hver metallplate er koblet til et håndholdt LCR-meter. Det må benyttes våte fiberkluter mellom kjernen og platene for å sikre god kontakt. Forskjellen i motstand mellom de to metallplatene måles og brukes til å regne ut resistiviteten i henhold til formel (7);

$$\rho = R * \frac{A}{L} \quad (7)$$

I formelen står  $\rho$  for resistivitet ( $\Omega\text{m}$ ),  $R$  betyr motstand mellom platene ( $\Omega$ ), mens  $A$  og  $L$  tilsvarer henholdsvis kjernens overflateareal ( $\text{m}^2$ ) og lengde (m).



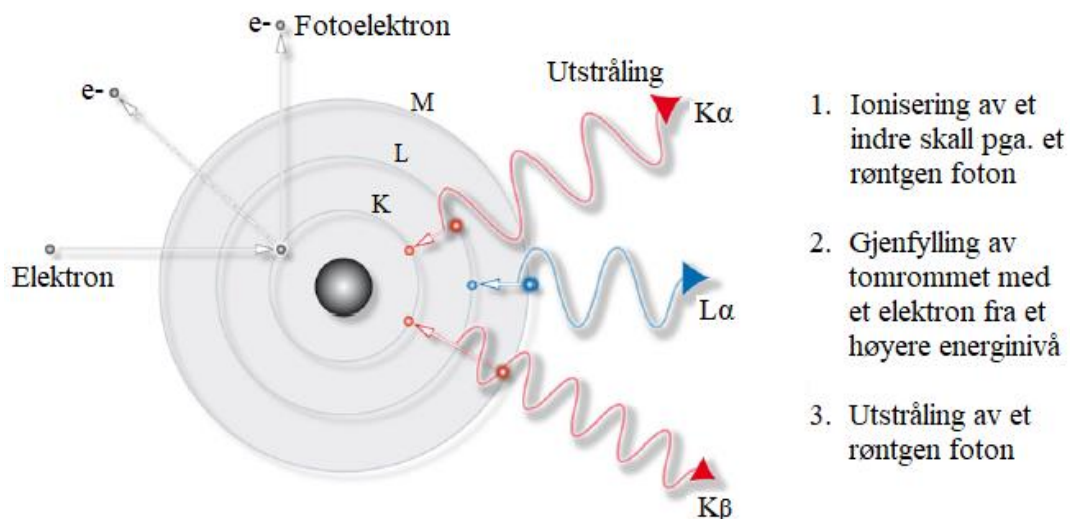
*Figur 2.8: Prinsipp for måling av motstand for en betongkjerne. Forskjellen i motstanden  $R$  måles mellom de to stålplatene, og benyttes senere i formel for å regne om til resistivitet. Gjengitt etter (Polder et al., 2000).*

Motstandsmålinger på kjerner bør tas med ulike frekvenser. Den frekvensen som gir mest nøyaktige målinger for en kjerne, er nødvendigvis ikke like nøyaktig for en annen kjerne. Det finnes derfor ikke noen retningslinje på hvilken frekvens som er mest riktig. Det anbefales at motstanden som er målt for frekvensen med lavets fasevinkel benyttes for å bestemme resistiviteten. (Thoresen, Hornbostel og Geiker, 2016)

## 2.6 Micro X-Ray Fluorescence ( $\mu$ -XRF)

$\mu$ -XRF er et verktøy som kan benyttes for å analysere elementfordeling i betong. Det er nyttig for å undersøke selvreparasjon av riss og karakterisering av stoffer i utfellingen.  $\mu$ -XRF benytter røntgenstråling for å eksitere partikler slik at det fremkalles karakteristisk røntgenfluorescens, altså lys, fra atomer i betongprøven som er utsatt for analysen. To fordeler med dette instrumentet er at det er mindre sensitivt til overflateruhet i forhold til andre slike instrumenter, og at det trengs lite eller ingen forberedelser av betongprøven i forkant av analysen. I tillegg kan man i forhold til andre instrumenter måle relativt store prøver, det vil si rundt 20 x 15 cm. (Danner, De Weerd og Geiker, 2017)

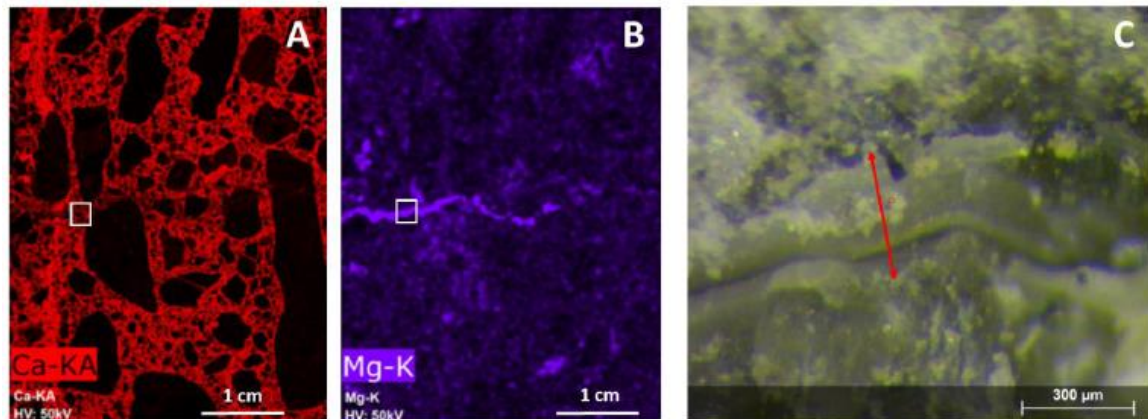
Figur 2.9 viser prinsippet der elektroner eksiteres ved tilføring av energi fra røntgenstråler. Et elektron hopper så inn for å fylle dette tomrommet slik at det sendes ut røntgenfotoner. Energien som sendes ut vises som røntgenfluorescens (BRUKER, 2015).



Figur 2.9: Prinsipp for  $\mu$ -XRF. Et elektron i det innerste skallet, k-skallet, eksiteres. Et elektron fra et skall med høyere energinivå faller ned for å fylle igjen gapet, og det blir sendt ut røntgen-fotoner. Gjengitt etter (BRUKER, 2015).

For å undersøke selvreparasjon av riss kan det benyttes nærbilder fra  $\mu$ -XRF for å undersøke en eventuell utfelling. Hvordan dette kan se ut illustreres i Figur 2.10. Deretter kan punktanalyser benyttes for å undersøke hvilke stoffer denne utfellingen består av (Danner, De Weerd og Geiker, 2017). Denne analysen kan kun indikere hvilke grunnstoffer utfellingen består av, men kan ikke fortelle direkte hvilke kjemiske forbindelser det dreier seg om. Resultatet man får forteller for eksempel at utfellingen består av magnesium og

kalsium, men ikke hvorvidt det dreier seg om for eksempel magnesiumhydroksid eller kalsiumkarbonat.



*Figur 2.10: Illustrasjon av hvordan  $\mu$ -XRF kan benyttes til å undersøke selvreparasjon. De to første bildene viser kartlegging av grunnstoffene A) kalsium og B) magnesium i en spesifikk betongkjerne. Bilde C) viser nærbilde av et selvreparert riss. Den røde pilen i bilde C) indikerer opprinnelig rissvidde, og man kan se at en utfelling har tettet risset nesten fullstendig. Kopi fra (Danner, De Weerd og Geiker, 2017).*

$\mu$ -XRF er et relativt nytt verktøy på NTNU, der kalibrering med standardprøver ikke er utført enda. På oppgavetidspunktet kan det derfor ikke bestemmes mengde av de ulike stoffene i prøvestykket. Maskinen fastslår hvilke grunnstoffer som finnes og hvor intens spredningen er, men fastslår ikke hvor store mengder som finnes. De ulike fargeintensitetene er derfor bare sammenlignbare innen samme bilde.

## 3. Eksperimentelle undersøkelser

### 3.1 Materialer

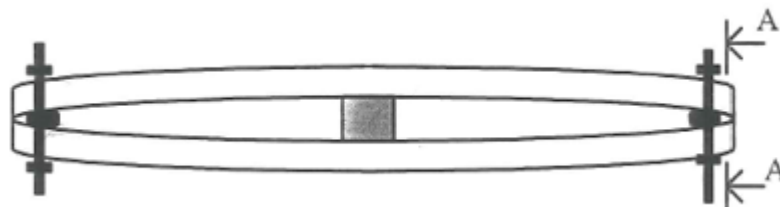
#### 3.1.1 Informasjon om feltstasjon

I dette prosjektet skal det undersøkes 3 armerte betongbjelker fra Statens vegvesens feltstasjon ved Sandnessjøen i Nordland. Feltstasjonens plassering illustreres i Figur 3.1. Feltstasjonen ble etablert i 1993, betongbjelkene er dermed 25 år gamle på undersøkelsestidspunktet.



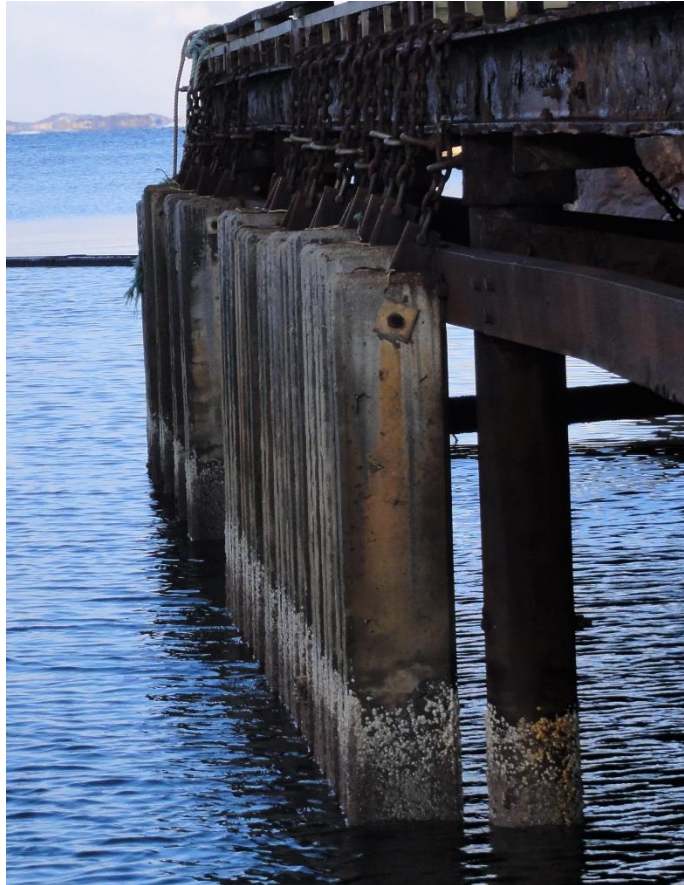
Figur 3.1: Plassering av feltstasjon i Sandnessjøen. Kopi fra (Danner og Geiker, 2017).

Informasjon om feltstasjonen er hentet fra Holtmon og Isaksen (1994). Feltstasjonen består opprinnelig av bjelker som er støpt med 17 forskjellige betongblandinger. Figur 3.3 viser bjelkene i feltstasjonen. På bjelkene som skal undersøkes er det produsert riss i strekksonen med en avstand på ca. 10-15 cm og rissdybde på ca. 70-90 mm. Rissviddene var på det tidspunktet 0,1 - 0,2 mm. To og to bjelker ble koblet sammen for å opprettholde åpne riss. Bjelkene ble koblet sammen som illustrert i Figur 3.2, slik at rissene forblir åpne.



Figur 3.2: Skisse av hvordan to bjelker er koblet sammen for å opprettholde åpne riss. Bjelkene er oppspennet ved hjelp av en gjennomgående bolt i hver ende. I midten er det plassert en trekloss som skaper en liten svai i bjelkene. Kopi fra (Holtmon og Isaksen, 1994).





*Figur 3.3: Feltstasjonen der betongbjelkene er hengt opp fra fergekaien. Nederste del av bjelken er alltid nedsenket i vann. (Foto: Tobias A. Danner)*

### **3.1.2 Bjelker**

Det skal undersøkes 3 opprissede bjelker med ulik betongblanding, henholdsvis blanding B, E og F. Bjelkene som skal undersøkes er sammenkoblet to og to som vist i Figur 3.2, hvor bare en av disse skal undersøkes for hver av blandingene. Blandingene inneholder ulikt innhold av SF, samt at en resept inneholder FA. Bjelkene har en geometri på 3000 x 300 x 150 mm. Rissene ble dannet ved 4 punkts bøyning i strekksonen. Bjelkene er armert til en side med Ø16 armering og 25 mm overdekning, se Vedlegg A – Tegninger av bjelker fra feltstasjonen. Materialinformasjon om de utvalgte bjelkene finnes i Tabell 3.1, mens detaljerte betongresepter finnes i Vedlegg B – Betongresepter.



Tabell 3.1: Betongblandinger for de ulike bjelkene som undersøkes i oppgaven. Kopi fra (Danner og Geiker, 2017).

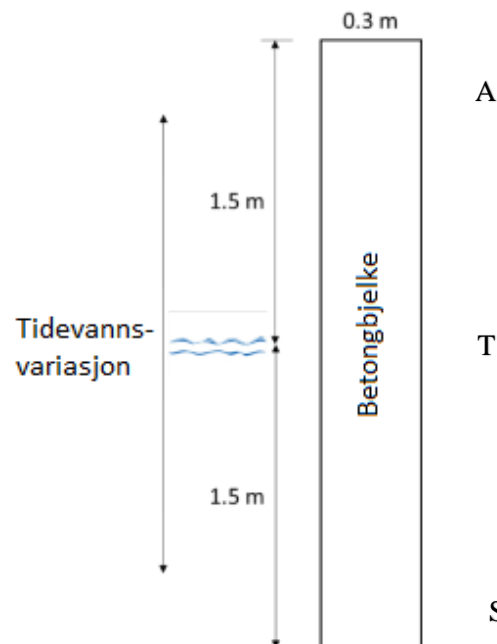
Miks	Ekv. w/c <sup>1</sup>	Sement	Sement (kg/m <sup>3</sup> )	Silikastøv <sup>3</sup>	Luft
B	0,36	Norcem P30	373	4,2	4%
E	0,37	Norcem MP30 <sup>2</sup>	384	3,5	4%
F	0,37	Norcem P30	398	12,5	4%

<sup>1</sup> ekvivalent w/c = w/(c+(k\*s)); k=2

<sup>2</sup> 20% FA iblandet sement %

<sup>3</sup> mengde SF gitt i vekt av sement; effektivitetsfaktor k=2

Bjelkene er konstant eksponert for marine forhold. De er montert slik at den øvre delen av bjelkene er eksponert for atmosfære/skvalpesone, den midterste delen er eksponert for tidevannsendringer, mens den nederste delen er permanent nedsenket i sjøvannet. De øverste 50 cm av bjelkene blir ikke nedsenket i vann annet enn ved springflo, mens de nederste 50 cm alltid er nedsenket. Gjennomsnittlig vann-nivå er på midten av bjelken, der tidevannsendringene tilsvarer ca. ±0,5 til ±1,4 meter. Dette gir 3 ulike eksponeringssoner: A= Atmosfære/skvalpesone, T= Tidevannssone, S= Nedsenket sone. Figur 3.4 illustrerer variasjonen i disse eksponeringsforholdene og plassering av sonene.

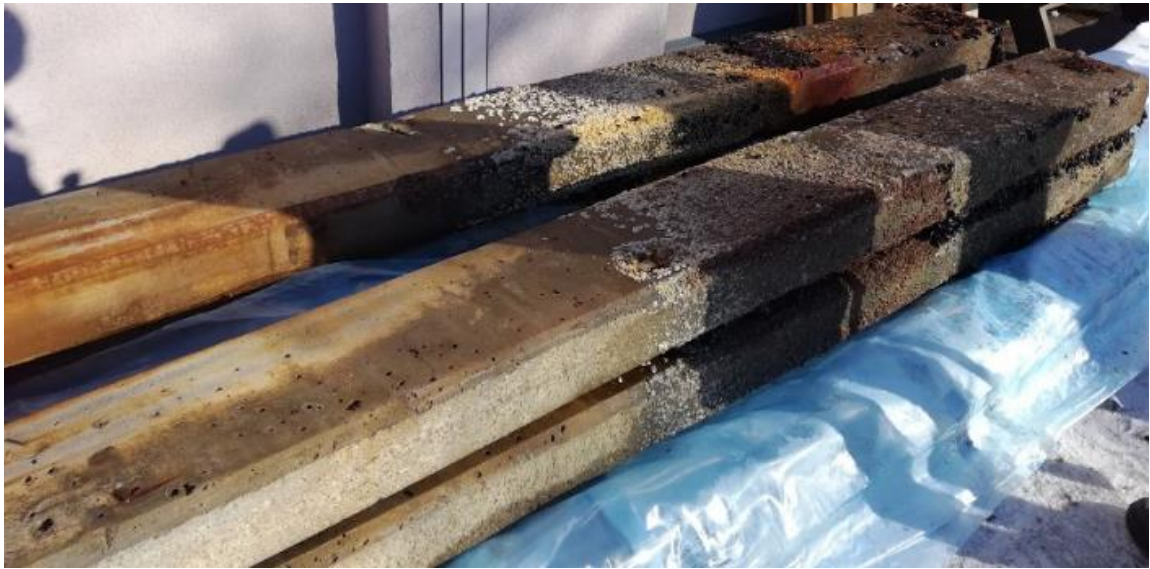


Figur 3.4: Deler av betongbjelkens geometri, der 0,3 meter er bredden og 3 meter er lengden. Det illustreres at gjennomsnittlig vann-nivå er på midten av bjelken, der tidevannsvariasjonen varierer langs pilene. Hentet fra (Danner og Geiker, 2017).

### 3.1.3 Visuell beskrivelse av bjelker

I dette underkapittelet presenteres bilder som viser hvordan de aktuelle bjelkene faktisk ser ut. I tillegg er det skissert en tegning som gir oversikt over bjelkene der alle gjennomgående riss er tegnet inn, se Figur 3.7. Alle bilder er tatt etter at bjelkene ankom NTNU ved oppstart av undersøkelser. Overflaten til hver bjelke er dokumentert med kamera og kan finnes i Vedlegg E – Overflatebilder fra visuell inspeksjon.

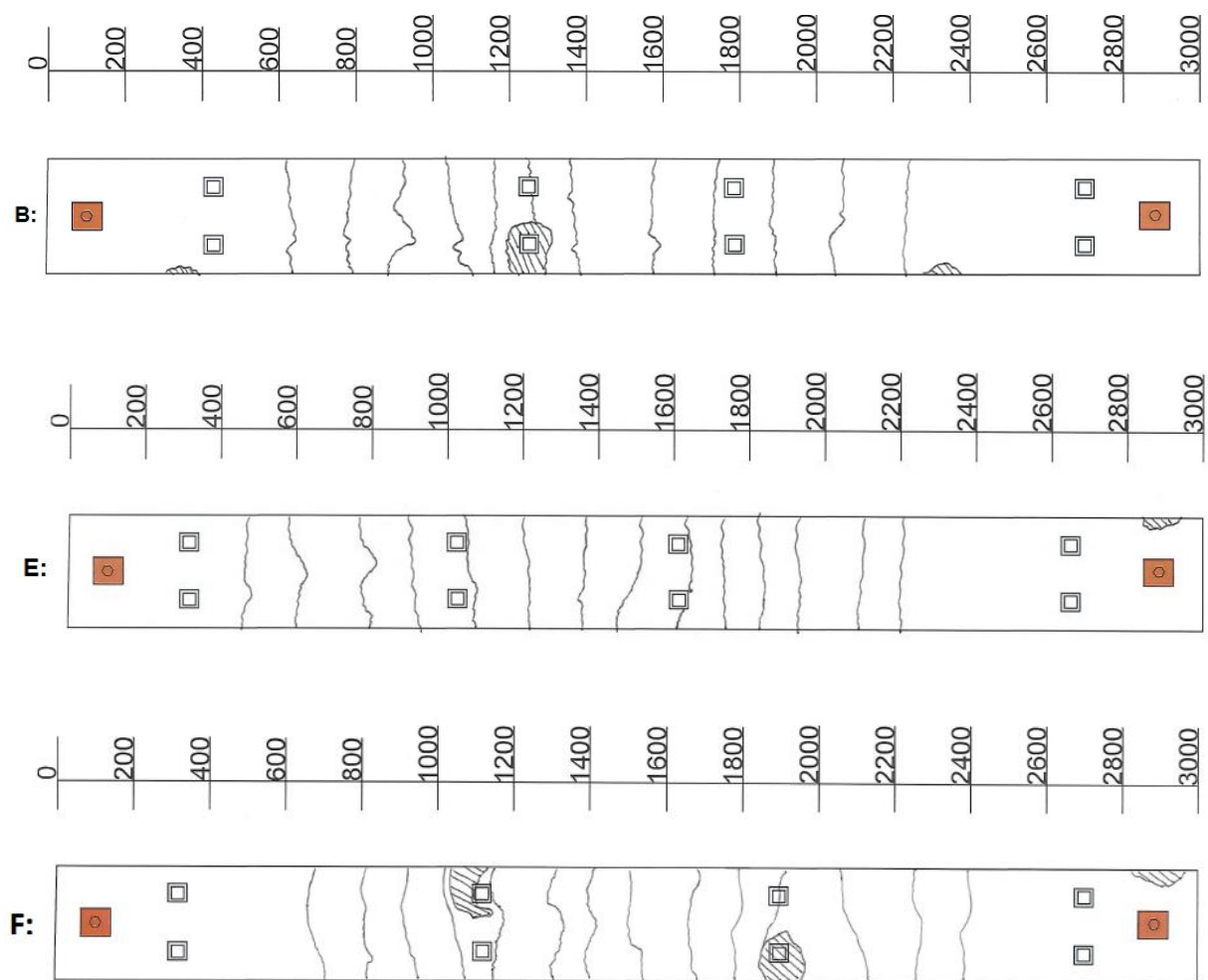
Som nevnt er bjelkene opprinnelig koblet sammen i par. Det er alltid den øverste bjelken på bildene som undersøkes i denne rapporten. Det er toppflaten til denne bjelken som omtales som bjelkens overflate.



*Figur 3.5: Bjelkenes utseende ved ankomst på NTNU, før rengjøring. (Eget foto)*



*Figur 3.6: Bjelkenes utseende etter rengjøring. Bjelkene er her plassert i NTNUs laboratorium. (Eget foto)*



Figur 3.7: Skisse av overflaten på bjelke B, E og F. Bolteplatene er inntegnet med oransje i hver sin ende, mens de grå kvadratene illustrerer omtrentlig plassering av armeringsstoler. De vertikale strekene indikerer eksisterende riss, mens de skraverte områdene indikerer avskalling. 0 meter er starten av atmosfæresonen og 3 meter er slutten av nedsenket sone.

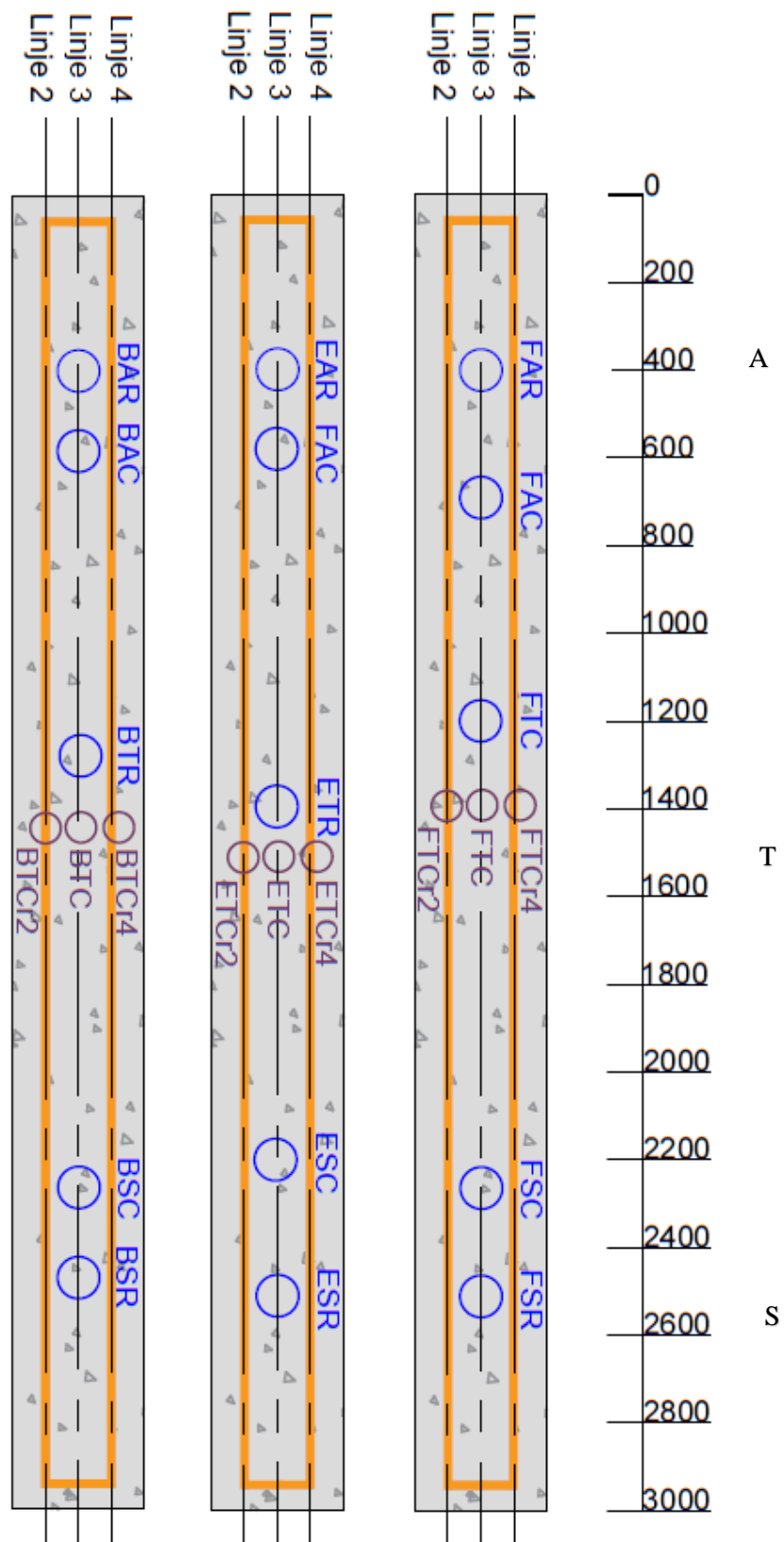
### 3.1.4 Beskrivelse av kjerner med merking

Det planlegges å i alt ta ut åtte kjerner fra hver bjelke; to kjerner fra hver eksponeringszone, der en av disse tas ut over et riss, samt en referansekjerne uten riss. I tillegg skal det i sone T tas ut to ekstra kjerner over armeringen.

Figur 3.8 viser plassering av kjernene som skal bores ut, i tillegg står det markert hvordan de skal merkes. Merkingen følger navngivningen som er bestemt i prosjektet “Ferjefri E39 - WP 7.1.1 Betydning av krav til rissvidder og trykkavlastning for bestandighet av armerte betongkonstruksjoner”. Det gjøres for at det ikke skal forekomme feil eller usikkerheter knyttet til navn og plassering av kjernene. Forklaring til navngivningen finnes i Tabell 3.2.

Tabell 3.2: Forklaring til merking av kjerner.

Symbol	Posisjon	Forklaring
<b>B, E, F</b>	1	Betongblanding
<b>A, T, S</b>	2	Eksponeringszone
<b>R</b>	3	Referansekjerne uten riss
<b>C</b>	3	Kjerne med riss
<b>r</b>	4	Kjerne tatt over armering



Figur 3.8: Posisjon for utborede kjerner med merking. Fra venstre: Bjelke B, E og F. De grønne sirkelene illustrerer kjerner med  $d = 95$  mm, mens de røde sirkelene indikerer kjerner med  $d = 70$  mm. Aksen starter ved 0 meter i atmosfærisk sone og slutter ved bjelkens ende på 3 meter som er slutten på nedsenket sone.

### 3.2 Metode

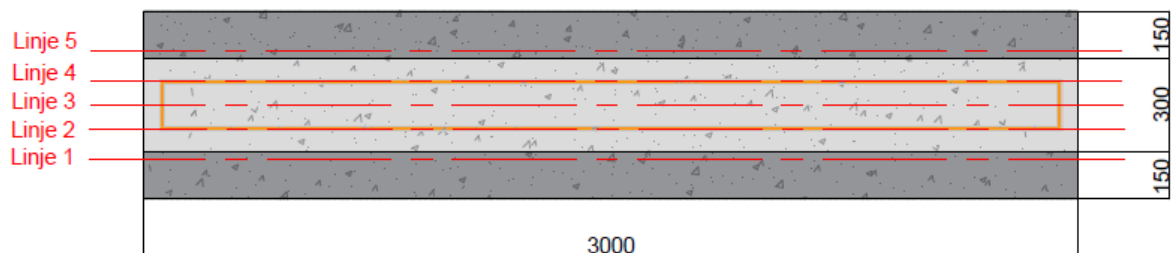
For å samle langtidsdata for bjelkene fra feltstasjonen, ble bjelkene undersøkt i laboratorium på NTNU. Undersøkelsene som ble utført med respektive utstyr er oppsummert i Tabell 3.3, samt en oversikt over hvilke undersøkelser som ligger til grunn for å besvare formål A og B. Formålene gjentas nedenfor til påminnelse.

- A. Påvirkning av miljø og bindertype på selvreparasjon av riss
- B. Påvirkning av riss med hensyn på armeringens tilstand

*Tabell 3.3: Oversikt over utførte laboratorieundersøkelser med respektive utstyr. Hvilke undersøkelser som skal betraktes for hver av de to formålene (A, B) indikeres med X i de to kolonnene til høyre. (X) indikerer en planlagt undersøkelse som ikke gikk etter planen.*

Type undersøkelse	Utstyr	Formål A	Formål B
Visuell inspeksjon	Kamera	X	X
Måling og dokumentasjon av rissvidder	Rissviddemåler, kamera	X	X
Overdekning	Profometer		X
EKP	Proceq		X
Resistivitet	Wenner Probe LCR-meter		X X
Karbonatisering	Tymolftalein-løsning		X
Kloridinntrengning	Sølvnitrat-løsning (AgNO <sub>3</sub> ) M4 Tornado $\mu$ -XRF		(X) X
$\mu$ -XRF	M4 Tornado $\mu$ -XRF	X	X

For alle grafer og skisser som heretter presenteres, vil alltid 0 m angi starten av atmosfæresonen og 3 m slutten av nedsenket sone. For enkelte målinger var det også viktig å alltid ta målingene på samme sted i forhold til armeringen. Det ble derfor på overflaten til hver bjelke delt inn i linjer i forhold til armeringens beliggenhet. Figur 3.9 illustrerer hvordan overflaten med sidekanter er delt inn i linje 1 – linje 5. Det vil videre i beskrivelse av utførelse refereres til denne figuren for forklaring av linjene.



Figur 3.9: Inndeling av linjer som relateres til utførelse av målinger. Figuren forestiller en bjelke med utbrettede sideflater sett ovenfra. Det lysegrå området er overflaten, mens de mørkegrå områdene er sideflatene brettet ut. Linje 1 og 5 går over armeringen langs bjelkens sidekant, mens linje 2 og 4 går over armeringen på bjelkens overflate. Linje 3 er plassert midt mellom armeringsjernet på begge sider. Målsettingen til høyre viser bredden på sidekantene og overflaten.

### 3.2.1 Klargjøring og behandling av bjelker

I dette underkapittelet beskrives det hvordan bjelkene ble behandlet og oppbevart etter at de ble tatt opp av sjøen og fraktet til NTNU. Bjelkene ankom NTNU med lastebil den 14.03.18. Bjelkene var innpakket i plast ved ankomst. De ble oppbevart ute til formiddagen den 15.03.18. Tabell 3.4 gir en oversikt over værdata for de aktuelle dagene da bjelkene ble oppbevart utendørs.

Tabell 3.4: Oversikt over værdata for de aktuelle dagene da bjelkene ble oppbevart utendørs. (-) angir at informasjon ikke er tilgjengelig. Hentet fra (Meteorologisk institutt, 2018).

Værdata	Onsdag 14.03.18	Torsdag 15.03.18
Værforhold	Overskyet	Sol
Middeltemp. (°C)	-1,8	-5,7
Nedbør (mm)	0,4	0,0
Vind (m/s)	1,8	2,4

Oppstart av undersøkelser foregikk den 15.03.18. Før dette ble bjelkene rengjort utendørs. For å fjerne skjell og noe tare ble det brukt skraper av stål, og deretter høytrykkspyler for å få overflaten så ren som mulig.





*Figur 3.10: Bruk av stålskraper for å fjerne skjell på bjelkene. (Eget foto)*

Bjelkene ble så transportert inn i laboratoriet hvor de ble pakket inn i plast for å beholde fuktnivået. Etter at bjelkene ble fraktet inn i laboratoriet den 15.03.18 ble det lagt 3 striesekker som hadde ligget i vann over hver bjelke. Disse lå på til neste dag, ca. 17 timer. Det ble gitt beskjed om at dette ikke skulle gjøres neste gang. Grunnen til dette er at hvis betongoverflaten er i kontakt med fukt så kan klorider fraktes opp fra innsiden av betongen til overflaten. Dette ville senere gitt støy ved analyser av elementfordeling, og ville ikke gitt et riktig bilde av for eksempel kloridinntrengning i betongen.

Neste dag, fredag den 16.03.18, ble det tatt målinger av rissvidder, EKP og resistivitet. Etter at målingene var utført, ble det lagt to vannkar inn mellom hver sammenkoblet bjelke (ikke i direkte kontakt), deretter ble bjelkene pakket tett inn i plast. Det ble bestemt at det skulle plasseres to vannkar mellom bjelkene for i en viss grad å opprettholde det fuktige miljøet bjelkene har vært eksponert for tidligere. Temperaturen på laboratoriet der bjelkene ble lagret da undersøkelsene pågikk holdt ca. 20 °C. Det antas at temperaturen har vært noe høyere når det har var sol ute.



Den 21.03.18 ble alle bjelkene avspent. Det minnes om at hver bjelke som ble undersøkt var koblet sammen med en annen bjelke som ikke ble undersøkt i denne oppgaven. Dette ble gjort ved at bolten ved opphengsfestet ble løsnet med oppløsende middel og skiftenøkkel. Da alle bolter var fjernet ble den øverste bjelken løftet opp med gaffeltruck og plassert på traller. De ble deretter pakket inn i plast og lagt på kjølerom der de skulle ligge i ca. 13 dager. Kjølerommet holdt ca. 5 °C. Den andre delen av de sammenkoblede bjelkene ble pakket inn og oppbevart ute før de skulle sendes tilbake til Sandnessjøen. Tabell 3.5 gir en oversikt over de ulike temperaturene som bjelkene har blitt utsatt for ved lagring og under undersøkelser, samt varigheten av denne eksponeringen.

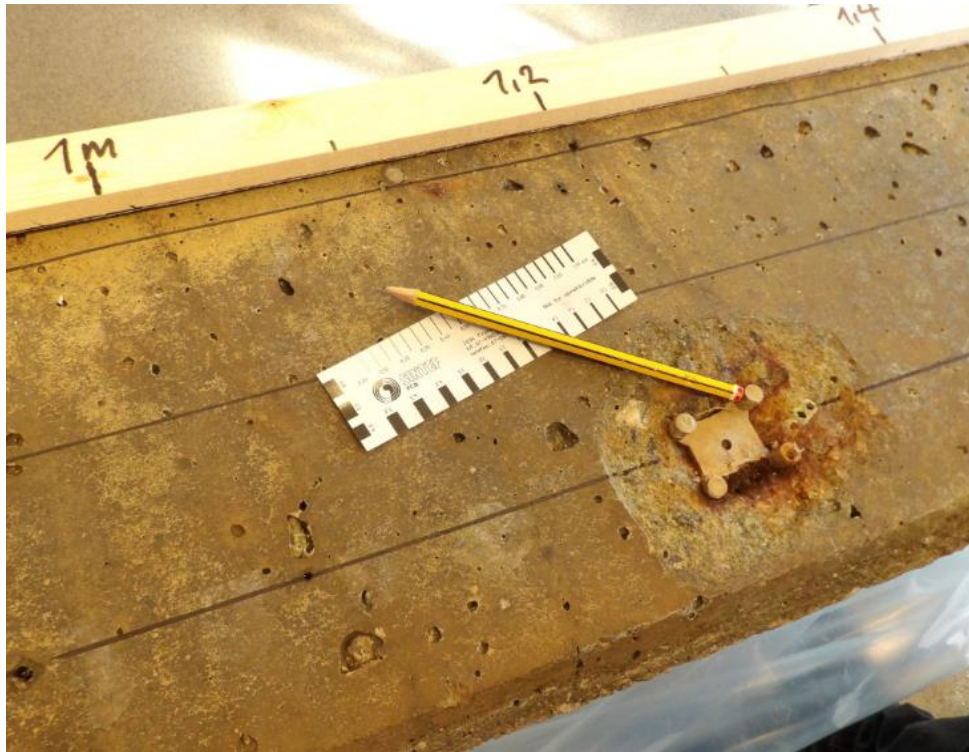
*Tabell 3.5: Temperaturer som bjelkene har vært utsatt for ved lagring og under undersøkelser. Oppbevaringen ute defineres fra det tidspunkt bjelkene ankom NTNU 14.03 til de ble fraktet inn i lab 15.03. Varigheten gir et omtrentlig anslag på hvor lenge bjelkene ble utsatt for gitt temperatur.*

	Oppbevaring ute	Oppbevaring i lab	Oppbevaring kjølerom
<b>Temperatur °C</b>	-5,7 til -1,8	20	5
<b>Varighet</b>	18 timer	6 dager	13 dager

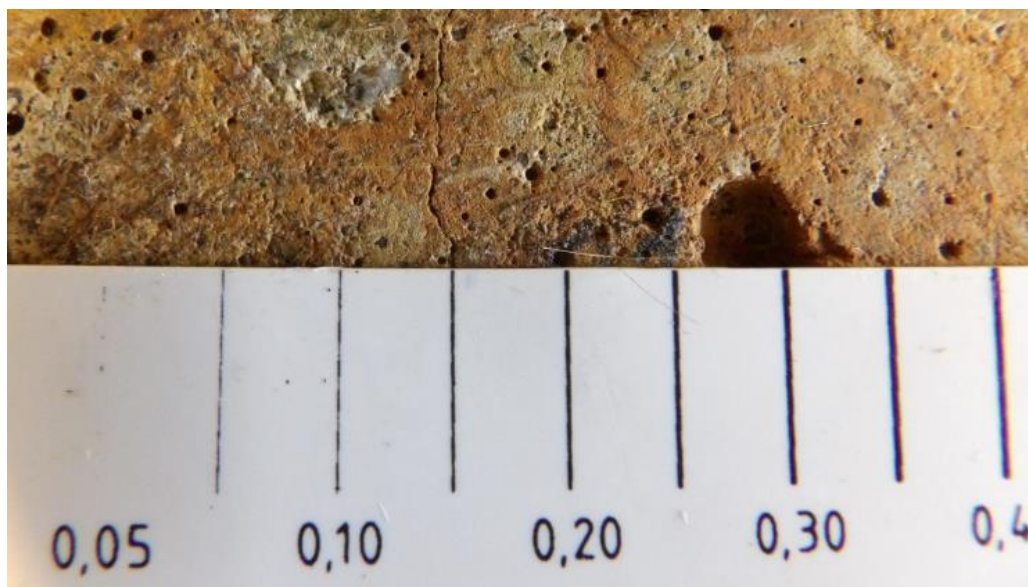
### 3.2.2 Visuell inspeksjon og måling av rissvidder på bjelker

Etter rengjøring ble bjelkene inspisert visuelt. Dette ble gjort for å danne et bilde av bjelkenes situasjon, og for å få et tidlig overblikk på hva som kan være tilstanden for de ulike bjelkene. Det ble tatt fotografier av overflaten på hver av bjelkene med ca. 0,4 m avstand, se Vedlegg E – Overflatebilder fra visuell inspeksjon.

Måling av rissvidder ble gjort i to omganger, først når bjelkene fremdeles var koblet sammen, og rett etter avspenning. Dette ble gjort for å kontrollere om rissviddene forble like, eller om de ble endret. Rissviddemålingene ble i begge tilfeller utført med rissviddelinjal fra Sintef, se Figur 3.12. Rissvidder ble målt over eller så nær som mulig linje 2, 3 og 4 (det vil si over armeringen og mellom armeringsjernene) i henhold til Figur 3.9. Målingene ble utført med en nøyaktighet på ca. 0,05 mm. Måling av rissvidder etter avspenning ble utført kort tid etter at boltene var fjernet. Bjelkene lå fortsatt oppå hverandre med treklosser imellom. Det er viktig å påpeke at måling av rissvidder er veldig personavhengig, og er avhengig av øyet som ser.



*Figur 3.11: Innregnede linjer på overflaten som ble benyttet ved måling av rissvidder. De to ytterste linjene mot bjelkens sidekanter er over armeringen, mens linjen i midten er mellom armeringsjernene. Hjelpelinjene er tegnet opp slik at rissviddemålingene skal tas på riktig sted i forhold til armeringen. (Eget foto)*



*Figur 3.12: Illustrasjon av måling av rissvidder med rissviddelinjal fra Sintef. (Eget foto)*

### 3.2.3 Betongoverdekning

Bjelkenes overdekning ble målt med et profometer fra Proceq SA. Profometeret fanger opp signaler fra armeringen som beskrevet i kapittel **Feil! Fant ikke referanseskilden.** Figur 3.13 illustrer hvordan profometeret ble brukt i praksis. Faktisk overdekning ble målt over linje 2 og 4, hvor armeringen ligger, for alle bjelkene. Overdekningen ble målt hver 0,2 m, slik at det ble lest av 13 verdier for hver av linje 2 og 4. Det ble lagt inn armeringsdiameter Ø16 i profometeret.



Figur 3.13: Illustrasjon av bruk av overdekningsmåleren fra Proceq. Bildet viser at det dukker opp et rødt lys når måleren har identifisert armeringsjernet, og faktisk overdekning kan leses av på skjermen. (Eget foto)

### 3.2.4 EKP

Ved utførelse av EKP-målinger ble det benyttet et måleinstrument kalt Proceq Profometer Corrosion. Målingene ble utført i henhold til Profometer-veiledningen fra Proceq (Proceq, 2016a). Alle målingene er utført med en referanseelektrode av typen kobber/kobbersulfat, Cu/CuSO<sub>4</sub>. Ved ankomst var kontaktpunktet til armeringen i samtlige bjelker ferdig etablert. Dette kan sees på Figur 3.14 der de gule ledningene som stikker ut i enden er koblet til armeringen. Som beskrevet i kapittel 3.2.1 hadde bjelkene siden dagen før vært tildekket med våte striesekker samtidig som de var pakket inn i plast. Striesekkene ble fjernet ca. en time før målingene ble utført.



EKP-målingene ble utført med hjul langs linje 1, 2, 4 og 5 i henhold til Figur 3.9. I tillegg ble det tatt punktmålinger langs linje 2 og 4. Dette ble gjort for å sammenligne målingene, da kontinuerlige målinger med hjul kun fanger opp en øyeblikks-verdi for EKP der den føres over, mens punktmålinger fanger opp stabiliserte verdier der målesonden plasseres. Figur 3.14 og Figur 3.15 viser utførelse av henholdsvis punktmålinger og kontinuerlige målinger. Det ble foretatt kontroll av en eventuell potensialforskjell mellom hjulet som brukes til kontinuerlige målinger og sonden som brukes til punktmålinger. Denne verdien burde fortrinnsvis vise 0 mV. Forskjellen ble målt til å utgjøre 3 mV, noe som ble regnet som en akseptabel verdi. Målinger med hjul ble derfor benyttet videre av praktiske årsaker.



*Figur 3.14: Utførelse av EKP-punktmålinger langs linje 2 på bjelke F. Målesonden plasseres på bjelken med jevne mellomrom, og verdier for EKP registreres på den håndholdte enheten. På bildet er det synlig hvordan det er etablert elektrisk kontakt mellom instrumentet og armeringen via den gule ledningen i enden av bjelken. (Foto: Tobias A. Danner)*



*Figur 3.15: Utførelse av EKP-målinger ved hjelp av hjul langs linje 1 på bjelke B. Målingene startes manuelt på skjermen til den håndholdte enheten i det man begynner å føre hjulet langs bjelken, og avsluttes i enden av bjelken. Verdier for EKP fanges opp kontinuerlig langs bevegelsesbanen. (Foto: Tobias A. Danner)*

### **3.2.5 Måling av resistivitet på bjelker**

Betongens resistivitet ble målt med en Wenner Probe fra Proceq. Målingene ble foretatt samme dag som EKP-målingene da det er nødvendig med like forhold for å kunne se disse målingene i sammenheng. Bjelkene hadde ligget i romtemperatur på ca. 20 °C siden dagen før. Måleinstrumentet ble kalibrert før målingene ble utført. Resistiviteten ble målt innenfor et intervall på 0,4 m i de ulike eksponeringssonene, der det ble foretatt 20 målinger innenfor hvert område. Dette ble gjort for å få en så nøyaktig verdi av resistiviteten som mulig, da betongoverflaten kan ha forhøyede resistivitets-verdier lokalt på grunn av for eksempel luftbobler. I tillegg vil resistiviteten bli forstyrret dersom armeringen befinner seg rett under måleenheten. Resistivitetsmålingene vil da bli betydelig lavere enn for korrekte, uforstyrrede målinger. Det ble derfor lagt vekt på å foreta målingene med ulike posisjoner innenfor armeringens beliggenhet. I tillegg var det viktig at det var fuktighet mellom betongen og måleinstrumentet for å få god nok kontakt. Som illustrert i Figur 2.7 så består måleenheten av 4 sonder på undersiden som er i kontakt med betongen. På disse ble det benyttet svamper som til enhver tid ble holdt fuktige ved hjelp av en skål med vann.



*Figur 3.16: Måling av resistivitet med Resipod fra Proceq. De våte flekkene på betongen stammer fra svampene på måleinstrumentet som til enhver tid ble holdt fuktig. (Eget foto)*

### **3.2.6 Utboring og splittelse av betongkjerner**

Utboring av kjerner ble utført av Sintef den 04.04.18 og 05.04.18. Utboringen foregikk ved bruk av en vannkjølt betongbor. Det ble lagt vekt på å benytte minst mulig vannkjøling da det kan være fare for utvasking av klorider. Boringen foregikk kontinuerlig, det vil si at det var ingen opphold underveis i boringen. Det ble boret ut kjerner i henhold til Figur 3.8 med diameter 95 mm og 70 mm. Etter utboring av en kjerne ble kjernen umiddelbart tørket med en fuktig klut. Deretter ble kjernen pakket inn i plast, navngitt, og deretter lagt til oppbevaring på kjølerom v/ 5 °C inntil videre. Kjernene ble etter utboring splittet i to på grunn av videre undersøkelser. Dette ble også utført av Sintef.

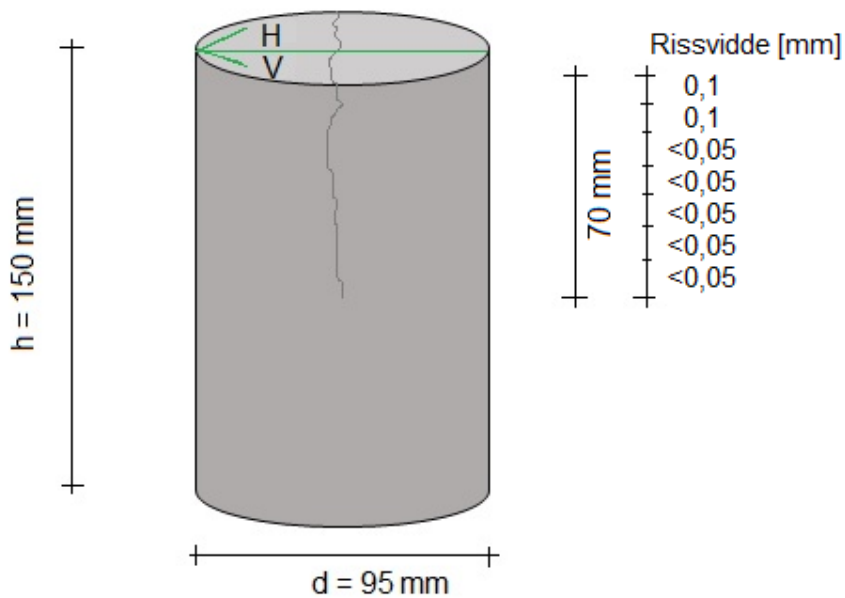




*Figur 3.17: Utboring av kjerner med en vannkjølt betongbor. (Eget foto)*

### **3.2.7 Visuell inspeksjon og måling av rissvidder på kjerner**

Det ble utført en egen visuell inspeksjon på de utborede kjernene. Den visuelle inspeksjonen av riss i kjernene brukes for å studere om rissene er selvreparert, og om en eventuell forskjell mellom de ulike eksponeringssonene og bjelkereseptene er synlig. Den visuelle inspeksjonen brukes i tillegg til å identifisere punkter det kan være interessant å se nærmere på i  $\mu$ -XRF. Det ble notert eventuell selvreparasjon av riss eller tegn på korrosjon. Her ble rissvidden på overflaten målt på nytt, samt dybden av risset på begge sider av kjernen. På overflaten ble det målt rissvidder som var representative for hele kjernen i stedet for å konsekvent måle så nær som mulig den påtegnede linjen, slik det ble gjort for bjelkene før avspenning. Det ble også foretatt rissviddemålinger innenfor et område på 10 mm langs risset på hver side av kjernen, se Figur 3.18. På hver kjerne var det inntegnet en grønn pil i overflaten. Pilen viser alltid retning mot atmosfærisk sone. Målingene som ble tatt langs rissdybden på hver side av kjernen omtales alltid som målinger utført på venstre og høyre side av denne pilen.



