

Pål Andreas Ødegård Hanssen

# Undersøkelser av ledende anodemaling ved katodisk beskyttelse av armert betong anvendt på bruer og prøvefelt

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Mette Rica Geiker

Juni 2019



Pål Andreas Ødegård Hanssen

# Undersøkelser av ledende anodemaling ved katodisk beskyttelse av armert betong anvendt på bruer og prøvefelt

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk  
Veileder: Mette Rica Geiker  
Juni 2019

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for konstruksjonsteknikk



# SAMMENDRAG

Katodisk beskyttelse brukes til å bekjempe armeringskorrosjon i betong, hovedsakelig forårsaket av kloridinntrengning. Kort fortalt stanses korrosjonen ved å gjøre armering til en enhetlig katode ved å montere en ekstern anode på/i betongen og påtrykke en likespenning mellom elektrodene. I denne oppgaven er det arbeidet med ledende anodemaling med strømfordelingsbånd som primæranode. I Oppgaven vurderes følgende:

- I hvilken grad evner anodesystemet å beskytte konstruksjoner med høy armeringstetthet og pågående armeringskorrosjon i varierende omfang. For å svare på dette ble et prøvefelt i et tett armert tilfluktsrom etablert.
- Hvordan har det gått med kystbruene som har vært beskyttet med disse anodesystemene over 20 – 30 år? Tre bru er beskyttet med ledende maling ble inspisert, hvorav grundigere undersøkelser ble utført på Verjeskiftet bru.

Utgangspunktet under hele oppgaven har vært å identifisere kritiske faktorer og områder med forbedringspotensial. Hva kan man lære i forhold til fremtidig bruk?

Det ble funnet at anodesystemet er i stand til å polarisere høy tetthet av armering med korrosjon i varierende omfang. Samtidig ble flere områder med forbedringspotensial identifisert. Mest overraskende var hvordan et ekstra strøk anodemaling over strømfordelingsbåndene resulterte i et kraftig forbedret anodesystem både i forhold til strømfordeling i anoden og økt beskyttelsesstrøm utfra samme spenning på 2V. Erfaringen bør nyttiggjøres ved fremtidig bruk av anodesystemet.

Under forsøket ble en kritisk faktor ved anodesystemet erfart. En ståltråd forbant anode og armering, denne resulterte ikke i en kortslutning, men ga høy lekkasjestrøm i prøvefeltet før den ble oppdaget. Slike «strømsluk» er vanskelige å oppdage da KB-anlegget tilsynelatende «fungerer greit» i tiden før ståltråden ble fjernet. Anbefalinger vedrørende feilsøk er gitt.

I prøvefeltet ble det utført en dyp reparasjon med flere lag med korrodert, og tett armering. Selv om mørtelen hadde god ledningsevne, var det vanskeligere å polarisere armeringslag nr. 2 enn det øvrige felt. Det anbefales å ha fokus på effekt av KB på armering under reparasjoner.

Hovedutfordringen med bruene viste seg å være ustabilitet i styresystem og manglende oppfølging. Dette gjør det vanskelig å vurdere langtidsfunksjonaliteten. Det er ikke mulig å si noe konkret om hvor mye akkumulert strøm anoden tåler over en periode på 19 år. Med utgangspunktet man har er det ingen indikasjoner på verken anodeforbruk (grafittoksidasjon) eller forsuring av grensesjiktet anode/betong på den undersøkte brua.

På Verjeskiftet bru, ble det ikke funnet betongskader til tross for ustabil drift av KB-anlegget. Dette har trolig sammenheng med en omfattende mekanisk reparasjon på 90-tallet. Videre har polarisering over lengre tid trolig gitt et bedre miljø rundt armeringen. Anodesystemets mekaniske egenskaper er ikke forringet, heft mellom anode/maling/betong og internmotstand i anoden er den samme etter 19 år. Dette illustrerer at varig god heft forutsetter grundig forbehandling og påføring av god overflatebehandling av anoden. Lokale avflassing er utfordringen over lengre tid, også på Verjeskiftet bru. Ved generell slitasje, må gjenbehandling vurderes.

For å øke funksjonaliteten av fremtidige KB-anlegg med ledende maling anbefales reduksjon av mulige ledd i kretsmotstanden. Her kan nevnes grundig forbehandling, anodetykkelse over strømfordelingsbånd og fjerning av eventuelle slemmemasser. Tettheten av strømfordelingsbånd tilpasses armeringstettheten.

Ledende maling er et reelt alternativ på bruene til Statens Vegvesen. Ved å nyttiggjøre erfaringer i oppgaven, vil dette øke langtidsbestandigheten og -funksjonaliteten av systemet med ledende anodemaling.