Figur 3.18: Illustrasjon av måling av rissvidder langs dybden av riss på utborede kjerner. Rissviddene er målt innenfor et område på 10 mm langs en målt rissdybde på for eksempel 70 mm. Geometrien  $h = 150$  mm og  $d = 95$  mm er faktisk geometri for enkelte kjerner.

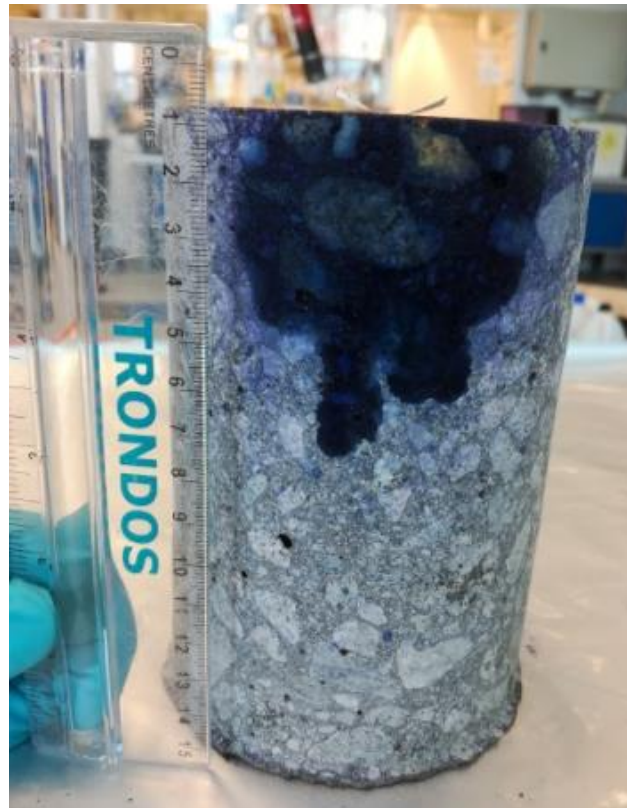
### 3.2.8 Karbonatiseringsdybde

Før kjernene ble splittet ble det målt karbonatiseringsdybde inn fra betongoverflaten. Dette ble utført på 3 kjerner fra hver bjelke, se Tabell 3.6. Det ble benyttet tymolftalein-løsning som pH-indikator. Målingene ble utført rett etter kjernene ble tatt ut fra kjølerom. Tymolftalein-løsning ble sprayet på ene siden av kjernen der risset befant seg.

Tabell 3.6: Oversikt over hvilke kjerner som ble undersøkt for karbonatisering ved bruk av tymolftalein.

Ph-indikator	Kjerner								
Tymolftalein	BAC	BTC	BSC	EAC	ETC	ESC	FAC	FTC	FSC





Figur 3.19: Måling av karboniseringsdybde for kjerne FAC. Det er ikke noen karboniseringsfront fra overflaten. (Eget foto)

### 3.2.9 Måling av kloridinntrengning med sølvnitrat

For å bekrefte/avkrefte tilstedeværelsen av klorider, ble det sprayet på sølvnitrat ( $\text{AgNO}_3$ ) på utvalgte hele kjerner. Dersom det er kloridioner i prøven vil det dannes en hvit utfelling hvor det er klorider. Det viste seg imidlertid at denne metoden ikke var nøyaktig, og det ble bestemt at kloridinntrengningen kun skulle bestemmes med  $\mu$ -XRF.

### 3.2.10 Bestemmelse av resistivitet på utborede kjerner

Det ble utført motstandsmålinger på enkelte av de utborede kjernene. Som nevnt i kapittel 2.5 benyttes motstandsmålingene til å regne ut resistiviteten for kjernene ved hjelp av formel. Motstandsmålinger er veldig temperaturavhengig, de ble derfor utført inne på kjølerommet som kjernene hele tiden lå oppbevart, slik at kjernene ikke skulle få temperaturendringer. Kjølerommet målte på dette tidspunktet  $4,2\text{ }^\circ\text{C}$ . Målingene ble utført ved å plassere kjernen mellom to stålplater. Det ble benyttet flere lag med fuktige fiberkluter mellom kjernens overflate og platene for å sikre god kontakt med hele overflaten. Det ble sørget for at klutene ikke var for våte slik at vann ikke skulle renne nedover kjernen. Et

håndholdt LCR-meter ble koblet til platene, og motstandsmålinger ble avlest for 4 ulike frekvenser, henholdsvis 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz og 10 kHz.



*Figur 3.20: Motstandsmåling på en borekjerne. Klutene kaster skygge på øverste del av kjernen slik at den ser mørkere ut her. (Eget foto)*

### **3.2.11 Inspeksjon av armering**

Kjernene med armering ble delt i to, og armringen ble separert fra betongen for å inspiseres. Dersom armeringen har rustlignende produkter på overflaten er det nødvendig å kontrollere armeringens faktiske tilstand.

For å kontrollere armeringens faktiske tilstand, ble armeringen rengjort og inspisert visuelt. Rengjøringen foregikk ved at armeringen ble lagt i et glass med løsning bestående av 50 % saltsyre (HCl) og 50 % vann (H<sub>2</sub>O). Denne løsningen oppløser eventuelle rustprodukter og smuss på overflaten av armeringen. Glasset ble plassert i et ultralydbad med vanlig vann. Ultralydbadet ble brukt for at rengjøringsprosessen skulle gå raskere. Etter rengjøring er det synlig om det er korrosjon på armeringen, og eventuell korrosjonsårsak kan avdekkes.

### 3.2.12 $\mu$ -XRF

Etter splittelse ble en kjernehalvdel med riss, uten armering, fra hver eksponeringszone undersøkt med et M4 Tornado  $\mu$ -XRF apparat fra Bruker. Apparatet bruker et silikon detektor energidispersivt spektrometer (SDD-EDS).  $\mu$ -XRF er utstyrt med et sølv-røntgenrør og polykapillære linser som fokuserer røntgenstrålen til en punktstørrelse på 25  $\mu$ m (Danner, De Weerdts og Geiker, 2017). Det krevdes ingen spesielle forberedelser av kjernehalvdelene før undersøkelsen. En halvdel ble plassert inne i maskinen og festet med kitt for å sørge for at den lå på plass under hele undersøkelsen. Før analysene ble vakuumpumpen aktivert via en datamaskin. Alle analyser ble utført av Tobias A. Danner.

Analysen foregikk ved at maskinen først tok et oversiktsbilde av kjernen. Deretter ble analysen som undersøker elementfordeling i betongen startet. Denne analysen tar generelt ca. 2 timer. Etter denne analysen er ferdig kan det velges å studere nærbilde av rissene for å se etter en eventuell utfelling. Deretter kan disse undersøkes nærmere ved å ta punktanalyse av risset. På denne måten er det mulig å finne ut hvilke elementer utfellingen består av. Ved linje-skanning og element-avbildning av kjernene ble det brukt en spenning på 50 kV og en strømstyrke på 600  $\mu$ A. Ved punktanalyse ble en spenning på 50 kV og en strømstyrke på 200  $\mu$ A benyttet. Kammertrykket var alltid 20 mbar. Området for elementavbildningen var 155 x 95/70 mm, det vil si ca. størrelsen til hver kerne. Skanningen hadde en hastighet på 1 ms/piksel, der avstanden mellom hver piksel var 80  $\mu$ m.



Figur 3.21: En kjernehalvdel ligger klar for analyse i M4 Tornado  $\mu$ -XRF apparatet. (Eget foto)

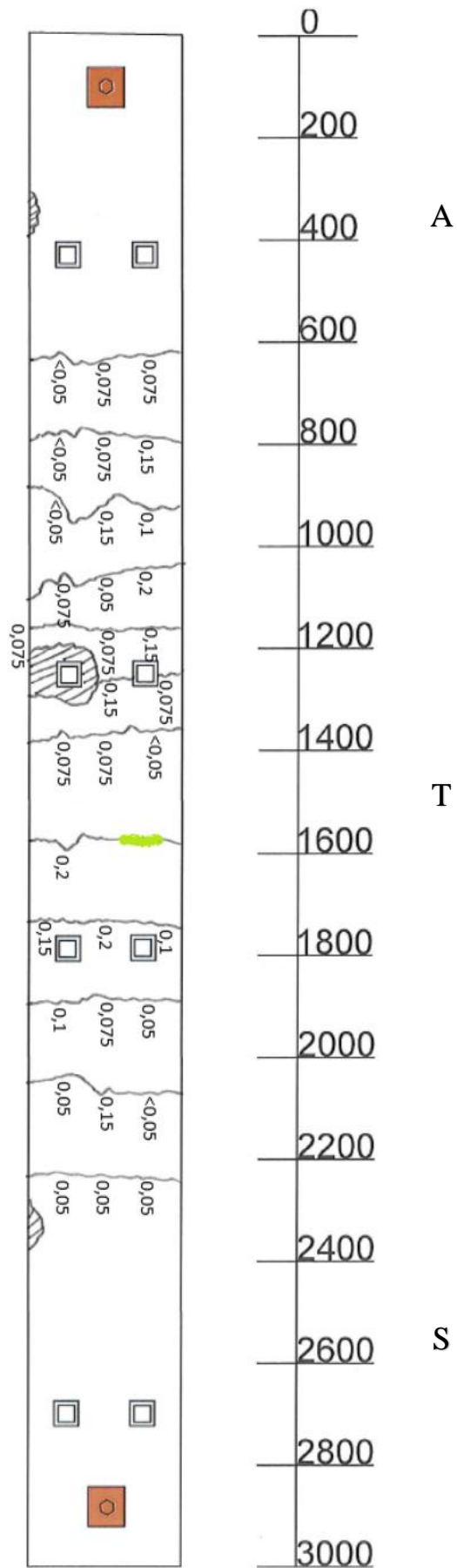


## 4. Resultater

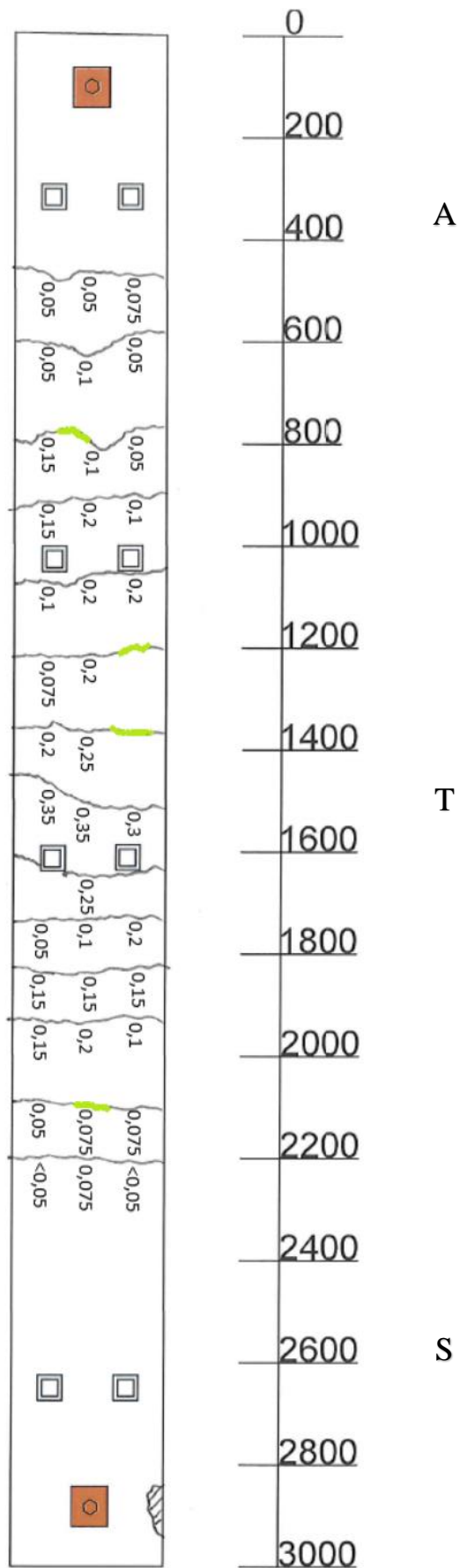
### 4.1 Visuell inspeksjon og kartlegging av riss på bjelker

I Figur 4.1 - Figur 4.3 presenteres skisser av kartlagte riss på overflaten til samtlige bjelker, samt observasjoner ved visuell inspeksjon. Bolteplatene er inntegnet med oransje i hver sin ende, mens de grå kvadratene illustrerer omtrentlig plassering av armeringsstoler. Armeringsstolene er inkludert på tegningen da disse noen steder er synlig, og omtales senere i diskusjon. De vertikale strekene indikerer eksisterende riss, mens de skraverete områdene indikerer avskalling. Rissvidder, målt i mm, står på høyre side av det tilhørende risset. Det er målt 3 rissvidder for hvert riss så nært som mulig linje 2, 3 og 4. Der det ikke er oppgitt rissvidde har ikke dette vært mulig å måle. Der det er skravert med grønn farge ble det observert mulig utfelling i overflaten som kan være antydning til selvreparasjon. 0 m er starten av atmosfæresonen og 3 m er slutten av nedsenket sone. Bilder av overflaten til hver bjelke som ble tatt ved visuell inspeksjon kan finnes i Vedlegg E – Overflatebilder fra visuell inspeksjon.

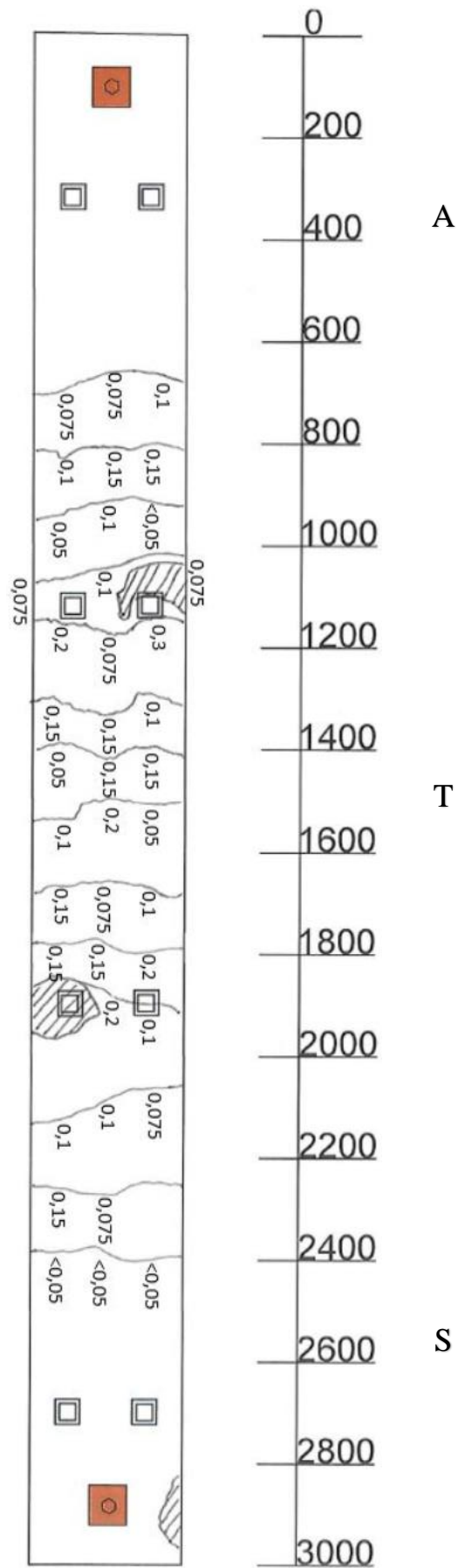
Som nevnt ble rissviddene også målt etter avspenning av bjelkene. Disse målingene viste ingen reduksjon av rissviddene. Målingene blir derfor ikke presentert videre.



Figur 4.1: Skisse av kartlagte riss på overflaten til bjelke B. Ref. forklaring i avsnitt 4.1.



Figur 4.2: Skisse av kartlagte riss på overflaten til bjelke E. Ref. forklaring i avsnitt 4.1.



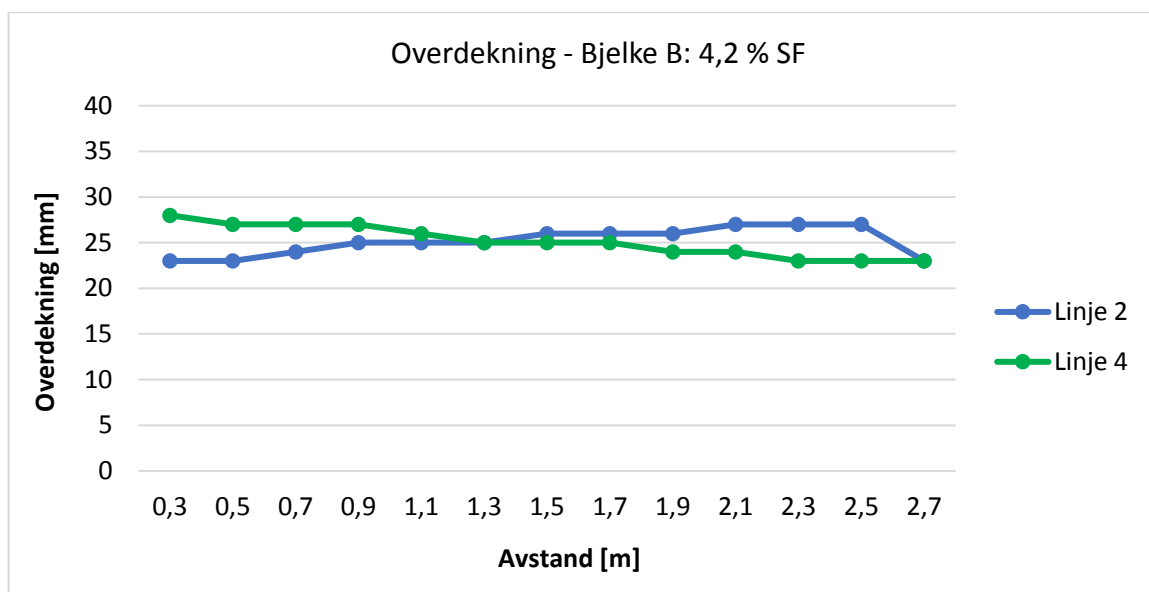
Figur 4.3: Skisse av kartlagte riss på overflaten til bjelke F. Ref. forklaring i avsnitt 4.1.



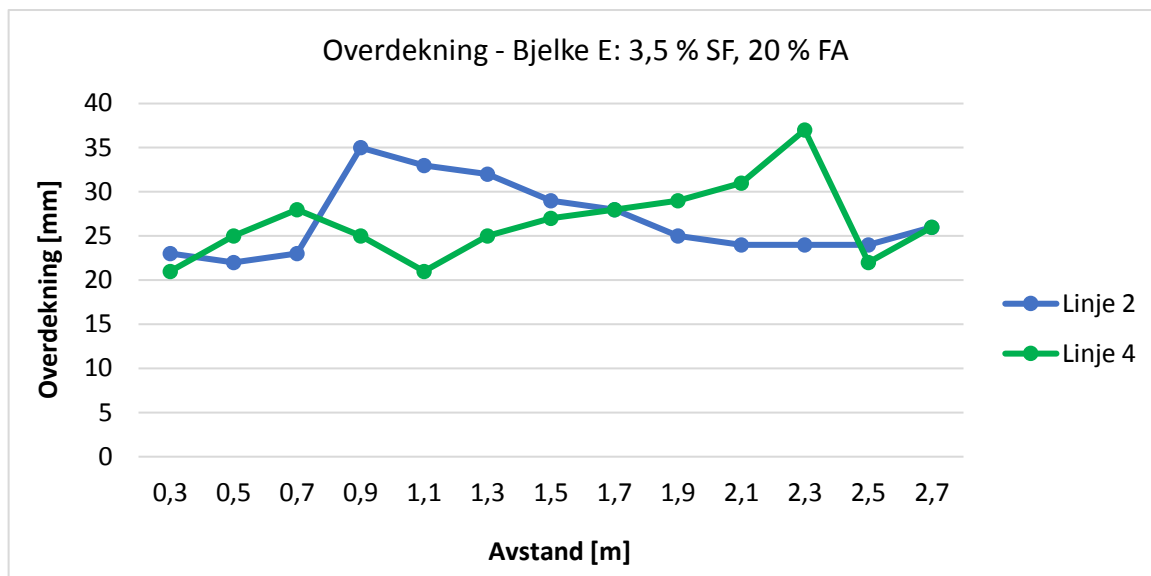
Som nevnt i kapittel 3.1.1 ble rissene på bjelkene produsert med rissvidder fra 0,1 – 0,2 mm. Det observeres her at de målte rissviddene strekker seg fra så lite som < 0,05 mm til 0,35 mm, noe som avviker fra de opprinnelige rissviddene. Tendensen er at de minste rissviddene befinner seg i atmosfære/skvalpe- og nedsenket sone, mens rissviddene er størst i tidevannssonen. Det er ikke innhentet informasjon om hvorvidt rissviddene ble kontrollert etter produksjon, men det antas at rissviddene er blitt mindre i begge ender av bjelkene på grunn av oppspenningen.

## 4.2 Overdekning

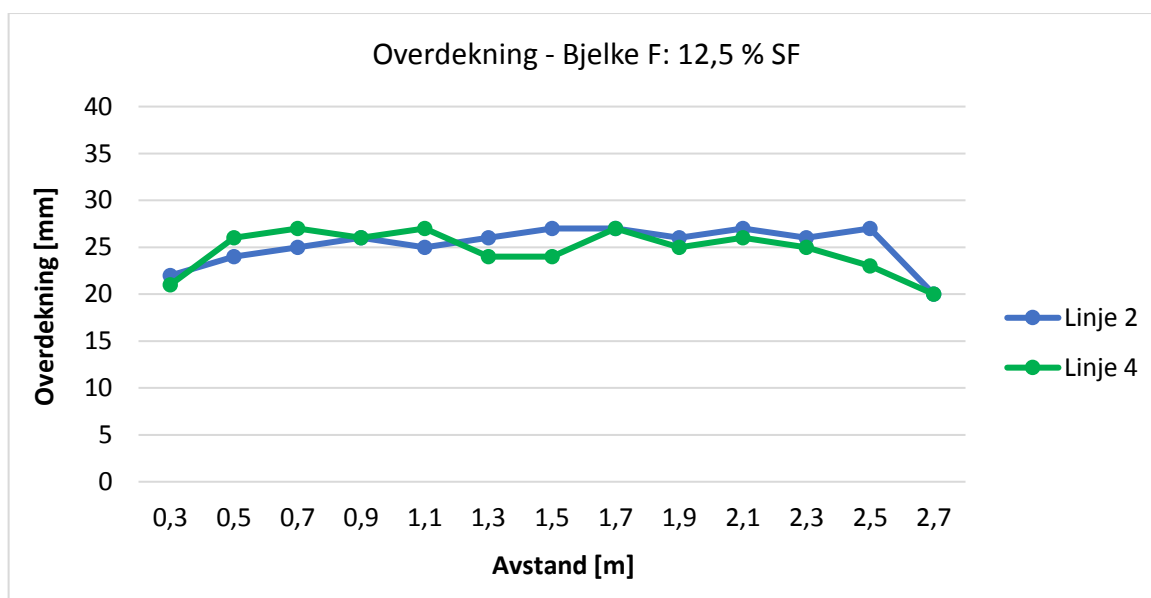
Figur 4.4 - Figur 4.6 viser resultater fra måling av overdekning langs linje 2 og 4. X-aksen angir 0 m alltid starten av atmosfæresonen og 3 m er slutten av nedsenket sone. Målingene ble tatt med start i 0,3 m og deretter hver 0,2 m til og med 2,7 m. Detaljerte verdier for overdekningen kan finnes i Vedlegg H – Detaljerte overdekningsmålinger.



Figur 4.4: Overdekningsmålinger for bjelke B.



Figur 4.5: Overdekningsmålinger for bjelke E.

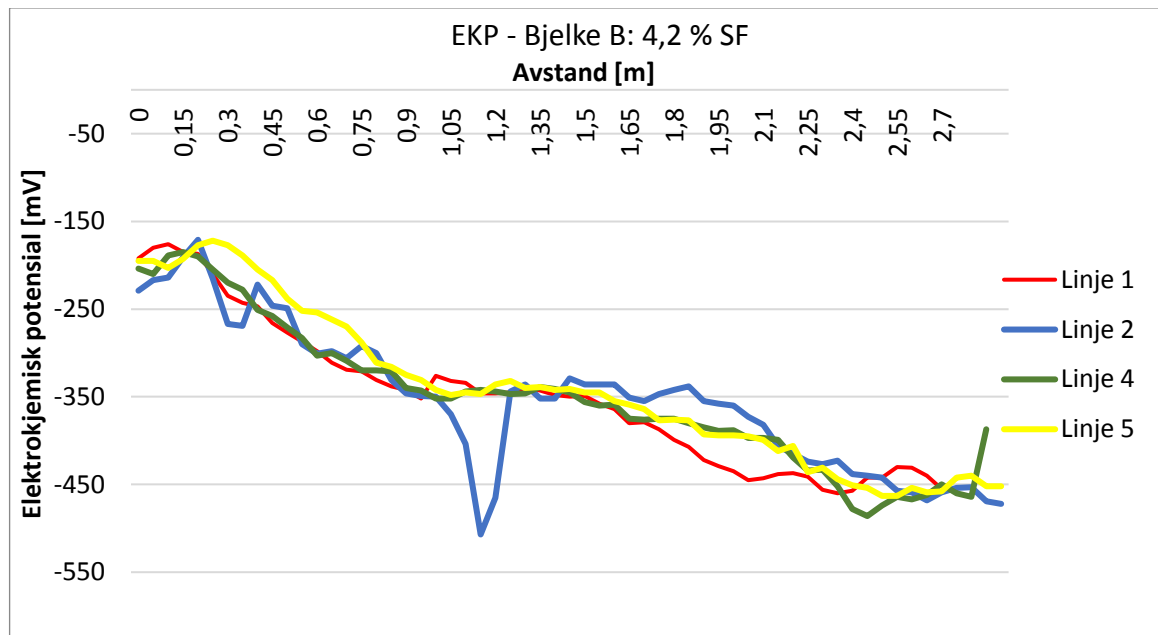


Figur 4.6: Overdekningsmålinger for bjelke F.

Overdekningen varierer både noe høyere og lavere enn teoretisk overdekning på 25 mm for alle bjelkene. Overdekningen målt på bjelke E viser mer svingende verdier enn for de andre bjelkene.

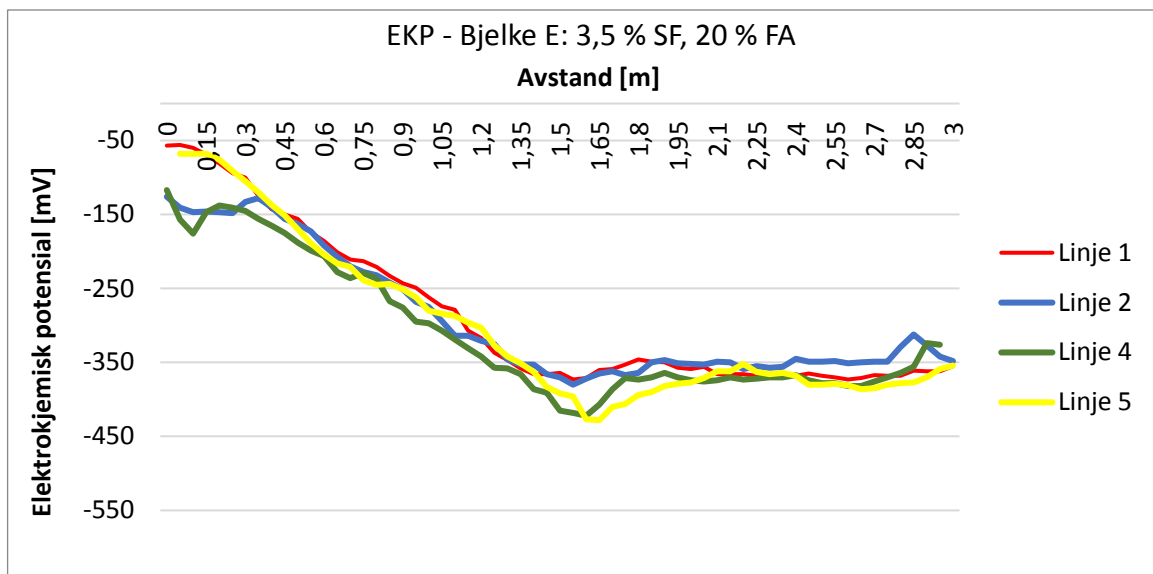
### 4.3 EKP

Figur 4.7 - Figur 4.9 viser sammenstilling av kontinuerlige EKP-målinger med hjul langs linje 1, 2, 4 og 5 for hver bjelke. Langs x-aksen angir 0 m alltid starten av atmosfæresonen og 3 m er slutten av nedsenket sone. For detaljerte verdier se Vedlegg I – Detaljerte EKP-målinger.



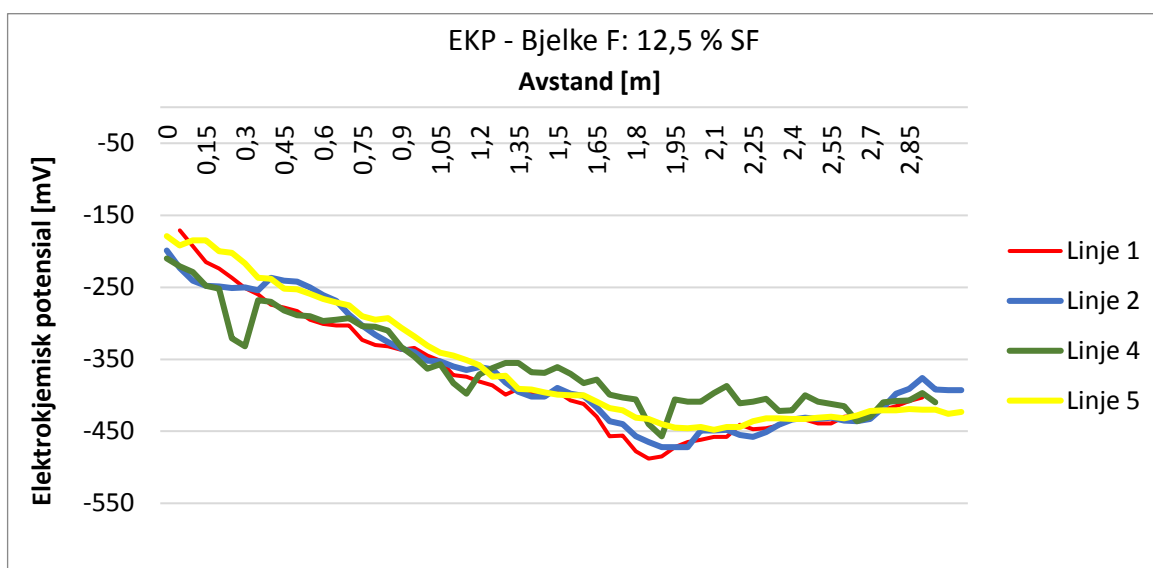
Figur 4.7: EKP målt med hjul langs linje 1, 2, 4 og 5 for bjelke B. Referanseelektrode: Cu/CuSO<sub>4</sub>.

Figur 4.7 viser at det er en tydelig gradient som skiller seg ut ved ca. 1,1 m langs linje 2. Området hvor gradienten befinner seg langs linje 2 sammenfaller nøyaktig med en synlig avskalling rundt en armeringsstol, se overflatebilder i vedlegg E. Det legges merke til at linje 1 i utgangspunktet også burde vist en gradient her dersom noe foregår i dette området. Gradienten ved 0,4 m for linje 2 sammenfaller også med synlig armeringsstol.



Figur 4.8: EKP målt med hjul langs linje 1, 2, 4 og 5 for bjelke E. Referanseelektrode: Cu/CuSO<sub>4</sub>.

Figur 4.8 viser at det er en gradient fra ca. 1,5 m til 1,65 m både for linje 4 og linje 5. Fra overflatebildene i vedlegg E er det også her en litt synlig del av en armeringsstol på overflaten.



Figur 4.9: EKP målt med hjul langs linje 1, 2, 4 og 5 for bjelke F. Referanseelektrode: Cu/CuSO<sub>4</sub>.

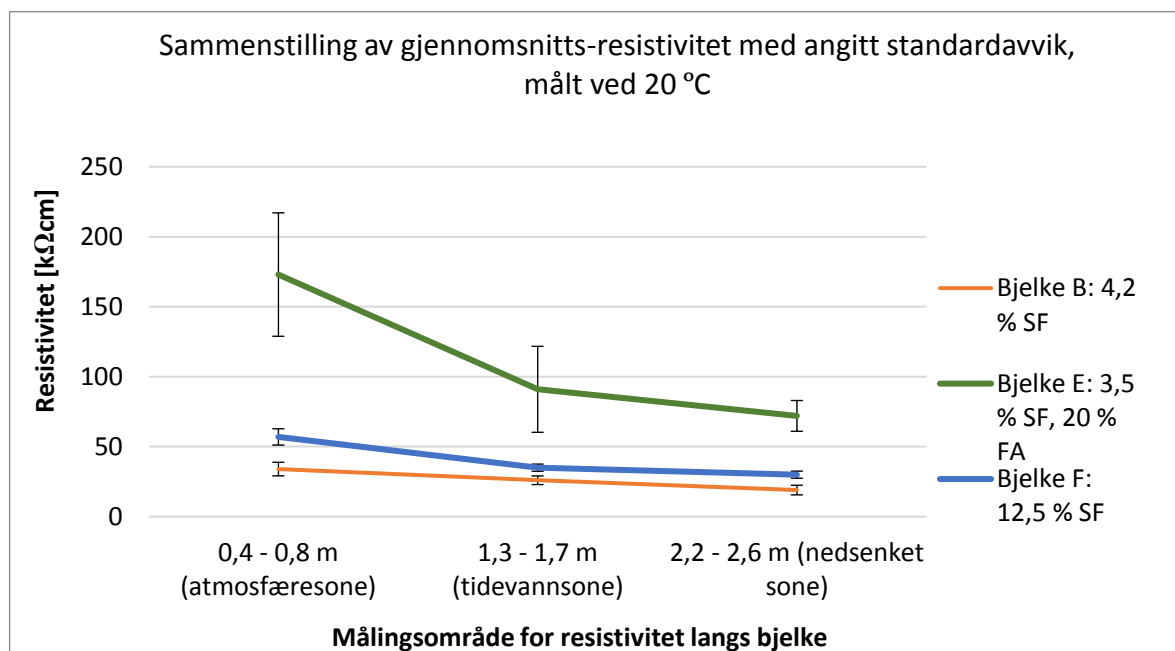
Figur 4.9 viser at det er en gradient ved 0,3 m og en gradient ved 1,9 m langs linje 4. Det er også en liten gradient ved ca. 1,1 m for denne linjen. Fra overflatebildene i Vedlegg E, kan man se at det er korroderte spikere som stikker opp fra overflaten samt en litt synlig armeringsstol ved 0,3 m. Spikerne er trolig brukt for å plassere armeringsstolene. Ved 1,1 m er det en stor avskalling kombinert med en synlig armeringsstol som sammenfaller med gradienten i målingene. Når det gjelder gradienten ved 1,9 m er også tilfellet her at det

finnes en synlig armeringsstol ved overflaten. Linje 1 og 2 gir også et lite utslag ved 1,9 m, som også sammenfaller med en stor avskalling rundt en synlig armeringsstol. Det henvises til Vedlegg E for overflatebilder.

Fremstillingen av EKP-målingene for linje 1, 2, 4 og 5 viser generelt at de ligger i samme område for alle bjelker. Området ligger ca. mellom -56 mV og -507 mV. Den generelle tendensen som EKP-verdiene viser for de tre bjelkene er at verdiene er mindre negative i atmosfærisk/skvalpesone, mens de avtar til å bli mer negative ned mot tidevannssonen og nedsenket sone

#### 4.4 Resistivitet

Figur 4.10 viser en sammenstilling av gjennomsnitts-resistivitet målt på bjelker. Som forklart i kapittel 3.2.5 er det foretatt 20 målinger innenfor et intervall på 0,4 m i hver eksponeringssone, der gjennomsnittet av disse er presentert i grafen. Utfyllende tabell for disse verdiene kan finnes i Vedlegg F – Detaljerte resistivitetmålinger.

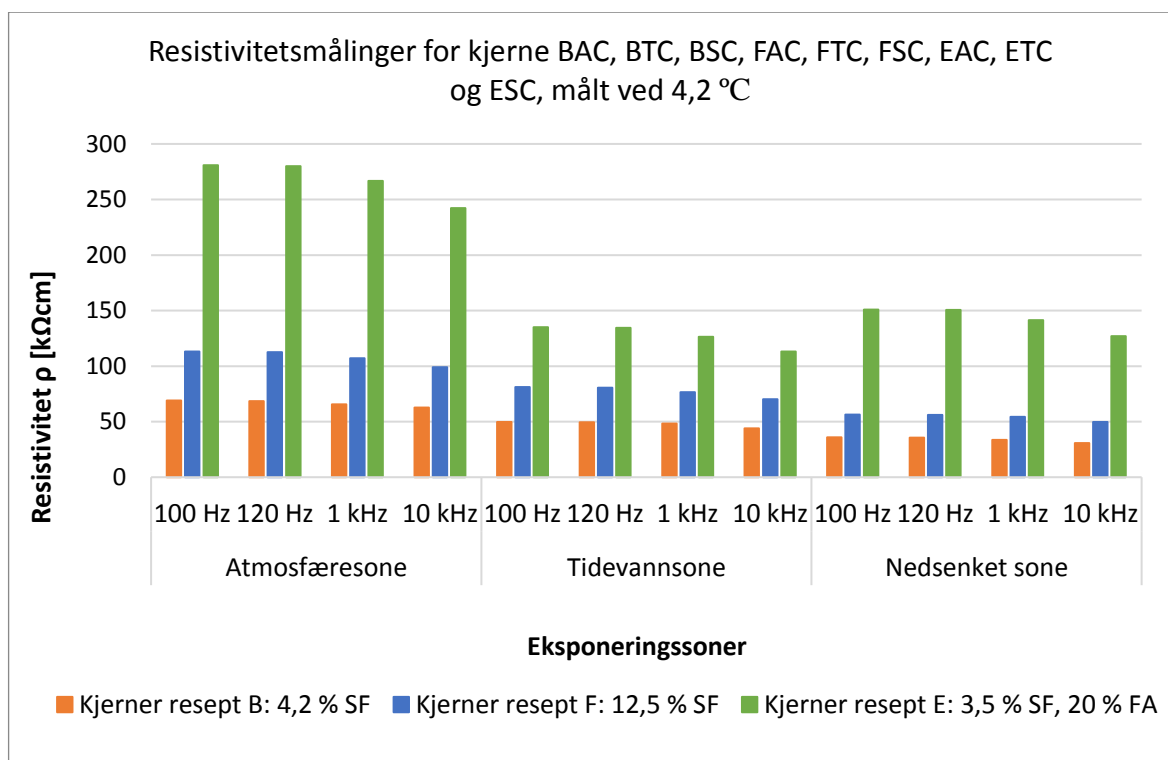


Figur 4.10: Sammenstilling av gjennomsnitts-resistiviteten med angitt standardavvik i de ulike eksponeringssonene på samtlige bjelker. Langs x-aksen vises i hvilket intervall med tilhørende eksponeringssone målingene er tatt.

De gjennomsnittlige resistivitetsmålingene viser at bjelke E har høyest resistivitet i alle eksponeringssoner. Deretter viser bjelke F nest lavest resistivitet, mens bjelke B viser lavest. Alle bjelkene viser en resistivitet som er størst i atmosfærisk sone, og deretter avtar mot laveste verdi i nedsenket sone.

### Bestemmelse av resistivitet på utborede kjerner

Figur 4.11 viser resistivitets-verdier for kjerne BAC, BTC, BSC, FAC, FTC, FSC, EAC, ETC og ESC. Grafen viser verdier for resistiviteten målt ved 4 forskjellige frekvenser for hver kjerne. De grønne stolpene i atmosfæresonen viser for eksempel resistivitetsmålinger for kjerne EAC ved ulike frekvenser. Tilsvarende er alle de grønne stolpene i tidevannssonen målinger for kjerne ETC, og i nedsenket sone for ESC. Resistiviteten er utregnet ved bruk av elektrisk motstand, se Vedlegg G – Bestemmelse av resistivitet på utborede kjerner for detaljerte målinger.



Figur 4.11: Resistivitet for utborede kjerner målt med frekvens på 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz og 10 kHz. Det fremstilles 4 resistivitetsverdier for hver kjerne, en for hver frekvens.

Det observeres at resistiviteten ved 4,2 °C generelt er høyere i atmosfærisk sone, mens den avtar mot laveste verdi i nedsenket sone. Dette stemmer ikke for resept E, der resistiviteten viser lavest verdi i tidevannssonen.

#### **4.5 Karbonatisering og kloridinntrenging**

Ingen av kjernene som ble undersøkt viste karbonatisert betong fra overflaten. De samme kjernene som ble undersøkt for karbonatisering, ble også sprayet med sølvnitrat for å bekrefte/avkrefte tilstedeværelsen av kloridioner. Siden påføring av  $\text{AgNO}_3$  ga lite utslag ble metoden derfor regnet som unøyaktig. Det ble bestemt at tilstedeværelsen av klorider heller skulle bestemmes ved bruk av  $\mu$ -XRF.

#### **4.6 Visuell inspeksjon og måling av riss på kjerner etter utboring**

Tabell 4.1 gir en oppsummering fra visuell inspeksjon og måling av riss på kjernene etter utboring. I kolonnen for rissdybde står det to verdier atskilt av et deletegn, og indikerer målt rissdybde for henholdsvis venstre og høyre side av kjernen i henhold til Figur 3.18. Det er valgt å rapportere representativ rissvidde på overflaten samt maks rissvidde, da dette er mest relevant for inntrengning.

Tabell 4.1: Oversikt over alle utborede kjerner, med informasjon om rissvidder og rissdybder samt informasjon om de ulike kjernene har tegn til selvreparasjon eller korrosjon. Tom rute indikerer ikke relevant informasjon, (-) betyr ikke synlig.

Kjerne	Diameter/høyde (mm)	Repr. Rissvidde (mm)	Maks. rissvidde (mm)	Rissdybde v/h (mm)	Tegn på selvreparasjon	Tegn på korrosjon
<b>BAR</b>	95/150					
<b>BAC</b>	95/150	0,075	0,1	-	Nei	
<b>BTR</b>	95/150					
<b>BTC</b>	70/150	0,2	0,2	80/68	Nei	
<b>BTCr2</b>	70/150	0,05	0,075	37/83	Nei	Nei
<b>BTCr4</b>	70/150	0,1	0,2	70/100	Ja	Nei
<b>BSC</b>	95/150	0,05	0,15	-	Nei	
<b>EAR</b>	95/150					
<b>EAC</b>	95/150	0,075	0,075	-	Nei	
<b>ETR</b>	95/150					
<b>ETC</b>	70/150	0,25	0,25	76/50	Ja	
<b>ETCr2</b>	70/150	0,3	0,3	80/75	Ja	Nei
<b>ETCr4</b>	70/150	0,25	0,25	15/61	Ja	Nei
<b>ESC</b>	95/150	0,075	0,075	-	Nei	
<b>FAR</b>	95/150					
<b>FAC</b>	95/150	0,075	0,15	80/80	Ja	
<b>FTR</b>	95/150					
<b>FTC</b>	70/150	0,15	0,2	90/25	Ja	
<b>FTCr2</b>	70/150	0,075	0,1	50/50	Nei	Nei
<b>FTCr4</b>	70/150	0,15	0,15	50/ -	Ja	Nei
<b>FSC</b>	95/150	0,05	0,1	30/35	Nei	
<b>FSR</b>	95/150					



Tabell 4.2 - Tabell 4.4 viser rissviddevariasjon utvendig langs rissdybden. Eventuelle tegn på selvreparasjon langs rissdybden er markert. Det henvises til Figur 3.18 for forklaring av hvordan målingene er utført.

## Bjelke B

Tabell 4.2: Rissviddevariasjon og tegn på selvreparasjon langs rissdybde for kjerner med riss fra bjelke B. Rissvidden er målt innenfor et område på 10 mm på kjernens venstre (V) og høyre (H) side. Svarte/hvite ruter indikerer om det er tegn på/ikke tegn på selvreparasjon (S).

Kjerne	BAC				BTC				BTCr2			
	V <sup>1</sup>	S <sup>3</sup>	H <sup>2</sup>	S	V	S	H	S	V	S	H	S
0 - 10	U <sup>4</sup>	U	U	U	0,3	<input type="checkbox"/>	0,2	<input type="checkbox"/>	<0,05	<input type="checkbox"/>	0,05	<input type="checkbox"/>
10 - 20					0,25	<input type="checkbox"/>	0,1	<input type="checkbox"/>	<0,05	<input type="checkbox"/>	0,2	<input type="checkbox"/>
20 - 30					0,3	<input type="checkbox"/>	0,1	<input type="checkbox"/>	<0,05	<input type="checkbox"/>	0,1	<input type="checkbox"/>
30 - 40					0,15	<input type="checkbox"/>	0,2	<input type="checkbox"/>	<0,05	<input type="checkbox"/>	0,075	<input type="checkbox"/>
40 - 50					0,3	<input type="checkbox"/>	0,3	<input type="checkbox"/>			0,05	<input type="checkbox"/>
50 - 60					LP	<input type="checkbox"/>	0,15	<input type="checkbox"/>			0,05	<input type="checkbox"/>
60 - 70					0,075	<input type="checkbox"/>	0,075	<input type="checkbox"/>			0,05	<input type="checkbox"/>
70 - 80					0,05	<input type="checkbox"/>					0,05	<input type="checkbox"/>
80 - 90												
90 - 100												

Kjerne	BTCr4				BSC			
	V <sup>1</sup>	S <sup>3</sup>	H <sup>2</sup>	S	V	S	H	S
0 - 10	0,1	<input type="checkbox"/>	0,35	<input type="checkbox"/>	U <sup>4</sup>	U	0,05	<input type="checkbox"/>
10 - 20	0,1	■	0,1	■			<0,05	<input type="checkbox"/>
20 - 30	0,1	<input type="checkbox"/>	0,15	■				
30 - 40	LP <sup>5</sup>	<input type="checkbox"/>	0,15	<input type="checkbox"/>				
40 - 50	0,075	<input type="checkbox"/>	0,2	<input type="checkbox"/>				
50 - 60			0,2	■				
60 - 70			0,075	<input type="checkbox"/>				
70 - 80			0,075	<input type="checkbox"/>				
80 - 90								
90 - 100								

<sup>1</sup> = Rissvidder målt utenpå langs kjernens venstre side

<sup>2</sup> = Rissvidder målt utenpå langs kjernens høyre side

<sup>3</sup> = Hvit utfelling som indikerer selvreparasjon; ■ synlig selvreparasjon; □ ikke synlig selvreparasjon.

<sup>4</sup> = Riss er ikke synlig for avlesning

<sup>5</sup> = Luftpore

## Bjelke E

Tabell 4.3: Rissviddevariasjon og tegn på selvreparasjon langs rissdybde for kjerner med riss fra bjelke E. Rissvidden er målt innenfor et område på 10 mm utvendig langs rissdybden på kjernens venstre (V) og høyre (H) side. Svarte/hvite ruter indikerer om det er tegn på/ikke tegn på selvreparasjon (S).

Kjerne	EAC				ETC				ETCr2			
	V <sup>1</sup>	S <sup>3</sup>	H <sup>2</sup>	S	V	S	H	S	V	S	H	S
0 - 10	U <sup>4</sup>	U	U	U	0,15	<input type="checkbox"/>	0,15	<input type="checkbox"/>	<0,05	<input type="checkbox"/>	0,15	<input type="checkbox"/>
10 - 20					0,1	<input checked="" type="checkbox"/>	0,075	<input type="checkbox"/>	0,075	<input checked="" type="checkbox"/>	0,15	<input checked="" type="checkbox"/>
20 - 30					0,1	<input type="checkbox"/>	LP <sup>5</sup>	<input type="checkbox"/>	0,1	<input checked="" type="checkbox"/>	0,1	<input checked="" type="checkbox"/>
30 - 40					0,1	<input type="checkbox"/>	0,15	<input type="checkbox"/>	0,1	<input checked="" type="checkbox"/>	0,2	<input type="checkbox"/>
40 - 50					0,15	<input type="checkbox"/>	<0,05	<input type="checkbox"/>	0,1	<input type="checkbox"/>	0,15	<input type="checkbox"/>
50 - 60					<0,05	<input type="checkbox"/>			0,1	<input type="checkbox"/>	0,15	<input type="checkbox"/>
60 - 70					<0,05	<input type="checkbox"/>			<0,05	<input type="checkbox"/>	<0,05	<input type="checkbox"/>
70 - 80									<0,05	<input type="checkbox"/>		
80 - 90												
90 - 100												

Kjerne	ETCr4				ESC			
	V <sup>1</sup>	S <sup>3</sup>	H <sup>2</sup>	S	V	S	H	S
0 - 10	0,2	<input type="checkbox"/>	0,2	<input checked="" type="checkbox"/>	U <sup>4</sup>	U	U	U
10 - 20	0,05	<input type="checkbox"/>	0,075	<input checked="" type="checkbox"/>				
20 - 30			0,05	<input type="checkbox"/>				
30 - 40			0,15	<input type="checkbox"/>				
40 - 50			0,1	<input type="checkbox"/>				
50 - 60			<0,05	<input type="checkbox"/>				
60 - 70								
70 - 80								
80 - 90								
90 - 100								

<sup>1</sup> = Rissvidder målt utenpå langs kjernens venstre side

<sup>2</sup> = Rissvidder målt utenpå langs kjernens høyre side

<sup>3</sup> = Hvit utfelling som indikerer selvreparasjon;  synlig selvreparasjon;  ikke synlig selvreparasjon.

<sup>4</sup> = Riss er ikke synlig for avlesning

<sup>5</sup> = Luftpore

## Bjelke F

Tabell 4.4: Rissviddevariasjon og tegn på selvreparasjon langs rissdybde for kjerner med riss fra bjelke F. Rissvidden er målt innenfor et område på 10 mm utvendig langs rissdybden på kjernens venstre (V) og høyre (H) side. Svarte/hvite ruter indikerer om det er tegn på/ikke tegn på selvreparasjon (S).

Kjerne	FAC				FTC				FTCr2			
	V <sup>1</sup>	S <sup>3</sup>	H <sup>2</sup>	S	V	S	H	S	V	S	H	S
0 - 10	0,1	<input type="checkbox"/>	0,075	■	0,15	<input type="checkbox"/>	0,2	<input type="checkbox"/>	0,05	<input type="checkbox"/>	0,1	<input type="checkbox"/>
10 - 20	0,1	<input type="checkbox"/>	0,15	<input type="checkbox"/>	0,2	■	0,1	<input type="checkbox"/>	0,05	<input type="checkbox"/>	0,1	<input type="checkbox"/>
20 - 30	<0,05	<input type="checkbox"/>	0,05	<input type="checkbox"/>	0,15	<input type="checkbox"/>	0,25	<input type="checkbox"/>	0,075	<input type="checkbox"/>	0,075	<input type="checkbox"/>
30 - 40	<0,05	<input type="checkbox"/>	0,05	<input type="checkbox"/>	<0,05	<input type="checkbox"/>			0,2	<input type="checkbox"/>	0,05	<input type="checkbox"/>
40 - 50	<0,05	<input type="checkbox"/>	<0,05	<input type="checkbox"/>	<0,05	<input type="checkbox"/>			0,05	<input type="checkbox"/>	0,05	<input type="checkbox"/>
50 - 60	<0,05	<input type="checkbox"/>	<0,05	<input type="checkbox"/>	<0,05	<input type="checkbox"/>						
60 - 70	<0,05	<input type="checkbox"/>	<0,05	<input type="checkbox"/>	<0,05	<input type="checkbox"/>						
70 - 80	<0,05	<input type="checkbox"/>			<0,05	<input type="checkbox"/>						
80 - 90					<0,05	<input type="checkbox"/>						
90 - 100												

Kjerne	FTCr4				FSC			
	V <sup>1</sup>	S <sup>3</sup>	H <sup>2</sup>	S	V	S	H	S
0 - 10	LP <sup>5</sup>	■	U <sup>4</sup>	U	<0,05	<input type="checkbox"/>	<0,05	<input type="checkbox"/>
10 - 20	0,1	■			<0,05	<input type="checkbox"/>		
20 - 30	0,05	<input type="checkbox"/>			<0,05	<input type="checkbox"/>		
30 - 40								
40 - 50								
50 - 60								
60 - 70								
70 - 80								
80 - 90								
90 - 100								

<sup>1</sup> = Rissvidder målt utenpå langs kjernens venstre side

<sup>2</sup> = Rissvidder målt utenpå langs kjernens høyre side

<sup>3</sup> = Hvit utfelling som indikerer selvreparasjon; ■ synlig selvreparasjon;  ikke synlig selvreparasjon.

<sup>4</sup> = Riss er ikke synlig for avlesning

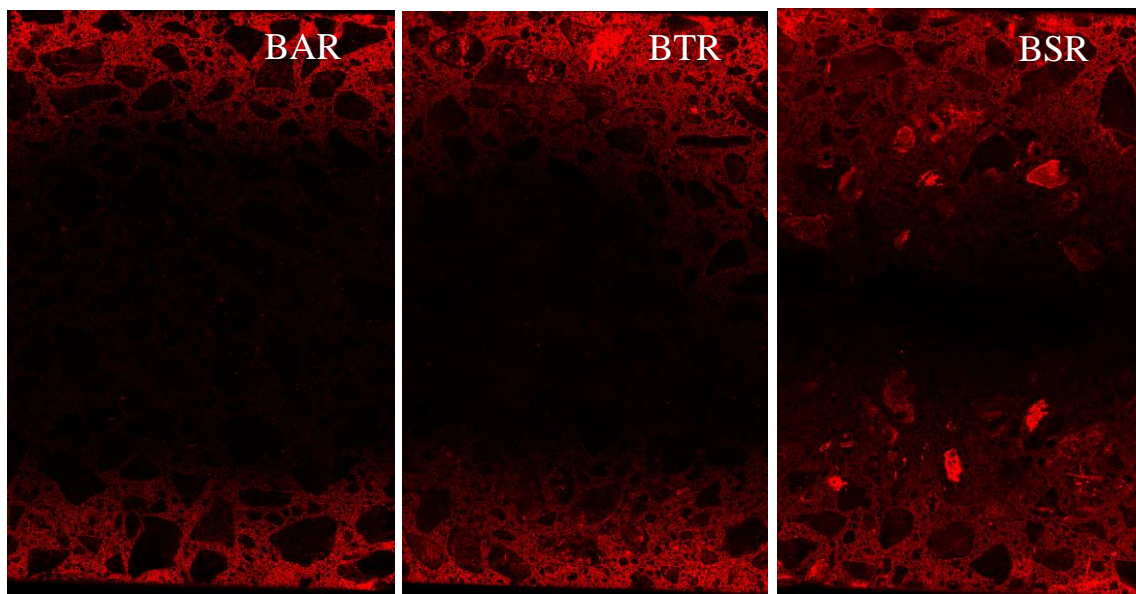
<sup>5</sup> = Luftpore

Den visuelle inspeksjonen av kjernene viste få tegn til selvreparasjon av rissene på overflaten. Inspeksjon av rissdybden langs kjernenes sideflate viste derimot flere tydelige tegn på selvreparasjon i form av hvit utfelling. Det ble kun observert tegn til selvreparasjon på én kerne fra bjelke B, mens flere kjerner fra bjelke E og F viste tegn på selvreparasjon.

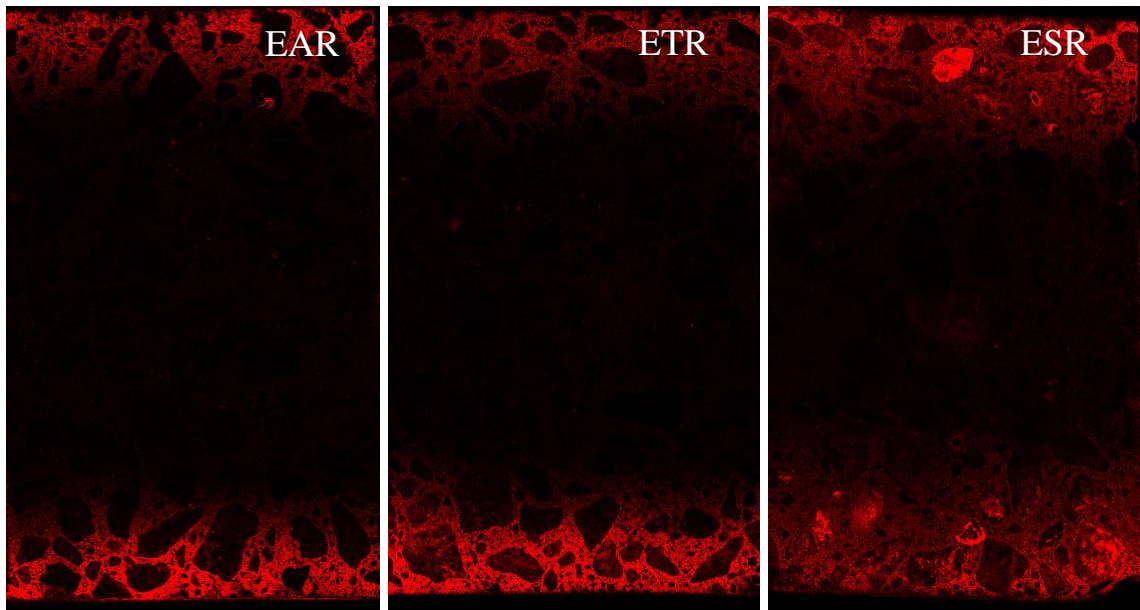
Det var vanskelig å si sikkert om rissene var fullstendig reparert eller ikke med det blotte øyet. Ut fra Tabell 4.1 observeres det at rissdybden er mer tydelig i tidevannssonen, mens den ofte ikke er synlig i atmosfære/skvalpe- og nedsenket sone. Det ble dermed gjort få observasjoner av rissene i atmosfære/skvalpesonen og nedsenket sone. Det antas at måten bjelkene har vært oppspent på er årsaken til dette. Representative rissvidder som ble målt i atmosfære/skvalpe- og nedsenket sone var også generelt mindre (0,05 – 0,075 mm) enn rissene i tidevannssonen (opp til 0,3 mm).

#### 4.7 Kloridfordeling

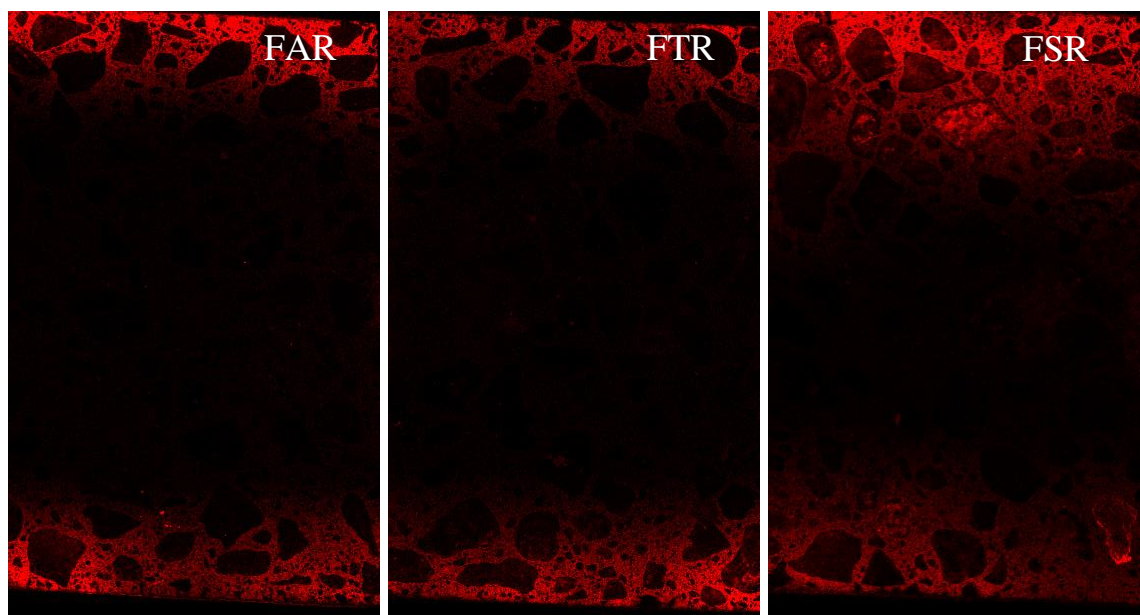
Figur 4.12 - Figur 4.14 viser spredninger av kloridkonsentrasjoner for samtlige referansekjerner fra  $\mu$ -XRF. Bildene viser venstre halvdel av en referansekjerne fra hver eksponeringsone. Bildene står alltid vendt slik at øverste del av bildet tilsvarer bjelkens overflate sett ovenfra, mens nedre del tilsvarer siden mellom de to sammenkoblede bjelkene.



Figur 4.12: Kloridfordeling med  $\mu$ -XRF for kjerne BAR, BTR og BSR. Bildene er i målestokk 1:2



Figur 4.13: Kloridfordeling med  $\mu$ -XRF for kjerne EAR, ETR og ESR. Bildene er i målestokk 1:2

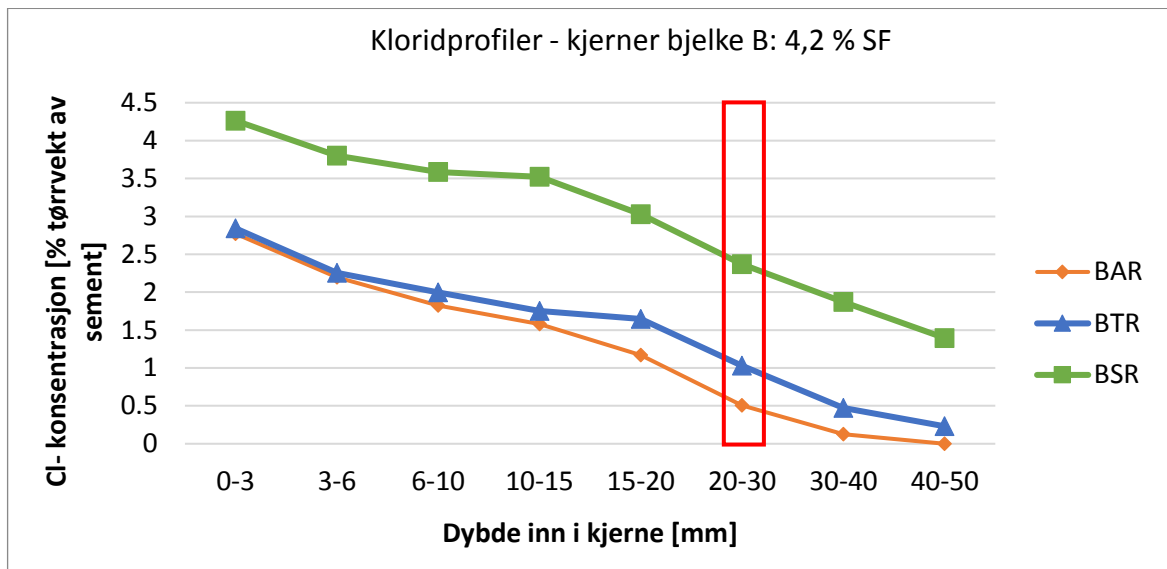


Figur 4.14: Kloridfordeling med  $\mu$ -XRF for kjerne FAR, FTR og FSR. Bildene er i målestokk 1:2

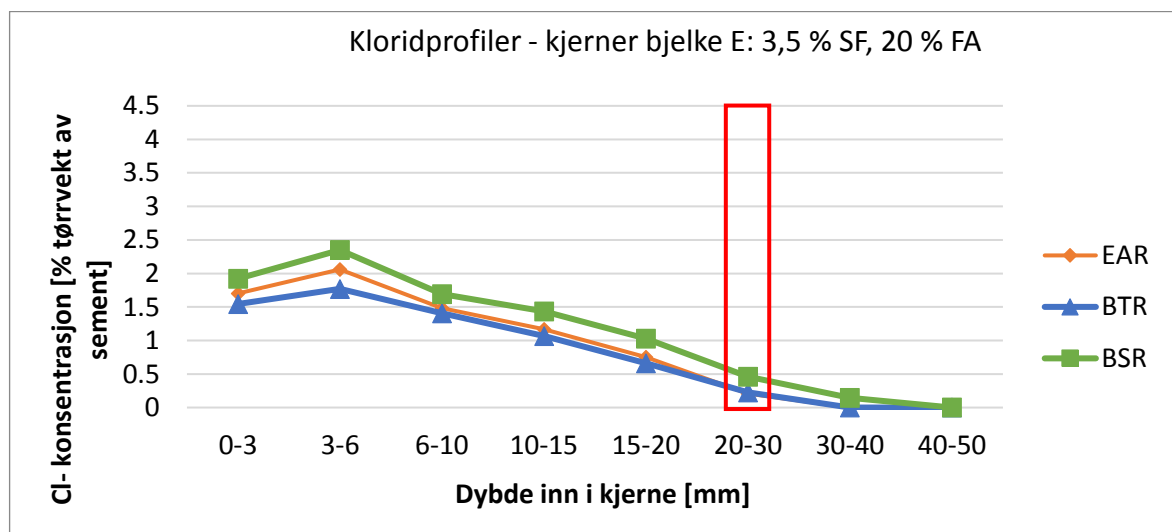
Kloridfordelingen i  $\mu$ -XRF viser at det er kloridinntrengning i alle bjelker. Siden det med  $\mu$ -XRF kun er mulig å se hvor intens spredningen av kloridene er, men ikke kan fastslå hvor store mengder som finnes, er de ulike fargeintensitetene bare sammenlignbare innen samme bilde. Det er altså ikke mulig å sammenligne kloridkonsentrasjonene mellom bildene. Inntrengingsdybden kan derimot betraktes. Generelt for alle reseptene ser det ut som at inntrengingsdybden er større for alle kjerner i nedsenket sone, men det presiseres at konsentrasjonen ikke kan bestemmes ut fra bildene.

## 4.8 Kloridprofiler

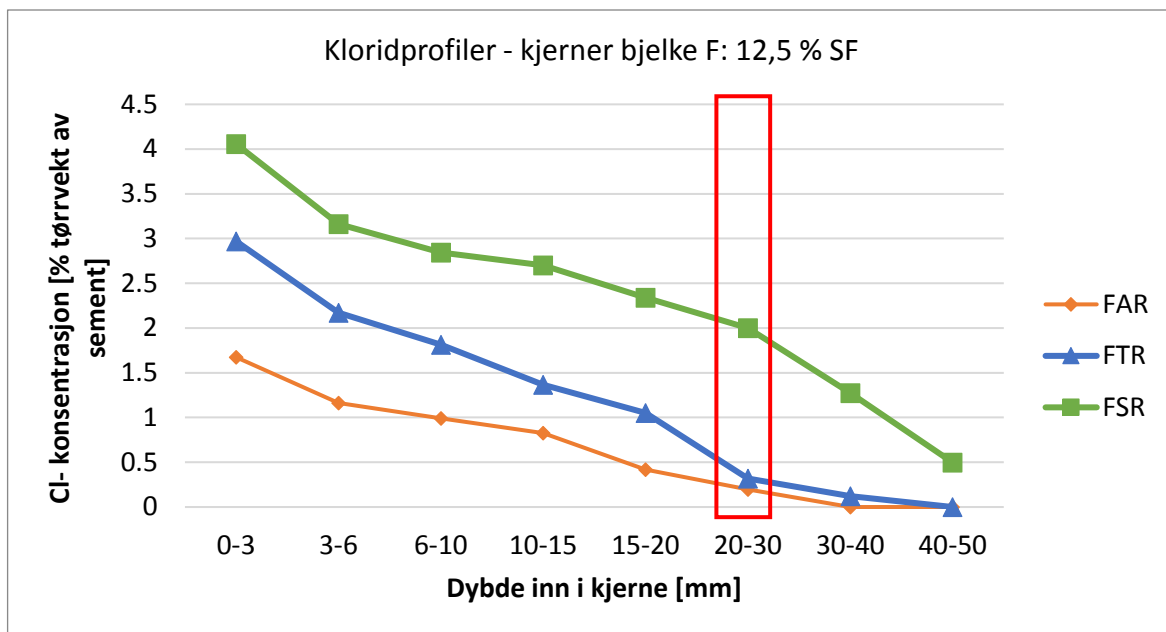
Det ble underveis i oppgaven gitt tilgang til kloridanalyser som ytterligere informasjon til kloridinntrengning. Sintef har utført fresing av betongkjernene og utarbeidet kloridanalysene. Disse presenteres her som resultater da de brukes videre i diskusjon. Figur 4.15 - Figur 4.17 viser kloridprofiler utarbeidet fra kloridanalysene for referansekjerner i hver eksponeringszone. Det henvises til Vedlegg J – Kloridanalyser for detaljerte data, samt informasjon om hvordan kloridkonsentrasjonen gitt som % av sementvekt er utregnet.



Figur 4.15: Kloridprofil for referansekjerner fra bjelke B. Området markert med rødt indikerer området hvor armeringen ligger.



Figur 4.16: Kloridprofil for referansekjerner fra bjelke E. Området markert med rødt indikerer området hvor armeringen ligger.



Figur 4.17: Kloridprofil for referansekjerner fra bjelke F. Området markert med rødt indikerer området hvor armeringen ligger.

Av kloridprofilene fremkommer det at kloridkonsentrasjonen generelt er høyest nær kjerneoverflaten og avtar gradvis innover i kjernen. Dette er tilfellet for alle bjelkene bortsett fra bjelke E, som faktisk har høyest kloridkonsentrasjon de første 3-6 mm, før den deretter avtar.

En annen generell tendens er at konsentrasjonen er høyest for kjernen i nedsenket sone, deretter tidevannssonen, mens atmosfære/skvalpesonen har lavest kloridkonsentrasjon. Igjen skiller bjelke E seg ut her, der atmosfære/skvalpesonen viser høyere kloridinnhold enn tidevannssonen i de første 20 mm.

Ved å sammenligne forskjellen i kloridkonsentrasjonen i de ulike sonene, fokuseres det på området armeringen ligger i, som ligger innenfor det røde rektanlet på figurene. Her ser man at bjelke B totalt sett har høyest konsentrasjon i alle soner. Bjelke F har høyere konsentrasjon i nedsenket sone enn bjelke E, mens det ser ut til at de to har relativt like kloridkonsentrasjoner i atmosfære/skvalpe- og tidevannssonen.



#### 4.9 Inspeksjon av armering

Ved visuell inspeksjon av armering fra kjerner i tidevannssonen ble det observert rustflekker i varierende mengde på overflaten av armeringen i samtlige kjerner. Figur 4.18 viser rustprodukter på armeringen i kjerne FTCr2. Etter rengjøring av armeringen for kjerne BTCr2, ETCr4, ETCr2, ETCr4, FTCr2 og FTCr4 var det derimot ingen tegn til korrosjon for noen av dem. For visuell dokumentasjon av den inspiserte armeringen etter rengjøring, se Vedlegg L - Inspeksjon av rengjort armering.



*Figur 4.18: Rustprodukter på armeringen i kjerne FTCr2. (Foto: Tobias A. Danner)*



#### 4.10 Selvrepasjon av riss

Observasjoner fra  $\mu$ -XRF relatert til selvrepasjon av riss blir presentert. Det blir fremstilt oversiktsbilder av kjernehalvdelen som er analysert med  $\mu$ -XRF. På oversiktsbildene er det markert punkter som indikerer hvor det er tatt nærbilder av riss. Nærbilder er tatt innover så langt risset er synlig. I noen kjerner er rissene så små at dette knapt har vært synlig, og det er derfor ikke laget slike bilder for alle kjerner.

Det er utført analyser på utvalgte punkter innover i risset på hver kjerne. Resultatene fra punktanalysene er fremstilt i tabeller under hver figur. Tabellene fremstiller mengde av et grunnstoff gitt som atomprosent, noe som gir prosentandelen av det respektive atomet i forhold til det totale antallet atomer i det punktet.

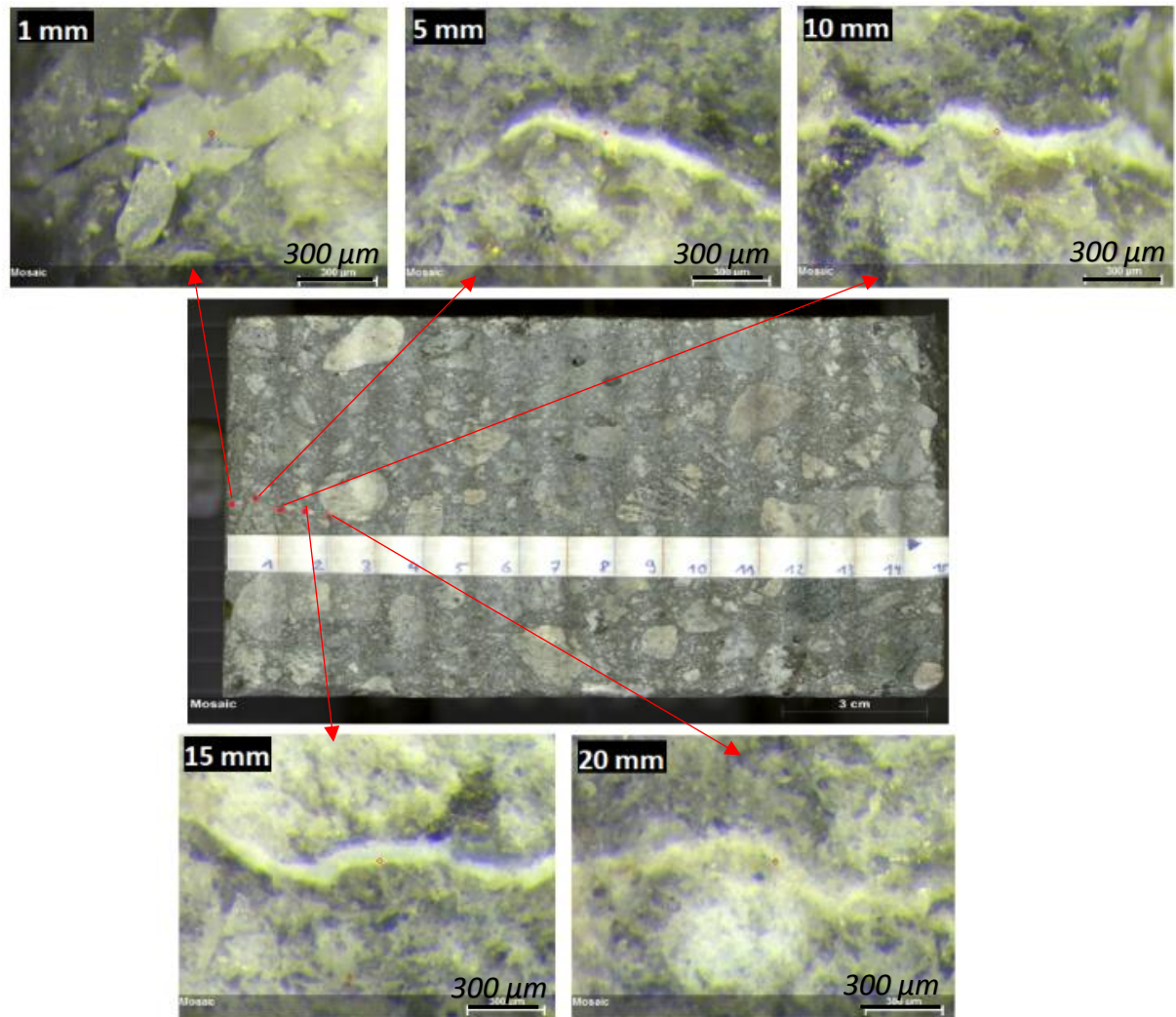
Nedenfor følger en oversikt over kjemiske symboler som benyttes som forkortelser for de ulike grunnstoffene fra analysene:

Al	Aluminium
Ca	Kalsium
Cl	Klor
Fe	Jern
K	Kalium
Mg	Magnesium
Na	Natrium
S	Svovel
Si	Silisium

#### Kjerner i atmosfæresonen

Kjerne BAC og EAC har riss som er så små at punktmålinger ikke var mulig. Risset er ikke synlig på nærbildene fra kjerne BAC. Nærbildene viser noe utfelling i risset for kjerne EAC, men det er valgt å ikke presentere dette siden punktmålinger ikke var mulig. Kjerne FAC er eneste riss i atmosfæresonen som har klart synlig riss med utfelling og som det er tatt punktmålinger av.

## FAC



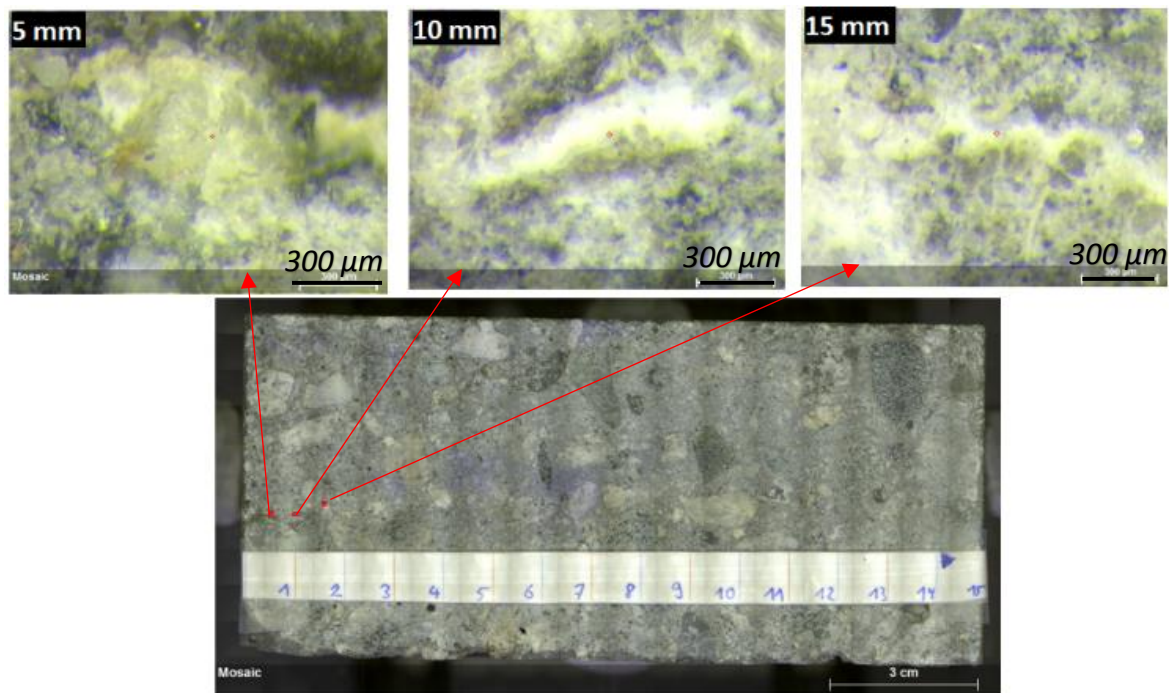
Figur 4.19: Oversiktsbilde over riss. De røde inntegnede prikkene langs risset tilsvarer punktene som det er tatt nærbilde av, henholdsvis 1 mm, 5 mm, 10 mm og 20 mm inn i risset.

Tabell 4.5: Punktmålinger. Verdiene som presenteres er en gjennomsnittsverdi fra 3 punktmålinger gitt i atomprosent (%).

		Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
1 mm	Gjennomsnittsverdi:	13,2	0,2	20,2	54,8	0,2	0,1	2,3	7,8	1,0
	Standardavvik:	0,7	0,3	0,5	1,2	0,0	0,0	1,4	0,9	0,1
5 mm	Gjennomsnittsverdi:	2,0	30,4	9,3	30,1	0,1	0,1	3,2	24,5	0,1
	Standardavvik:	2,1	11,5	2,4	3,6	0,0	0,1	1,5	2,3	0,1
10 mm	Gjennomsnittsverdi:	0,6	33,5	4,2	22,5	1,0	0,6	0,7	34,3	2,3
	Standardavvik:	0,2	5,6	0,6	0,7	0,1	0,1	0,0	5,4	0,2
15 mm	Gjennomsnittsverdi:	2,2	18,3	12,1	37,7	0,0	0,1	6,9	21,9	0,4
	Standardavvik:	1,8	5,6	1,5	3,4	0,0	0,0	5,1	2,7	0,2

## Kjerner i tidevannssonen

### BTC

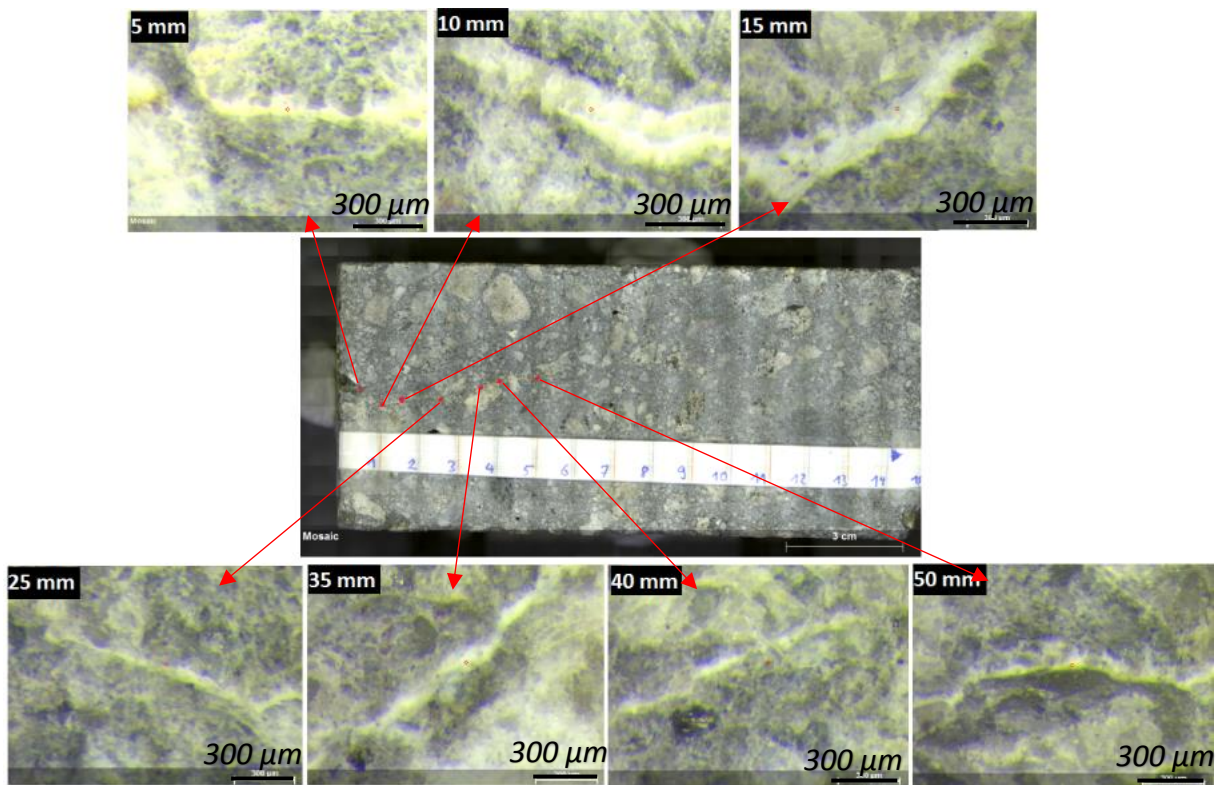


Figur 4.20: Oversiktsbilde over riss. De røde inntegnede prikkene langs risset tilsvarer punktene som det er tatt nærbilde av, henholdsvis 5 mm, 10 mm og 15 mm inn i risset.

Tabell 4.6: Punktmålinger. Verdiene som presenteres er en gjennomsnittsverdi fra 5 punktmålinger gitt i atomprosent (%).

		Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
5 mm	Gjennomsnittsverdi:	9,5	1,3	18,4	55,5	0,2	0,0	4,1	8,4	2,2
	Standardavvik:	1,8	1,5	0,8	4,5	0,2	0,1	2,6	5,4	0,9
10 mm	Gjennomsnittsverdi:	0,1	35,6	1,8	8,6	0,2	0,4	0,1	52,6	0,6
	Standardavvik:	0,1	14,1	0,7	4,0	0,2	0,2	0,2	18,5	0,6

## ETC



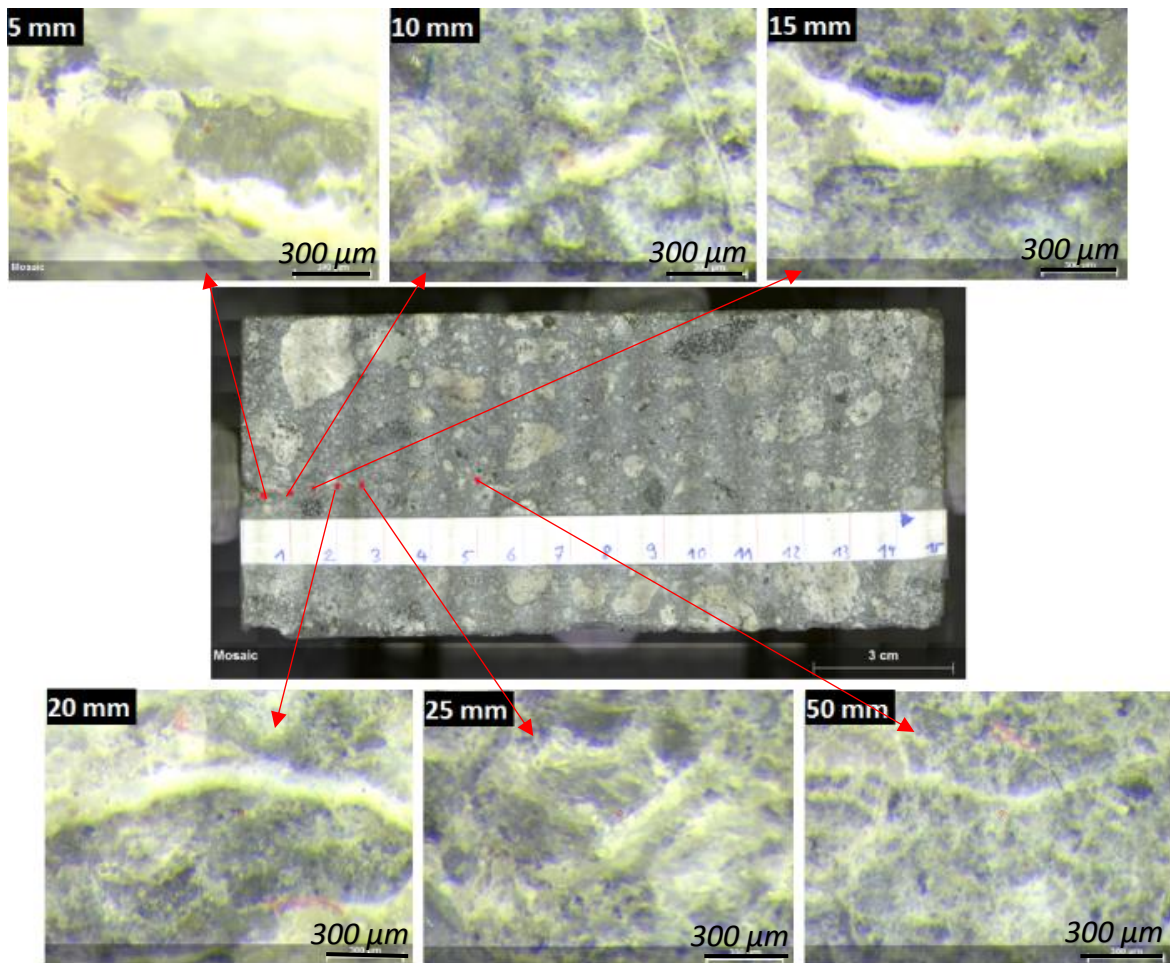
Figur 4.21: Oversiktsbilde over riss. De røde inntegnede prikkene langs risset tilsvarer punktene som det er tatt nærbilde av, henholdsvis 5 mm, 10 mm, 15 mm, 25 mm, 35 mm, 40 mm og 50 mm inn i risset.

Tabell 4.7: Punktmålinger. Verdiene som presenteres er en gjennomsnittsverdi fra 5 punktmålinger gitt i atomprosent (%).

		Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
5 mm	Gjennomsnittsverdi:	2,4	1,5	4,2	27,9	0,1	0,0	1,0	62,4	0,4
	Standardavvik:	2,5	0,5	2,7	24,8	0,0	0,0	1,9	27,3	0,3
10 mm	Gjennomsnittsverdi:	0,8	14,9	2,3	7,9	0,1	0,1	0,0	73,5	0,4
	Standardavvik:	0,7	11,9	1,0	4,4	0,0	0,1	0,1	10,1	0,1
15 mm	Gjennomsnittsverdi:	0,9	40,4	8,1	21,7	0,2	0,4	0,5	26,7	0,6
	Standardavvik:	0,8	3,0	2,6	3,4	0,0	0,2	0,1	7,2	0,2



## FTC



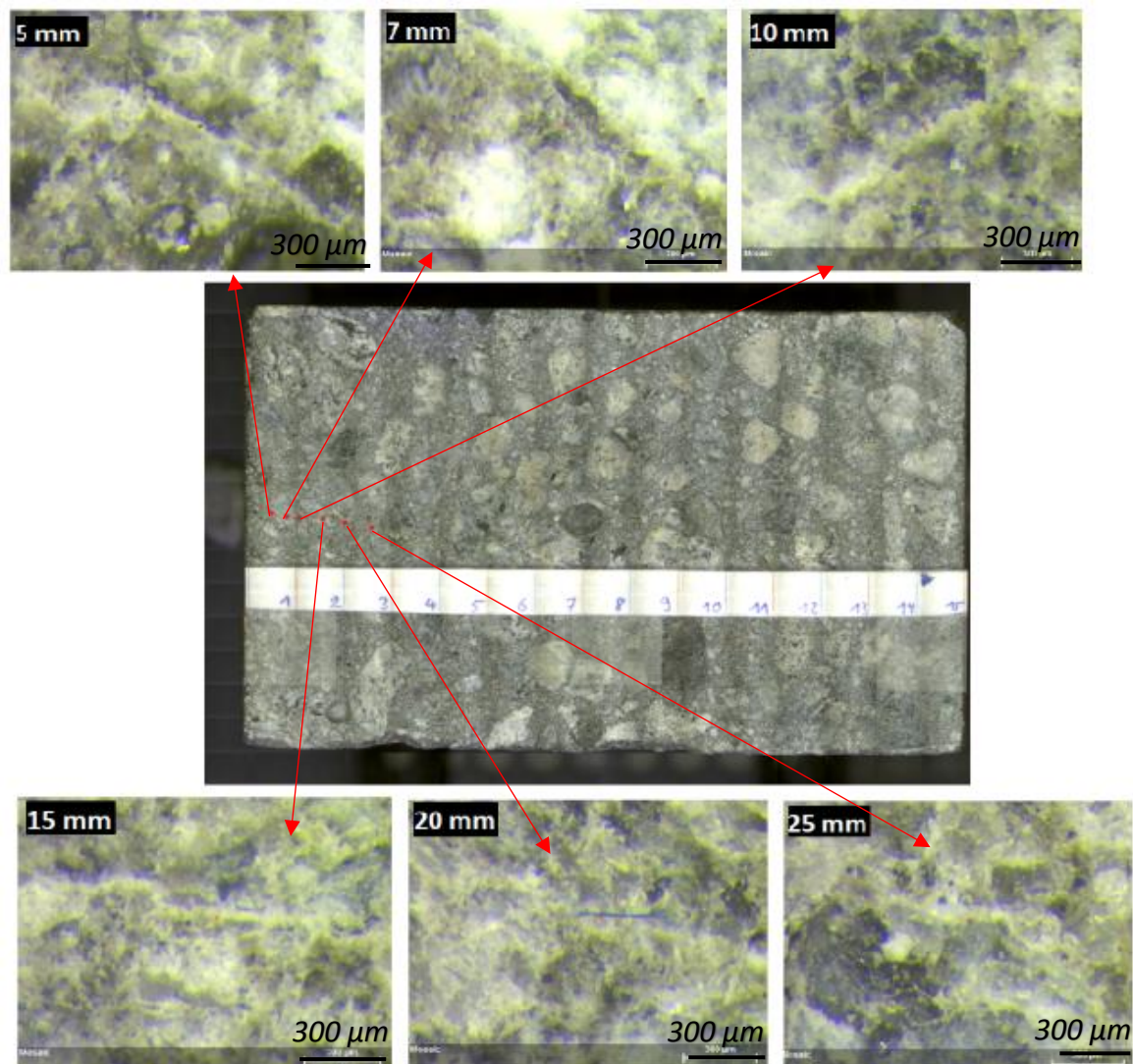
Figur 4.22: Oversiktsbilde over riss. De røde inntegnede prikkene langs risset tilsvarer punktene som det er tatt nærbilde av, henholdsvis 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm og 50 mm inn i risset.

Tabell 4.8: Punktmålinger. Verdiene som presenteres er en gjennomsnittsverdi fra 5 punktmålinger gitt i atomprosent (%).

		Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
5 mm	Gjennomsnittsverdi:	0,9	0,1	4,9	82,9	0,1	0,2	7,0	3,5	0,1
	Standardavvik:	0,7	0,0	4,5	12,1	0,0	0,0	6,9	1,6	0,0
15 mm	Gjennomsnittsverdi:	0,9	13,8	1,3	27,5	0,1	1,5	0,4	54,0	0,3
	Standardavvik:	0,7	3,9	0,3	22,3	0,1	0,6	0,3	24,1	0,1
20 mm	Gjennomsnittsverdi:	12,2	39,7	1,3	11,1	0,3	19,4	3,7	11,4	0,8
	Standardavvik:	2,2	3,1	0,3	4,4	0,0	3,6	0,5	0,6	0,5

## Kjerner i nedsenket sone

### BSC



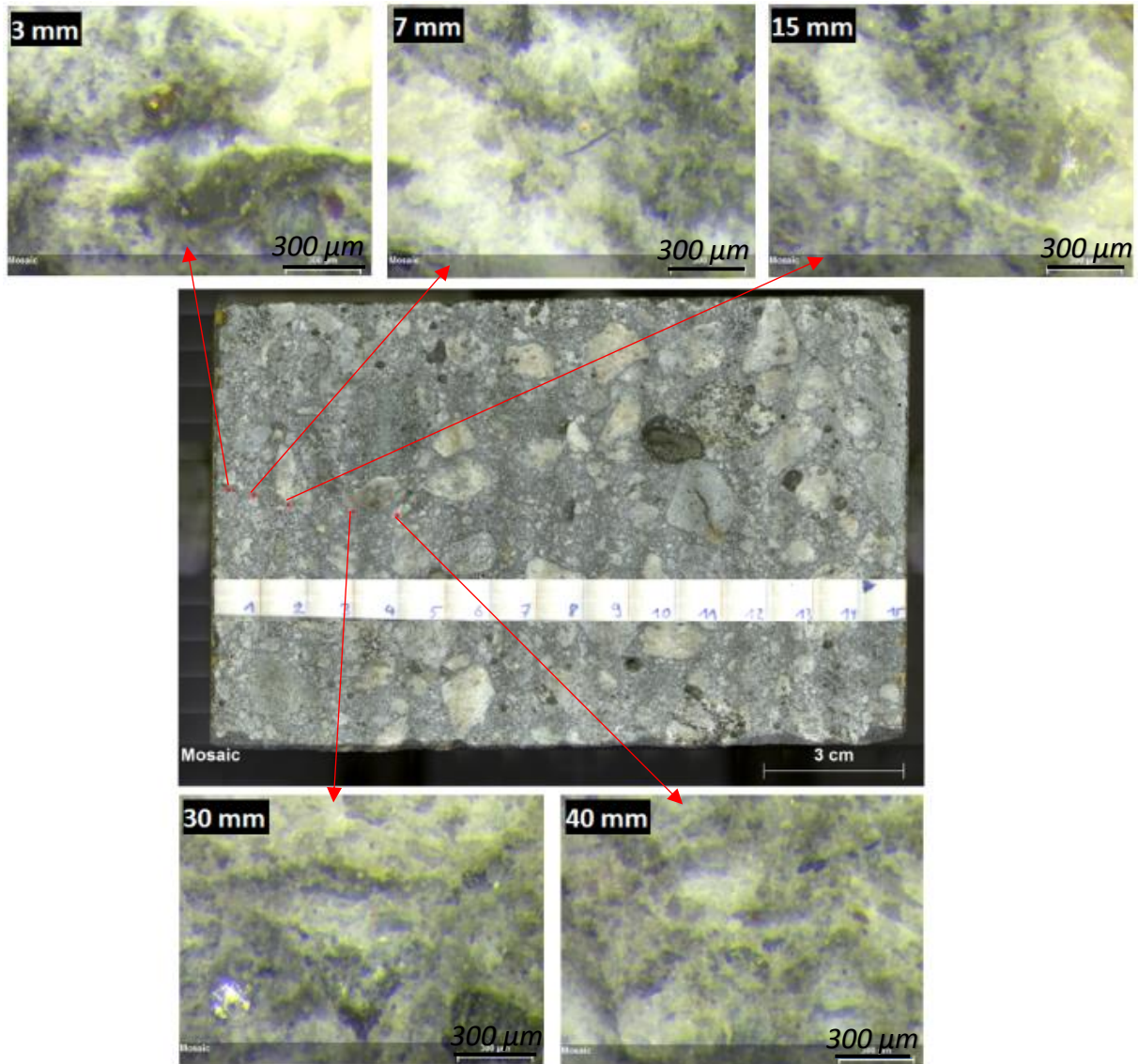
Figur 4.23: Oversiktsbilde over riss. De røde inntegnede prikkene langs risset tilsvarer punktene som det er tatt nærbilde av, henholdsvis 5 mm, 7 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm og 25 mm inn i risset.