## ABSTRACT

Cathodic protection (CP) is used to prevent corrosion of reinforcement in concrete, mainly caused by chloride contamination. The corrosion is prevented by making the reinforcement function as a unified cathode by mounting an external anode on/in the concrete and applying a direct voltage between the electrodes. In the present thesis work has been performed with conductive anode paint with power distribution ribbons (PDR) as the primary anode. In the thesis the following items have been evaluated:

- The extent to which the anode system is able to protect constructions with high reinforcement density and different degrees of ongoing corrosion. In order to find an answer to this an experimental field was established in a shelter with high reinforcement density.
- What is the experience with the coastal/marine bridges that have been protected with conductive paint over 20-30 years? Three bridges protected by conductive paint were inspected, whereby more detailed experiments were conducted on Verjeskiftet bridge.

The basis for the thesis has been to identify critical factors and the potential for possible improvements. What lessons may be learned for future use?

It was established that the anode system is able to polarize high density reinforcement with varying degrees of corrosion attack. At the same time a number of areas showing potential for improvement were identified. It was surprisingly found that an extra layer of anode paint over the PDR resulted in a significantly improved function of the anode system, both with regard to the current distribution in the anode and increased protection current based on the same voltage of 2V. This experience could advantageously be used in future anode systems.

During the experiment a critical factor of the anode system was identified. A steel wire connected anode and reinforcement, this did not result in a short circuit, however it produced a considerable leak current in the experimental field before the problem was located. Such currents are difficult to find since the CP system seems to function as expected during the time before the steel wire was located and removed. Recommendations for troubleshooting are provided.

In the experimental field a deep repair comprising multiple layers of corroded and high density reinforcement was performed. Even if the mortar displayed high conductivity, it was more difficult to polarize the second layer of reinforcement compared to the rest of the field. The recommendation is to focus on the effect of CP of the reinforcement during repairs.

The main challenge in relation to the bridges was demonstrated to be the instability of the control system and lack of follow up procedures. This makes assessment of the long-term functionality difficult. It is impossible to predict the amount of accumulated current the anode can withstand over a period of 19 years. Based on our observations there are no indications of either anode consumption (oxidation of graphite) or acidification of the junction anode/concrete on the inspected bridge.

On Verjeskiftet bridge no concrete damage was detected in spite of instable operation of the CP system. This is likely due to a comprehensive mechanical repair performed in the nineties. Also prolonged polarization has probably provided an improved environment around the reinforcement. The mechanical properties of the anode system are not degraded, adhesion between anode/paint/concrete and internal resistance remain the same after 19 years. This illustrates that a prerequisite for sustainable adhesion is a thorough pre-treatment and relevant surface treatment of the anode. Local paint peelings are the challenge over time, also on Verjeskiftet bridge. Retreatment must be considered when the bridge shows general wear.

In order to improve the functionality of future CP systems with conductive paint a reduction of possible elements in the total resistance of the circuit is recommended. In this connection thorough pre-treatment, anode thickness over PDR, removal of possible cementitious paint, may be emphasized. The density of PDR is to be adjusted according to the reinforcement density.

Conductive paint is a valid option for the coastal/marine bridges. By applying the experiences in the thesis, the long-term sustainability and -functionality of the system with conductive anode paint may be improved.

## FORORD

Denne oppgaven markerer slutten på fem år med studier, hvorav to ved NTNU i Trondheim. Allerede ved oppstart av studiene ved NTNU var den videre kursen staket ut. Det var betongteknologi, det var betongrehabilitering og det var katodisk beskyttelse (KB). Og nå til takkerunden, den er ikke så rent liten.

Først vil jeg få takke Statens Vegvesen Region Midt, Bru- og ferjekaiseksjonen i Trondheim for at jeg fikk skrive oppgave hos dem. Takket være dem ble det mulig å inspisere Verjeskiftbrua på Smøla. En spesiell takk til min veileder ved avdelingen, Peter Skjerstad som rekvirerte brulift og var med på inspeksjonen.

Under arbeidet med oppgaven fikk jeg mulighet til å etablere et prøvefelt med KB ved bruk av ledende maling. Dette ville ikke vært gjennomførbart på egenhånd og i den anledning er det flere som fortjener en stor takk:

Først vil jeg få takke entreprenøren, Consolvo AS ved Kjell Lagsrud og arbeidslaget hans for tillatelse til å etablere prøvefeltet midt i et pågående rehabiliteringsprosjekt. Ikke minst bisto de med uvurderlig hjelp ved etableringen av feltet og stilte til rådighet både nødvendig utstyr og materialer. Takk for hjelpen og for den positive innstillingen. I prøvefeltet var det betongskader som ble utbedret på vanlig måte ved mørtling. I denne forbindelse gikk det med totalt 850 kg mørtel. En takk rettes til de tre materialleverandørene.