Tabell 4.9: Punktmålinger. Verdiene som presenteres er en gjennomsnittsverdi fra 3 punktmålinger gitt i atomprosent (%).

		Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
5 mm	Gjennomsnittsverdi:	0,0	5,4	3,0	13,0	0,2	2,2	0,4	71,9	3,6
	Standardavvik:	0,0	0,3	0,3	0,5	0,0	0,2	0,0	0,2	0,1
10 mm	Gjennomsnittsverdi:	0,1	9,7	2,8	13,0	0,8	1,8	0,5	69,0	2,1
	Standardavvik:	0,1	4,1	0,7	3,7	0,3	0,4	0,1	3,1	1,2
20 mm	Gjennomsnittsverdi:	0,4	0,8	6,1	21,2	3,7	2,8	2,1	59,0	3,6
	Standardavvik:	0,4	0,3	0,6	1,1	1,1	0,5	0,3	1,3	0,4



## ESC

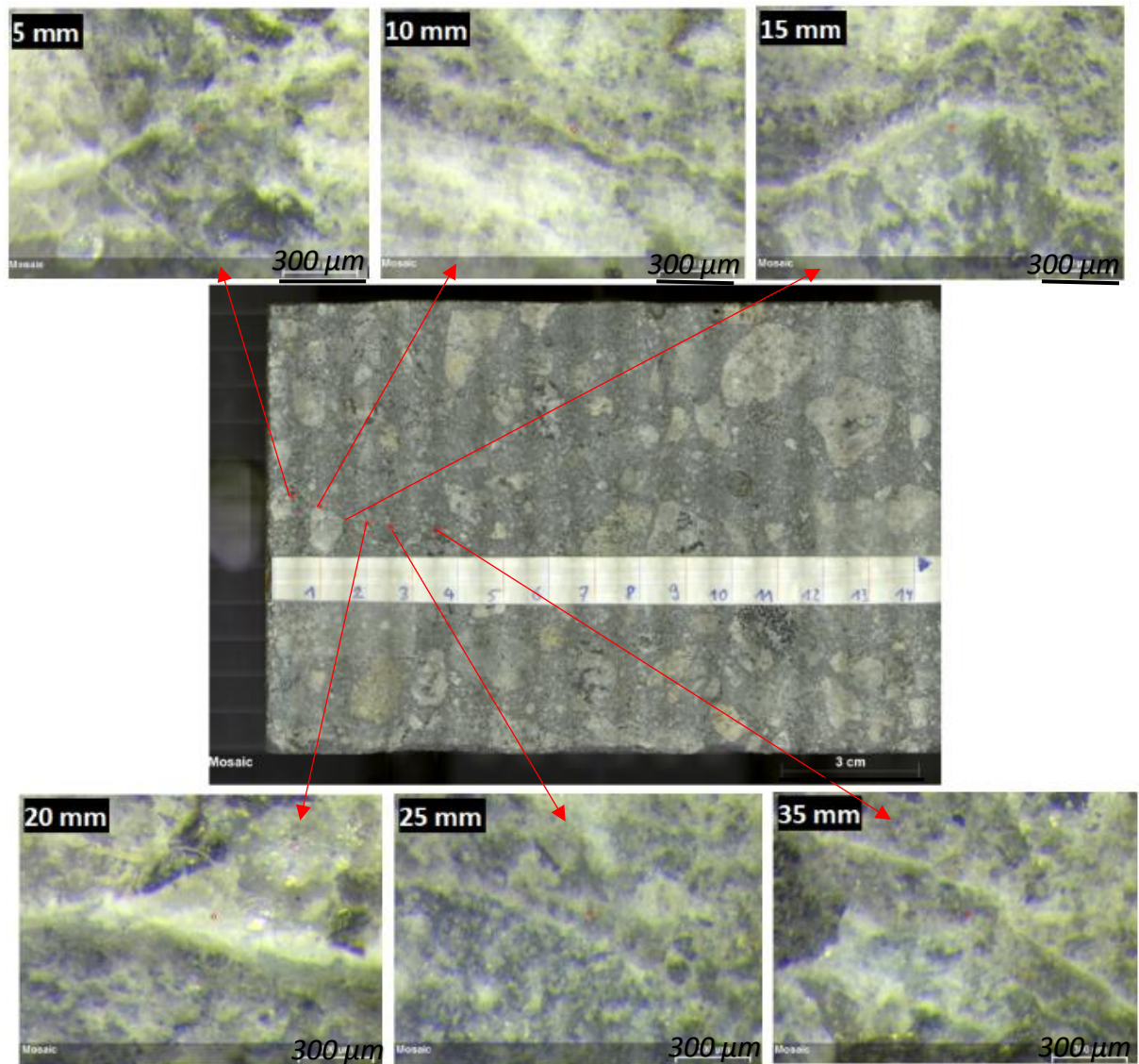


Figur 4.24: Oversiktsbilde over riss. De røde inntegnede prikkene langs risset tilsvarer punktene som det er tatt nærbilde av, henholdsvis 3 mm, 7 mm, 15 mm, 30 mm og 40 mm inn i risset.

Tabell 4.10: Punktmålinger. Verdiene som presenteres er en gjennomsnittsverdi fra 3 punktmålinger gitt i atomprosent (%).

		Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
5 mm	Gjennomsnittsverdi:	0,0	50,3	0,8	9,3	0,2	0,0	0,3	36,7	2,1
	Standardavvik:	0,0	3,0	0,3	3,1	0,0	0,0	0,1	1,9	0,1
7 mm	Gjennomsnittsverdi:	1,5	0,2	14,8	44,8	0,9	0,2	12,1	22,9	2,0
	Standardavvik:	0,4	0,3	0,9	11,8	0,6	0,2	7,6	18,1	1,5
30 mm	Gjennomsnittsverdi:	0,6	1,1	5,5	34,8	1,2	0,3	1,1	50,2	4,4
	Standardavvik:	0,3	0,2	0,9	3,1	0,2	0,1	0,1	2,1	0,4

## FSC



Figur 4.25: Oversiktsbilde over riss. De røde inntegnede prikkene langs risset tilsvarer punktene som det er tatt nærbilde av, henholdsvis 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm og 35 mm inn i risset.

Tabell 4.11: Punktmålinger. Verdiene som presenteres er en gjennomsnittsverdi fra 3 punktmålinger gitt i atomprosent (%).

		Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
15 mm	Gjennomsnittsverdi:	6,8	6,8	9,0	33,7	1,0	0,2	1,7	39,3	1,4
	Standardavvik:	0,9	1,3	0,6	2,5	0,1	0,0	0,3	3,3	0,2
20 mm	Gjennomsnittsverdi:	5,0	1,8	8,9	25,7	4,8	0,2	1,4	50,8	1,3
	Standardavvik:	1,2	0,2	1,3	3,3	0,3	0,0	0,2	5,8	0,2
25 mm	Gjennomsnittsverdi:	5,8	1,0	10,8	30,6	1,4	0,4	2,2	44,1	3,4
	Standardavvik:	0,5	0,1	1,4	1,8	0,1	0,0	0,3	3,9	0,1



Punktmålingene for samtlige kjerner viser generelt at utfellingen består av faser der det er andelen kalsium, silisium og magnesium som dominerer. Aluminium, natrium og kalium er som regel også tydelig til stede. Mengden av de ulike stoffene varierer mellom punktene, og det er ikke mulig å se en spesiell tendens. I atmosfære/skvalpe- og tidevannssonene øker mengden magnesium som regel innover i risset. Det er generelt en veldig liten tilstedeværelse av magnesium i nedsenket sone sammenlignet med de andre sonene.

### Grad av selvreparasjon langs rissene

Tabell 4.12 - Tabell 4.14 gir en oversikt over rissvidder målt med  $\mu$ -XRF langs rissdybden for kjernene i samtlige eksponeringssoner. Ut fra tabellene fremkommer det at den største rissvidden som er fullstendig tettet av selvreparasjons-materiale er 0,24 mm i tidevannssonen. Rissvidder over 0,3 mm er kun delvis tettet, men det fremkommer også et tilfelle der et riss med vidde 0,12 mm kun er delvis tettet. I atmosfære/skvalpesonen er den største rissvidden som er fullstendig tettet 0,09 mm, mens for nedsenket sone er det 0,2 mm.

Tabell 4.12: Rissvidder målt langs riss med  $\mu$ -XRF for kjerner i atmosfæresonen. (-) betyr at risset er for lite for måling.

Kjerne	BAC		EAC		FAC	
	Rissvidde [mm]	S <sup>1</sup>	Rissvidde [mm]	S	Rissvidde [mm]	S
5	-		0,06	■	0,09	■
10	-		-		0,10	▲
15	-				0,09	▲
20	-				0,07	■
25	0,09	□				
30						
35						
40						
50						

<sup>1</sup> = Hvit utfelling som indikerer selvreparasjon; ■ riss fremstår som fullstendig tettet; ▲ riss fremstår som delvis tettet; □ riss er ikke tettet

Tabell 4.13: Rissvidder målt langs riss med  $\mu$ -XRF for kjerner i tidevannssonen. (-) betyr at risset er for lite for måling.

Kjerne	BTC		ETC		FTC		
	Dybde [mm]	Rissvidde [mm]	S <sup>1</sup>	Rissvidde [mm]	S	Rissvidde [mm]	S
5		0,33	▲	0,24	■	0,32	▲
10		0,15	■	0,23	■	0,15	■
15		0,11	■	0,15	■	0,21	■
20		-	■	-		0,10	■
25				0,07	■	0,13	■
30				-		-	
35				0,09	■	0,06	■
40				-	■	-	
50				0,12	▲	0,03	■

<sup>1</sup> S = Hvit utfelling som indikerer selvreparasjon; ■ riss fremstår som fullstendig tettet; ▲ riss fremstår som delvis tettet

Tabell 4.14: Rissvidder målt langs riss med  $\mu$ -XRF for kjerner i nedsenket sone. (-) betyr at risset er for lite for måling.

Kjerne	BSC		ESC		FSC		
	Dybde [mm]	Rissvidde [mm]	S <sup>1</sup>	Rissvidde [mm]	S	Rissvidde [mm]	S
5		0,12	▲	0,16	▲	0,05	■
10		0,09	■	-		0,02	■
15		0,04	■	0,04	■	0,06	■
20		0,10	▲	-		0,20	■
25		-		0,03	■	0,07	■
30				0,12	▲	-	
35				-		0,02	■
40				0,07	▲		
50							

<sup>1</sup> S = Hvit utfelling som indikerer selvreparasjon; ■ riss fremstår som fullstendig tettet; ▲ riss fremstår som delvis tettet

## 5. Diskusjon

### 5.1 Påvirkning av miljø og bindertype på selvreparasjon av riss

Det ble med  $\mu$ -XRF tatt punktanalyser av utfellingen i rissene som gir informasjon rundt andelen grunnstoffer gitt i atomprosent. Det gir prosentandelen av et atom i forhold til det totale antallet atomer i det punktet. Det er som tidligere påpekt ikke mulig å få ut nøyaktig hvilke kjemiske forbindelser som er tilstede i en slik analyse. En må derfor se på andelen av et stoff i forhold til et annet for å få en indikasjon på hvilke forbindelser det kan være snakk om. C-S-H har vanligvis formelen  $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (Sellevold, 2014). Dersom det for eksempel i et område blir målt mye kalsium og silisium med et forhold på ca.  $3/2=1,5$  kan dette indikere tilstedeværelse av C-S-H. Ca/Si forholdet er imidlertid veldig varierende, og er også avhengig av sementsammensetning.

For å få en indikasjon på hva som er mekanismen bak utfellingen i rissene ble det derfor lagt vekt på å se på forholdet mellom de ulike stoffene. Det er spesielt fokusert på stoffene Mg, Ca og Si siden dette er stoffer som kan gi en indikasjon på mekanismene for selvreparasjon av riss, henholdsvis brucitt, kalsiumkarbonat og videre hydratisering. Dette lot seg ikke enkelt avgjøre, da en målt mengde i et punkt kan inngå i flere forskjellige forbindelser. En analyse består av 5 målinger innenfor et lite areal. Målingene viste ofte veldig varierende mengder av et stoff innenfor et punkt, noe som indikerer at utfellingen antagelig består av flere ulike faser. Kalsium kan for eksempel inngå i kalsiumkarbonat  $\text{CaCO}_3$ , men det kan også inngå i C-S-H fra videre hydratisering, samt rekrystallisert kalsiumhydroksid  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . For å avgjøre om det kan inngå i en C-S-H forbindelse ser man som nevnt grovt sett at forholdet mellom kalsium og silisium er  $3/2=1,5$ . Så lenge det er både silisium og kalsium til stede er det ikke snakk om ren utfelling av kalsiumkarbonat. Dersom forholdet mellom kalsium og silisium er for eksempel 1,83 er det fortsatt mulig at kalsium er en del av en C-S-H forbindelse, mens resterende mengde Ca er kalsiumkarbonat eller rekrystallisert kalsiumhydroksid.

Ifølge Tobias A. Danner, forsker ved NTNU, (personlig kommunikasjon, 30.mai.2018) er en begrensning ved  $\mu$ -XRF at det bare kan måles elementer med atomnummer  $\geq 11$  (Na). Karbon, hydrogen og oksygen kan altså ikke måles. Dermed er det ikke mulig å finne ut nøyaktig hvilken forbindelse Ca egentlig er en del av. En usikkerhet ved selve analysen er fokuseringen av punktmålingene. Det er mulig at fokuset enkelte steder har vært slik at målingen har blitt tatt i kanten av utfellingen. Dermed kan det fanges opp høye verdier av

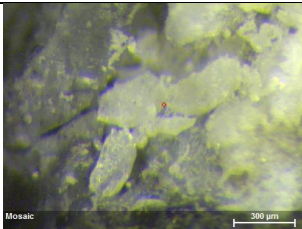
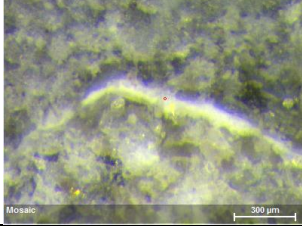
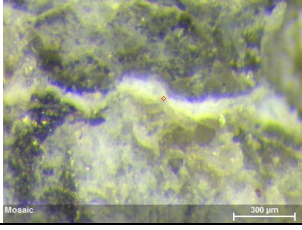
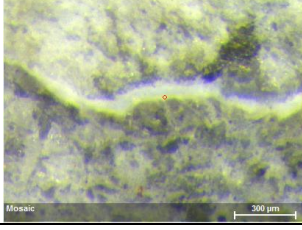
for eksempel silisium fra betongen, som kan forstyrre tolkningen av hva utfellingen består av.

Nærbilder av rissene og resultatet fra punktanalysene presenteres videre i adskilte tabeller. Nærbilder av rissene presenteres sammen med målte rissvidder og grad av selvreparasjon i de respektive punktene. Det er bare fremstilt nærbilder av rissene i de områdene hvor det er utført punktanalyser. Punktanalysene for atmosfære/skvalpesone og nedsenket sone fremstilles i samme tabell da det kun er disse som har sammenlignbare rissvidder. Disse rissviddene er mindre enn i tidevannssonen, antagelig på grunn av måten bjelkene var oppspent på. For atmosfæresonen er det kun foretatt analyser for kjerne FAC, da kjerne EAC og BAC ikke viste synlig riss. Analysene er ikke alltid utført på samme sted, men er tatt der hvor det er tydeligst tegn til selvreparasjon for å kunne fokusere punktmålingene best mulig i utfellingen.

### **5.1.1 Nærbilder av utfelling i riss**

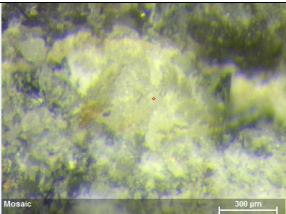

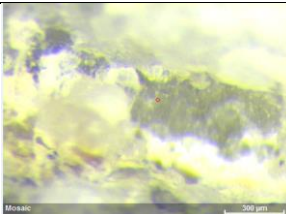
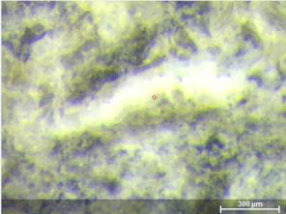
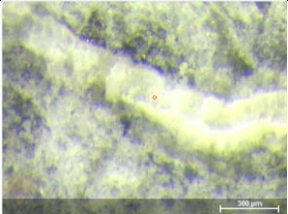
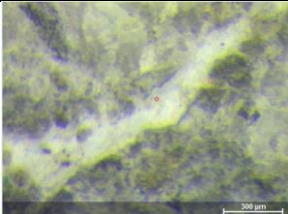
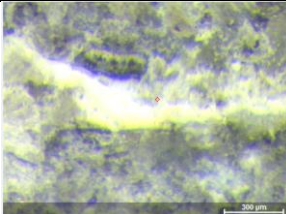

Tabell 5.1 - Tabell 5.3 viser nærbilder tatt innover i risset for de respektive sonene. Under hvert bilde fremstilles målt rissvidde sammen med grad av selvreparasjon i det gitte punktet. Grad av selvreparasjon indikeres med symboler som tilsier om risset er fullstendig eller kun delvis reparert.

Tabell 5.1: Nærbilder tatt med  $\mu$ -XRF for atmosfære/skvalpesone; FAC. Der rissvidde ikke er oppgitt foreligger det ikke målinger.

<b>FAC</b>	
1 mm	
Rissvidde [mm]	
5 mm	
Rissvidde [mm] 0,09 ■	
10 mm	
Rissvidde [mm] 0,10 ▲	
15 mm	
Rissvidde [mm] 0,09 ▲	

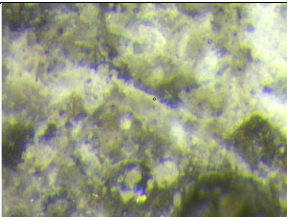
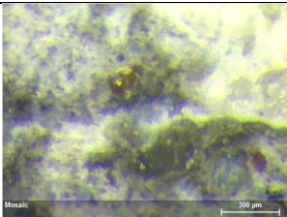
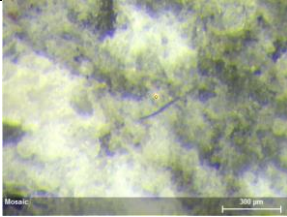
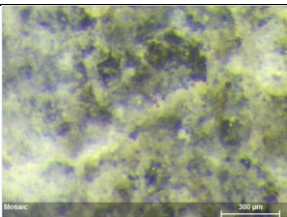
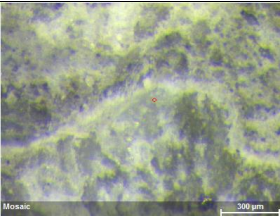
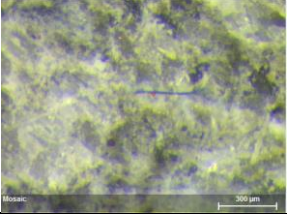
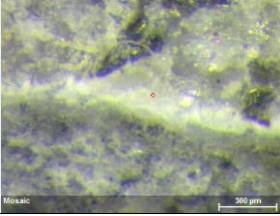
Nærbildet ved 1 mm skiller seg ut i forhold til de andre i denne sonen. Ut fra bildet ser man på kornene at det antagelig er avbrutte betongpartikler/tilslag. Punktanalysen for dette punktet viser at det er store mengder silisium, aluminium og natrium her, noe som kan tyde på at det er avbrutte betongpartikler som fyller risset helt ytterst. Det observeres at det er en tydelig hvit utfelling innover i risset.

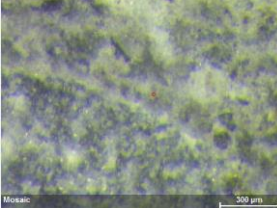
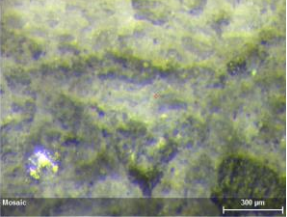
Tabell 5.2: Nærbilder tatt med  $\mu$ -XRF av kjerner i tidevannssone; BTC, ETC og FTC. Der risssidde ikke er oppgitt foreligger det ikke målinger.

	BTC	ETC	FTC
5 mm			
Risssidde [mm]	0,33 ▲	0,24 ■	0,32 ▲
10 mm			
Risssidde [mm]	0,15 ■	0,23 ■	0,15 ■
15 mm			
Risssidde [mm]	0,11 ■	0,15 ■	0,21 ■
20 mm			
Risssidde [mm]			0,10 ■

Nærbildene av rissene ved 5 mm, viser for alle kjernene litt gulaktig utfelling. Nærbildene fra BTC og FTC er mer like enn bilde fra ETC. Denne observasjonen kan ses i sammenheng med grunnstoffene til stede i disse punktene for kjernene. BTC og FTC har begge svært høye verdier for silisium, mens ETC har kalsium som dominerende grunnstoff for punktmålingene ved 5 mm. For BTC og FTC kan det, likt som for atmosfæresonen, tyde på at det er mekaniske prosesser som tetter risset helt ytterst. Ut fra nærbildene av kjerne BTC og FTC kan det se ut til at det nemlig er avbrutte betongpartikler. Nærbildet for ETC viser en mer jevn utfelling, som sammen med kalsium kan tyde på utfelling av kalsiumkarbonat.

Tabell 5.3: Nærbilder tatt med  $\mu$ -XRF av kjerner i nedsenket sone; BSC, ESC og FSC. Der risssidde ikke er oppgitt foreligger det ikke målinger.

	BSC	ESC	FSC
5 mm			
Risssidde [mm]	0,12 ▲	0,16 ▲	0,05 ■
7 mm			
Risssidde [mm]			
10 mm			
Risssidde [mm]	0,09 ■		0,02 ■
15 mm			
Risssidde [mm]	0,04 ■	0,04 ■	0,06 ■
20 mm			
Risssidde [mm]	0,10 ▲		0,2 ■

25 mm		
Rissvidde [mm]	0,03 ■	0,07 ■
30 mm		
Rissvidde [mm]	0,12 ■	

For nærbildene i nedsenket sone ser rissene relativt like ut for alle reseptene. Ved første øyekast ser det generelt ut til å være mindre hvit utfelling i forhold til bildene fra atmosfære/skvalpesonen og tidevannssonen.

Atmosfære/skvalpesonen og nedsenket sone har generelt sammenlignbare rissvidder. På grunn av færre rissviddemålinger som foreligger for kjernene i atmosfære/skvalpesonen er det ikke nok grunnlag for å sammenligne om en av sonene har større grad av selvreparasjon enn den andre. Angående påvirkningen av miljø på grad av selvreparasjon, var det i utgangspunktet forventet mer selvreparasjon i tidevannssonen enn i de to andre sonene. Dette på grunn av at rissene oftere kommer i kontakt med CO<sub>2</sub> fra luften som løser seg opp i vannet. Det fører til kalsiumkarbonat-utfelling, i tillegg til at videre hydratisering også er blitt observert som en mekanisme ved syklisk påkjenning (Maes, Snoeck og De Belie, 2016). Om forventningen stemmer eller ikke er ikke lett å konstatere, da rissene i atmosfære/skvalpe- og nedsenket sone ble målt til å være mindre enn i tidevannssonen. Det kan uansett spekuleres i om det er større grad av selvreparasjon i tidevannssonen da rissvidder helt opp til 0,24 mm er fullstendig reparert i denne sonen, mens riss over 0,1 mm generelt ikke repareres fullstendig i atmosfære/skvalpe- og nedsenket sone. Et unntak er for kjerne FSC, der et riss med vidde 0,2 mm er fullstendig reparert. Det er ikke nok grunnlag for å si noe om dette har sammenheng med type binder å gjøre, siden det ikke finnes riss av denne størrelsen som det kan sammenlignes med for atmosfære/skvalpesonen og resten av reseptene i nedsenket sone. Det ser derimot generelt ut til at riss under 0,1 mm som regel repareres fullstendig uavhengig av binder i både atmosfære/skvalpe- og nedsenket sone. Det er heller ingen tegn på at bindertype har en påvirkning i tidevannssonen.



Det at største rissvidde som er fullstendig selvreparert er på 0,24 i tidevannssonen, viker ikke langt i fra andre forsøk som viste at maks rissvidde er 0,2 mm (Edwardsen (1999); Palin, Jonkers og Wiktor (2016); Van Tittelboom *et al.* (2012)). Dette var riktig nok korttidsforsøk med andre parametere. Mohammed, Otsuki og Hamada (2003) fant derimot ut at rissvidder så store som 0,5 mm kunne repareres etter 15 års marin eksponering. Riss av denne størrelsen foreligger ikke her, men det observeres at riss over 0,3 mm kun er delvis reparert helt ytterst (5 mm) inn i risset. Det kan spekuleres i om større riss kunne vært reparert fullstendig avhengig av plassering i risset, men det forblir uvisst i dette prosjektet.

Tabell 4.12 - Tabell 4.14 ga et overordnet bilde av dybden på målte riss sett sammen med rissvidder og indikasjoner på selvreparasjon. Ut fra tabellene ser det ut til at kjernene i atmosfære/skvalpesonen generelt har mye mindre dybde på rissene enn for tidevann- og nedsenket sone. I følge Holtmon og Isaksen (1994) ble rissene dannet med en dybde på 70-90 mm og rissvidde på 0,1-0,2 mm. Det antas at mindre synlige rissdybder ikke skyldes selvreparasjon, men heller at måten bjelkene ble oppspent på gjorde rissene mindre.

### 5.1.2 Analyse av punktmålinger i utfellingen

Tabell 5.4: Oversikt over avleste grunnstoffer fra punktmålinger for atmosfære/skvalpesone og nedsenket sone. Verdiene som presenteres er representative gjennomsnittsverdier gitt i atomprosent.

		FAC	BSC	ESC	FSC
1 mm	Ca	7,8			
	Mg	0,2			
	Si	54,8			
	Al	20,2			
	K	2,3			
	Na	13,2			
	S	0,2			
	Fe	1,0			
	Cl	0,1			
5 mm	Ca	24,5	71,9	36,7	
	Mg	30,4	5,4	50,3	
	Si	30,1	13,0	9,3	
	Al	9,3	3,0	0,8	
	K	3,2	0,4	0,3	
	Na	2,0	0,0	0,0	
	S	0,1	0,2	0,2	
	Fe	0,1	3,6	2,1	
	Cl	0,1	2,2	0,0	

7 mm	Ca		22,9
	Mg		0,2
	Si		44,8
	Al		14,8
	K		12,1
	Na		1,5
	S		0,9
	Fe		2,0
	Cl		0,2
10 mm	Ca	34,3	69,0
	Mg	33,5	9,7
	Si	22,5	13,0
	Al	4,2	2,8
	K	0,7	0,5
	Na	0,6	0,1
	S	1,0	0,8
	Fe	2,3	2,1
	Cl	0,6	1,8
15 mm	Ca	21,9	39,3
	Mg	18,3	6,8
	Si	37,7	33,7
	Al	12,1	9,0
	K	6,9	1,7
	Na	2,2	6,8
	S	0,0	1,0
	Fe	0,4	1,4
	Cl	0,1	0,2
20 mm	Ca		59,0
	Mg		0,8
	Si		21,2
	Al		6,1
	K		2,1
	Na		0,4
	S		3,7
	Fe		3,6
	Cl		2,8
25m m	Ca		44,1
	Mg		1,0
	Si		30,6
	Al		10,8
	K		2,2
	Na		5,8
	S		1,4
	Fe		3,4
	Cl		0,4

30 mm	Ca	50,2
	Mg	1,1
	Si	34,8
	Al	5,5
	K	1,1
	Na	0,6
	S	1,2
	Fe	4,4
	Cl	0,3

Helt ytterst i risset i atmosfære/skvalpesonen (ved 1 mm), er det tydelig avbrutte betongpartikler på grunn av høyest andel silisium, i tillegg til mengder aluminium og natrium som kan finnes i for eksempel tilslag. Nærbildet ved 1 mm viste tydelig at det er avbrutte partikler. Videre innover i risset er det relativt jevne andeler av kalsium, magnesium og silisium. Det antas at kalsium og magnesium indikerer kalsiumkarbonat og brucitt, noe som svarer til den karakteristiske hvite utfellingen. Forholdet mellom Ca/Si tilsvarer ca. 1,5 og tilsier mulig utfelling av videre hydratiseringsprodukter i tillegg. I atmosfære/skvalpesonen var det på forhånd forventet lite selvreparasjon. Dette på grunn av at tilgang på vann er den viktigste faktoren for selvreparasjon (de Rooij *et al.*, 2013). Det var likevel forventet at det kunne finnes noe utfelling av kalsiumkarbonat på grunn av at sonen tidvis bli utsatt for skvalping. Det var ikke forventet videre hydratisering på grunn av antatt lite tilgang på vann. Dannelsen av brucitt stammer utelukkende fra at sjøvann har kommet inn i risset, så det er likevel mulig at det er dannet nye C-S-H produkter også. På grunn av at tilgangen på vann som regel er begrenset antas det uansett at videre hydratisering ikke er en hovedmekanisme i denne sonen, da dette foregår langsommere en utfelling av kalsiumkarbonat (Maes, Snoeck og De Belie, 2016). Det er også mistanke om at silisium sammen med blant annet aluminium kan være en del av betongen som har blitt med i punktmålingen, eventuelt små avbrutte korn.

Punktmålingene innover rissene i nedsenket sone viser generelt et mengdeforhold mellom kalsium og silisium som kan tilsa både tilstedeværelse av C-S-H og andre forbindelser som inneholder kalsium. Punktmålingen ved 20 mm for BSC trekkes frem som et eksempel. Her er forholdet Ca/Si=2,8. Det er naturlig å anta at dette kan inngå både i en C-S-H forbindelse og en annen kalsium-rik forbindelse. Noen steder er det også mistanke om at siden rissene er så små, kan fokuseringen på punktmålingen ha havnet litt utenfor selve utfellingen slik at stoffer i betongen er blitt fanget opp. Om de andre forbindelsene dreier seg om kalsiumkarbonat eller rekrystallisert kalsiumhydroksid er ikke sikkert. Det kan forventes at

det kan være kalsiumkarbonat da man kan se litt hvit utfelling, men på en annen side fant Jacobsen, Marchand og Hornain (1995) og Huang *et al.* (2016) at rekrystallisering av kalsiumhydroksid var en av hovedmekanismene for betong fullstendig nedsenket. Dette gjaldt riktignok PC-betong nedsenket i ferskvann, og dersom man ser på punktmålingene for BSC viser denne stadig et høyere innhold av kalsium enn de andre reseptene. Det kan derfor spekuleres i om resept B har mer rekrystallisert kalsiumhydroksid, eller generelt at det er mer videre hydratisering. Dette fordi betongen antagelig inneholder mer kalsiumhydroksid enn resept E og F på grunn av at pozzolaner konsumerer kalsiumhydroksid.

Tabell 5.5: Oversikt over avleste grunnstoffer fra punktmålinger for kjerne BTC, ETC og FTC. Verdiene som presenteres er representative gjennomsnittsverdier gitt i atomprosent.

		BTC	ETC	FTC
5 mm	Ca	8,4	79,1	3,5
	Mg	1,3	1,5	0,1
	Si	55,5	42,7	82,9
	Al	18,4	4,2	4,9
	K	4,1	1,0	7,0
	Na	9,5	2,4	0,9
	S	0,2	0,1	0,1
	Fe	2,2	0,4	0,1
	Cl	0,0	0,0	0,2
10 mm	Ca	52,6	73,5	
	Mg	35,6	14,9	
	Si	8,6	7,9	
	Al	1,8	2,3	
	K	0,1	0,0	
	Na	0,1	0,8	
	S	0,2	0,1	
	Fe	0,6	0,4	
	Cl	0,4	0,1	
15 mm	Ca		26,7	54,0
	Mg		40,4	13,8
	Si		21,7	27,5
	Al		8,1	1,3
	K		0,5	0,4
	Na		0,9	0,9
	S		0,2	0,1
	Fe		0,6	0,3
	Cl		0,4	1,5
20 mm	Ca			11,4
	Mg			39,7
	Si			11,1
	Al			1,3
	K			3,7
	Na			12,2
	S			0,3
	Fe			0,8
	Cl			19,4

Punktmålingene viser at det ytterst i risset (ved 5 mm) for BTC og FTC er tettet med avbrutte betongpartikler. Dette kan sees ut fra kornformen på bildene i Tabell 5.2, samt at målingene viser høye verdier silisium. Videre innover i rissene er det generelt et mengdeforhold mellom kalsium og silisium som tilsier tilstedeværelse av C-S-H, i tillegg

til andre forbindelser som inneholder kalsium. Det antas at de andre forbindelsene kan dreie seg om kalsiumkarbonat på grunn av den karakteristiske hvite utfellingen, samt at det i litteraturen er vist at dette er hovedmekanismen ved væting/tørking. I tillegg viser samtlige resepter en tilnærmet økende mengde magnesium innover i risset. Dette indikerer tilstedeværelse av brucitt.

### **5.1.3 Oppsummering – påvirkning av miljø og bindertype på selvreparasjon av riss**

#### **Påvirkning av miljø og binder på selvreparasjons-mekanismen**

Det ble funnet selvreparerte riss i samtlige eksponeringssoner. Målingene indikerer at hvilken mekanisme som forårsaker selvreparasjon tydelig avhenger av miljøeksponeringen. I atmosfære/skvalpesonen indikerer målingene en blanding av to mekanismer; utfelling av kalsiumkarbonat og brucitt. Utfellingen i nedsenket sone viser også en blanding av flere mekanismer; utfelling av kalsiumkarbonat og/eller rekrystallisert kalsiumhydroksid, samt videre hydratisering. I motsetning til atmosfære/skvalpesonen er det generelt en ganske liten tilstedeværelse av magnesium i nedsenket sone. Ett unntak er for ESC der det er 50,3 % magnesium 5 mm inn i risset. Det tyder på at det kan være litt utfelling av brucitt i overflaten også i denne sonen, men det antas at det ikke er en av mekanismene bak selvreparasjon på grunn av de ellers små mengdene i risset. I tidevannssonen indikerer målingene at utfellingen i alle reseptene består av en blanding av kalsiumkarbonat, brucitt og videre hydratisering. For resept B er grunnlaget for denne påstanden noe mindre da det kun er 2 punktanalyser her, men det er indikasjoner på dette i målingene som foreligger. Det var på forhånd forventet å finne både kalsiumkarbonat og brucitt i tidevannssonen på grunn av syklisk tilgang på CO<sub>2</sub> fra luften, samt tilstedeværelsen av magnesium i vannet. Disse antagelsene var basert på funn fra Mohammed, Otsuki og Hamada (2003), Maes, Snoeck og De Belie (2016) og Palin, Jonkers og Wiktor (2016). Det var også forventet at det kunne påvises noe nye hydratiseringsprodukter basert på forsøkene til Maes, Snoeck og De Belie (2016). Fra de tidligere undersøkelsene i 2014 ble det observert ettringitt-lignende materiale i tidevannssonen. Det er derimot ikke tegn på det her, da andelen sulfat generelt er for minimal til at det inngår i en slik forbindelse.

I tillegg til de nevnte mekanismene ble det for to av tre kjerner i tidevannssonen, og kjernen i atmosfære/skvalpesonen, funnet tegn som tilsier at bruddpartikler fra tilslag eller betongen tetter risset ytterst. Det er bare tydelig funn på dette i den ytterste delen av risset, og har

antagelig ikke mye å si for selvreparasjons-effekten, da risset videre innover er tettet av annet materiale. De avbrutte tilslagspartiklene regnes derfor å være av mindre betydning for selvreparasjon, noe som stemmer bra opp mot annen litteratur (Edvardsen (1999); de Rooij *et al.* (2013)).

På grunn av manglende målinger for bjelke B og E i atmosfære/skvalpesonen er det ikke mulig å si noe om hvordan binder påvirker selvreparasjonsmekanismen her. I nedsenket sone har resept B et høyere innhold kalsium enn de andre reseptene, og det kan spekuleres i om PC-betong har en større evne til å danne nye hydratiseringsprodukter eller rekrystallisert kalsiumhydroksid. I tidevannssonen er det heller ingen indikasjoner på at binder påvirker hvilke mekanismer som foreligger, da punktmålingene for alle reseptene indikerer de samme mekanismene. Det ligger imidlertid en svakhet i at det ikke alltid er tatt punktmålinger på samme sted for alle reseptene, noe som gir et litt mindre sammenligningsgrunnlag.

### **Påvirkning av miljø og binder på grad av selvreparasjon**

På grunn av færre rissviddemålinger som foreligger for atmosfære/skvalpesonen er det ikke nok grunnlag for å sammenligne om en av sonene har større grad av selvreparasjon enn den andre. Det var i utgangspunktet forventet mer selvreparasjon i tidevannssonen enn i de to andre sonene. Om forventningen stemmer eller ikke er ikke lett å konstatere, da rissene i atmosfære/skvalpe- og nedsenket sone ble målt til å være mindre enn i tidevannssonen. På grunn av dette er det ikke mulig å konkludere med noe rundt effekten av miljøbetingelser på grad av selvreparasjon.

Det er ingen spesielle tegn på at bindertype er mer eller mindre effektivt. Siden det er få dokumenterte forsøk med SF, var det spesielt interessant å se om økende mengde SF kan gi mindre selvreparasjonseffekt. Dette på grunn av at Jacobsen, Marchand og Hornain (1995) observerte mindre selvreparasjon for betong med 5 % SF sammenlignet med 0 % SF. Det er imidlertid ingen tegn på dette, men sammenligningsgrunnlaget blir noe feil da alle reseptene i denne oppgaven inneholdt en viss mengde SF. Van Tittelboom (2012) observerte i et forsøk at PC-betong hadde best reparasjonseffektivitet ved utfelling av kalsiumkarbonat, men heller ikke dette er det tegn på her. At observasjoner fra slike korttidsforsøk ikke ser ut til stemme for langtidseksponert betong, er med på å bygge opp om at det fortsatt er behov for flere langtidssundersøkelser rundt selvreparasjon.

Avslutningsvis er det viktig å presisere at de foreslåtte resultatene er basert på indikasjoner. En svakhet med analysene utarbeidet i dette prosjektet er at det ikke er tatt punktmålinger i de samme punktene for alle reseptene, slik at sammenligningsgrunnlaget er noe mindre. En annen faktor er at rissene som er dannet i de ulike eksponeringssonene har veldig ulike rissvidder. Enkelte riss er så små at punktmålinger ikke lar seg gjøre. Dette er noe som begrenser sammenligningsgrunnlaget både i og mellom sonene.

## **5.2 Påvirkning av riss med hensyn på armeringens tilstand**

### **5.2.1 EKP og rissvidder**

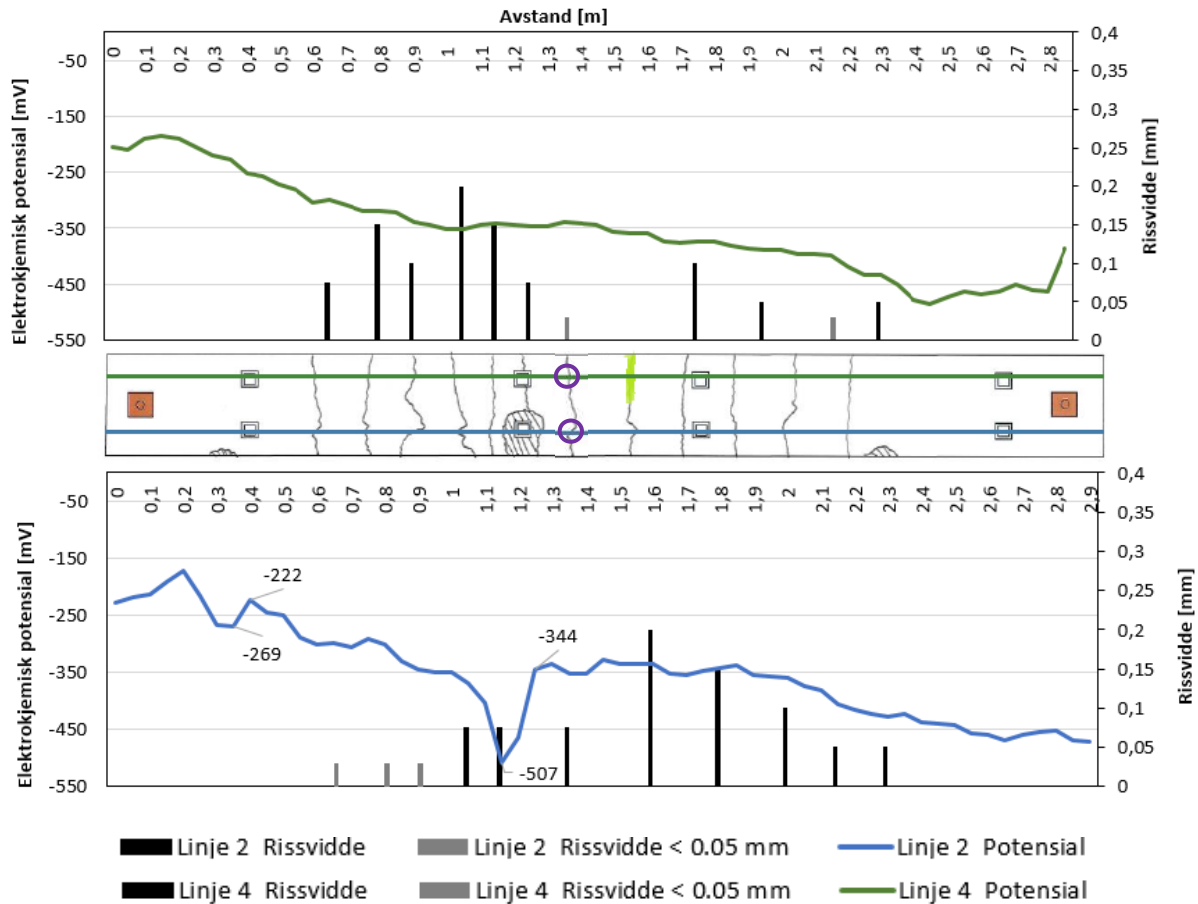
Tabell 2.8 angir typiske EKP-verdier for normalt stål i betong. Verdiene i tabellen varierer ut fra fuktighetsforholdet i betongen, om den er karbonatisert og om den inneholder klorider. Resultatene viste at betongen ikke var karbonatisert fra overflaten, noe som stemte overens med forventningene knyttet til bjelkenes plassering i tidevannssonen.

Ut fra kloridfordelingen i kapittel 4.7 og kloridprofilene i kapittel 4.8 for referansebjelkene, er det som forventet at betongen i samtlige av de tre bjelkene fra feltstasjonen er kloridforurenset. Ved tolking av EKP antas det at bjelkene har et varierende fuktinnhold på grunn av eksponering i tidevannssonen. Bjelkene har stadig vært pakket inn i plast siden de ble tatt opp av sjøen, og det antas at fuktnivået har vært noenlunde bevart gjennom undersøkelsene.

EKP-målingene på bjelkene lar seg ikke tolke direkte. Dette på grunn av at bjelkene antagelig har et varierende fuktinnhold på grunn av tidevannseksponeringen. Måling av fuktinnholdet har ikke vært en del av denne oppgaven. Resultatene viste at EKP-verdiene ble mer negative fra atmosfærisk sone ned mot nedsenket sone. Med det varierende fuktinnholdet er det ikke hensiktsmessig å benytte Tabell 2.8 direkte for å se om EKP-verdiene indikerer korrosjon. Dersom en bjelke hadde hatt en jevn fuktfordeling i hele bjelken kunne man lettere påvist områder med korrosjon på grunn av et negativt skifte i EKP-verdiene. Siden alle bjelkene fra feltstasjonen har varierende fuktnivå vil det derimot bli et naturlig negativt skifte i EKP-verdiene på grunn av fukten. Dette skyldes mindre tilgang på oksygen ved mer fukt, noe som samsvarer med mer negative verdier i tidevannssone og nedsenket sone.



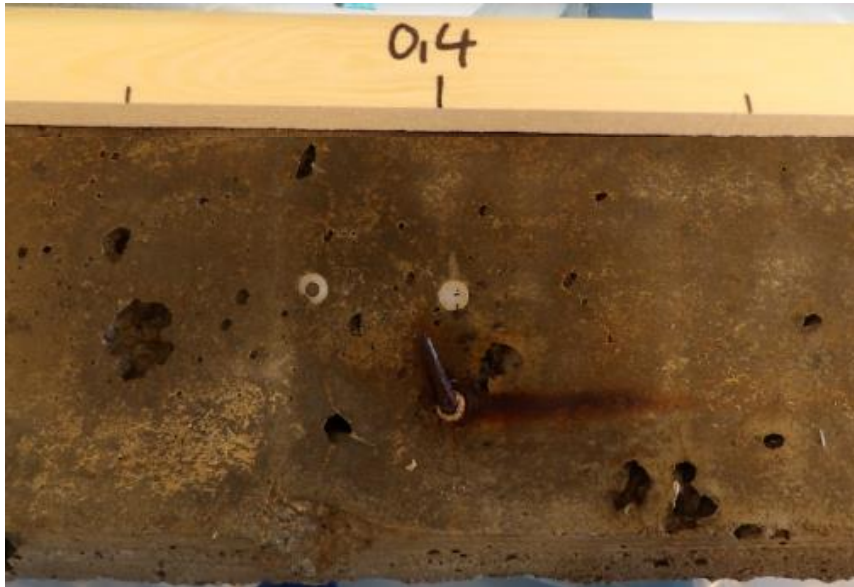
Gradientene som ble trukket frem for hver av bjelkene i kapittel 4.3 synes samtlige å sammenfalle med synlige armeringsstoler eller avskallinger på overflaten. Det er laget en sammensatt figur som viser bjelkens visuelle utseende på overflaten stilt opp mot EKP og målte rissvidder for linje 2 og 4, slik at det blir lettere å se disse sammenhengene. Figur 5.1, Figur 5.4 og Figur 5.5 viser dette for hver av bjelkene.



Figur 5.1: EKP målinger for linje 2 og 4 med målte rissvidder for bjelke B. De svarte stolpene viser målbare riss  $\geq 0,05$  mm, mens de grå stolpene viser riss  $< 0,05$  mm som ikke var direkte målbare. Mellom grafene er en skisse av bjelke B, hvor armeringsstoler, avskallinger og kjerneutboring m/armering er markert. Grønn linje indikerer linje 4 og, blå linje tilsvarer linje 2.