En stor takk rettes også til leverandøren av anodesystemet, Protector AS ved Jan Eri og Filip Johansen. Både i forkant av og under forsøket mottok jeg uvurderlig hjelp og gode råd, omtrent til alle døgnets tider. Takk for haugevis med referanseelektroder og ikke minst for utlån av et komplett styresystem. Det er dessuten utrolig hva Protector klarte å finne frem til meg av gammel dokumentasjon fra kystbruene med ledende anodemaling.

Jeg vil også få takke Knut Einar Riise ved Corroteam AS for tilsendt bakgrunnsmateriale fra bruene som i oppgaven er besøkt, og ikke minst for telefonkontakt langt utenfor normal arbeidstid under besøk på bruene.

Tre veiledere er mer enn man kan forvente: Mette Rica Geiker (NTNU), Karla Hornbostel (Statens Vegvesen) og Peter Skjerstad (Statens Vegvesen) fortjener alle en stor takk for sitt engasjement og for god hjelp og støtte gjennom dette semesteret. Tilbakemeldingene de kom med har vært mange, og uten tvil nyttige.

En stor takk til min mor som fikk den mindre heldige oppgaven med å lese korrektur. Tilslutt gjenstår min far, Olav Ødegård, som må sies å være over gjennomsnittet interessert i KB. Takk for all hjelp og støtte gjennom arbeidet med oppgaven. Det gjelder både arbeidet med å finne et egnet prøvefelt, etableringen av prøvefeltet og x antall timer nattarbeid. Det har vært mange gode og svært lærerike diskusjoner, også i forbindelse med de tre bruene jeg var så heldig å få besøke. Jeg er svært takknemlig for ditt brennende engasjement.

## Innhold

SAMMENDRAG .....	I
ABSTRACT .....	II
FORORD .....	III
FIGURER.....	VII
TABELLER .....	X
1 INNLEDNING .....	1
2 FORMÅL OG FREMGANGSMÅTE .....	4
2.1 Fremgangsmåte.....	4
3 BAKGRUNN .....	6
3.1 Teoretisk.....	6
3.2 Armeringskorrosjon.....	6
3.3 Katodisk beskyttelse av armerte betongkonstruksjoner.....	8
3.4 De elektrokjemiske reaksjonene ved katodisk beskyttelse.....	8
3.5 Beskyttelsesstrøm og strømfordeling ved katodisk beskyttelse .....	10
3.6 Beskyttelseskriteriene etter NS-EN 12696 .....	12
3.7 Ledende maling .....	13
3.7.1 Mulige anodereaksjoner ved karbonbaserte anodesystemer .....	14
3.7.2 AHEAD-anoden .....	15
3.7.3 ZEBRA-anoden .....	16
3.8 Anodesystemet anvendt på bruer i region Midt.....	17
3.9 Nerlandsøy .....	18
3.10 Verjeskiftbrua .....	18
3.10.1 Rehabiliteringen av Verjeskiftet Bru .....	20
3.11 Tilfluktsrom i garasjeanlegg i Oslo, prøvefelt med KB.....	21
4 EKSPERIMENTELT .....	23
4.1 Bruundersøkelser .....	23
4.2 Prøvefelt i garasje i Oslo .....	24
4.2.1 Utbedring av skader .....	25
4.2.2 Påføring av anodemaling og PDR-bånd.....	27
4.2.3 Installasjon av det katodiske anlegget .....	28
4.2.4 Instrumentering for måling av motstand i anode .....	31
4.2.5 Instrumentering for måling av strømgjennomgang i anodemaling .....	32
4.2.6 Strømfordeling i prøvefeltet.....	33
4.2.7 Styling av det katodiske anlegget .....	34
4.3 Måling av armeringsoverdekning og plassering.....	34