For linje 2 er det en gradient i området 0,3 – 0,4 m. Denne gradienten sammenfaller med korroderte spikere og en delvis synlig armeringsstol på overflaten, se Figur 5.2. Det er viktig å påpeke at skissen av bjelken mellom målingene ikke er i målestokk, slik at armeringsstolene ikke nødvendigvis sammenfaller nøyaktig med gradienten på figurene. Spikerne skal sannsynligvis holde på plass armeringsstolen under montering. Det kan spekuleres i om gradienten skyldes påbegynnende korrosjon på grunn av økt kloridinntrengning langs armeringsstolen. Gradienten ved ca. 1,2 m har en positiv

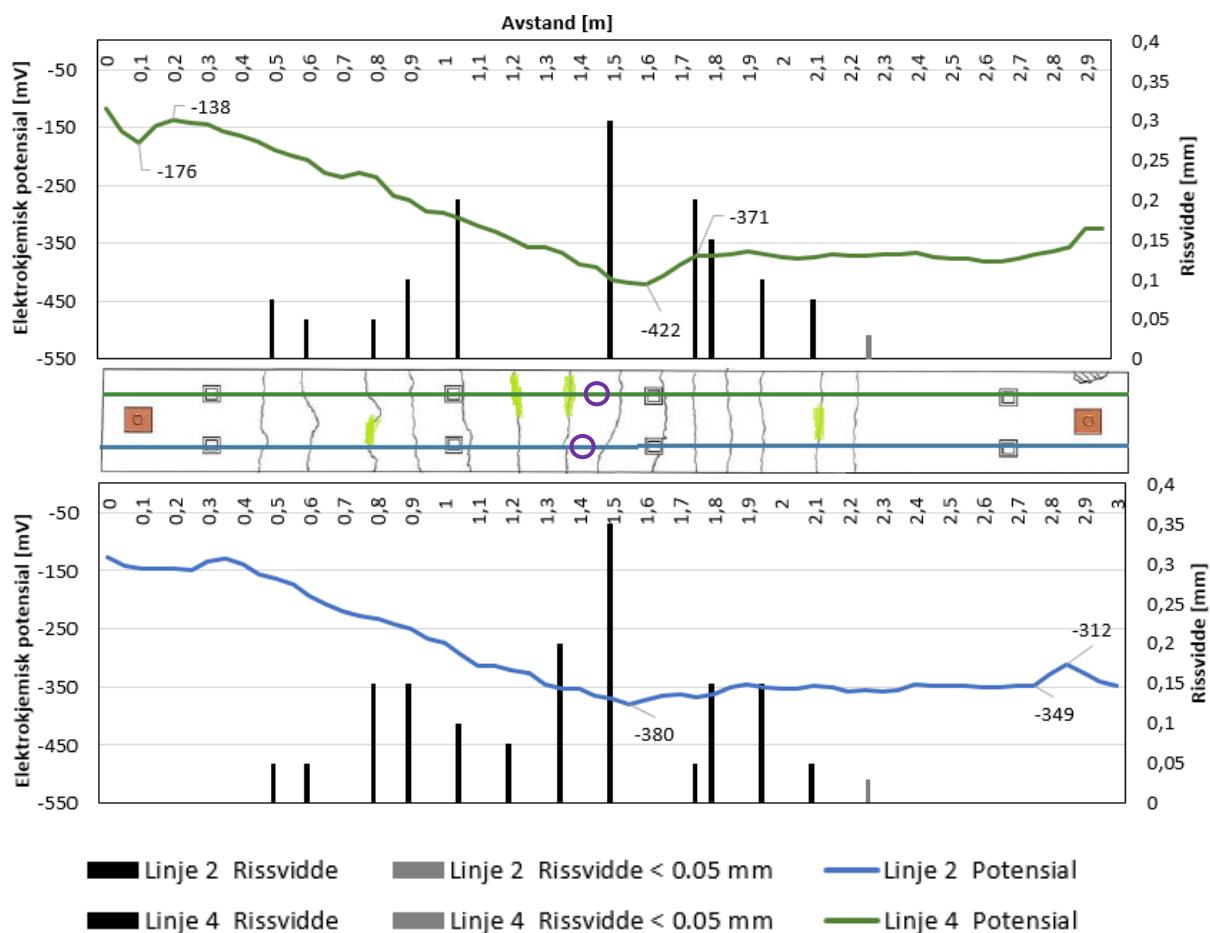
potensialforskjell på 163 mV. I henhold til Proceq (2016a) kan en positiv potensialforskjell på 100 mV indikere lokal korrosjon. Området hvor denne gradienten befinner seg langs linje 2 sammenfaller med en avskalling rundt en armeringsstol. Det er sannsynlig at klorider kan ha trengt inn langs armeringsstolen og forårsaket lokal korrosjon, noe som kan ha ført til avskallingen, se Figur 5.3.



Figur 5.2: Oppstikkende spikere synlige på overflaten mellom ca. 0,3 - 0,4 m.

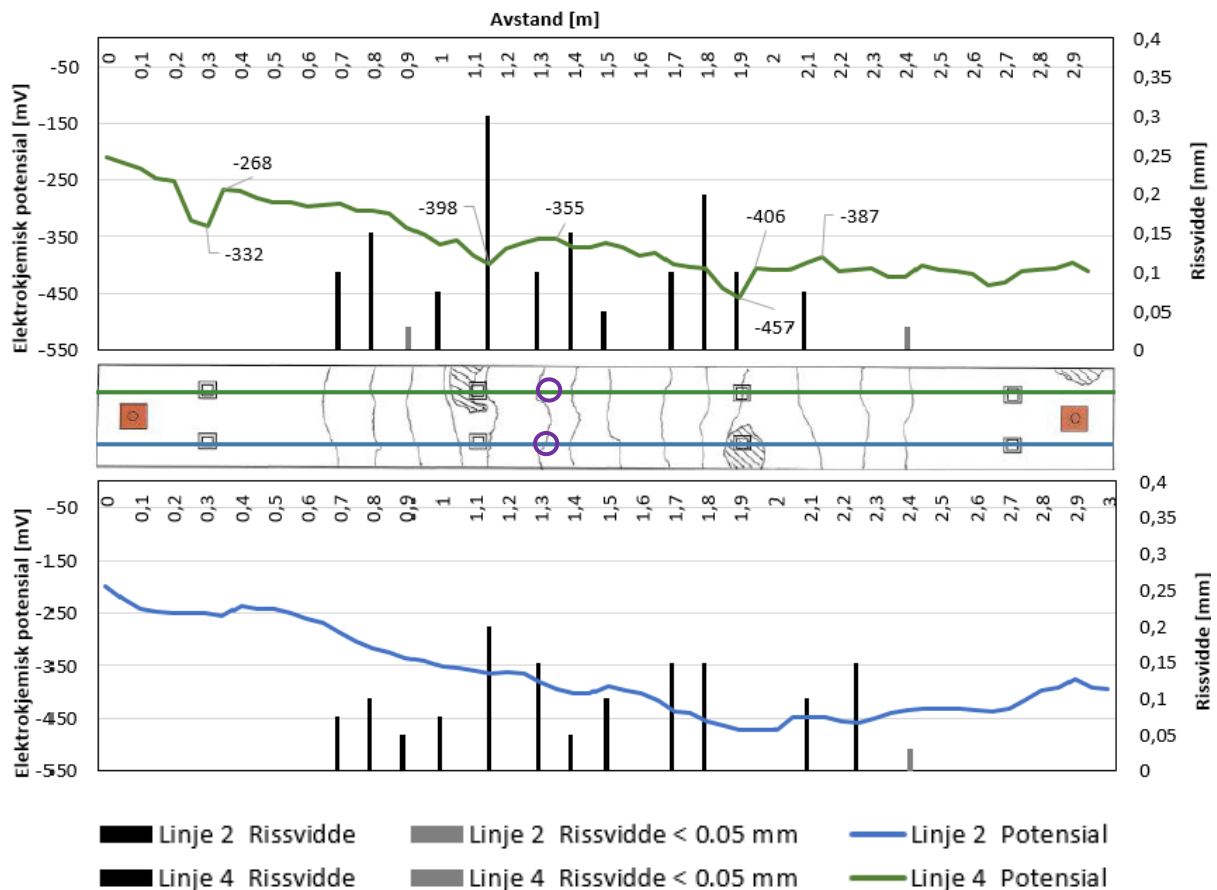


Figur 5.3: Avskalling rundt armeringsstol ved ca. 1,2 m for linje 2. Synlig rustutslag rundt armeringsstol.



Figur 5.4: EKP målinger for linje 2 og 4 med målte rissvidder for bjelke E. De svarte stolpene viser målbare riss  $\geq 0,05$  mm, mens de grå stolpene viser riss  $< 0,05$  mm som ikke var direkte målbare. Mellom grafene er en skisse av bjelke E, hvor armeringsstoler, avskallinger og kjerneutboring m/armering er markert. Grønn linje indikerer linje 4 og, blå linje tilsvare linje 2.

Det ble observert en gradient fra ca. 1,5 m til 1,65 m for linje 4 på bjelke E. Linje 5, som ikke er representert i denne figuren, viser også en gradient på samme sted. Det at EKP-verdiene langs begge linjene blir mer negative her kan tyde på at det er noe som foregår i dette området med hensyn på korrosjon. Det er også her en delvis eksponert armeringsstol som kan ha ført til at klorider har hatt en raskere inntrengning her. Det kan også spekuleres i om rissvidden på 0,3 mm kan bidra til det litt mer negative potensialet.



Figur 5.5: EKP målinger for linje 2 og 4 med målte rissvidder for bjelke F. De svarte stolpene viser målbare riss  $\geq 0,05$  mm, mens de grå stolpene viser riss  $< 0,05$  mm som ikke var direkte målbare. Mellom grafene er en skisse av bjelke F, hvor armeringsstoler, avskallinger og kjerneutboring m/armering er markert. Grønn linje indikerer linje 4 og, blå linje tilsvarende linje 2.

Figur 5.5 som viser visuelt utseende opp mot EKP og rissvidder for bjelke F viser ekstra godt at de små gradientene langs linje 4 sammenfaller med avskalling og armeringsstoler. Ingen av gradientene for bjelke F indikerer direkte korrosjon forårsaket av klorider da gradientene ikke er av betydelig størrelse, men de kan tyde på at noe er i ferd med å skje. Det kan diskuteres hvorfor det ikke har oppstått like tydelige gradienter langs linje 2 der det også er avskalling og synlige armeringsstoler.

## 5.2.2 Resistivitet

De målte resistivitetene for de tre bjelkene var som forventet. Alle bjelkene viser generelt en høyere resistivitet i atmosfærisk sone som gradvis blir lavere ned mot nedsenket sone. Dette viser tydelig at resistiviteten avhenger av fuktnivået i betongen. Fuktnivået er høyere i tidevannssonen og nedsenket sone, noe som vil gi større mulighet for transport av ioner. Fuktnivået i betongen ved måling er ikke kjent, men bjelkene ble oppbevart i plast fra de

ble tatt opp av sjøen for å bevare fuktnivået. Bjelke E inneholder 3,5 % SF og 20 % FA, og antas for å være den tetteste betongen på grunn av høyest innhold pozzolaner. Denne betongen viser høyest resistivitet i alle eksponeringssoner, noe som kan begrunnes med at en finere porestruktur henger sammen med større evne til å motstå transport av ioner. Sammenlignet med referanseverdiene gitt i Tabell 5.6 ser resistiviteten målt med Wenner probe ved 20 °C til samtlige bjelker grovt sett ut til å passe innenfor de ulike områdene. Mengden binder som tabellen tar utgangspunkt i samsvarer ikke helt med alle bjelkene, noe som kan gi forskjellig mellom verdiene.

*Tabell 5.6: Referanseverdier ved 20 °C for elektrisk resistivitet til eldre betongkonstruksjoner (alder > 10 år). Miljøbetingelsene i klammer er tilsvarende laboratorieklima. Gjengitt etter (Polder, 2001). Verdiene har blitt konvertert til kΩcm for å samsvare med displayet til Resipod.*

Miljø	Resistivitet ρ kΩcm	
	PC (CEM I)	BFS (> 65 % slagg) eller FA (> 25%) eller SF (>5 %)
Veldig våt, nedsenket, skvalpesone, tåkerom	5 - 20	30 - 100
Utendørs, eksponert	10 - 40	50 - 200
Utendørs, skjermet, belagt, hydrofobert (ikke karbonisert) [20 °C / 80 % RH]	20 - 50	100 - 400
Utendørs skjermet som ovenfor (karbonisert)	100 og høyere	200 – 600 og høyere
Innendørsklima (karbonisert) [20 °C / 50 % RH]	300 og høyere	400 – 1000 og høyere

Metodene for måling av resistivitet på hele bjelker og på utborede kjerner er ulike. Resistiviteten målt med begge metodene indikerer uansett samme tendens ved at resistiviteten avtar fra atmosfærisk til nedsenket sone. Det ble benyttet ulikt utstyr, der målingene ble utført ved ulike temperaturer og ulike frekvenser. Det noteres også at resistiviteten målt ved 20 °C er målt med en frekvens på 40 Hz, noe som ikke er direkte sammenlignbart ved noen av frekvensene som er benyttet ved måling ved 4,2 °C. Det ble

foretatt en temperaturkorrigering for målingene på kjernene ved 4,2 °C til 20 °C (temperaturen til bjelkene ved resistivetsmåling). I henhold til Polder (2001) blir resistiviteten, basert på laboratorieforsøk, 3-5 % mindre per grad temperaturøkning. Fuktnivået påvirker denne temperaturavhengigheten, der 3% tilsvarer mettet betong og 5% tilsvarer tørr betong. På grunn av et fuktnivå i bjelkene som ikke er kjent, ble det som en forenkling valgt å regne ut resistivitet korrigert for 3 % endring. Dette fordi det antas at bjelkene er nærmere en mettet tilstand enn tørr. Utregningen kan finnes i Vedlegg G – Bestemmelse av resistivitet på utborede kjerner.

Ved å betrakte resistivetsmålingene fra bjelkene sammen med resistivetsmålingene fra kjernene (korrigert for 3 % temperaturøkning), ser man at målte og beregnede verdier er veldig like. Se Vedlegg G – Bestemmelse av resistivitet på utborede kjerner for sammenlignede verdier. For bjelke F ligger resistivetsverdiene fra både kjernene og bjelken mellom 30-60 kΩcm. Ved å ta tabell 2.9 i betraktning så ser man at denne verdien havner mellom moderat og lav risiko for korrosjon. Bjelke B har verdier mellom 20 - 34 kΩcm, og angir da moderat risiko for korrosjon. Bjelke E har høyere resistivitet enn bjelke B og F, og havner i området mellom lav og neglisjerbar risiko for korrosjon. Ved å betrakte risikoen for korrosjon i henhold til resistivetsmålingene sammen med EKP, er det generelt ingen grunn til å forvente korrosjon for noen av bjelkene.

### **5.2.3 Tilstedeværelse av klorider**

I Tabell 5.7 er kloridkonsentrasjonene i dybde 20 – 30 mm trukket ut for alle referansekjernene. Det fokuseres på dette området da overdekning var ca. 25 mm i alle bjelkene. Det er generelt betydelig mindre klorider i resept E og F. Dette kan muligens skyldes en finere porestruktur grunnet høyt innhold av pozzolaner. Det var forventet at resept E ville ha aller minst kloridkonsentrasjon på grunn av en generelt høy resistivitet sammenlignet med resept B og F. Dette stemmer sett opp mot resept B, mens tabellen ikke viser store forskjeller sett opp mot resept F.

Kloridprofilen for bjelke E skiller seg ut i de ytterste sjiktene i forhold til kloridprofilene for bjelke B og F, se avsnitt 4.8. Dette skyldes utluting i de ytterste sjiktene, noe som kan skje på grunn av det høye innholdet av FA. Andre forsøk har vist at det er en tendens til utluting for betongresepter med innhold av FA (De Weerd *et al.*, 2016).

Tabell 5.7: Kloridkonsentrasjoner for referansekjerner (gitt i % sementvekt) i området der armeringen ligger i resten av betongen, ved 25 mm.

Kjerne ID	Dybde [mm]	Kloridkonsentrasjon [% sementvekt]
BAR	20 - 30	0,51
BTR	20 - 30	1,03
BSR	20 - 30	2,37
EAR	20 - 30	0,21
ETR	20 - 30	0,23
ESR	20 - 30	0,46
FAR	20 - 30	0,20
FTR	20 - 30	0,32
FSR	20 - 30	0,20

En kloridkonsentrasjon på 0,4 % av sementvekt har som nevnt i kapittel 2.2.3, vært ansett som kritisk kloridgrense før initiering av armeringskorrosjon (Statens vegvesen, 2014). Det er derimot akseptert at det ikke kan brukes som en definert verdi, da det er mange faktorer som gjør at denne verdien kan variere. Å diskutere armeringens tilstand utelukkende opp mot kloridkonsentrasjonen ved armeringen er dermed for vagt, og må brukes som en pekepinn. At kloridkonsentrasjonen i området armeringen ligger er under grensen på 0,4 % for bjelke E og F, henholdsvis 0,23 % og 0,32 %, tyder på at armeringen foreløpig er utenfor fare for klorid-initiert armeringskorrosjon. Rengjøring av armeringen fra kjernene i tidevannssonen avdekket heller ingen tegn på groptæring, noe som kan sees i sammenheng med kloridkonsentrasjonen. Bjelke B har derimot en kloridkonsentrasjon på 1,03 % i dette området, noe som er over den kritiske grensen på 0,4 %. Heller ikke her var det tegn på groptæring. På bakgrunn av observasjonene gjort av Statens vegvesen, som tilsier at denne grensen kan være langt høyere uten at det er skadelig (Statens vegvesen, 2014), er det dermed ikke sagt at det pågår skadelig armeringskorrosjon i bjelke B.

#### 5.2.4 Visuell inspeksjon av armering

Rustutfellingen som var synlig på armeringene etter splittelse av kjerner, var for alle tilfeller bare på den siden av armeringen som vender ut mot overflaten. Det kan tyde på at rustproduktene kommer utenfra, i dette tilfelle fra klorider. Alle kjernene med armering går over riss. Rengjøring av armeringen avdekket ingen tegn på groptæring, til tross for en kloridkonsentrasjon på 1,03% på nivå med armeringen for bjelke B.

### **5.2.5 Oppsummering – påvirkningen av riss med hensyn på armeringens tilstand**

Sammenstilling av EKP opp mot målte rissvidder langs de respektive linjene viser ingen generell tendens til at riss sammenfaller med potensialgradienter. På enkelte steder sammenfaller riss med potensialgradienter, men da er risset også rett ved siden av en avskalling eller synlig armeringsstol. Avskallingen er trolig et resultat av pågående lokal korrosjon ved armeringsstolen, der det mistenkes at det kan ha vært økt kloridinntrengning langs armeringsstolen. Det presiseres at det ikke er undersøkt om det har vært økt kloridinntrengning langs armeringsstoler i denne oppgaven, så dette er foreløpig kun en antagelse. Korrosjonsbildet når klorider har nådd inn til armeringen er nemlig lokal korrosjon, også kalt groptæring. Dersom man følger anbefalingen i proceq om at en positiv potensialforskjell på 100 mV indikerer lokal korrosjon så er det kun gradienten for bjelke B, på 163 mV som indikerer dette. De mindre gradientene kan muligens bety at det er en liten påbegynt korrosjon. Ved å betrakte risikoen for korrosjon i henhold til resistivitetsmålingene sammen med EKP, er det ingen tegn på stor risiko for korrosjon. Ut fra at den inspiserte armeringen fra tidevannssonen ikke viste tegn på korrosjon etter rengjøring kan det tyde på at armeringen fortsatt er i god stand. Det forventes derfor ikke, utenom lokal korrosjon ved enkelte armeringsstoler, korrosjon for noen av bjelkene.



## 6. Konklusjon

Det er studert langtidsdata for tre bjelker som har vært eksponert for marint miljø i tidevannssonen i 25 år. De tre bjelkene har ulike betongresepter, med ulikt innhold av bindemidler. Hensikten med prosjektet har vært å studere langtidsdata for å se i hvilken grad miljø- og bindertype påvirker selvreparasjon av riss. Det skulle også fastslås om riss påvirker armeringens tilstand, samt angi om det er forventet korrosjon.

### Formål A: Påvirkning av miljø og bindertype på selvreparasjon av riss

Basert på observasjonene gjort i denne oppgaven er det ikke mulig å skille ut en ren mekanisme bak selvreparasjon av riss, men det er funnet indikasjoner på at:

- Miljøbetingelser fører med seg ulike mekanismer:
  - Selvreparasjons-mekanismene bak utfellingen i atmosfære/skvalpe-sonen består av kalsium- og magnesium rike faser fra sjøvann.
  - I tidevannssonen skyldes utfellingen kalsium- og magnesium rike faser fra sjøvann i tillegg til tegn på videre hydratisering.
  - Utfellingen i nedsenket sone skyldes antagelig videre hydratisering samt andre uidentifiserte kalsium-rike faser.
- På grunn av ulike rissvidder som ikke er sammenlignbare i de ulike sonene er det ikke mulig å konkludere med noe rundt effekten av miljøbetingelser på grad av selvreparasjon.
- Det er ingen tegn på at bindertype påvirker type selvreparasjons-mekanisme i de ulike sonene eller grad av selvreparasjon.

### Formål B: Påvirkningen av riss med hensyn på armeringens tilstand.

- EKP og rissviddemålinger viser ingen effekt av riss på armeringens tilstand.
- Ingen korrosjon ble oppdaget på armering fra kjerner tatt over riss i tidevannssonen
- Det forventes generelt ikke korrosjon, men EKP-målinger og visuelle undersøkelser indikerer lokal korrosjon ved enkelte armeringsstoler.



## 7. Forslag til videre arbeid

For å studere selvreparasjonsfenomenet bør det fortsettes med undersøkelser av langtidsdata på opprisset betong eksponert for marint miljø i tidevannssonen. Det foreslås at det bør finnes en måte å opprettholde åpne riss på som ikke gjør at rissene blir mindre i noen av sonene. Dersom rissene er like store i alle eksponeringssoner vil det muligens være lettere å gjøre sammenligninger mellom ulike bindertyper og eksponeringssoner. Det bør fortsatt gjøres flere forsøk med varierende innhold av ulike bindertyper og størrelse på riss. Det bør være riss større enn 0,2 mm for å studere maks størrelse på rissvidder som kan repareres fullstendig. Det vil også være interessant å studere gjennomgående riss for å kunne si noe om ulike typer riss påvirker selvreparasjon. Rissets orientering i forhold til eksponeringen burde også vies oppmerksomhet. For å kunne skille mellom de ulike mekanismene som ligger bak selvreparasjon av riss er det behov for metoder som tillater en å gå nærmere inn i rissene.

Når det gjelder å studere påvirkningen av riss på armeringens tilstand i langtidseksponert opprisset betong, foreslås det at hele armeringen inspiseres ved å fjerne overdekningen. Hvorvidt det er økt inntrengning av klorider via armeringsstoler er også et tema som bør undersøkes nærmere.



## 8. Referanser

- ASTM (1990) Corrosion Rates of Steel in Concrete, i Berke, N. S., *et al.* (red.) *STP1065-EB*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- BRUKER (2015) M4 TORNADO - High performance Micro-XRF spectrometer.
- Danner, T., De Weerd, K. og Geiker, M. R. (2017)  $\mu$ -XRF – CHARACTERISATION OF CHLORIDE INGRESS AND SELF-HEALING IN CRACKED CONCRETE. Upublisert artikkel presentert på NORDIC CONCRETE RESEARCH. Proceedings of the XXIII Nordic Concrete Research Symposium. Aalborg, Danmark.
- Danner, T. A. og Geiker, M. R. (2017) *Long-term impact of cracks on reinforcement corrosion-Field station Sandnessjøen*. Trondheim: NTNU.
- de Rooij, M. *et al.* (2013) *Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials*. Dordrecht: Springer Netherlands, Dordrecht.
- De Weerd, K. *et al.* (2016) Towards the understanding of chloride profiles in marine exposed concrete, impact of leaching and moisture content, *Construction and Building Materials*, 120, s. 418-431. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.069.
- Edvardsen, C. (1999) Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete, *ACI Materials Journal*, 96(4), s. 448-454. doi: 10.14359/645.
- Elsener, B. *et al.* (2003) Hall-cell potential measurements—Potential mapping on reinforced concrete structures, *Materials and Structures*, 36(7), s. 461-471. doi: 10.1007/bf02481526.
- Geiker, M. R. og Michel, A. (2017a) Half-Cell Potential measurement of reinforced concrete (s. 1-4). DTU Course 11569 Durability and repair of concrete structures: DTU.
- Hearn, N. og Morley, C. T. (1997) Self-sealing property of concrete - Experimental evidence, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 30(201), s. 404-411.
- Holtmon, J. P. og Isaksen, H. R. (1994) *Utvikling av kloridbestandig betong - Rapport fra produksjon av prøveelementer*. (94-13 BRU): Statens vegvesen.
- Hornbostel, K., Larsen, C. K. og Geiker, M. R. (2013) Relationship between concrete resistivity and corrosion rate - A literature review, *Cement and Concrete Composites*, 39, s. 60-72. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019.
- Hornbostel, K. og Geiker, M. R. (2017) *Influence of cracking on reinforcement corrosion*. Upublisert paper presentert på Workshop Proceedings No. 12, Nordic Miniseminar, Crack width calculation methods for large concrete structures. Oslo, Norway.
- Huang, H. *et al.* (2016) Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions, *Materials & Design*, 92, s. 499-511. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.091>.

- Jacobsen, S., Marchand, J. og Hornain, H. (1995) Sem observations of the microstructure of frost deteriorated and self-healed concretes, *Cement and Concrete Research*, 25(8), s. 1781-1790. doi: 10.1016/0008-8846(95)00174-3.
- Korrosjonsmåling og kjerneuttak på bjelkeelementer i Sandnessjøen (2014), i Statens vegvesen (red.).
- Kristiansen, B., Lindland, J. og Østmoen, T. (1998) *Betongrehabilitering: metode og utførelse*. Oslo: BA forlaget.
- Maes, M., Snoeck, D. og De Belie, N. (2016) Chloride penetration in cracked mortar and the influence of autogenous crack healing, *Construction and Building Materials*, 115, s. 114-124. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.180.
- Markeset, G. og Myrdal, R. (2008) *Modelling of reinforcement corrosion in concrete - state of the art*. SINTEF Building and Infrastructure.
- Mehta, P. K. (1991) *Concrete in the marine environment*. London: Elsevier Applied Science.
- Meteorologisk institutt (2018) *Yr.no*. Tilgjengelig fra: <https://www.yr.no/sted/Norge/Tr%C3%B8ndelag/Trondheim/Trondheim/statistikk.html> (Hentet: 21.03 2018).
- Michel, A. *et al.* (2013) Experimental investigation of the relation between damage at the concrete-steel interface and initiation of reinforcement corrosion in plain and fibre reinforced concrete, *Corrosion Science*, 77, s. 308-321. doi: 10.1016/j.corsci.2013.08.019.
- Mohammed, T. U., Otsuki, N. og Hamada, H. (2003) Corrosion of Steel Bars in Cracked Concrete under Marine Environment, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(5), s. 460-469. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:5(460).
- Neville, A. (2002) Autogenous Healing - A Concrete Miracle?, *Concrete International*, s. 76-82.
- Norcem (2017) *Produktdatablad*. Tilgjengelig fra: [https://www.norcem.no/no/standardsement\\_FA](https://www.norcem.no/no/standardsement_FA) (Hentet: 13. mars 2018).
- Palin, D., Wiktor, V. og Jonkers, H. M. (2015) Autogenous healing of arine exposed concrete: Characterization and quantification through visual crack closure, *Cement and Concrete Research*, s. 20.
- Palin, D., Jonkers, H. M. og Wiktor, V. (2016) Autogenous healing of sea-water exposed mortar: Quantification through a simple and rapid permeability test, *Cement and Concrete Research*, 84, s. 1-7. doi: 10.1016/j.cemconres.2016.02.011.
- Polder, R. *et al.* (2000) Rilem TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion - Test methods for on site measurement of resistivity of concrete, *Mater. Struct.*, 33(234), s. 603-611.

- Polder, R. B. (2001) Test methods for on site measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC-154 technical recommendation, *Construction and Building Materials*, 15(2), s. 125-131. doi: 10.1016/S0950-0618(00)00061-1.
- Proceq (2016a) Profometer - Operating Instructions. Sveits.
- Proceq (2016b) Resipod family - Operating Instructions - Concrete Durability Testing.
- Reinhardt, H.-W. og Jooss, M. (2003) Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width, *Cement and Concrete Research*, 33(7), s. 981-985. doi: 10.1016/S0008-8846(02)01099-2.
- Revert, A. B. *et al.* (2016) Carbonation Characterization of Mortar with Portland Cement and Fly Ash, Comparison of Techniques,, *Nordic Concrete Research*, 54, s. 60-76.
- Sellevoid, E. J. (2014) Hydration, i Jacobsen, S. (red.) *Concrete Technology*. Trondheim, s. 6-6.
- St John, D. A., Poole, A. B. og Sims, I. (1998) *Concrete Petrography: A handbook of investigative techniques*. første utgave. utg. Great Britain: Arnold.
- Statens vegvesen (2014) *Inspeksjonshåndbok for bruer : veiledning : [håndbok V441]*. Statens vegvesen. Tilgjengelig fra:  
[https://www.vegvesen.no/attachment/69833/binary/964063?fast\\_title=H%C3%A5ndbok+V441+Inspeksjonsh%C3%A5ndbok+for+bruer+%2836+MB%29.pdf](https://www.vegvesen.no/attachment/69833/binary/964063?fast_title=H%C3%A5ndbok+V441+Inspeksjonsh%C3%A5ndbok+for+bruer+%2836+MB%29.pdf).
- Statens vegvesen (2016) *Laboratorieundersøkelser: retningslinje: [Håndbok R210]*. Statens vegvesen. Tilgjengelig fra:  
[https://www.vegvesen.no/\\_attachment/185231/binary/1090658](https://www.vegvesen.no/_attachment/185231/binary/1090658).
- Termkhajornkit, P. *et al.* (2009) Self-healing ability of fly ash–cement systems, *Cement and Concrete Composites*, 31(3), s. 195-203. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2008.12.009
- Thoresen, A.-M., Hornbostel, K. og Geiker, M. R. (2016) Frequency dependency of concrete resistance measurements, i *Proceedings Concrete Solutions; 2016-06-20 - 2016-06-22*.
- Van Tittelboom, K. *et al.* (2012) Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation, *Construction and Building Materials*, 37, s. 349-359. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.026.
- Vennesland, Ø. og Maage, M. Chapter 3 Structural assessment, *TKT4225 Concrete Technology 2*.
- Vinje, L. og Vennesland, Ø. (2007) Nedbryting av armert betong, i Betongelementforeningen (red.) *Betongelementboken*. s. 6. Tilgjengelig fra:  
[http://www.betongelement.no/betongbok/BindD/Del\\_2/D10/10\\_2\\_1\\_Armeringskorrosjon.pdf](http://www.betongelement.no/betongbok/BindD/Del_2/D10/10_2_1_Armeringskorrosjon.pdf) (Hentet: 24.09.17).
- Zhou, Z. *et al.* (2011) Influence of Slag and Fly Ash on the Self-healing Ability of Concrete, *Advanced Materials Research*, 306-307, s. 1020-1023.

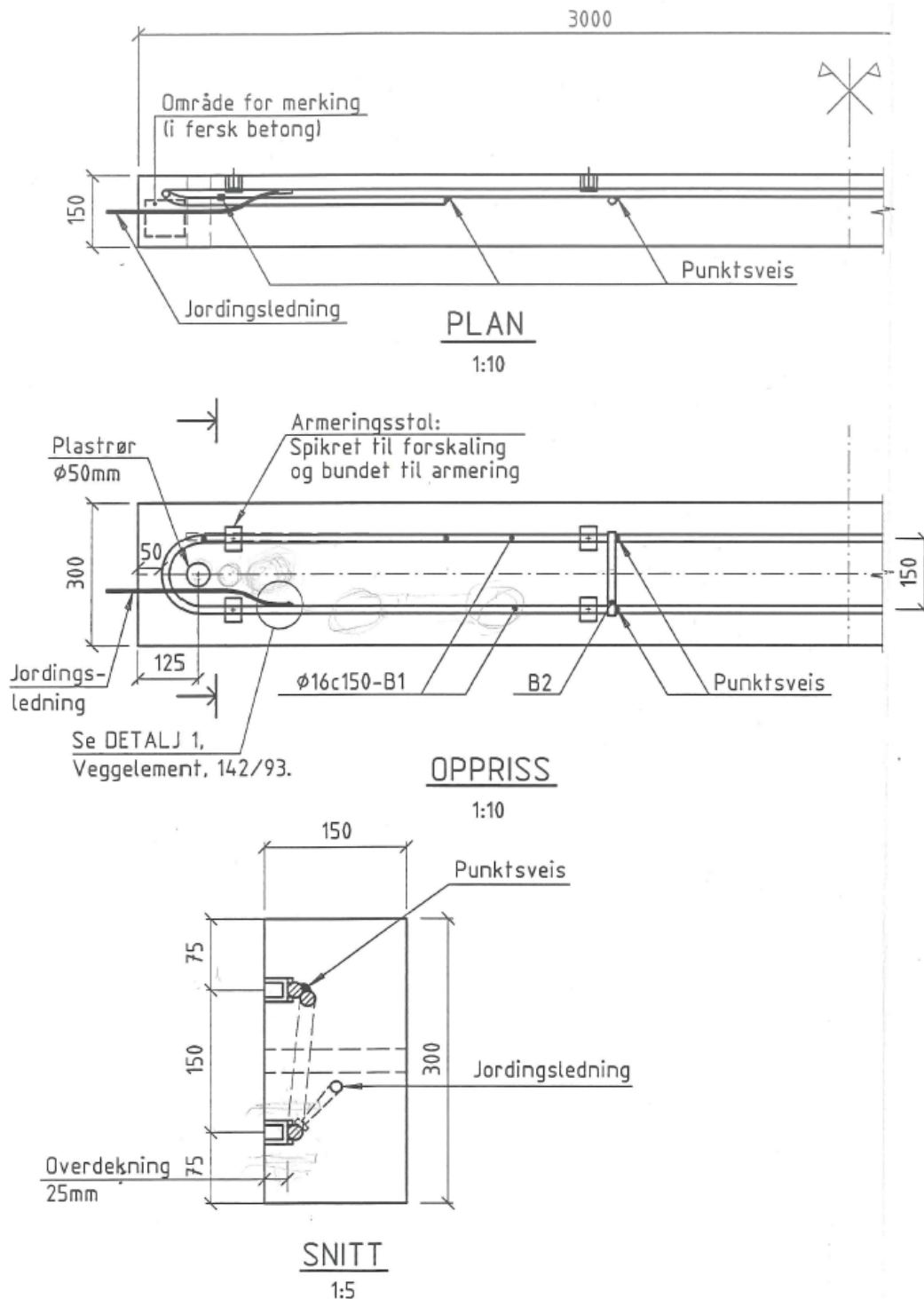
Østnor, T., Haugen, M. og De Weerd, K. (2015) *Kloridbestandig Betong Fase 1*. (3041-16 Fortrolig): SINTEF Byggforsk, Betong.



## Vedlegg

## Vedlegg A – Tegninger av bjelker fra feltstasjonen

Figur A.1 viser tegninger av bjelkene, og er hentet fra Holtmon og Isaksen (1994).



Figur A.1: Tegning av bjelker (3000x300x150 mm) (Holtmon og Isaksen, 1994)

## Vedlegg B – Betongresepter

Tabell B.1 viser betongresepter for blanding B, E og F. Reseptene er hentet fra (Holtmon og Isaksen, 1994)

*Tabell B.1: Betongsammensetninger for de aktuelle bjelkene som undersøkes i denne rapporten. Etter (Holtmon og Isaksen, 1994)*

<b>Blanding (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>B</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
<b>Sement</b>	373	384	398
<b>Silika</b>	15,5	13,4	49,8
<b>Vann</b>	123	126	164
<b>Filler</b>	0	0	0
<b>Sand 0-8 mm</b>	928	1014	881
<b>Pukk 8-16 mm</b>	904	820	841
<b>Fukt 0-8 mm %</b>	29	31	27
<b>Fukt 8-16 mm %</b>	4	3	3
<b>Inhibitor</b>	0,00	0,00	0,00
<b>Hydrofob</b>	0,00	0,00	0,00
<b>Luftinnførende stoff</b>	0,34	0,59	0,00
<b>Plastiserende stoff</b>	2,98	3,53	4,48
<b>Sikament 110</b>	3,95	4,41	0,00
<b>Mighty 150</b>	0,00	0,00	3,98
<b>Luft</b>	0,00	0,00	0,00
<b>Totalt vann</b>	160,52	166,56	198,68
<b>Pastavolum</b>	28,60	29,45	34,77
<b>Teoretisk densitet</b>	2,3843	2,4013	2,3712
<b>Ekvivalent w/c</b>	0,4	0,4	0,4

## Vedlegg C – Kjemisk sammensetning av sementene

Tabell C.1 viser sementsammensetninger for bjelkene fra feltstasjonen. Sammensetningene av Norcem sementene er gjennomsnitts-sammensetninger fra 1993, gitt av Norcem AS 1. Desember 2017 (Danner og Geiker, 2017).

*Tabell C.1: Sementsammensetningene for bjelker – feltstasjon er de som benyttes i betongresept B, E og F. Norcem P30 gjelder for betongresept B og F, mens Norcem MP30\* gjelder for resept E.*

Sementsammensetning %	Bjelker – feltstasjon	
	Norcem P30	Norcem MP30*
CaO	63,3	
SiO <sub>2</sub>	20,6	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,8	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,5	
MgO	2,2	
SO <sub>3</sub>	2,8	2,7
K <sub>2</sub> O	1	
Na <sub>2</sub> O	0,35	
Na <sub>2</sub> O ekv.	1,02	
CO <sub>2</sub>	-	
Cl <sup>-</sup>	-	
S <sup>2-</sup> (Sulfid-innhold)	-	
Uoppløselige rester	-	
LOI (glødetap)	1	1,36
Fri kalk (CaO)	1,1	0,9
Spesifikk overflate (m <sup>2</sup> /kg)	341	409

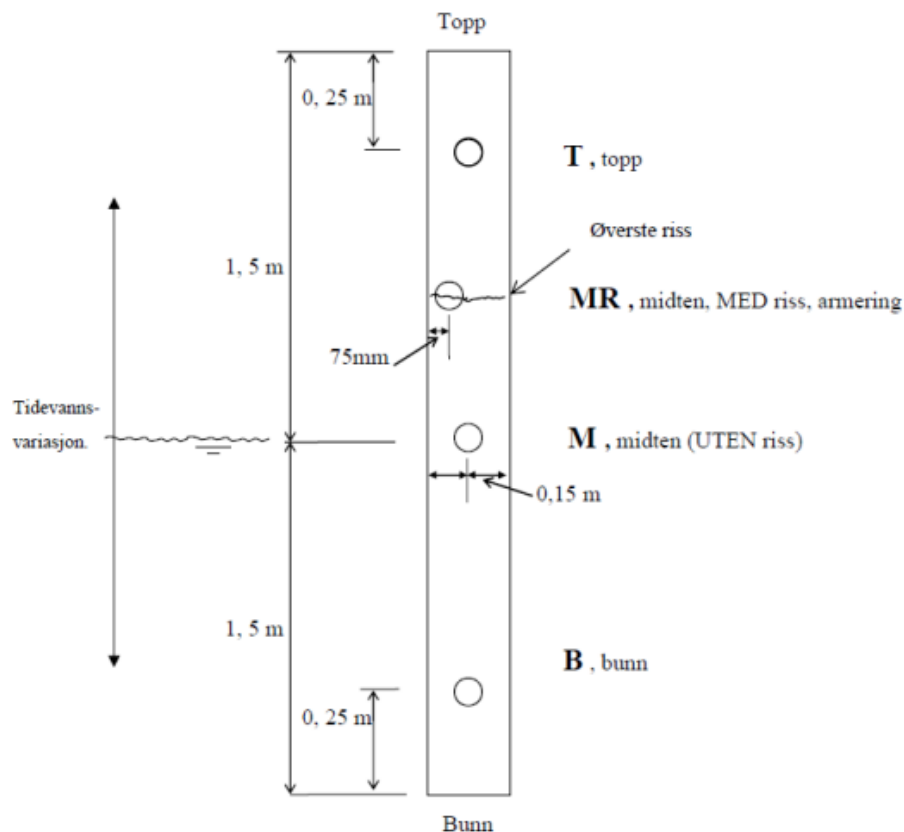
\* 20 % FA iblandet P30 Portlandsement fra Norcem

Sementtypene i henhold til EN 197 er:

- Norcem P30: CEM I
- Norcem MP30: CEM II/A-V med 20% flyveaske

## Vedlegg D – Tidligere undersøkelser fra feltstasjon

I dette vedlegget finnes ytterligere informasjon fra en tidligere undersøkelse av bjelker fra feltstasjonen, foretatt av Østnor, Haugen og De Weerd (2015). Betongbjelkene ble undersøkt i 2014 og hadde på dette tidspunktet 21 års eksponering for miljøet. 3 betongbjelker fra henholdsvis resept B, E og F ble undersøkt. Det ble tatt ut 3 kjerner fra atmosfære/skvalpesone, tidevannssone og nedsenket sone på alle bjelkene, der hver kjerne ble tatt fra et område uten riss. I tillegg ble det fra noen utvalgte bjelker tatt ut en kjerne med riss og armering i tidevannssonen. Figur D.1 viser hvor de respektive kjernene ble tatt ut på bjelkene.



Figur D.1: Markering av der kjernene ble tatt ut fra undersøkelsene i 2014. (Korrosjonsmåling og kjerneuttak på bjelkeelementer i Sandnessjøen, 2014)

Følgende undersøkelser ble utført for borekjernene (Østnor, Haugen og De Weerd, 2015):

- Kloridprofiler (T= Atmosfære, M= tidevannssone, B= nedsenket sone)
- Elektrisk motstand
- Karbonatisering
- Tynnslip og elementmapping

- Vannmetningsgrad (DS)

Tabell D.1 og Tabell D.2 gir oversikt over reseptnummer, kjerne MR-1 eller MR-2 for den aktuelle resepten (kjerne i tidevannssone) samt observasjoner fra tynnslipanalyse i polarisasjonsmikroskop og fra elementmapping av polerte tynnslip. Figur D.1 viser hvor kjerne MR er plassert på bjelken. Kun resultater relatert til resept B, E og F presenteres da det er de samme reseptene som skal undersøkes i denne rapporten.

*Tabell D.1: Oversikt over noen av observasjonene fra tynnslipanalysen i polarisasjonsmikroskop utført i 2014 etter informasjon fra (Østnor, Haugen og De Weerd, 2015). MR-1 og MR-2 tilsvarer kjerne fra samme sone, men fra 2 ulike bjelker med samme resept.*

	<b>Resept B 4,2 % SF</b>	<b>Resept E 3,5 % SF, 20 % FA</b>	<b>Resept F 12,5 % SF</b>
<b>MR - 1</b>			
Rissvidde	0,08 mm	0,03 mm	Varyerer. Maks 0,15 mm like innenfor overflaten
Rissdybde	23 mm	11 mm	27 mm (inn til armering) Risset forgreiner seg
Utfellinger i riss/ tegn på selvrepasjon	Stedvis uidentifisert utfelling, samt karbonat i riss inn til dybde 20 mm	Litt karbonat, uidentifiserte mineraler i riss inn til dybde 9 mm	Ettringitt-lignende materiale, uidentifisert utfelling, karbonat i riss inn til dybde 16 mm
<b>MR - 2</b>			
Rissvidde	Brudd langs risset. Enkelte mikroriss fra overflaten og innover	Ikke riss fra overflate	2 mm
Rissdybde	Brudd inn til 26 mm (inn til armering)	-	1,5 mm (stopper ved tilslag)
Utfellinger i riss/tegn på selvrepasjon	Ikke observert (brudd)	-	Karbonat og uidentifisert materiale i riss inn til dybde 1,5 mm der risset stopper

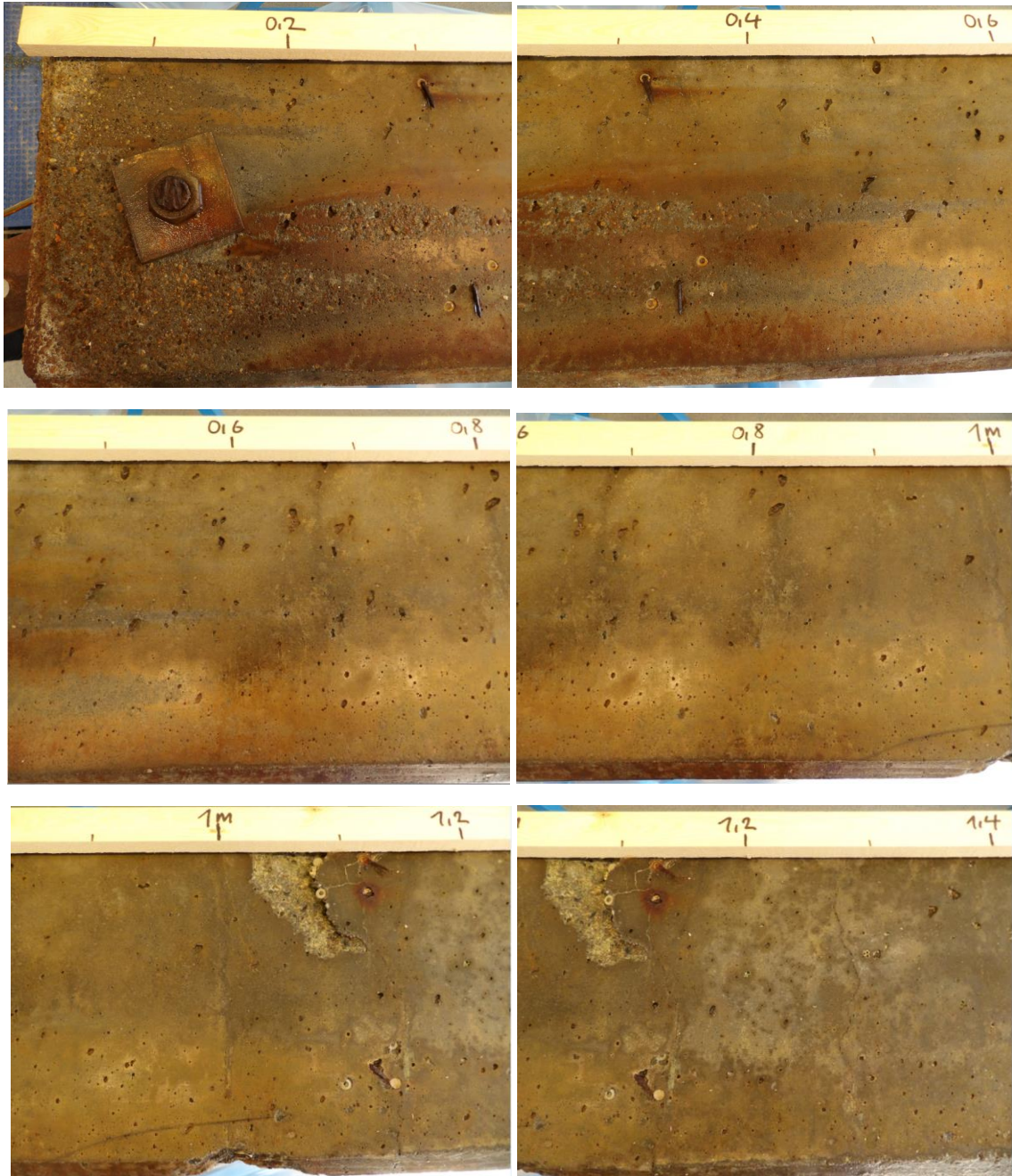
Tabell D.2: Oversikt over noen av observasjonene fra elementmappingen av polerte tynnslip utført i 2014 etter informasjon fra (Østnor, Haugen og De Weerd, 2015). MR-1 og MR-2 tilsvarer kjerne fra samme sone, men fra 2 ulike bjelker med samme resept.

	<b>Resept B</b> <b>4,2 % SF</b>	<b>Resept E</b> <b>3,5 % SF, 20 % FA</b>	<b>Resept F</b> <b>12,5 % SF</b>
<b>MR - 1</b>			
	Jevn kloridinntrenging	Høyest kloridinnhold i de ytterste 15 mm, avtar brått videre innover	Høyest kloridinnhold i de ytterste 10 mm, avtar videre innover
	Riss fra overflaten delvis tettet med Mg-rik fase	Støy på undersiden av tynnslipet (polerrester?). Kommer fram i Cl- og S-mappingen	Liten antydning til Mg-anrikning i overflaten
	Antydning til dekalsifisering mot overflaten		Liten antydning til dekalsifisering mot overflaten
<b>MR - 2</b>			
	Jevn kloridinntrenging	Høyest kloridinnhold i de ytterste 15 mm, avtar brått videre innover	Høyest kloridinnhold i de ytterste 10-15 mm, avtar videre innover
	Brudd fra overflaten delvis tettet med Mg- og Ca-rik lim	Liten antydning til Mg- og S-anrikning i overflaten	Liten antydning til dekalsifisering mot overflaten
	Ingen ekstra Cl-inntrenging langs bruddet		Liten antydning til Mg- og S-anrikning i overflaten
	Liten antydning til Mg-anrikning i overflaten		

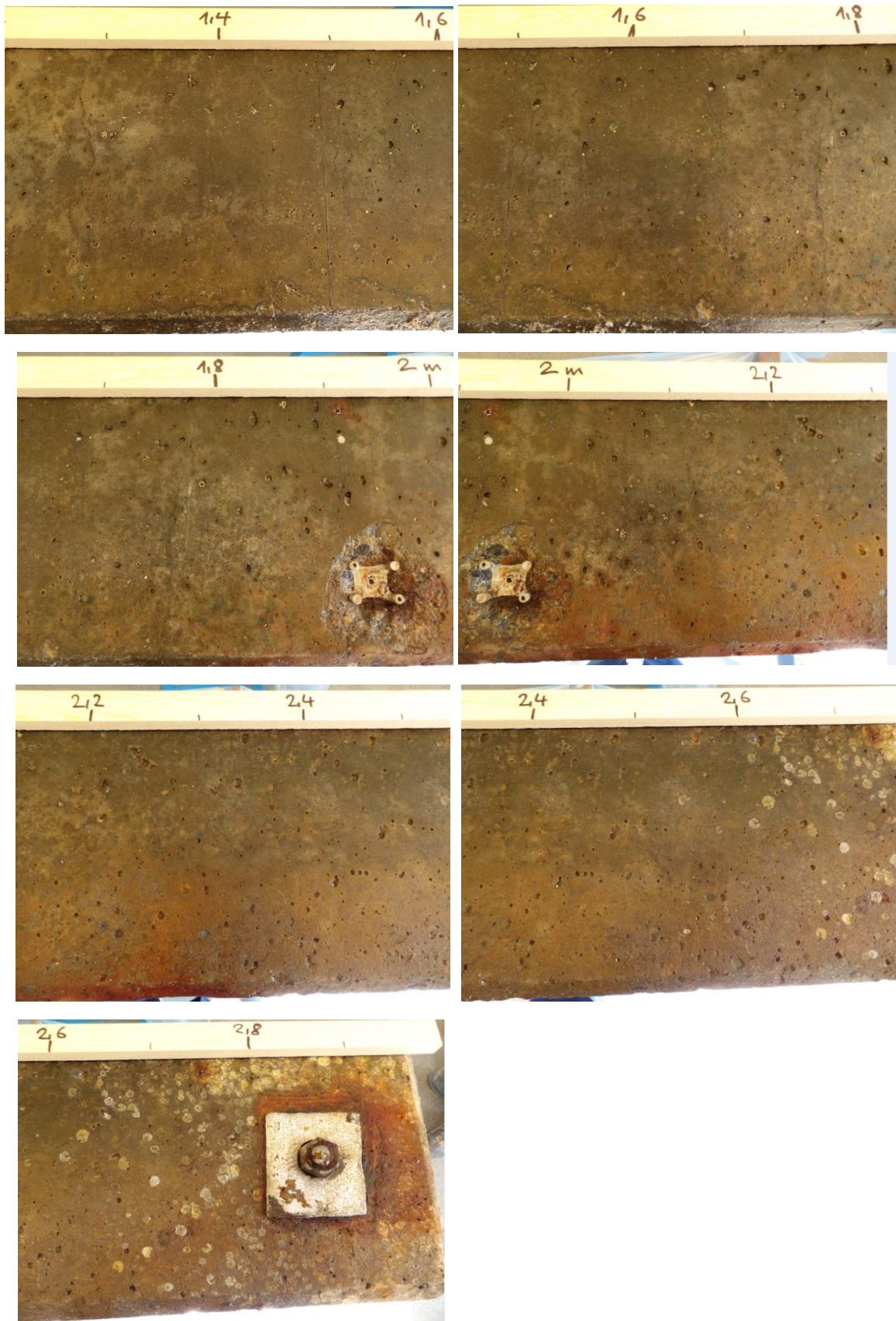
## Vedlegg E – Overflatebilder fra visuell inspeksjon

Bildene av overflaten ble tatt torsdag 15.03.18. Alle bildene er tatt med start i atmosfæresonen på 0 meter og avslutter over nedsenket sone med slutt på 3 meter.

### Bjelke F



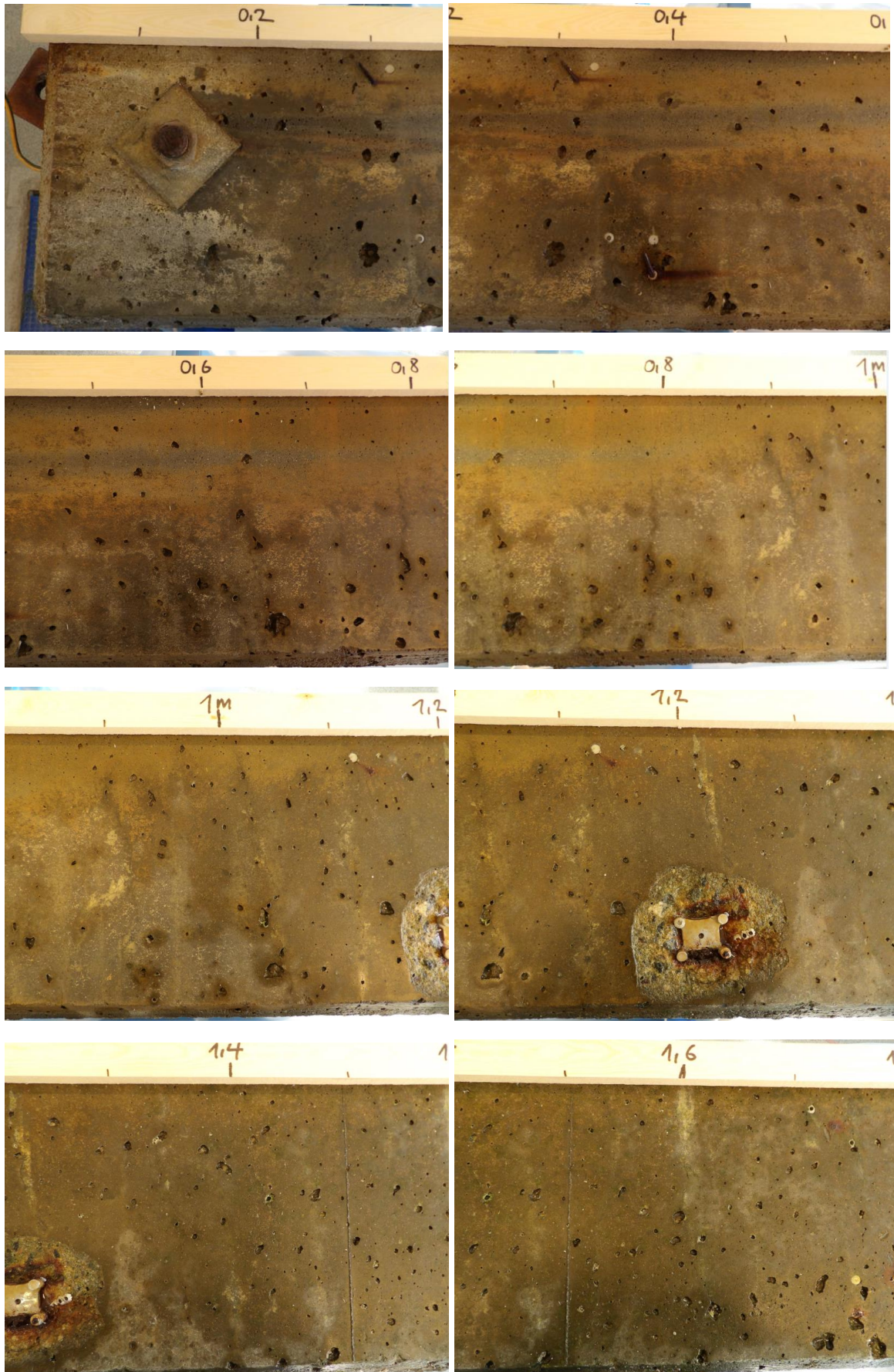




Figur E.1: Bilder av overflaten på bjelke F. Bildene er tatt fra atmosfæresonen ved start på 0 meter mot nedsenket sone. (Egne foto).



## Bjelke B



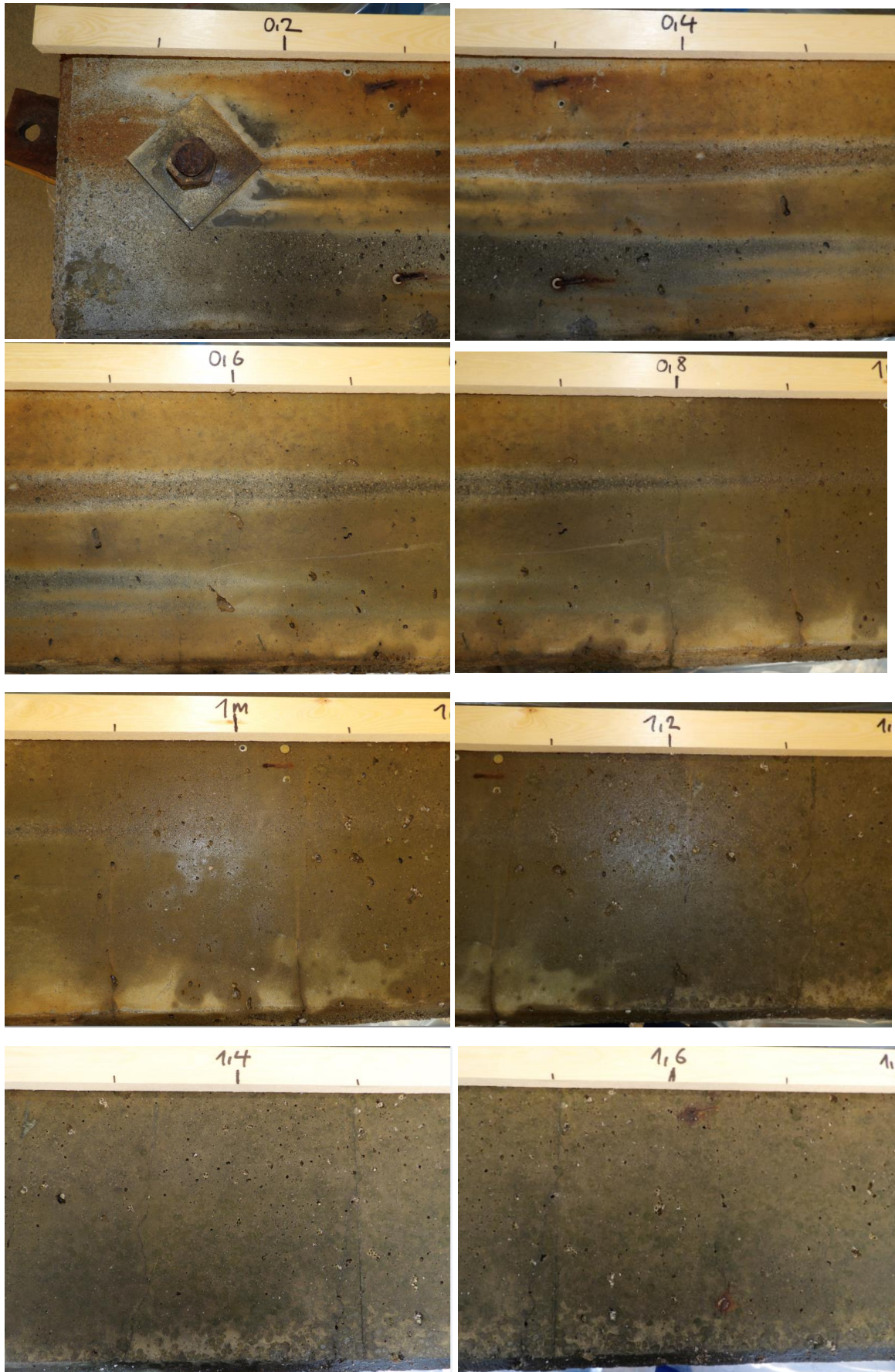




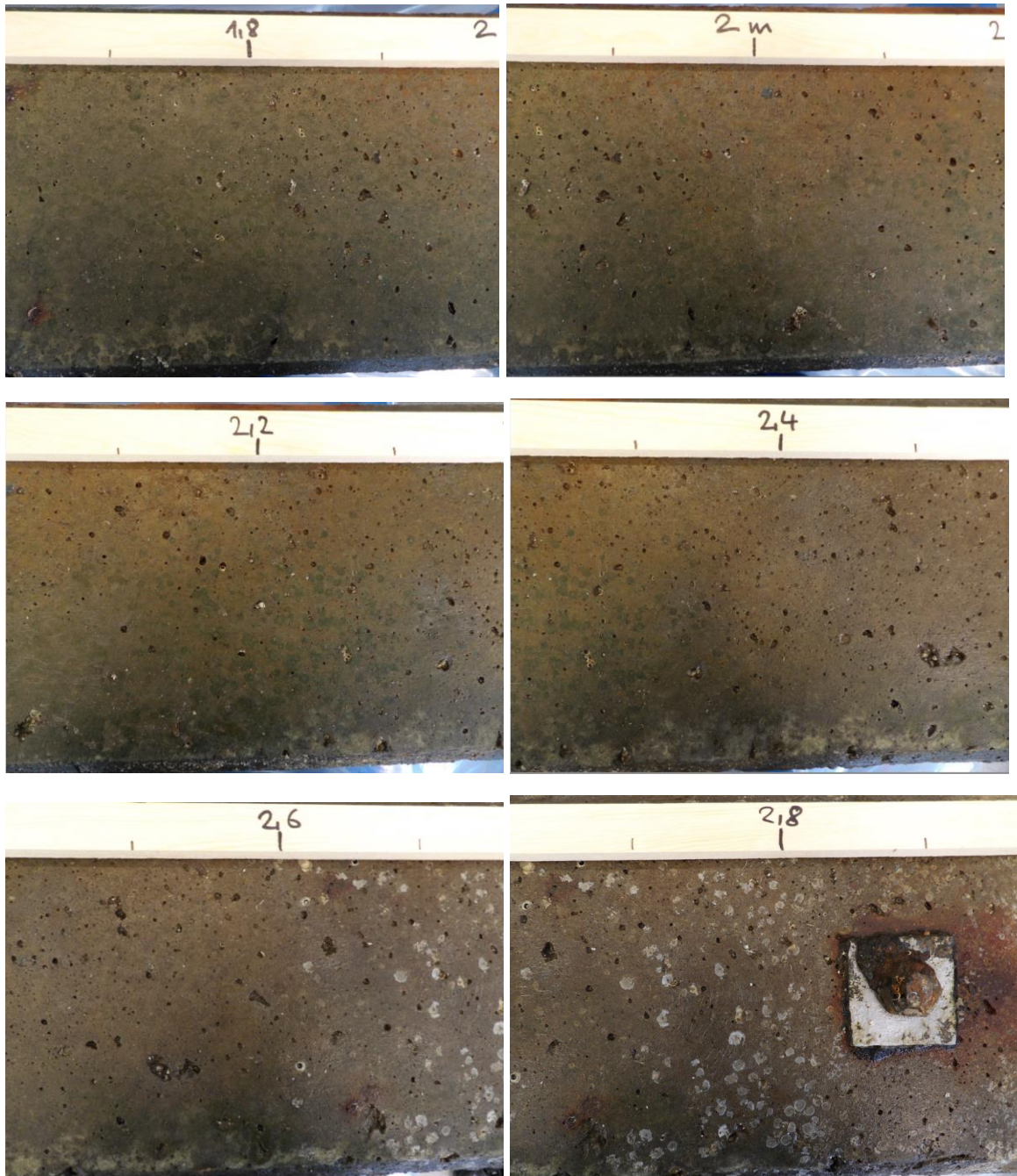
*Figur E.2: Bilder av overflaten på bjelke B. Bildene er tatt fra atmosfæresonen ved start på 0 meter mot nedsenket sone. (Egne foto).*



**Bjelke E**







*Figur E.3: Bilder av overflaten på bjelke E. Bildene er tatt fra atmosfæresonen ved start på 0 meter mot nedsenket sone. (Egne foto).*

## Vedlegg F – Detaljerte resistivitetmålinger

Tabell F.1 – Tabell F.3 viser detaljerte verdier for resistivitetmålingene utført på bjelkene. Den nederste raden i hver tabell viser gjennomsnittsverdien for hvert måle-område.

*Tabell F.1: Detaljerte resistivitetmålinger for de ulike eksponeringssonene for bjelke B. Nederste raden angir gjennomsnittsverdi for den aktuelle sonen.*

Bjelke B		
Resistivitet (kΩcm) - atmosfæresone (0,4-0,8 m)	Resistivitet (kΩcm) - tidevannssone (1,3-1,7 m)	Resistivitet (kΩcm) - nedsenket sone (2,2-2,6 m)
34	28	19
32	23	20
43	22	14
24	21	18
34	23	22
31	20	17
30	25	20
36	28	20
26	25	17
33	28	14
37	27	22
36	25	14
35	25	23
34	27	17
35	23	17
31	25	26
34	26	24
25	31	21
39	31	23
41	29	17
33,5	25,6	19,3

Tabell F.2: Detaljerte resistivitetsmålinger for de ulike eksponeringssonene for bjelke E. Nederste raden angir gjennomsnittsverdi for den aktuelle sonen.

Bjelke E		
Resistivitet (k $\Omega$ cm) - atmosfæresone (0,4-0,8 m)	Resistivitet (k $\Omega$ cm) - tidevannssone (1,3-1,7 m)	Resistivitet (k $\Omega$ cm) - nedsenket sone (2,2-2,6 m)
159	81	70
150	112	81
104	66	61
166	45	85
167	47	72
170	72	70
173	80	73
159	82	72
196	74	95
179	103	64
179	140	84
152	144	62
167	117	52
102	62	65
209	49	70
151	121	68
192	98	89
176	92	75
324	138	56
182	98	80
172,9	91,1	72,2

Tabell F.3: Detaljerte resistivitetmålinger for de ulike eksponeringssonene for bjelke F. Nederste raden angir gjennomsnittsverdi for den aktuelle sonen.

Bjelke F		
Resistivitet (k $\Omega$ cm) - atmosfæresone (0,4-0,8 m)	Resistivitet (k $\Omega$ cm) - tidevannsone (1,3-1,7 m)	Resistivitet (k $\Omega$ cm) - nedsenket sone (2,2-2,6 m)
70	39	33
65	35	31
58	34	33
57	32	29
58	38	32
53	34	29
52	36	32
52	34	28
51	30	28
65	36	31
66	39	30
64	36	24
59	33	32
55	33	25
58	35	29
52	32	32
52	39	32
54	33	33
53	35	31
52	32	29
57,3	34,8	30,2



## Vedlegg G – Bestemmelse av resistivitet på utborede kjerner

### G.1 Data fra motstandsmålinger og utregning av resistivitet

Nedenfor vises nødvendig inndata for utregning av resistivitet basert på motstandsmålinger fra kjernene. Selve formelen er uthevet i grått.

Dimensjon for kjerne ESC, EAC, BSC, BAC, FSC, FAC: 95x150 mm, der d=95 mm, H=150 mm, A= 7084.625 mm <sup>2</sup>
Dimensjon for kjerne ETC, BTC, FTC: 70x150 mm, der d=70 mm, H=150 mm, A= 3846.5 mm <sup>2</sup>
<b>Resistivitet = Motstand x A/ H</b> <b><math>\rho = R \times A/H</math></b>

Tabell G.1.1 – Tabell G.1.3 inneholder all data fra bestemmelse av elektrisk motstand på utborede kjerner. Målingene ble utført på kjølerommet i Sintef-laboratoriet, ved en temperatur på 4,2°C.

*Tabell G.1.1: Elektrisk motstand R (kΩ) målt for kjerner fra resept B, avlest ved ulike frekvenser og fasevinkel (°θ). Omregnet resistivitet i kΩcm i høyre kolonne.*

Kjerne ID	Frekvens	Fasevinkel (°θ)	R (kΩ)	Utregnet resistivitet ρ (kΩmm)	Resistivitet ρ (kΩcm)
BAC	1 kHz	-2.2	13.9	655.4	65.5
	10 kHz	-0.4	13.3	626.8	62.7
	100 Hz	-1.4	14.6	689.6	69.0
	120 Hz	-1.5	14.5	685.7	68.6
BTC	1 kHz	-2.6	18.8	482.2	48.2
	10 kHz	-0.4	17.1	439.5	44.0
	100 Hz	-1.8	19.4	498.4	49.8
	120 Hz	-1.9	19.3	495.2	49.5
BSC	1 kHz	-3.1	7.1	335.5	33.6
	10 kHz	-4.4	6.5	306.5	30.7
	100 Hz	-2.3	7.6	358.7	35.9
	120 Hz	-2.4	7.5	356.2	35.6

Tabell G.1.2: Elektrisk motstand  $R$  ( $k\Omega$ ) målt for kjerner fra resept F, avlest ved ulike frekvenser og fasevinkel ( $^{\circ}\Theta$ ). Omregnet resistivitet i  $k\Omega\text{cm}$  i høyre kolonne.

Kjerne ID	Frekvens	Fasevinkel ( $^{\circ}\Theta$ )	$R$ ( $k\Omega$ )	Utregnet resistivitet $\rho$ ( $k\Omega\text{mm}$ )	Resistivitet $\rho$ ( $k\Omega\text{cm}$ )
FAC	1 kHz	-2.7	22.7	1070.3	107.0
	10 kHz	-5.3	21.0	989.5	99.0
	100 Hz	-1.9	24.0	1131.7	113.2
	120 Hz	-1.9	23.8	1126.0	112.6
FTC	1 kHz	-2.8	29.8	764.9	76.5
	10 kHz	-5.4	27.4	701.4	70.1
	100 Hz	-2	31.6	810.3	81.0
	120 Hz	-2.1	31.4	806.0	80.6
FSC	1 kHz	-2.4	11.5	542.3	54.2
	10 kHz	-4.5	10.6	498.5	49.9
	100 Hz	-1.5	11.9	563.7	56.4
	120 Hz	-1.6	11.9	561.5	56.2

Tabell G.1.3: Elektrisk motstand  $R$  ( $k\Omega$ ) målt for kjerner fra resept B, avlest ved ulike frekvenser og fasevinkel ( $^{\circ}\Theta$ ). Omregnet resistivitet i  $k\Omega\text{cm}$  i høyre kolonne.

Kjerne ID	Frekvens	Fasevinkel ( $^{\circ}\Theta$ )	$R$ ( $k\Omega$ )	Utregnet resistivitet $\rho$ ( $k\Omega\text{mm}$ )	Resistivitet $\rho$ ( $k\Omega\text{cm}$ )
EAC	1 kHz	-2.9	56.5	2667.6	266.8
	10 kHz	-8.2	51.3	2422.9	242.3
	100 Hz	-1.7	59.5	2809.8	281.0
	120 Hz	-1.8	59.3	2798.4	279.8
ETC	1 kHz	-3.5	49.3	1263.7	126.4
	10 kHz	-7.6	44.1	1130.1	113.0
	100 Hz	-2.3	52.7	1351.2	135.1
	120 Hz	-2.4	52.4	1343.7	134.4
ESC	1 kHz	-3.3	29.9	1414.1	141.4
	10 kHz	-7.1	26.9	1270.0	127.0
	100 Hz	1.9	32.0	1509.5	151.0
	120 Hz	-2	31.9	1504.8	150.5

## G.2 Utregning av resistivitet med temperaturkorrigering

Her vises hvordan resistiviteten ved 4,2 °C regnes om til resistivitet ved 20 °C for å sammenligne verdiene målt med Wenner probe. Resistiviteten med lavest fasevinkel er brukt til dette, etter anbefaling fra Thoresen, Hornbostel og Geiker (2016). Resistiviteten med lavest fasevinkel tilsvarer frekvens på 100 Hz for alle kjerner bortsett fra kjerne BAC og BTC.

Tabell G.2.1: Oversikt over utvalgte verdier som benyttes for omregning av resistiviteten, basert på lavest fasevinkel

Kjerne ID	Frekvens	Fasevinkel (°θ)	Resistivitet ved 4.2 °C
BAC	10 kHz	-0.4	62.7
BTC	10 kHz	-0.4	44.0
BSC	100 Hz	-2,3	35.9
FAC	100 Hz	-1.9	113.2
FTC	100 Hz	-2.0	81.0
FSC	100 Hz	-1.5	56.4
EAC	100 Hz	-1.7	281.0
ETC	100 Hz	-2.3	135.1
ESC	100 Hz	-1.9	151.0

Tabell G.2.2: Formel som benyttes ved omregning av resistiviteten med hensyn på temperaturkorrigering. Verdiene i det grønne feltet er input-verdier i formelen, der  $\rho$  velges ettersom hvilken kjerne som skal regnes ut. Det blå feltet tilsvarer feltet der resultatet kommer ut.

Resistiviteten blir 3 mindre (antar mettet betong) per grad Celsius temp.økning	
Input-verdier:	
$T_{bjelke}$	20
$T_{kjerne}$	4.2
$\Delta T$	15.8
$\rho$	
Utregning av resistivitet ved 3% temperaturøkning:	$\rho_{ny} = \rho - ((\rho * 0.03) * \Delta T) =$

Tabell G.2.3: Oversikt over de korrigerede resistivitetsmålingene for kjernene sett sammen med resistiviteten målt på bjelkene med wenner probe. Resistiviteten på bjelkene er målt innenfor et område på 400 mm i hver eksponeringssone, og er kun plassert på samme rad som kjerne ID for å kunne sammenligne med riktig eksponeringssone.

Kjerne ID	Omregnet resistivitet fra 4.2 - 20 °C	Resistivitet på bjelker, 20 °C
	$\rho$ - 3 % økning	
BAC	33.0	33.5
BTC	23.1	25.6
BSC	18.9	19.3
EAC	147.8	172.9
ETC	71.1	91.1
ESC	79.4	72.2
FAC	59.5	57.3
FTC	42.6	34.8
FSC	29.7	30.2

## Vedlegg H – Detaljerte overdekningsmålinger

Tabell H.1 – Tabell H.3 inneholder detaljerte verdier for overdekningsmålinger av bjelkene.

Tabell H.1: Overdekningsmålinger for bjelke B over linje 2 og 4

Bjelke B		
Avstand [m]	Overdekning [mm]	
	Linje 2	Linje 4
0,3	23	28
0,5	23	27
0,7	24	27
0,9	25	27
1,1	25	26
1,3	25	25
1,5	26	25
1,7	26	25
1,9	26	24
2,1	27	24
2,3	27	23
2,5	27	23
2,7	23	23

Tabell H.2: Overdekningsmålinger for bjelke E over linje 2 og 4

Bjelke E		
Avstand [m]	Overdekning [mm]	
	Linje 2	Linje 4
0,3	23	21
0,5	22	25
0,7	23	28
0,9	35	25
1,1	33	21
1,3	32	25
1,5	29	27
1,7	28	28
1,9	25	29
2,1	24	31
2,3	24	37
2,5	24	22
2,7	26	26

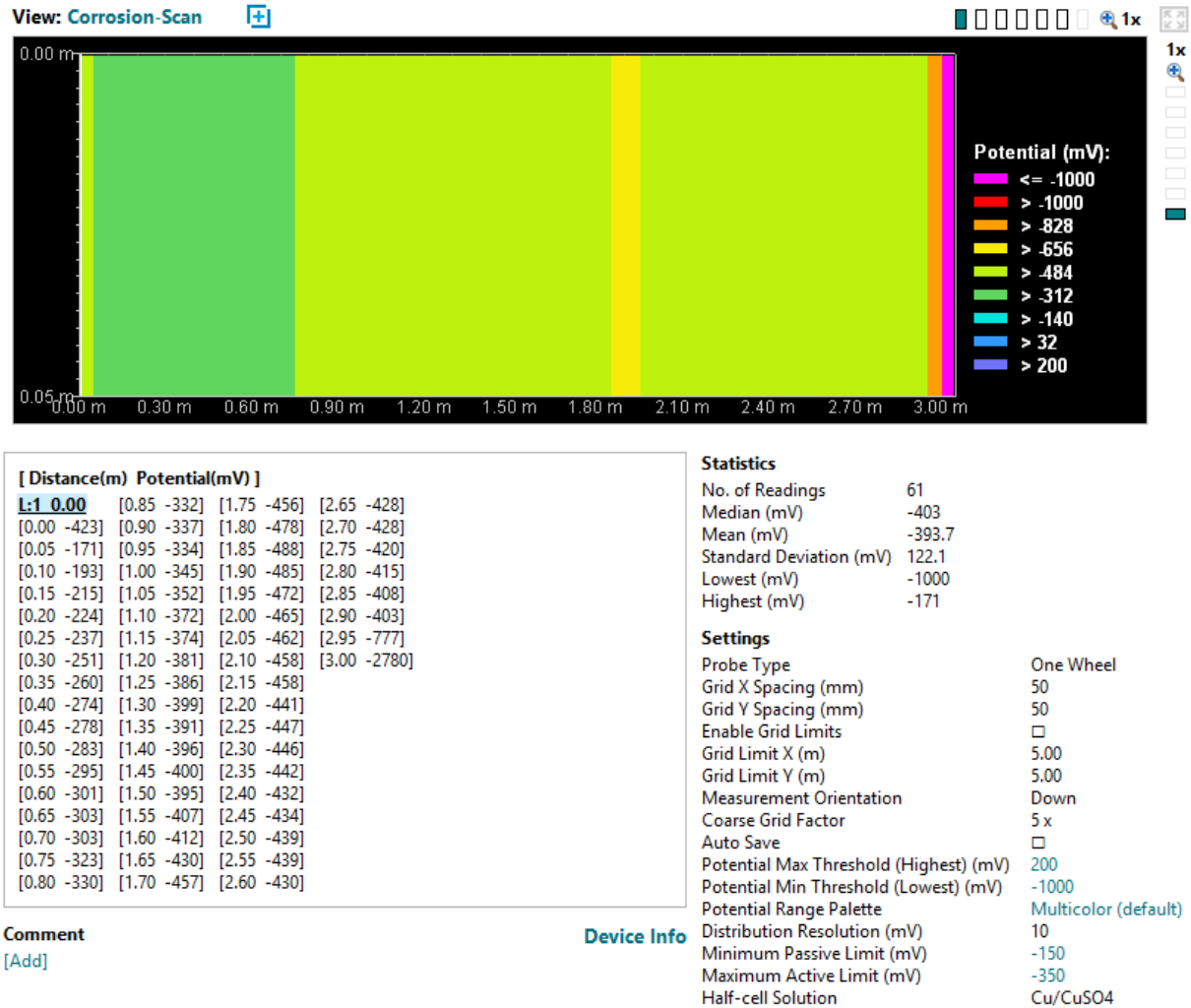
Tabell H.3: Overdekningsmålinger for bjelke B over linje 2 og 4

Bjelke F		
Avstand [m]	Overdekning [mm]	
	Linje 2	Linje 4
0,3	22	21
0,5	24	26
0,7	25	27
0,9	26	26
1,1	25	27
1,3	26	24
1,5	27	24
1,7	27	27
1,9	26	25
2,1	27	26
2,3	26	25
2,5	27	23
2,7	20	20

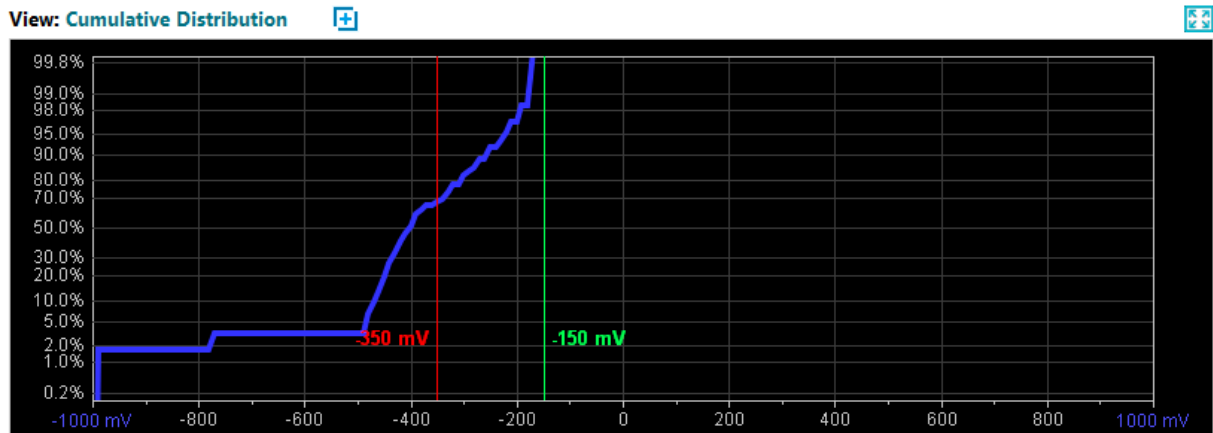
# Vedlegg I – Detaljerte EKP-målinger

## I.1 Detaljerte EKP-målinger for bjelke F

Hjul- Linje 1:

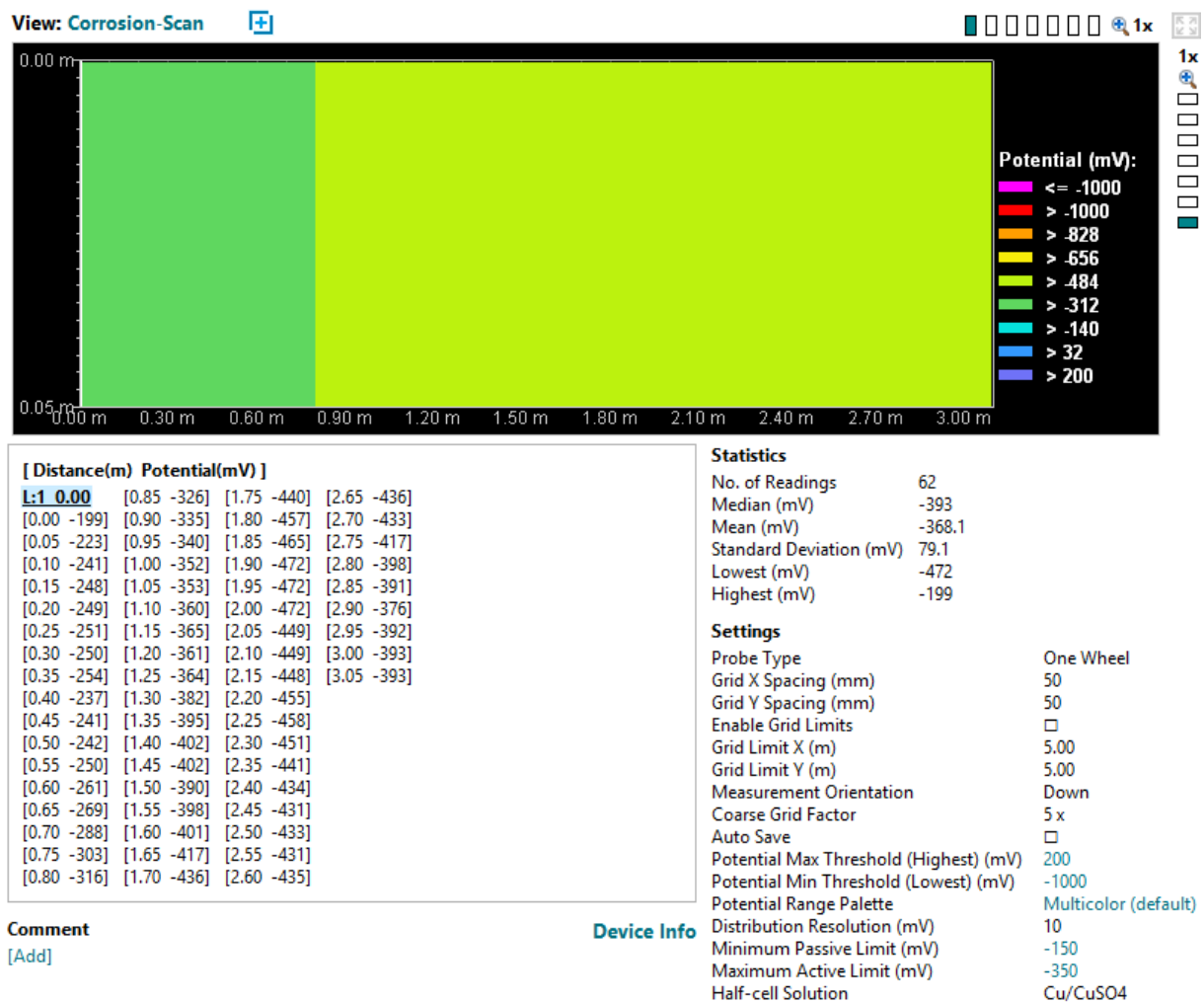


Figur I.1.1: "Corrosion Scan" fra Profometer.



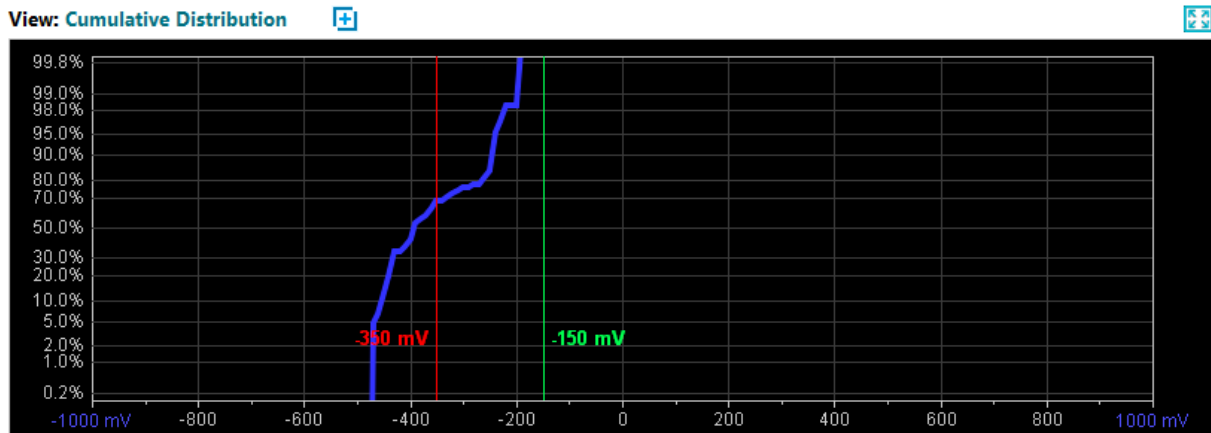
Figur I.1.2: Kumulativ distribusjon fra Profometer.

### Hjul- Linje 2:



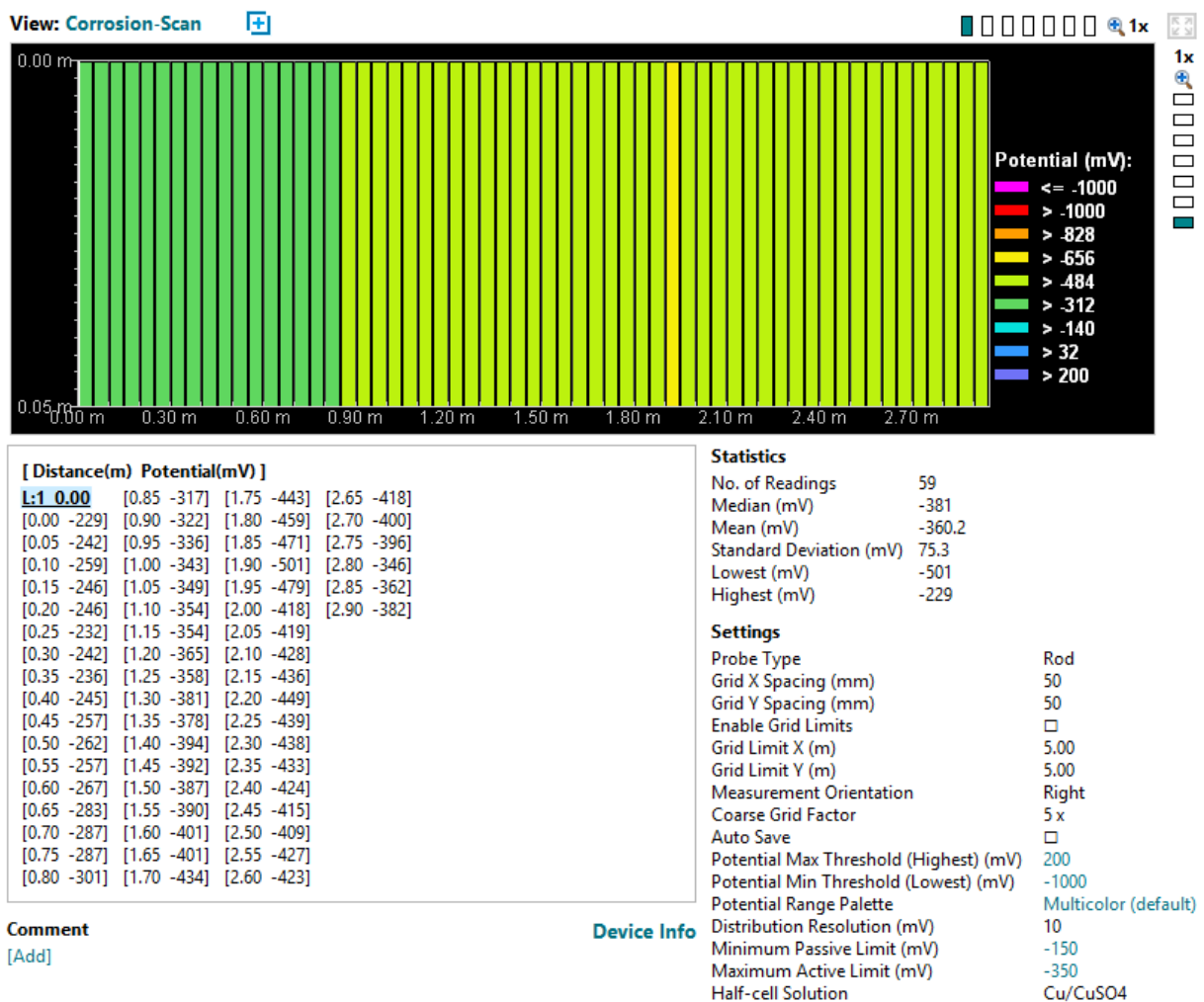
Figur I.1.3: "Corrosion Scan" fra Profometer.





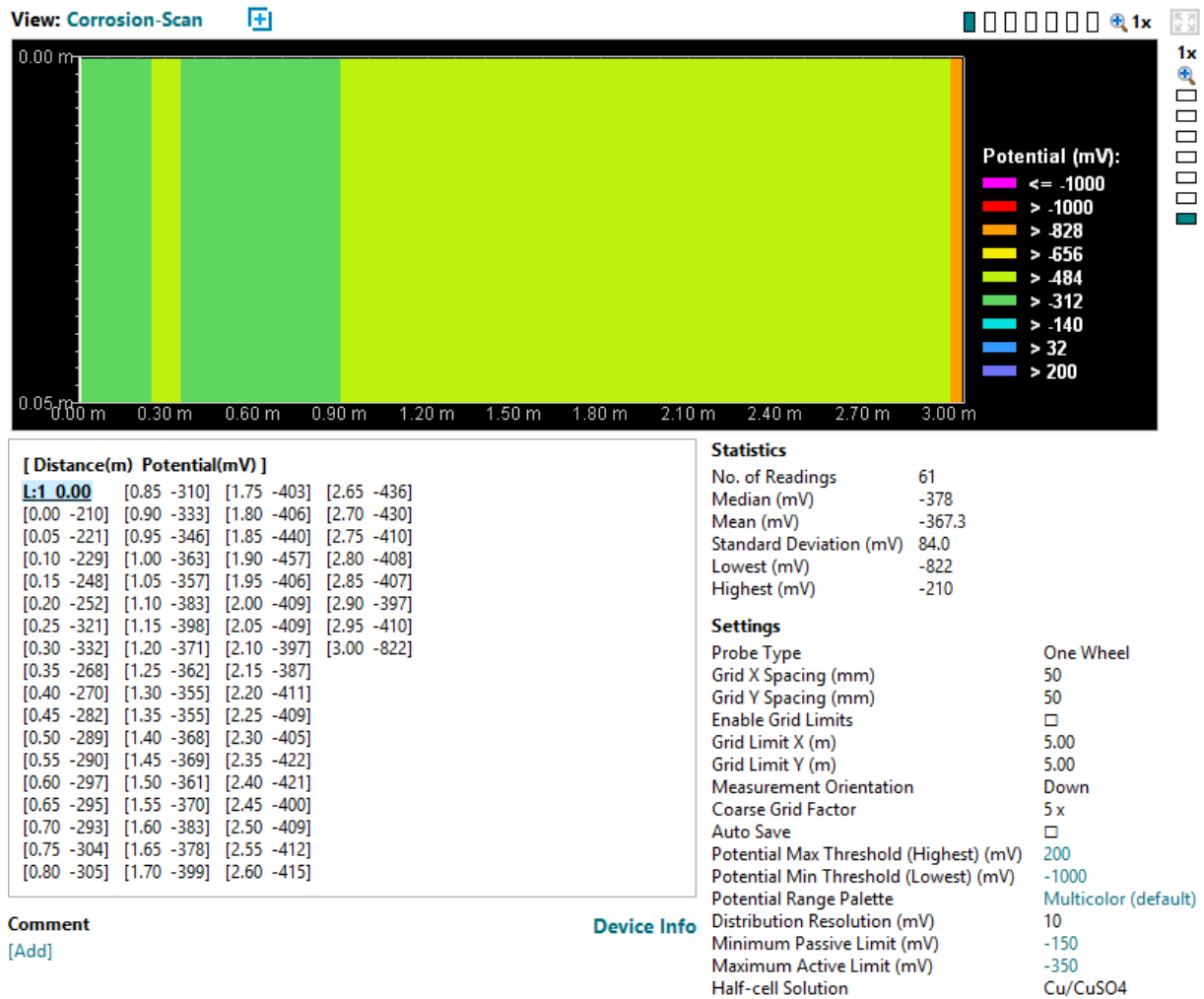
Figur I.1.4: Kumulativ distribusjon fra Profometer.

### Punktmålinger- Linje 2:

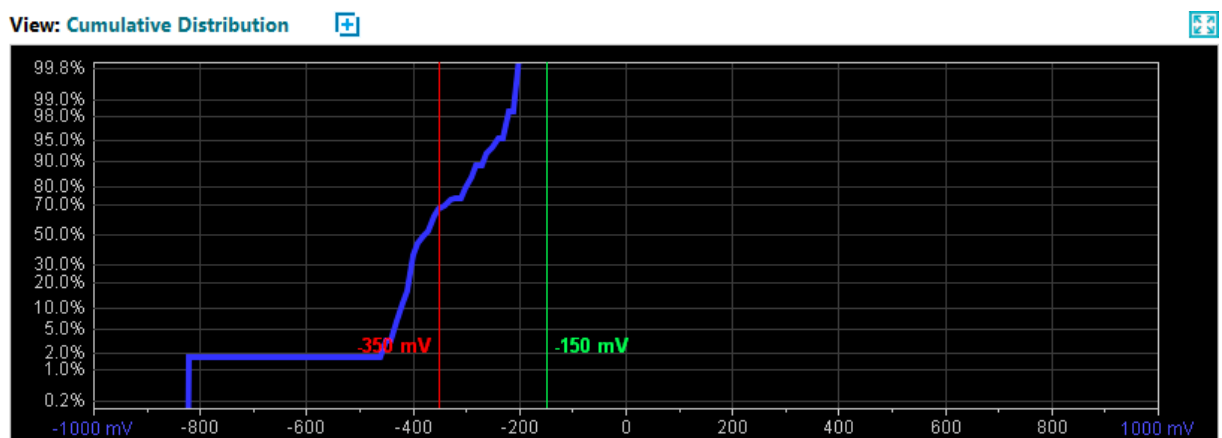


Figur I.1.5: "Corrosion Scan" fra Profometer.

## Hjul- Linje 4:

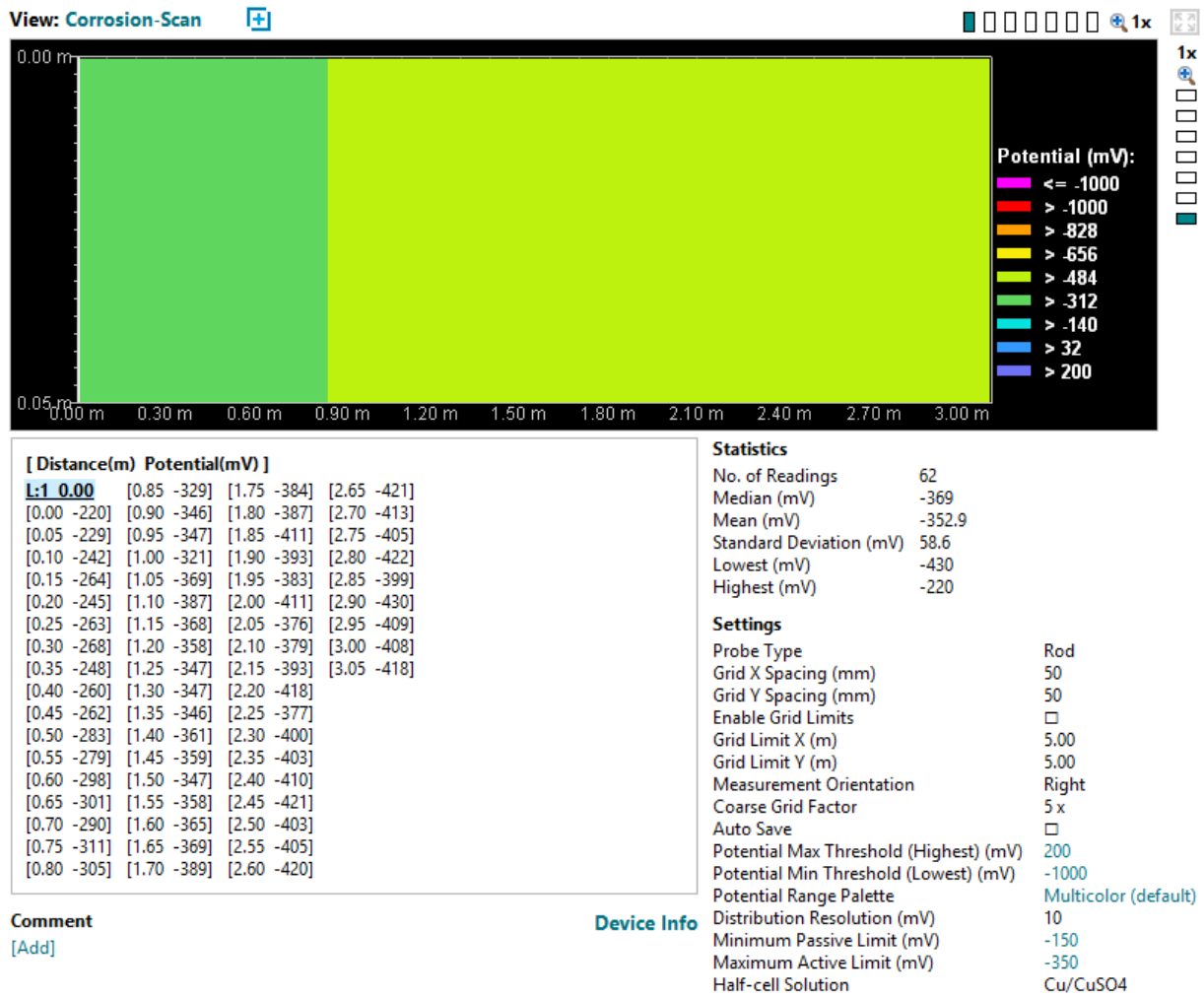


Figur I.1.6: "Corrosion Scan" fra Profometer.



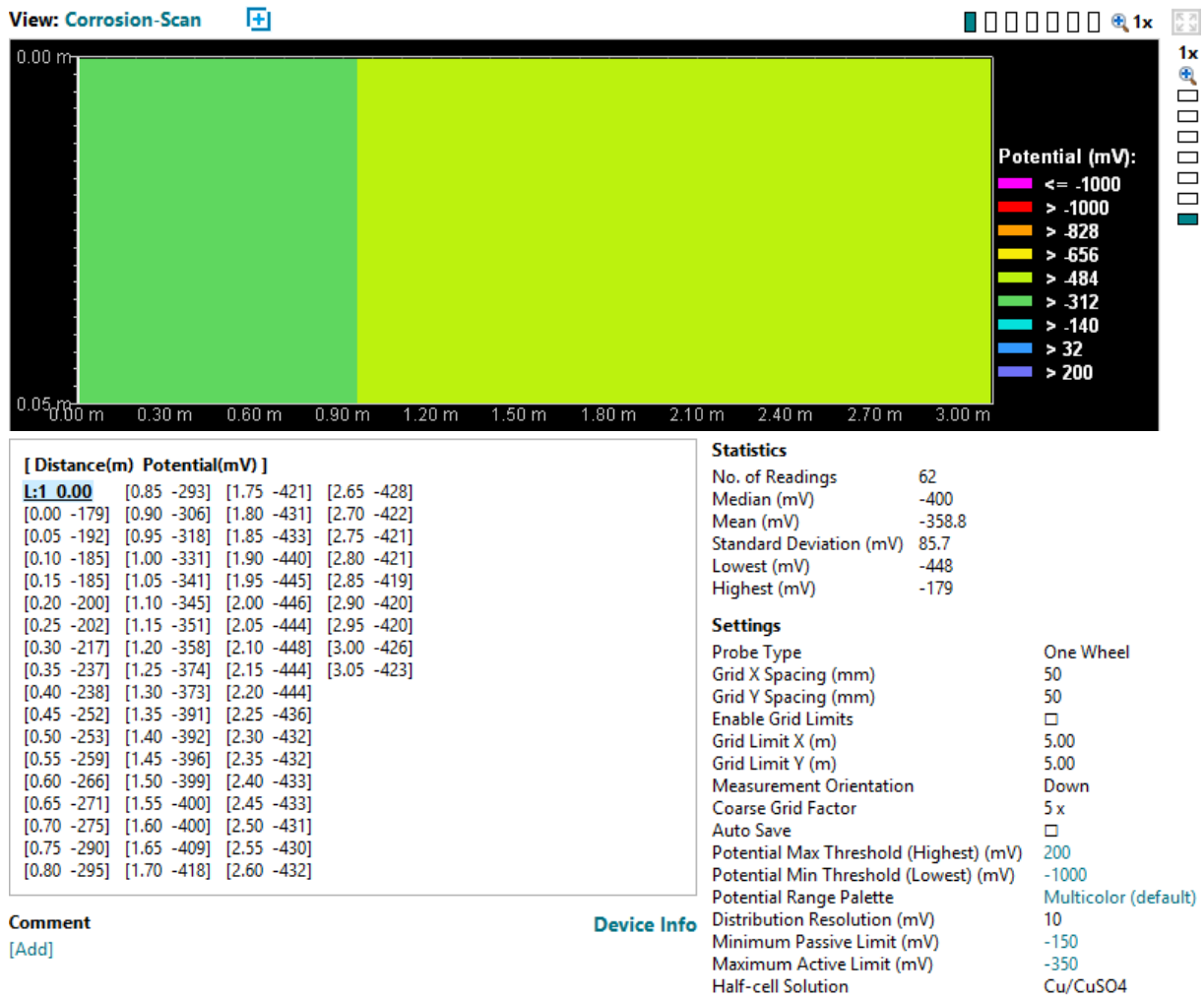
Figur I.1.7: Kumulativ distribusjon fra Profometer.

## Punktmålinger- Linje 4:

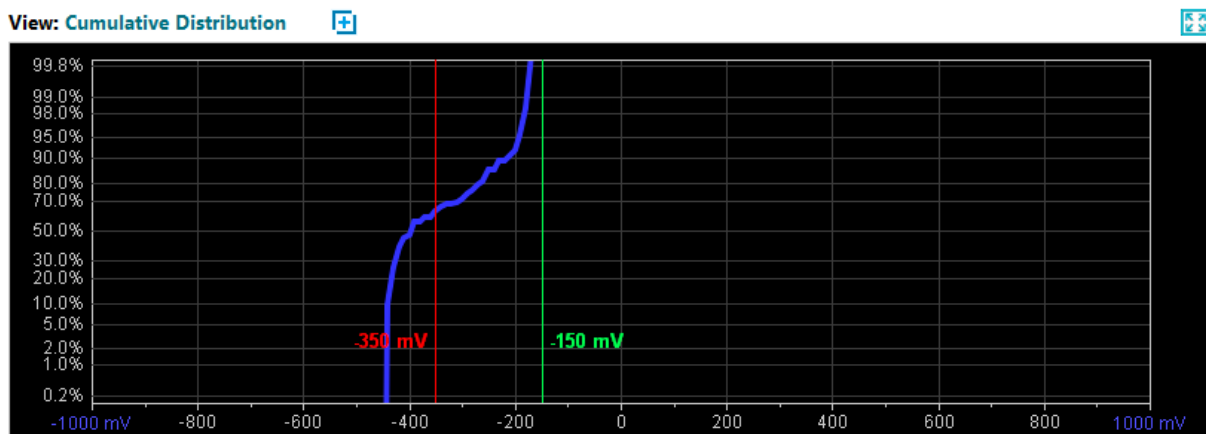


Figur I.1.8: "Corrosion Scan" fra Profometer.

## Hjul- Linje 5:



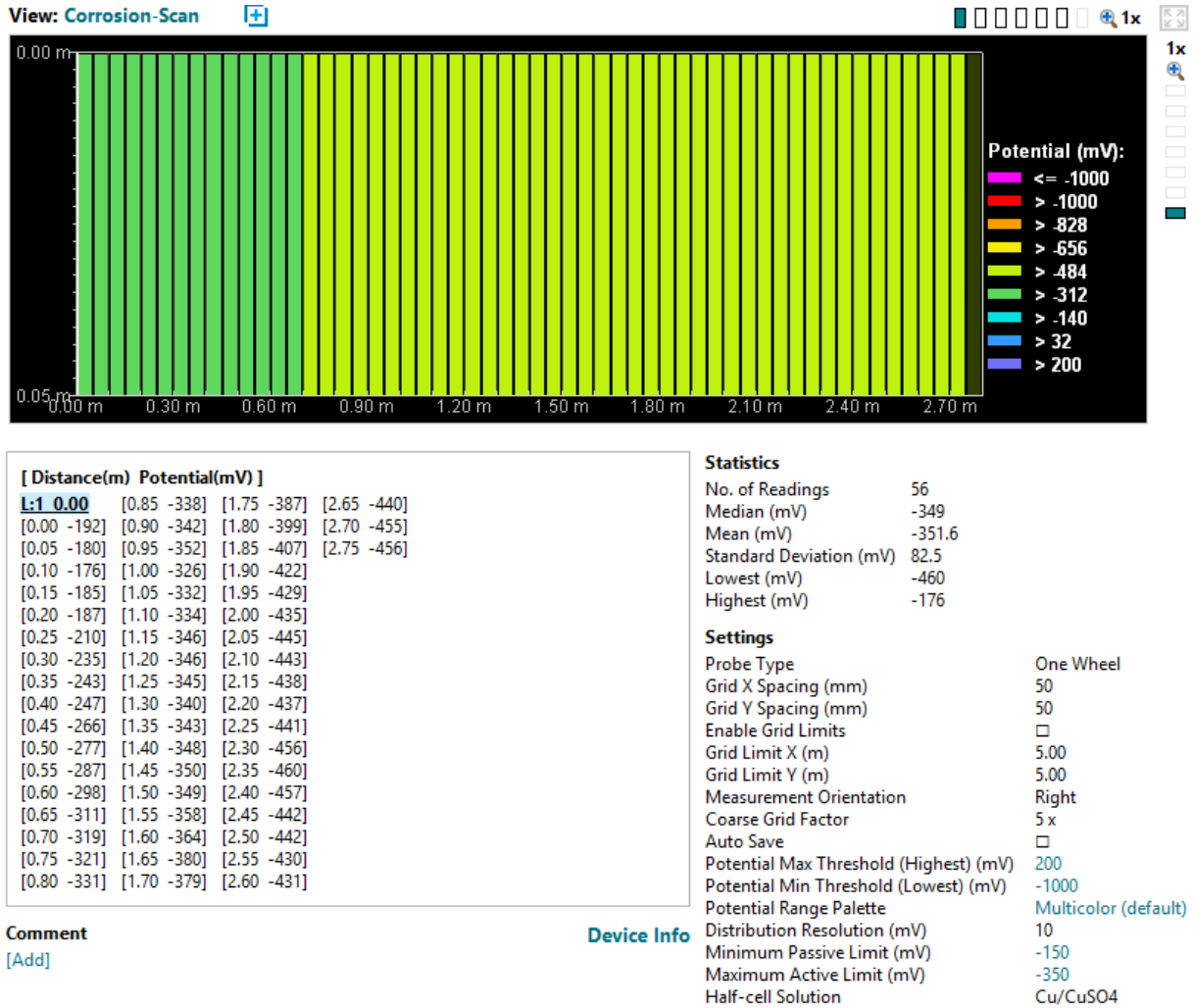
Figur I.1.9: "Corrosion Scan" fra Profometer.



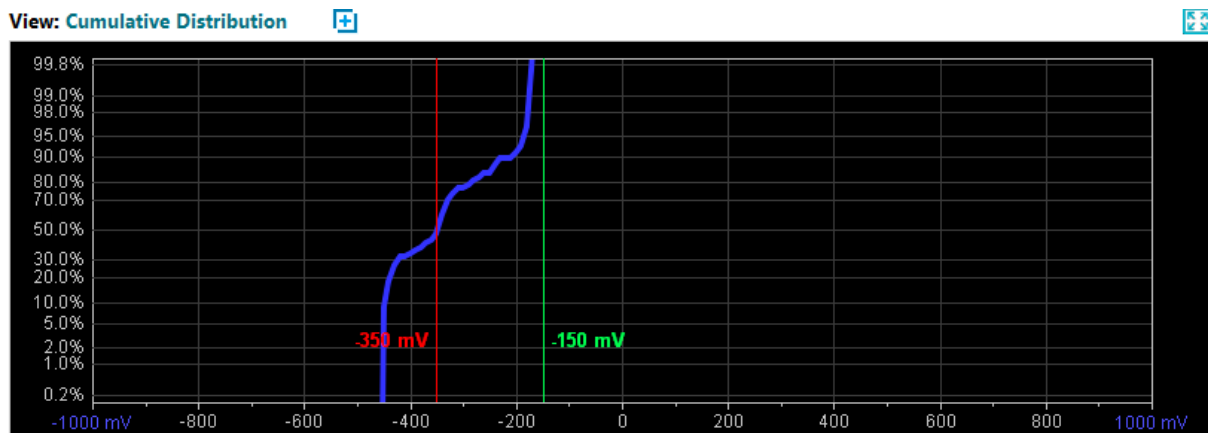
Figur I.1.10: Kumulativ distribusjon fra Profometer.

## I.2 Detaljerte elektrokjemiske målinger bjelke B:

### Hjul- Linje 1:

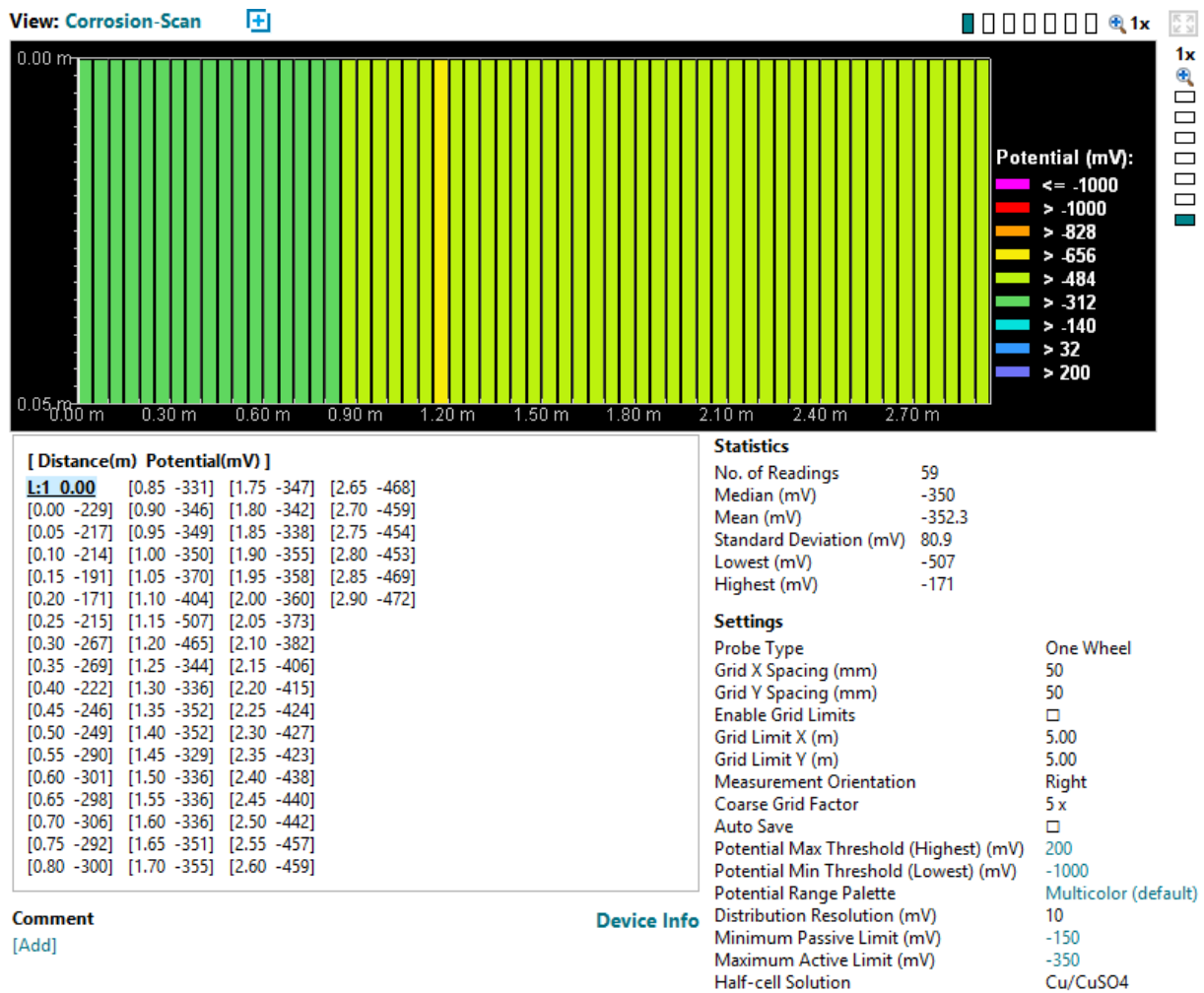


Figur I.2.1: "Corrosion Scan" fra Profometer.

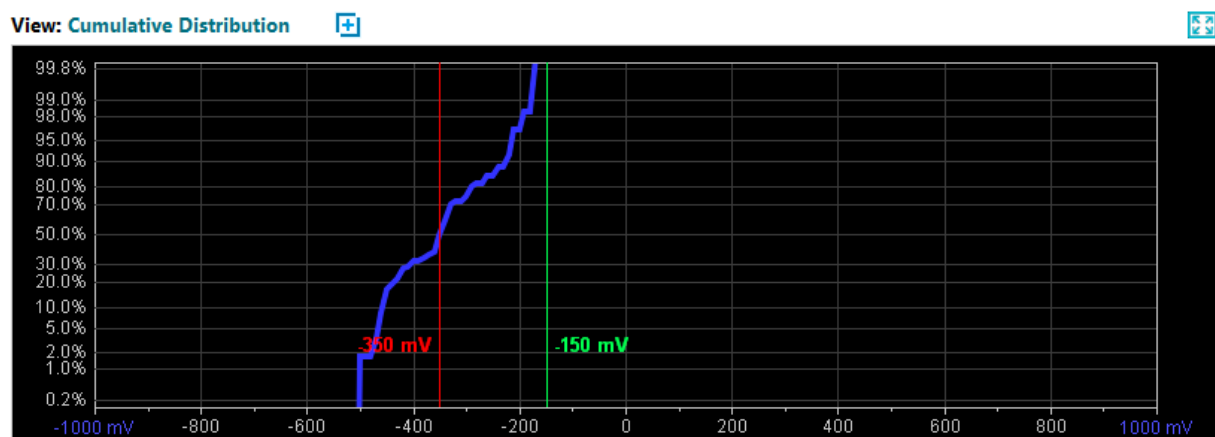


Figur I.2.2: Kumulativ distribusjon fra Profometer.

## Hjul- Linje 2:

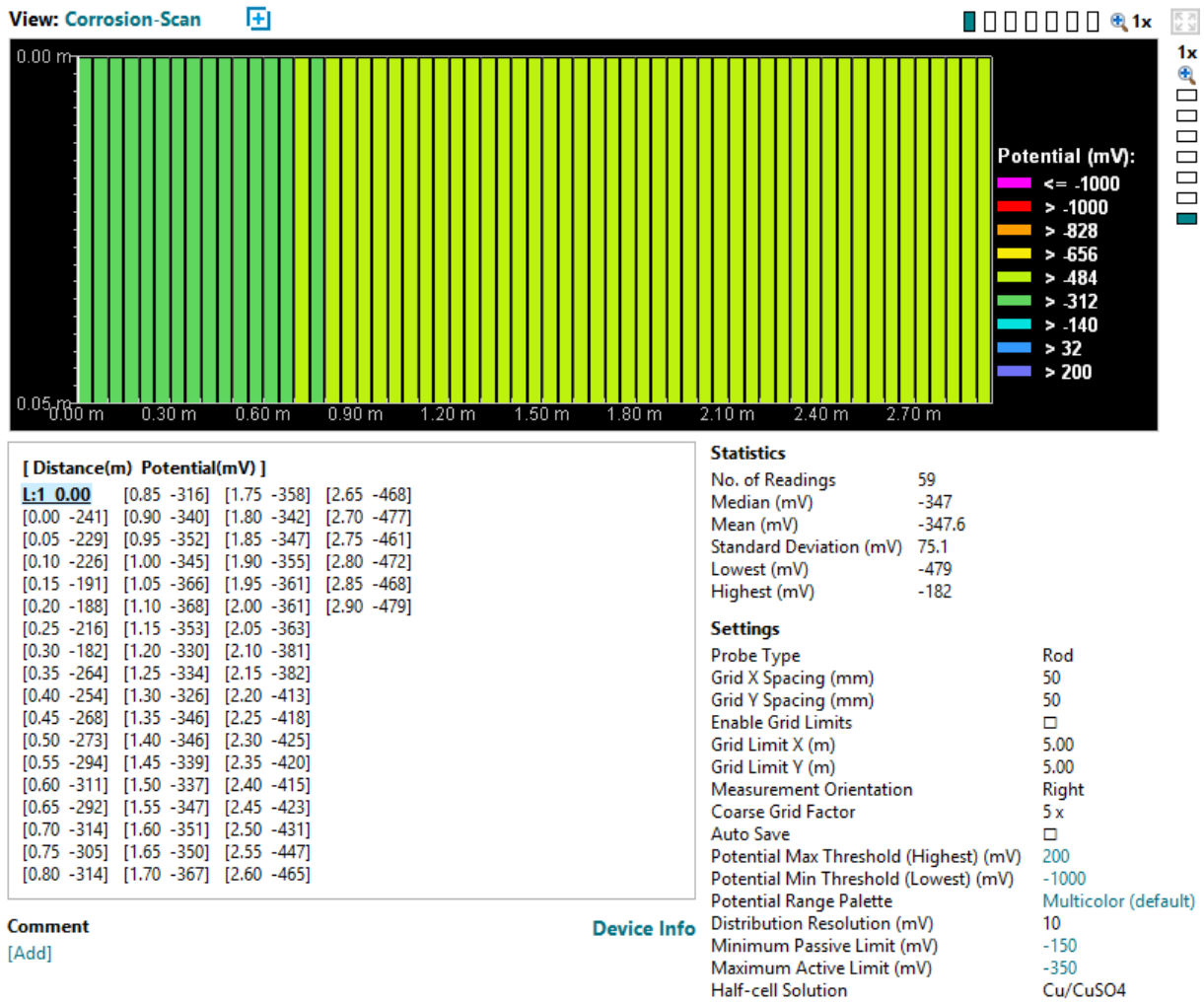


Figur I.2.3: "Corrosion Scan" fra Profometer.



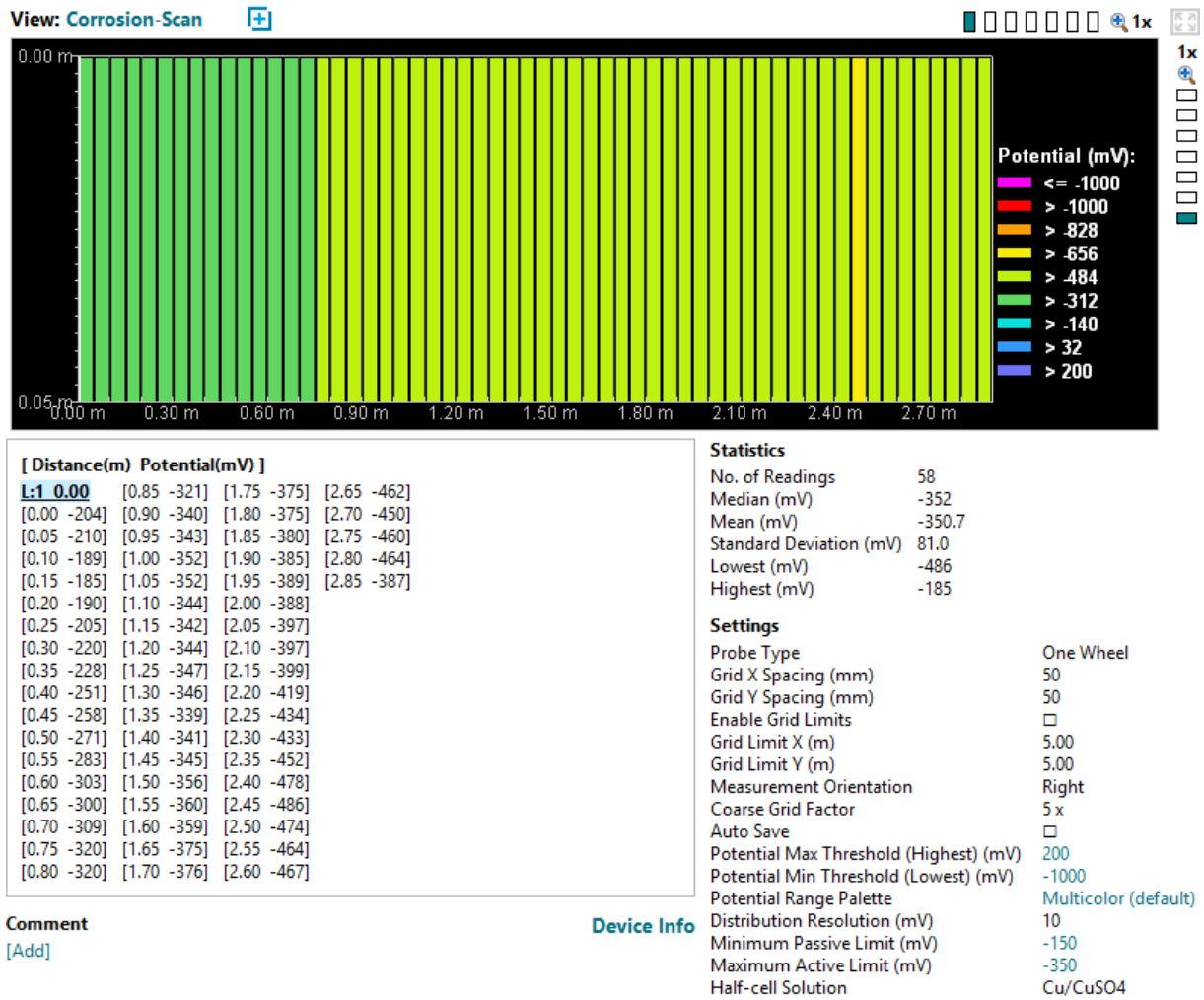
Figur I.2.4: Kumulativ distribusjon fra Profometer.

## Punktmålinger- Linje 2:

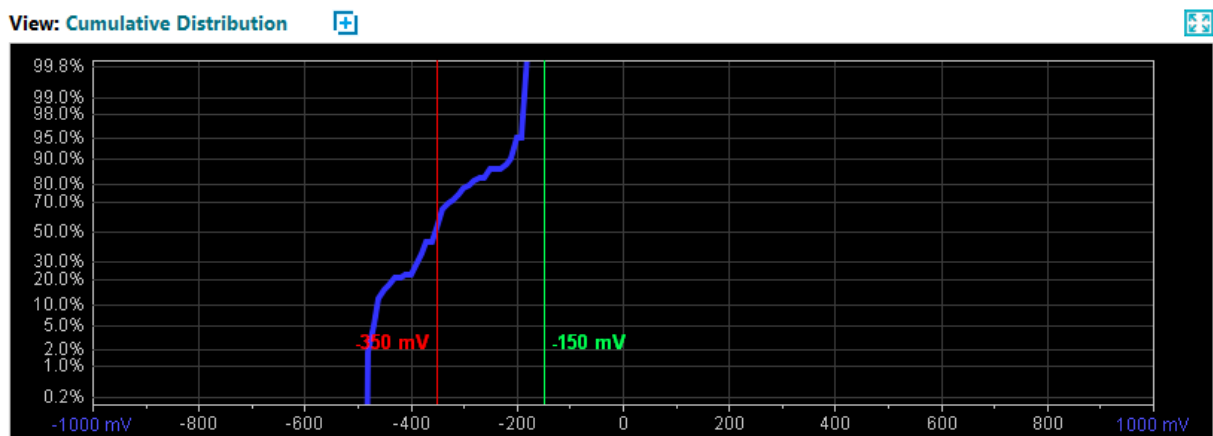


Figur I.2.5: "Corrosion Scan" fra Profometer.

## Hjul- Linje 4:



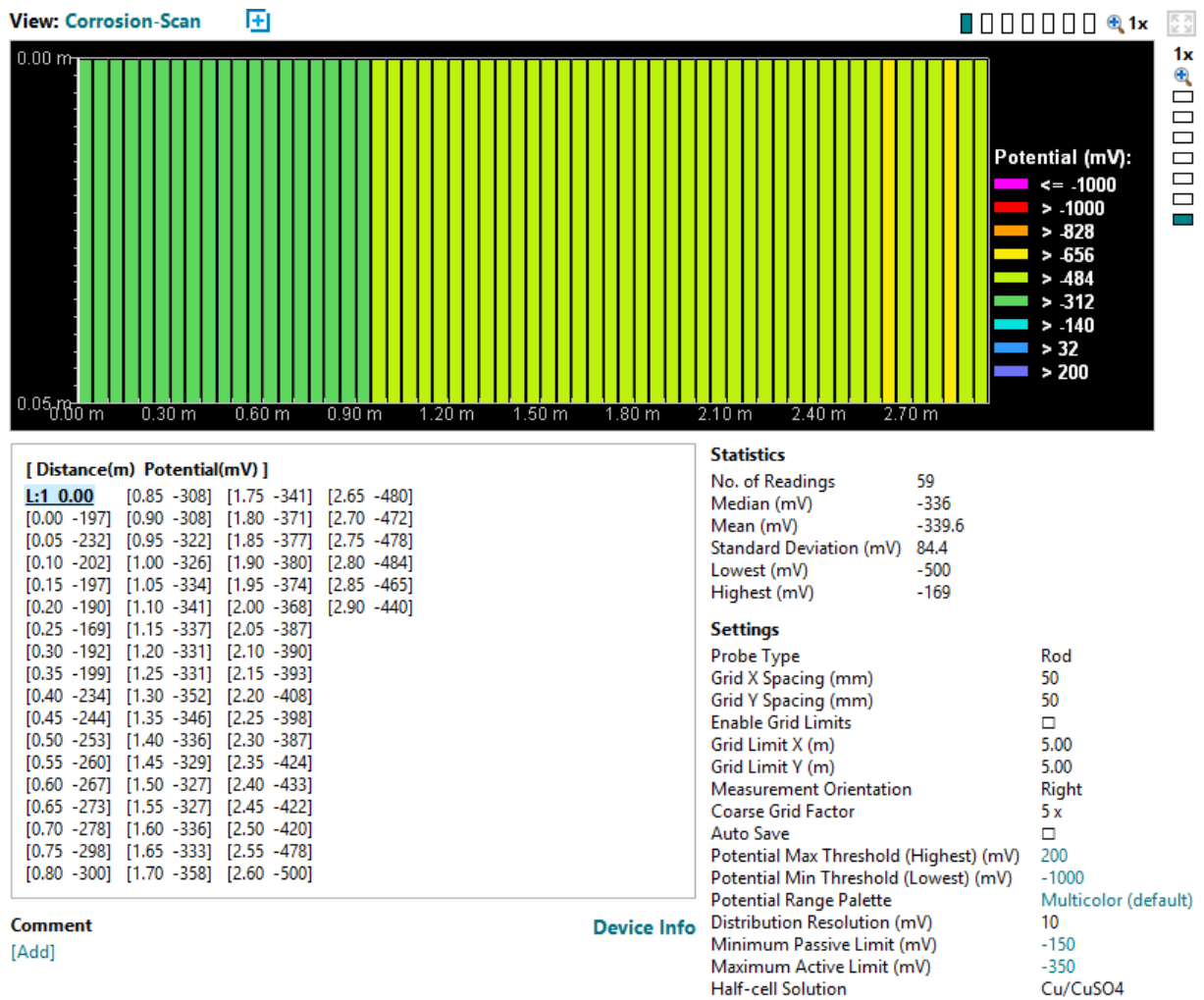
Figur I.2.6: "Corrosion Scan" fra Profometer.



Figur I.2.7: Kumulativ distribusjon fra Profometer.

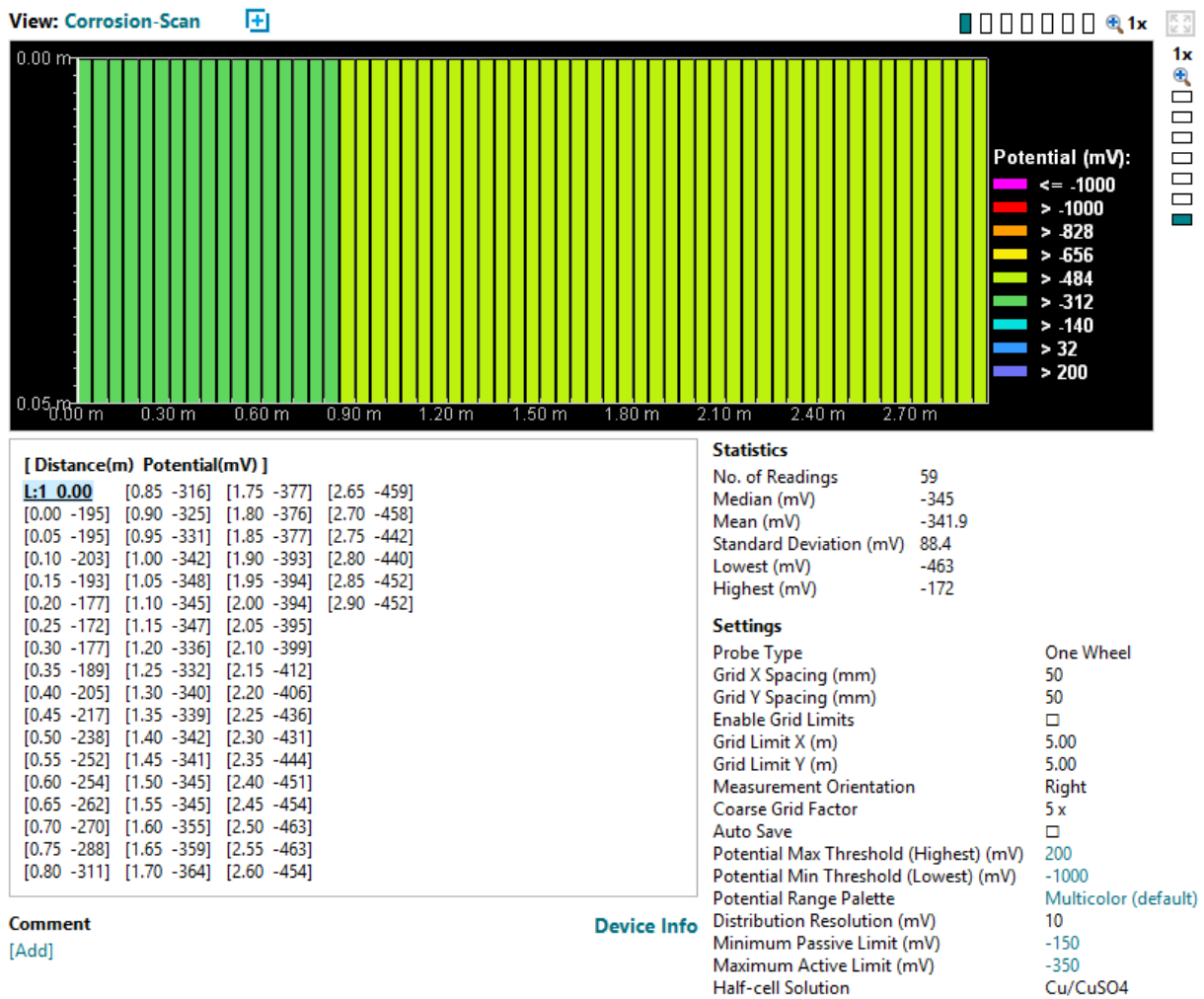


## Punktmålinger- Linje 4:

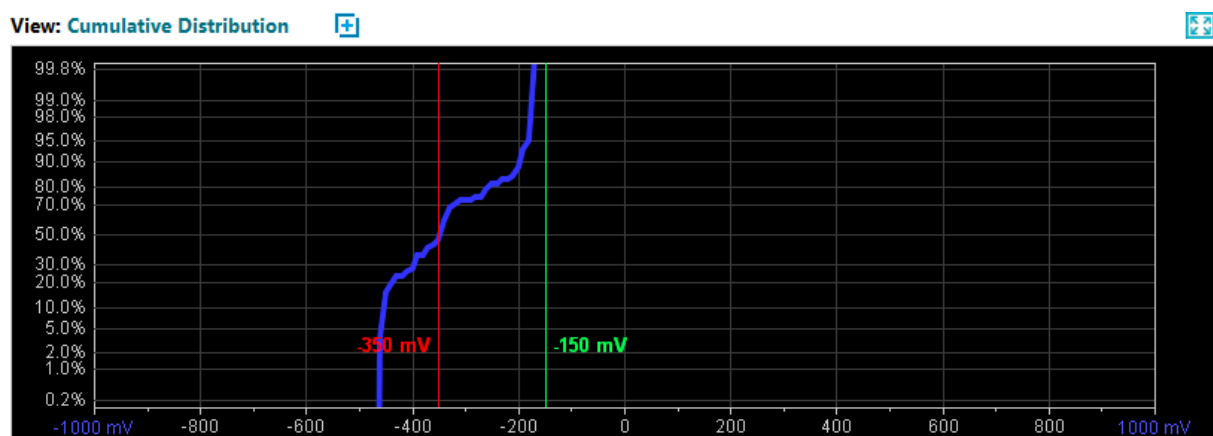


Figur I.2.8: "Corrosion Scan" fra Profometer.

## Hjul- Linje 5:



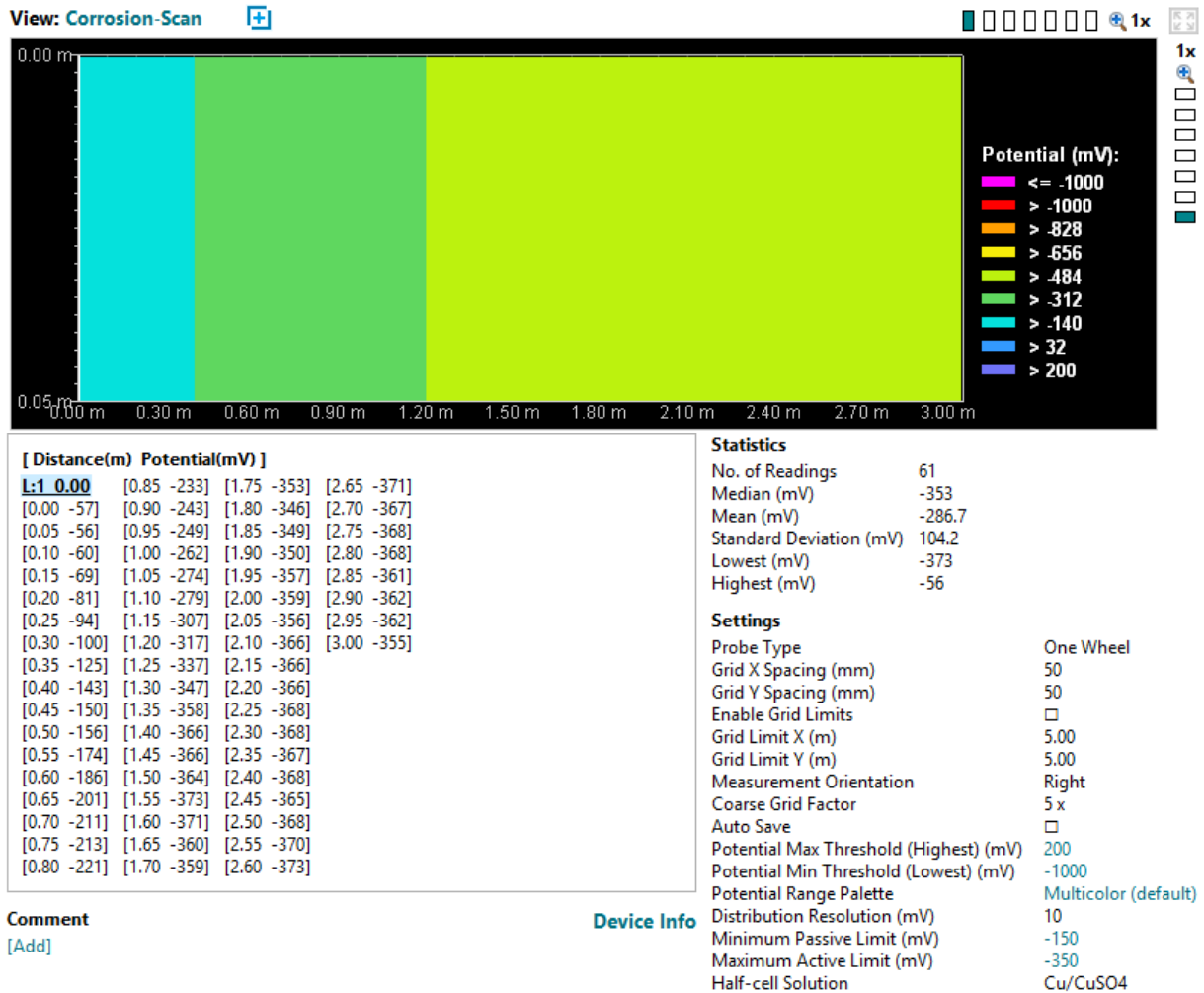
Figur I.2.9: “Corrosion Scan” fra Profometer.



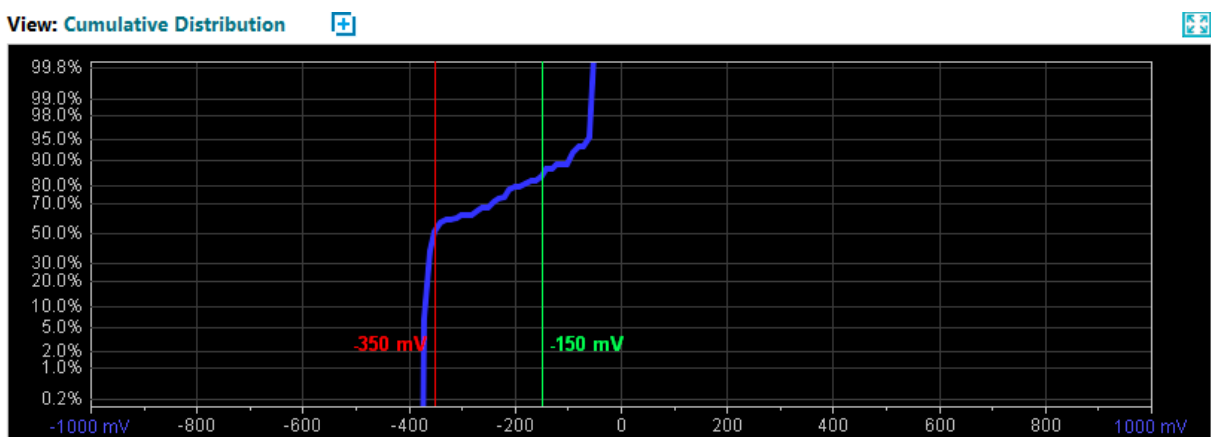
Figur I.2.10: Kumulativ distribusjon fra Profometer.

### I.3 Detaljerte elektrokjemiske målinger bjelke E:

#### Hjul- Linje 1:

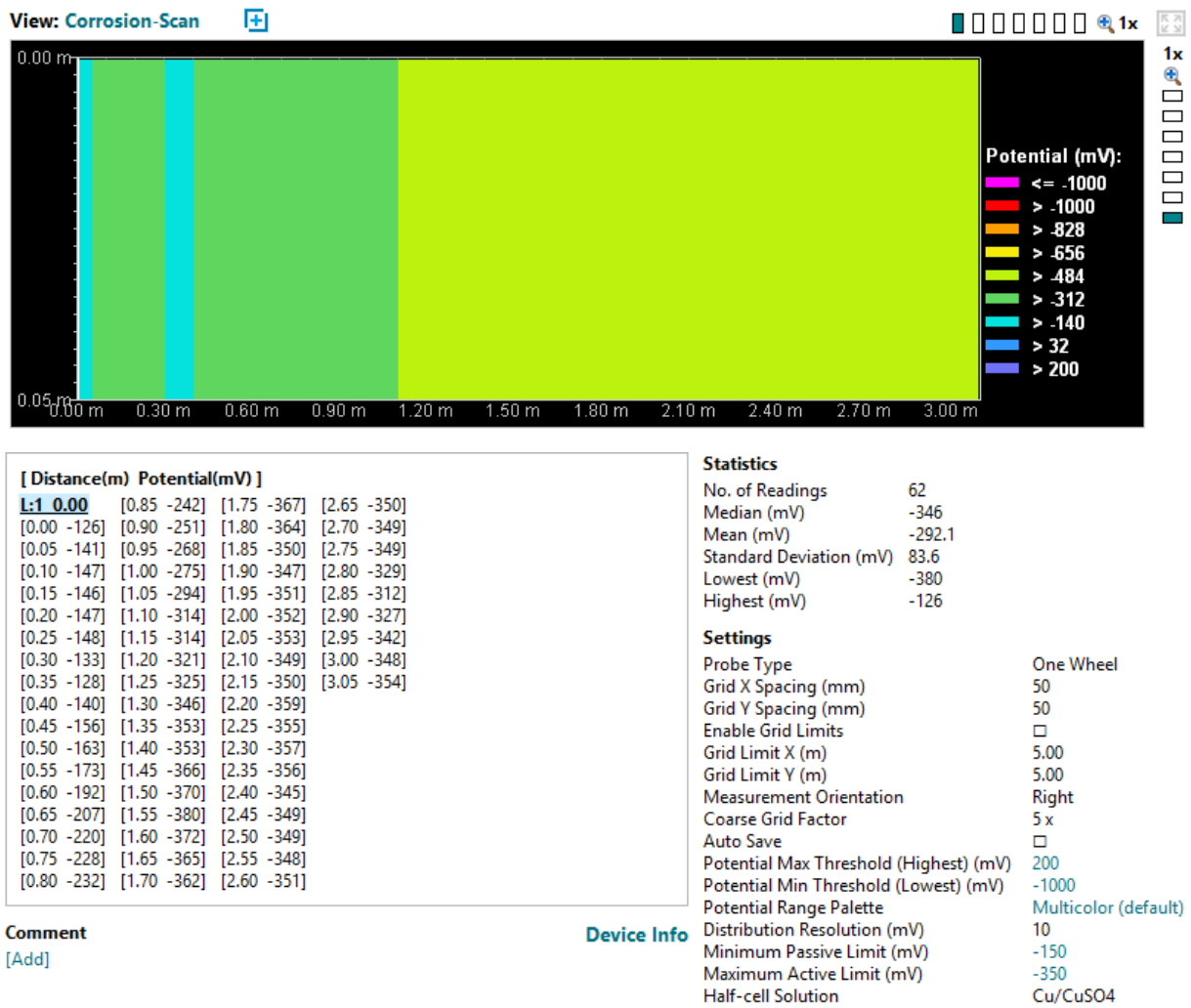


Figur I.3.1: "Corrosion Scan" fra Profometer.

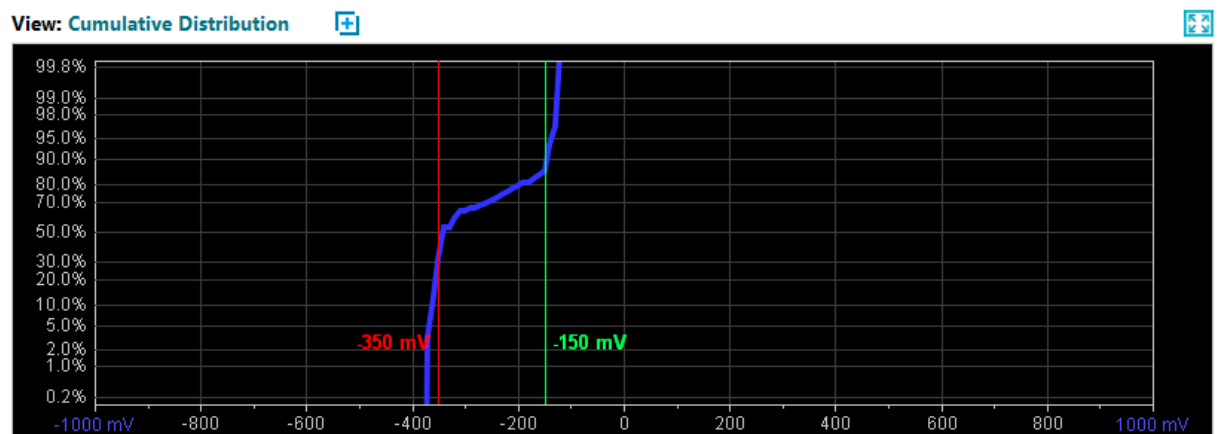


Figur I.3.2: Kumulativ distribusjon fra Profometer.

## Hjul- Linje 2:

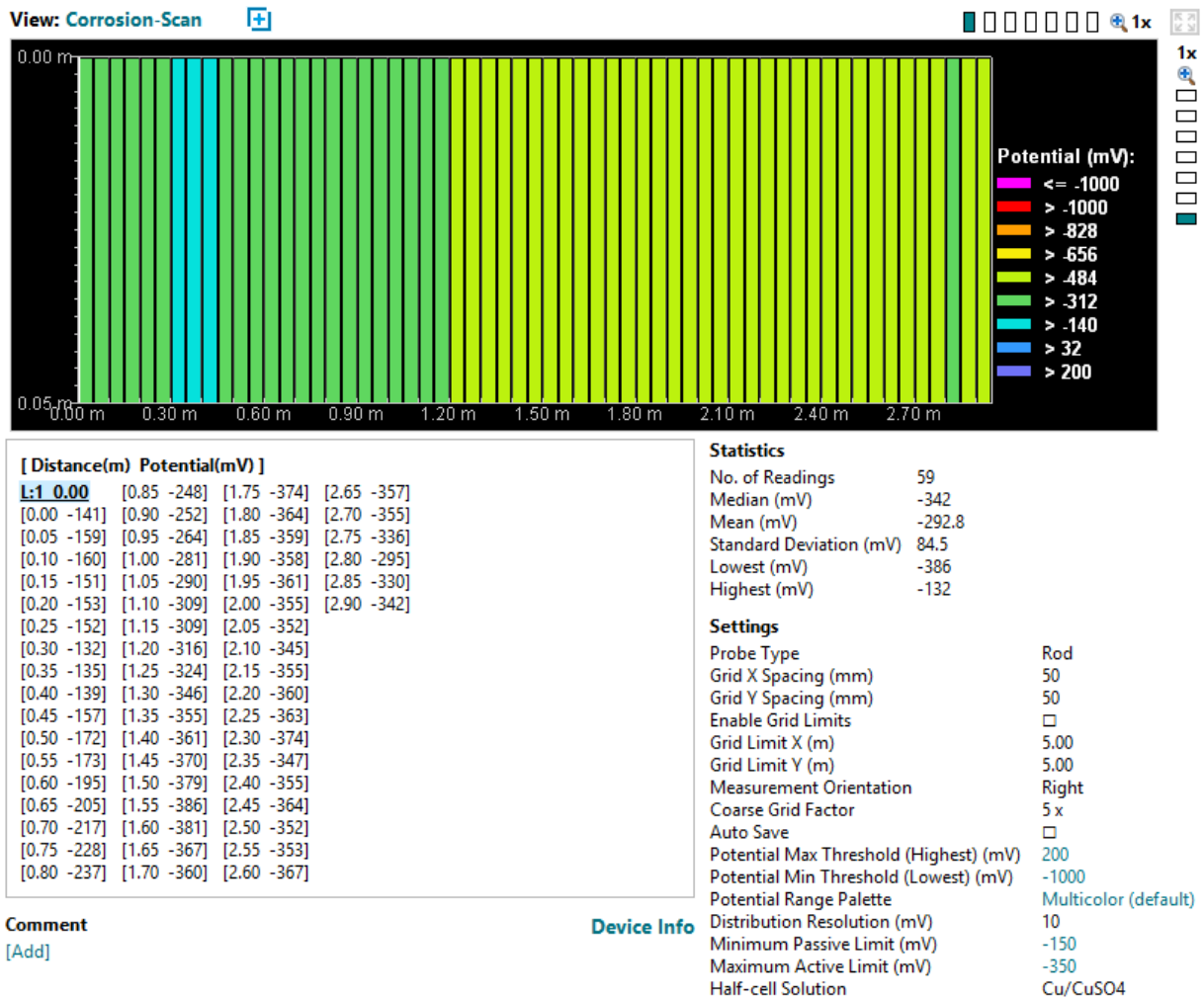


Figur I.3.3: "Corrosion Scan" fra Profometer.



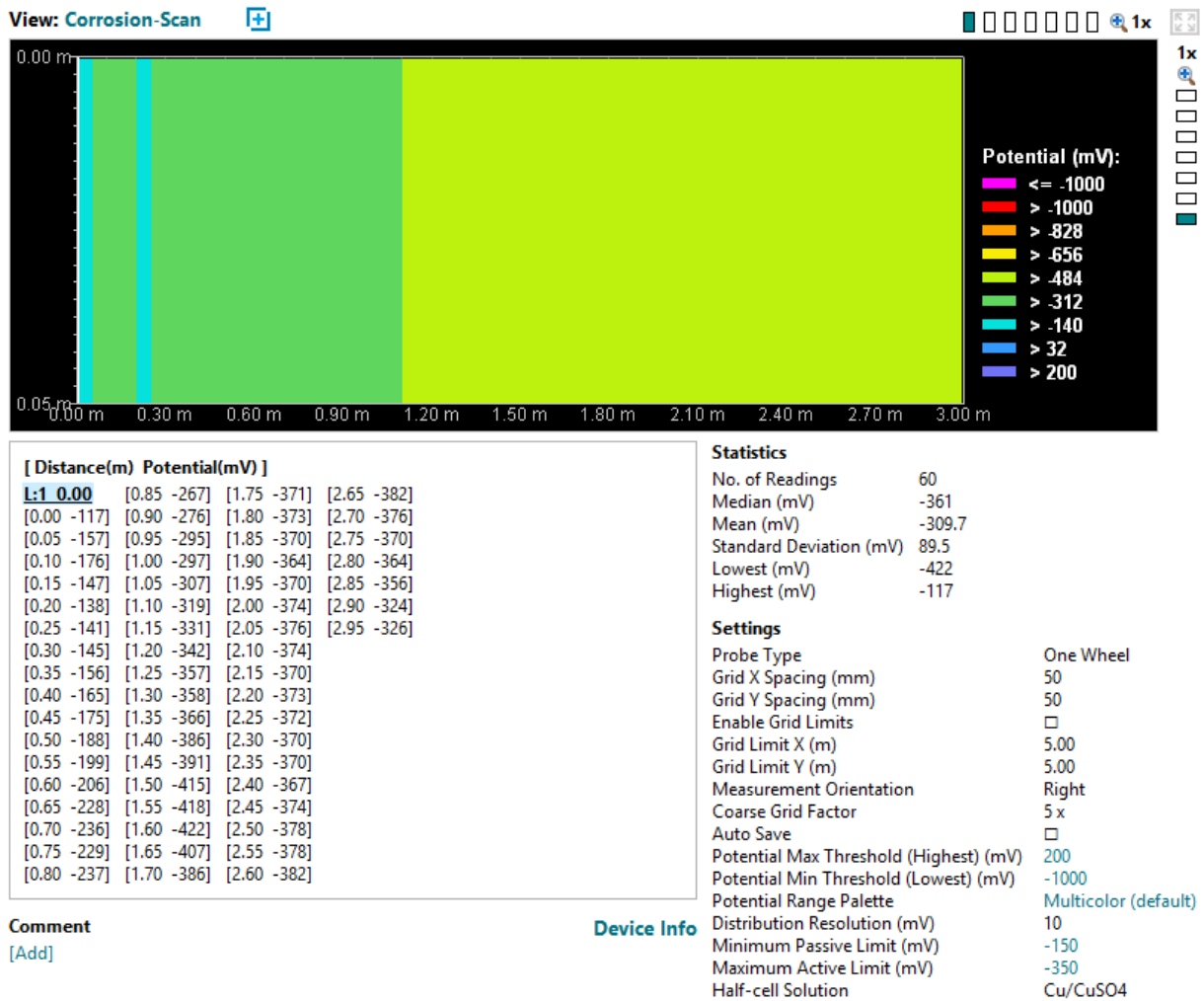
Figur I.3.4: Kumulativ distribusjon fra Profometer.

## Punktmålinger- Linje 2:

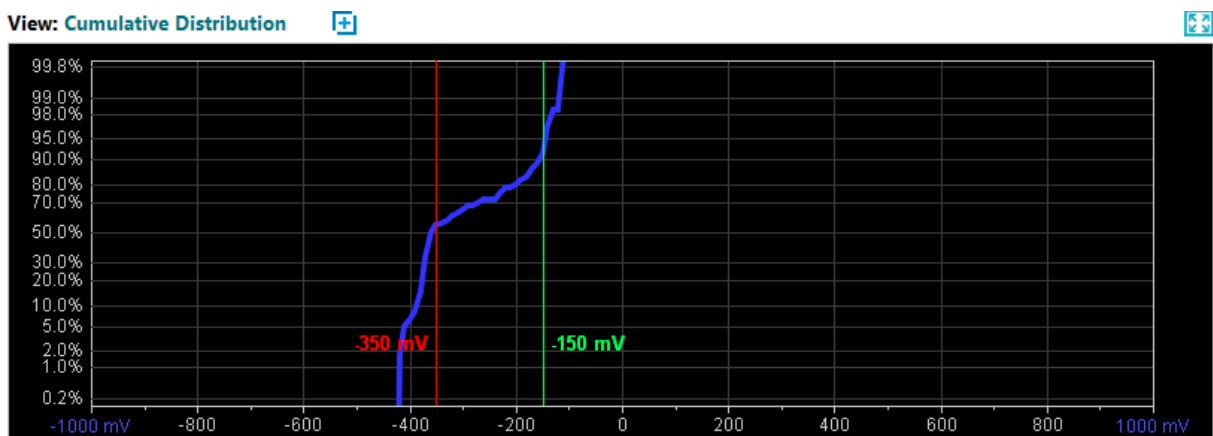


Figur I.3.5: "Corrosion Scan" fra Profometer.

## Hjul - Linje 4

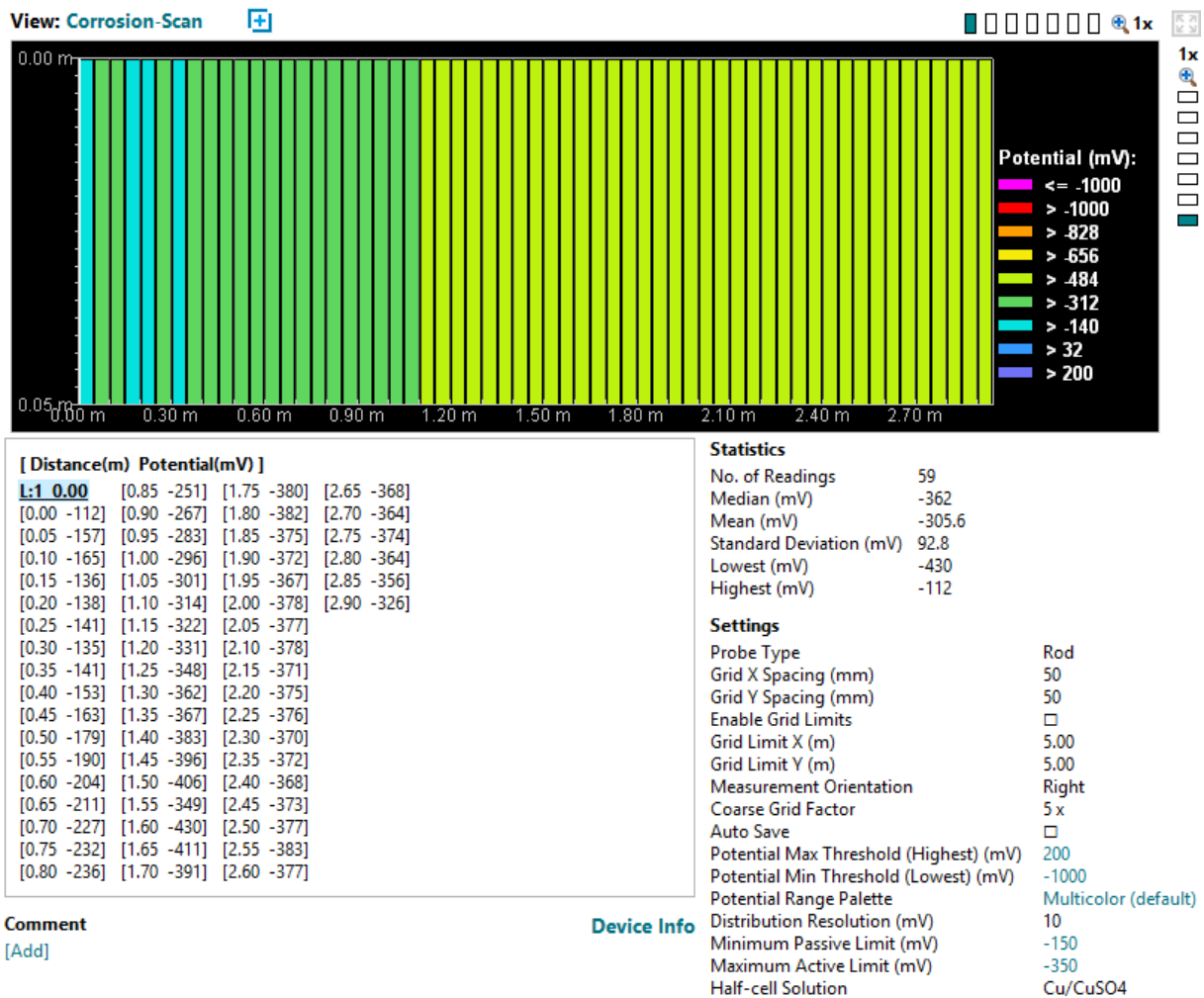


Figur I.3.6: "Corrosion Scan" fra Profometer.



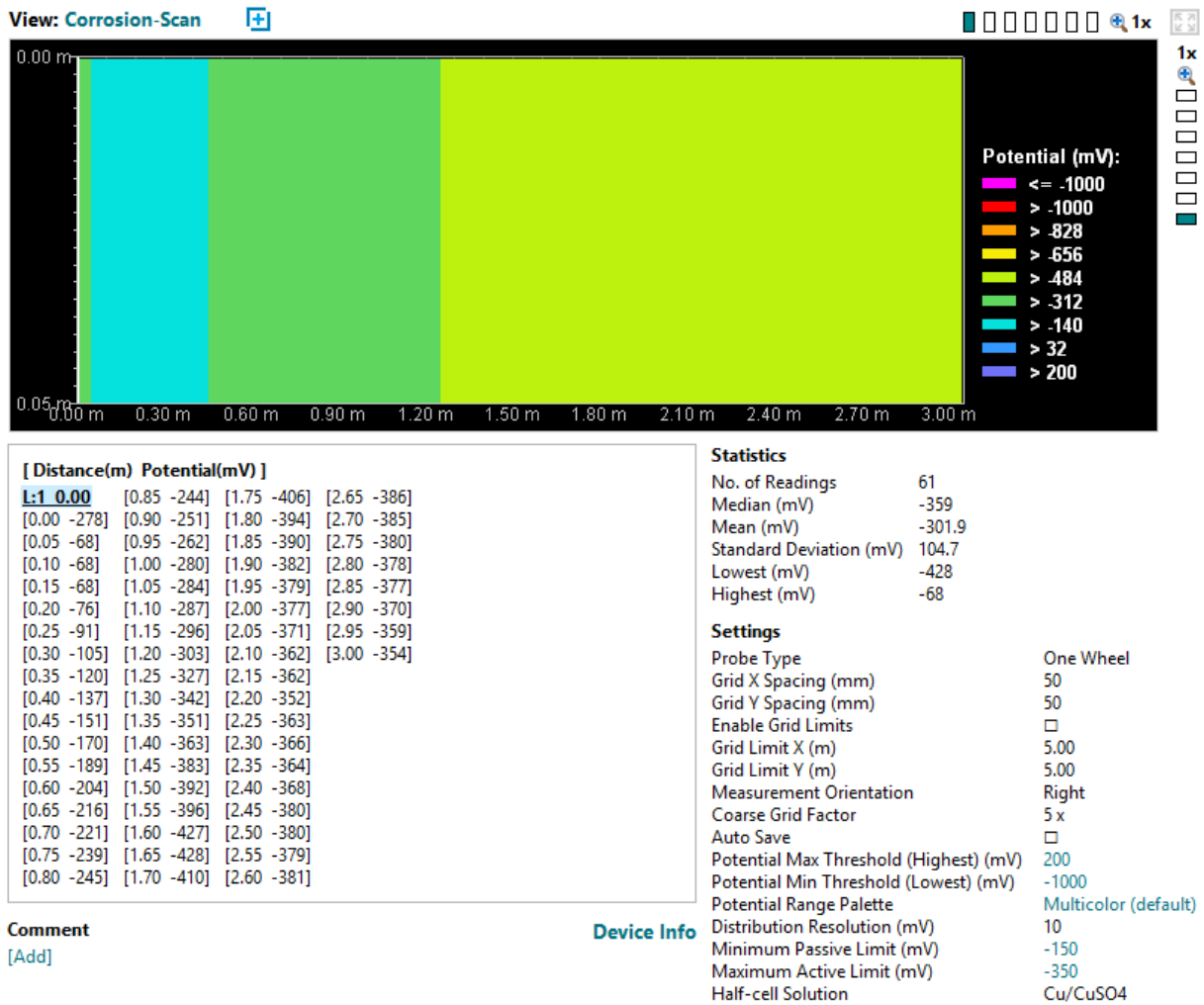
Figur I.3.7: Kumulativ distribusjon fra Profometer.

## Punktmålinger- Linje 4:

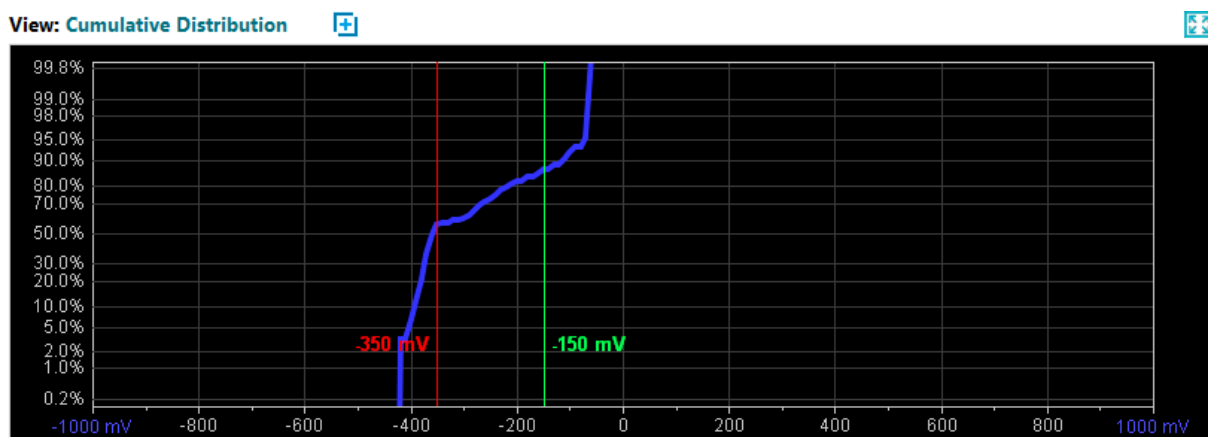


Figur I.3.8: "Corrosion Scan" fra Profometer.

### Hjul - Linje 5:



Figur I.3.9: "Corrosion Scan" fra Profometer.



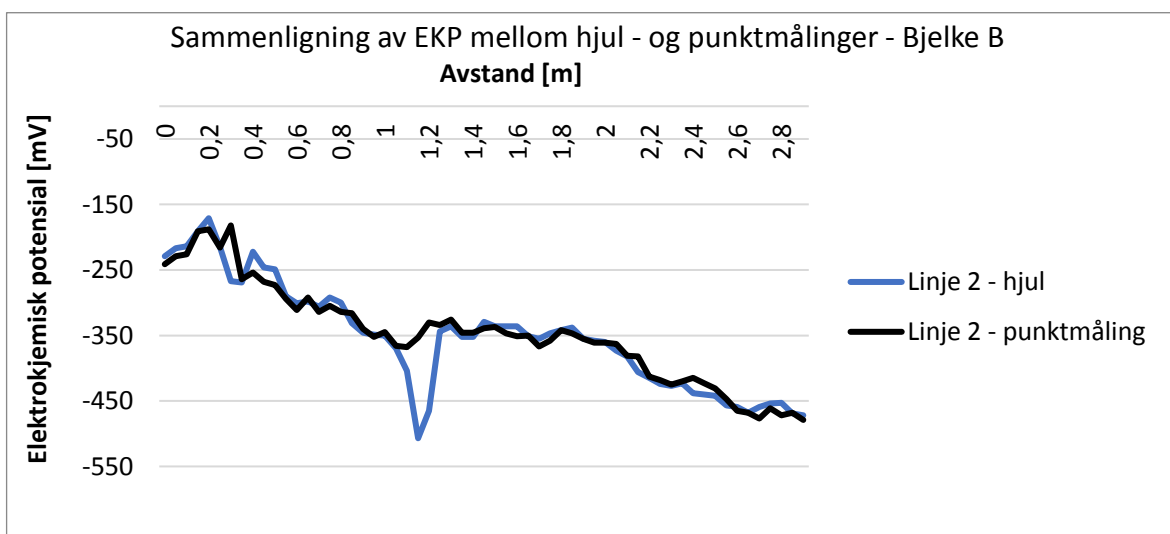
Figur I.3.10: Kumulativ distribusjon fra Profometer.



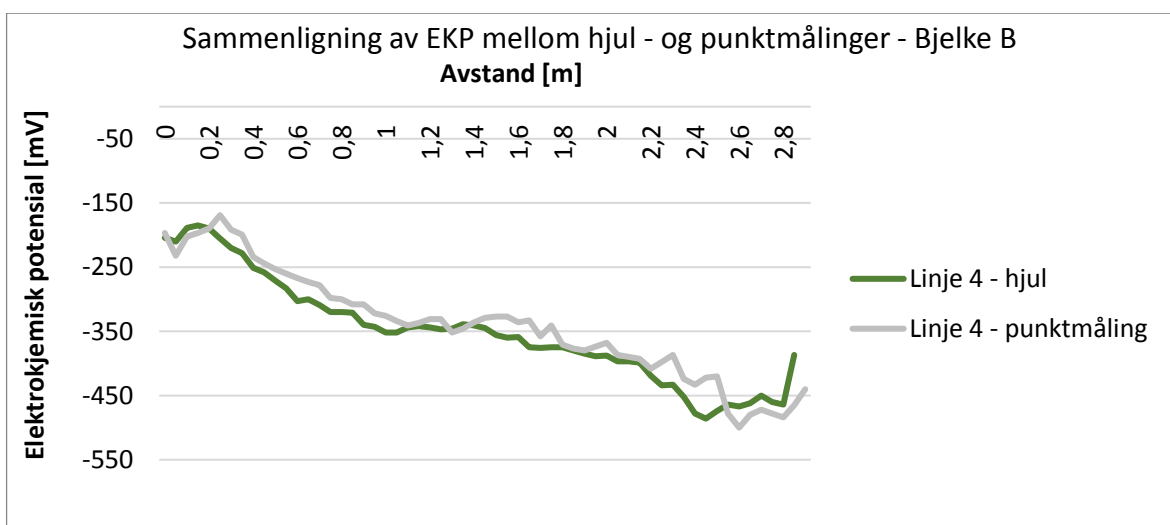
## I.4 Sammenligning av kontinuerlige målinger og punktmålinger

Det er utført en sammenligning mellom kontinuerlige målinger med hjul og punktmålinger for både linje 2 og linje 4. Dette ble gjort for å sikre at avviket mellom målingene ikke var så stort at valg av målemetode påvirket resultatene. Målingene med hjul ble tatt over avskallinger i overflaten, mens punktmålingene ble tatt ved siden av. Dette er årsaken til at EKP-målingene med hjul noen ganger viser gradienter der EKP-punktmålingene ikke viser dette.

### Bjelke B

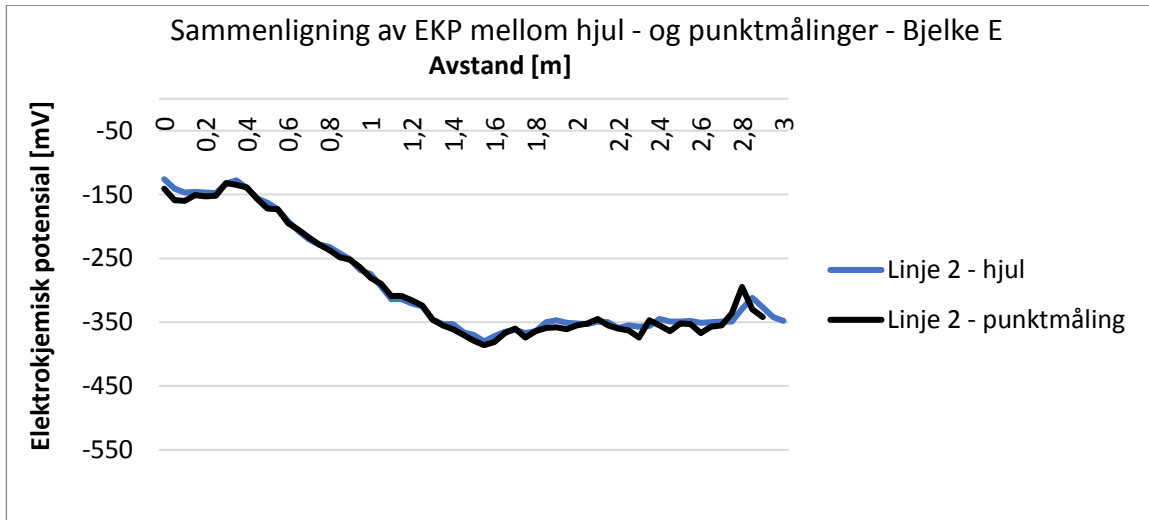


Figur I.4.1: Fremstilling av EKP for linje 2 utført både med hjul og med punktmåling.

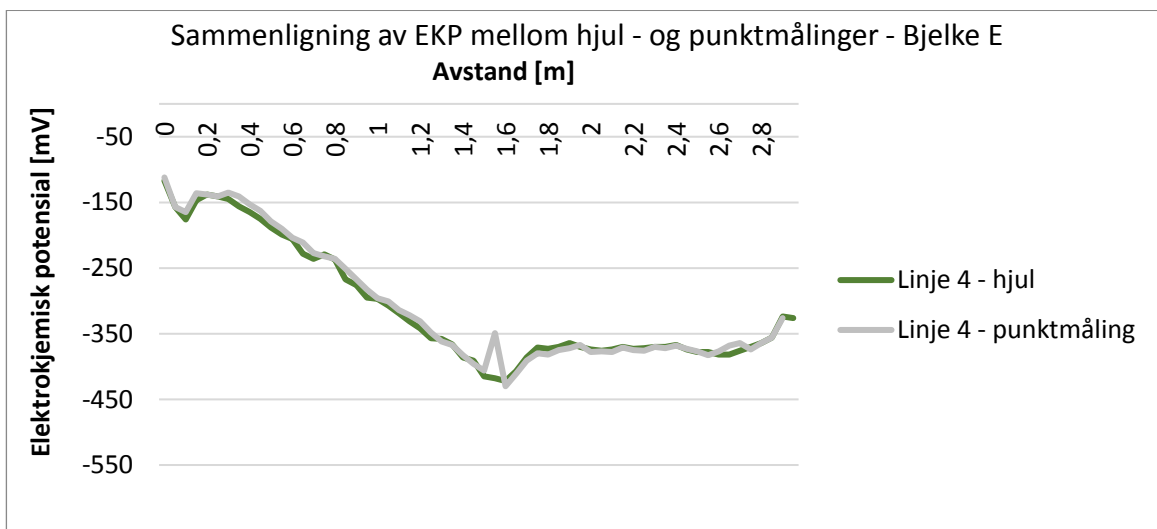


Figur I.4.2: Fremstilling av EKP for linje 4 utført både med hjul og med punktmåling.

## Bjelke E

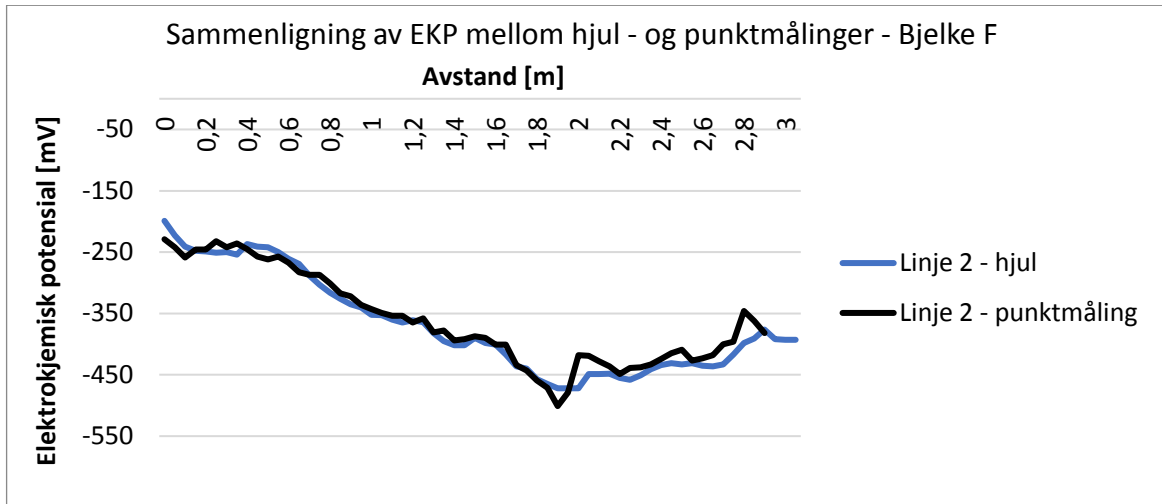


Figur I.4.3: Fremstilling av EKP for linje 2 utført både med hjul og med punktmåling.

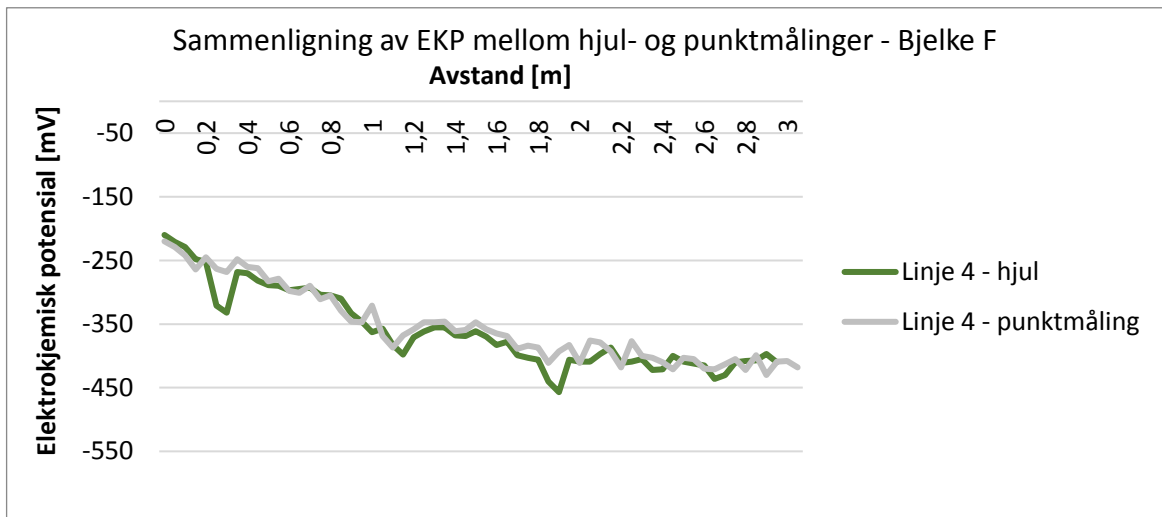


Figur I.4.4: Fremstilling av EKP for linje 4 utført både med hjul og med punktmåling.

## Bjelke F



Figur I.4.5: Fremstilling av EKP for linje 2 utført både med hjul og med punktmåling.



Figur I.4.6: Fremstilling av EKP for linje 4 utført både med hjul og med punktmåling.

## Vedlegg J – Kloridanalyser

Kloridanalysene som er benyttet i rapporten er utarbeidet av Sintef Byggforsk. Tabell J.2 – Tabell J.4 viser kloridanalyser for samtlige bjelker. Her finnes forklaring til hvordan kloridkonsentrasjonen er regnet om fra % betongvekt til % sementvekt. Tallene fra den opprinnelige kloridanalysen viser kloridinnholdet som % vekt av betong. Siden kritisk kloridgrense er gitt i % av sementvekten, ganges disse tallene med forholdstallet som viser vekten av betongen i forhold til sementvekten, for å få % sementvekt (Statens vegvesen, 2016). Disse forholdstallene finnes i Tabell J.1 og er regnet ut i fra betongreseptene i vedlegg B.

*Tabell J.1: Forholdstall benyttet til omregning fra % betongdensitet til % sementvekt.*

	Resept B	Resept E	Resept F
Sement [kg/m <sup>3</sup> ]	373	384	398
Teoretisk tetthet [kg/m <sup>3</sup> ]	2384	2401	2371
Betongvekt/Sementvekt	6,4	6,3	6,0

Tabell J.2: Kloridanalyse for kjerner fra bjelke B

Kjerne ID	Dybde [mm]	Konsentrasjon [% betongvekt]	Konsentrasjon [% sementvekt]
BAR	0-3	0,433	2,7712
	3-6	0,343	2,1952
	6-10	0,285	1,824
	10-15	0,247	1,5808
	15-20	0,183	1,1712
	20-30	0,079	0,5056
	30-40	0,02	0,128
	40-50	<0,005	<0,032
BTR	0-3	0,444	2,8416
	3-6	0,352	2,2528
	6-10	0,312	1,9968
	10-15	0,274	1,7536
	15-20	0,257	1,6448
	20-30	0,161	1,0304
	30-40	0,074	0,4736
	40-50	0,036	0,2304
BSR	0-3	0,666	4,2624
	3-6	0,594	3,8016
	6-10	0,56	3,584
	10-15	0,55	3,52
	15-20	0,473	3,0272
	20-30	0,37	2,368
	30-40	0,292	1,8688
	40-50	0,218	1,3952

Tabell J.3: Kloridanalyse for kjerner fra bjelke E

Kjerne ID	Dybde [mm]	Konsentrasjon [% betongvekt]	Konsentrasjon [% sementvekt]
EAR	0-3	0,27	1,701
	3-6	0,327	2,0601
	6-10	0,235	1,4805
	10-15	0,185	1,1655
	15-20	0,119	0,7497
	20-30	0,033	0,2079
	30-40	<0,005	<0,032
	40-50	<0,005	<0,032
ETR	0-3	0,245	1,5435
	3-6	0,281	1,7703
	6-10	0,223	1,4049
	10-15	0,169	1,0647
	15-20	0,105	0,6615
	20-30	0,036	0,2268
	30-40	<0,005	<0,032
	40-50	<0,005	<0,032
ESR	0-3	0,305	1,9215
	3-6	0,373	2,3499
	6-10	0,269	1,6947
	10-15	0,228	1,4364
	15-20	0,163	1,0269
	20-30	0,073	0,4599
	30-40	0,023	0,1449
	40-50	<0,005	<0,032

Tabell J.4: Kloridanalyse for kjerner fra bjelke F

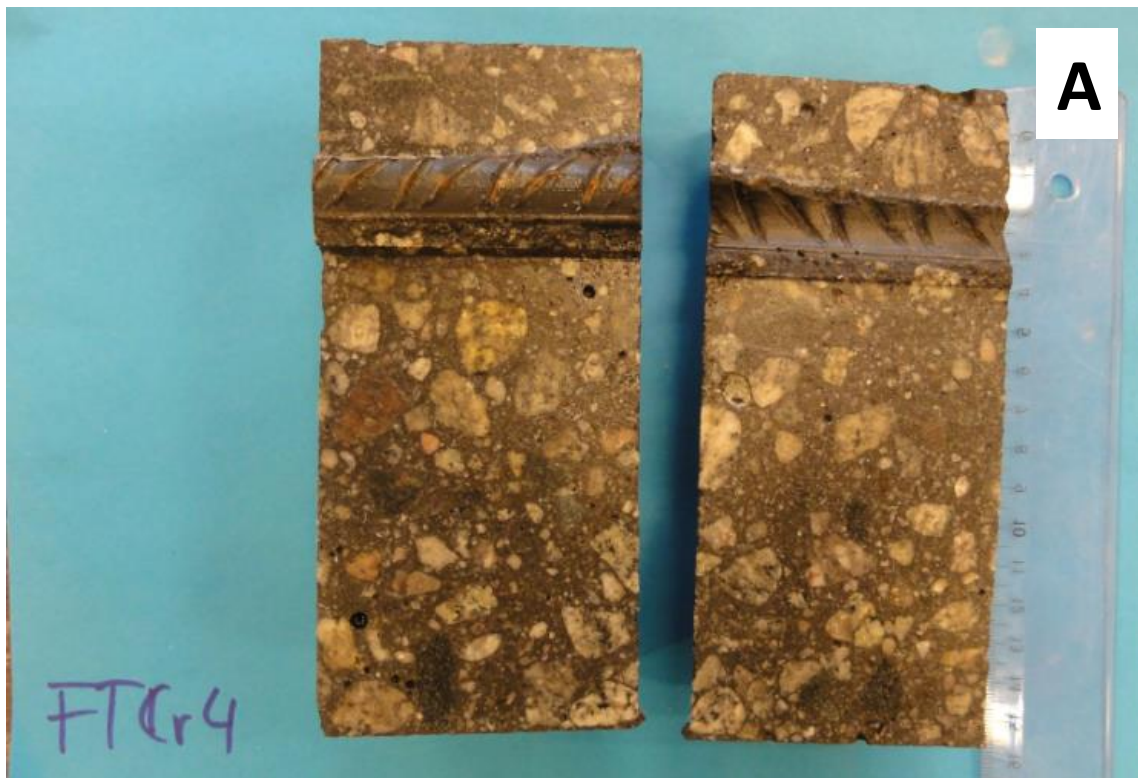
Kjerne ID	Dybde [mm]	Konsentrasjon [% betongvekt]	Konsentrasjon [% sementvekt]
FAR	0-3	0,279	1,674
	3-6	0,194	1,164
	6-10	0,165	0,99
	10-15	0,138	0,828
	15-20	0,07	0,42
	20-30	0,033	0,198
	30-40	<0,005	<0,03
	40-50	<0,005	<0,03
FTR	0-3	0,495	2,97
	3-6	0,362	2,172
	6-10	0,302	1,812
	10-15	0,228	1,368
	15-20	0,175	1,05
	20-30	0,053	0,318
	30-40	0,02	0,12
	40-50	<0,005	<0,03
FSR	0-3	0,676	4,056
	3-6	0,527	3,162
	6-10	0,474	2,844
	10-15	0,45	2,7
	15-20	0,39	2,34
	20-30	0,333	1,998
	30-40	0,212	1,272
	40-50	0,083	0,498

## Vedlegg K – Inspeksjon av armering

Splitting av kjerner er utført av Sintef. Bildene i dette vedlegget er tatt av Tobias A. Danner.



*Figur K.1: Splittelse av kjerner med armering*





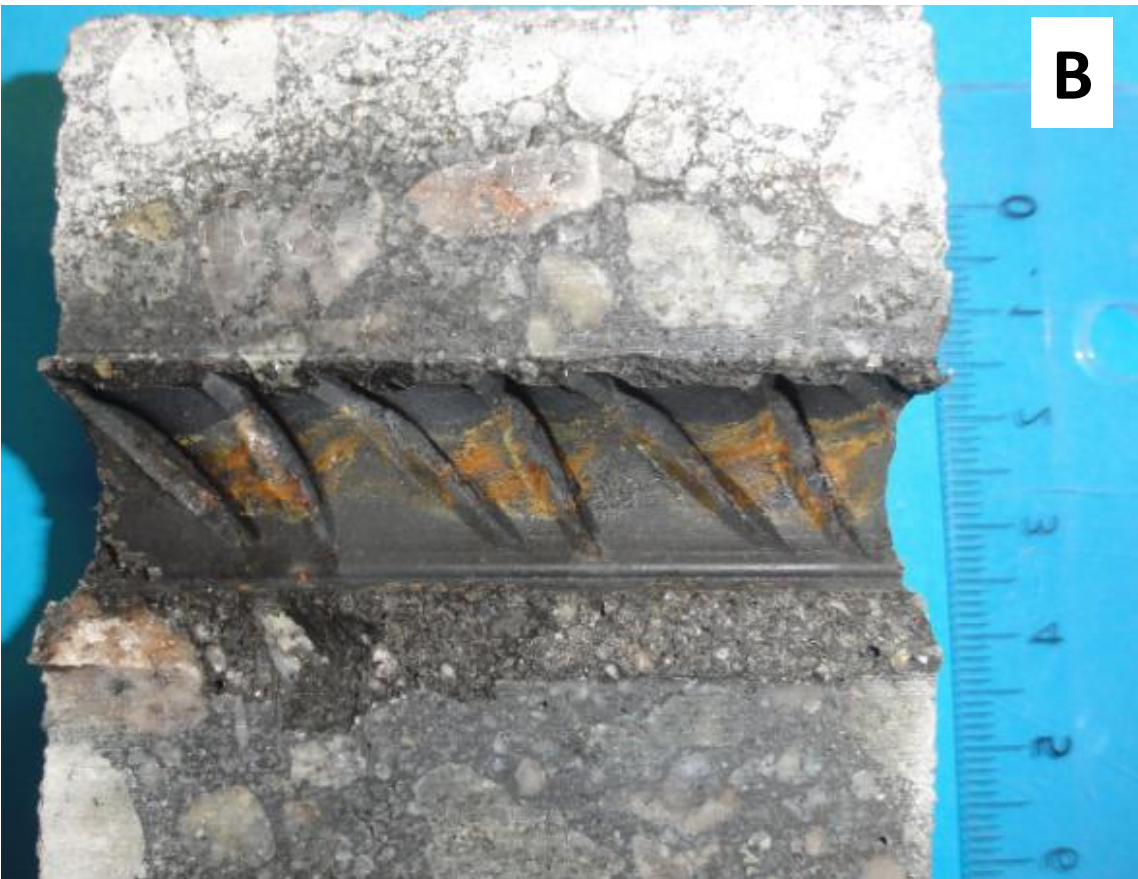
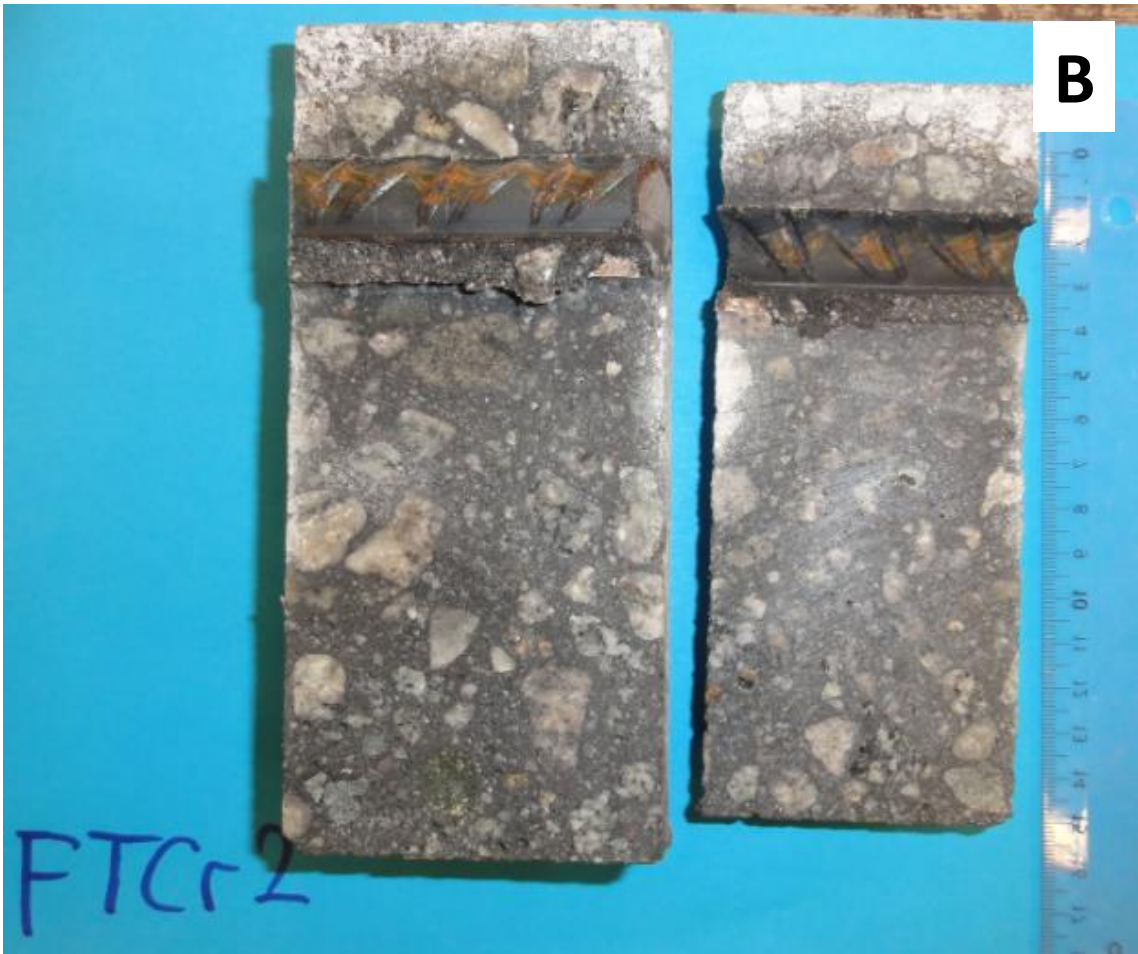






*Figur K.2: Alle bilder markert med A oppe i høyre hjørne er fra kjerne FTCr4.*











*Figur K.3: Alle bilder markert med B oppe i høyre hjørne er fra kjerne FTCr2.*









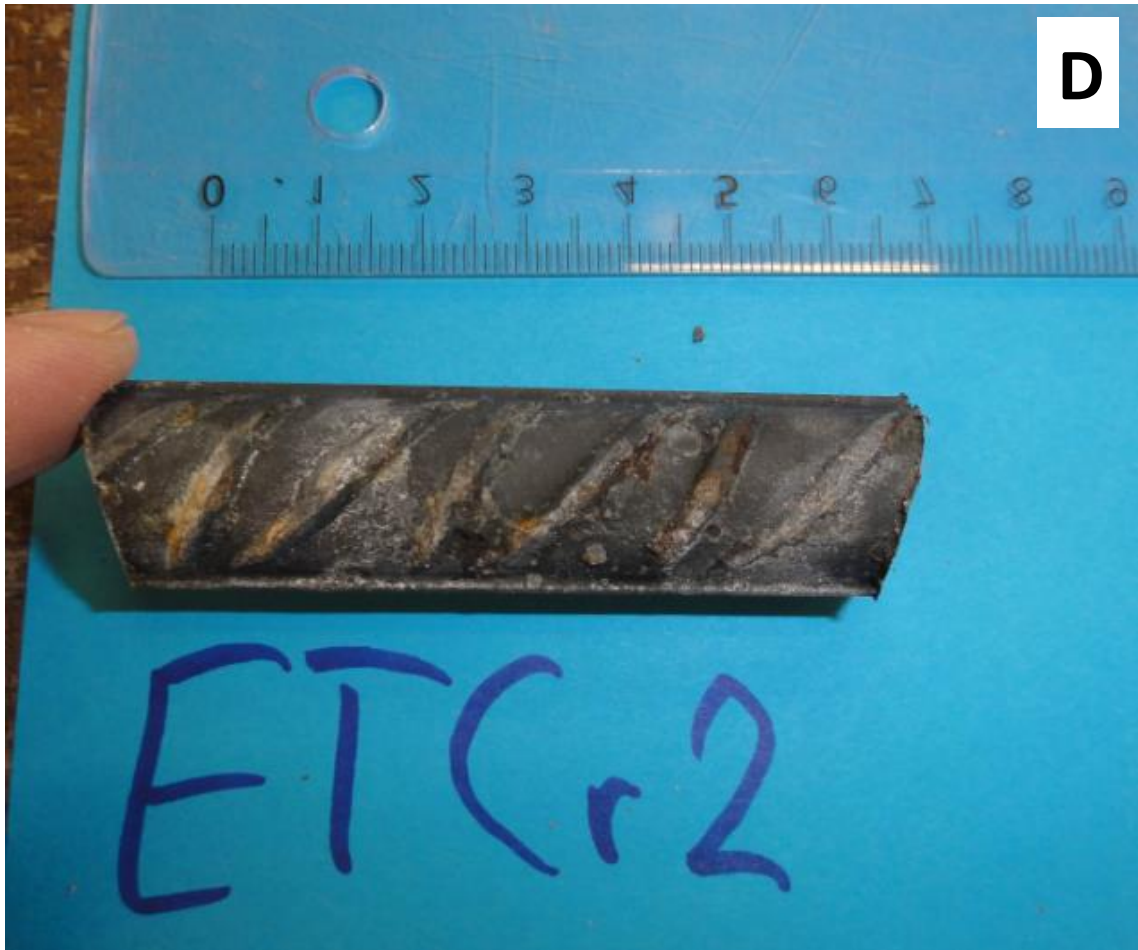


*Figur K.4: Alle bilder markert med C oppe i høyre hjørne er fra kjerne BTCr4.*









*Figur K.5: Alle bilder markert med D oppe i høyre hjørne er fra kjerne ETCr2.*







E



E





*Figur K.6: Alle bilder markert med E oppe i høyre hjørne er fra kjerne ETCr4.*



## Vedlegg L - Inspeksjon av rengjort armering



*Figur L.1: Rengjort armering fra kjerne BTCr4*



*Figur L.2: Rengjort armering fra kjerne BTCr2*



*Figur L.3: Rengjort armering fra kjerne ETCr4*



*Figur L.4: Rengjort armering fra kjerne ETCr2*



*Figur L.5: Rengjort armering fra kjerne FTCr4*



*Figur L.6: Rengjort armering fra kjerne FTCr2*