4.4	Kloridprøver.....	35
4.4.1	Kloridprøver i tilfluktsrom .....	36
4.4.2	Kloridprøver på bruinspeksjonen .....	36
4.5	Potensialmålinger.....	36
4.6	Motstandsmålinger i betong .....	37
4.7	Spenningsfall i ledende anodemaling.....	38
4.8	Prøving av heftfasthet .....	39
4.9	Motstand i anodemaling på Verjeskiftbrua.....	40
4.10	Måling av betongens relative luftfuktighet.....	40
4.11	Tørrfilmtykkelse av beskyttende overflatebehandling .....	41
5	RESULTATER .....	42
5.1	Plassering av prøvefelt .....	42
5.2	Oppstart av prøvefelt .....	43
5.2	Spenningsfall i anode med et lag ZEBRA over PDR-bånd .....	44
5.2.1	Spenningsfall i anode etter overmaling av PDR .....	47
5.3	Depolarisering på armering gjennom forsøket .....	49
5.4	Potensialmålinger med håndholdt referanseelektrode i prøvefeltet .....	54
5.4.1	Potensialmålinger i nedre plan under prøvefelt i underkant dekke .....	55
5.5	Strøm og strømfordeling i prøvefeltet .....	55
5.6	Motstand i anodemaling ved oppstart og avslutning av prøvefeltet .....	58
5.7	Motstand i betong og mørtel ved avslutning av forsøket.....	59
5.8	Relativ luftfuktighet målt i borehull i prøvefeltet .....	59
5.9	Heftprøver i tilfluktsrom.....	60
5.9	Brubefaring i forkant av inspeksjon med lift .....	60
5.9.1	Brubefaring på Nerlandsøy.....	61
5.9.2	Brubefaring på Remøy.....	63
5.9.3	Brubefaring på Verjeskiftbrua .....	65
5.10	Bruinspeksjon med brulift på Verjeskiftbrua .....	69
5.10.1	Driftsdata fra Verjeskiftbrua.....	69
5.10.2	Visuell inspeksjon og hammerbanking.....	71
5.10.3	Spenningsfall i anoden på Verjeskiftbrua.....	74
5.10.4	Pin-motstand i anoden på Verjeskiftbrua .....	75
5.10.5	Overdekning og kloridprøver, Verjeskiftbrua.....	76
5.10.6	Heftprøver på Verjeskiftbrua .....	76
5.10.7	Tørrfilmtykkelse av overflatebehandling .....	79
6	DISKUSJON.....	80

6.1 Karakterisering av prøvelfeltet.....	80
6.2 Design .....	81
6.3 Funksjonalitet .....	85
6.4 Utførelse.....	92
6.5 Drift.....	92
6.6 Bestandighet.....	93
6.7 Gjenbehandling .....	96
7 KONKLUSJON .....	97
Videre arbeid .....	99
8 REFERANSER .....	100
VEDLEGG.....	105

## FIGURER

FIGUR 1 ANODESYSTEM BENYTTET PÅ BRUER (NORSK FORENING FOR BETONGREHABILITERING- FKBB 2016) ...	1
FIGUR 2 ANODESYSTEM BENYTTET I NORGE PER 2016 (NORSK FORENING FOR BETONGREHABILITERING- FKBB 2016). .....	2
FIGUR 3 POURBAIX-DIAGRAM FOR JERN I VANDIG LØSNING VED 25 GRADER (CHRISTODOULOU, WEBB ET AL. 2011). .....	6
FIGUR 4 PRINSIPPSKISSE AV KATODISK BESKYTTELSE VED PÅTRYKT STRØM (EMMONS 1993) .....	8
FIGUR 5 ENDRING AV ANODISKE POLARISERINGSKURVER VED ØKT KLORIDINNHOLD (BERTOLINI, BOLZONI ET AL. 1998).....	12
FIGUR 6 PEDEFERRI-DIAGRAMMET VISER HVORDAN DE ULIKE SONENE ENDRER SEG VED ØKT KLORIDINNHOLD (BERTOLINI, BOLZONI ET AL. 1998) .....	12
FIGUR 7. PRINSIPIELL SKISSE SOM VISER DEPOLARISERINGSFORLØPET ETTER AT LIKESTRØMMEN/ LIKESPENNINGEN ER BRUTT (VENNESLAND 2009).....	13
FIGUR 8 PRINSIPIELL FORSKJELL I LEDNINGSEVNE MELLOM DATIDENS ANODEMALING OG AHEAD-ANODEN (ØDEGÅRD 1992) .....	15
FIGUR 9 VERJESKIFTBRUA SETT FRA HOPEN-SIDEN MOT VEIHOLMEN .....	19
FIGUR 10 ARMERING I MIDTSNITT AV DRAGER PÅ VERJESKIFTBRUA, FELT 2,3,6 OG 7. ....	19
FIGUR 11 Plassering av strømfordelingsbånd på verjeskiftbrua .....	21
FIGUR 12 PRØVEFELTET OG DET ETABLERTE AKSESYSTEMET. 50 CM GRID. ....	25
FIGUR 13 FORBEHANDLING. SLIPING AV BETONGOVERFLATEN.....	25
FIGUR 14 DIAMANTSLIPING AV BITUMENRESTER MED VINKELSLIPER.....	25
FIGUR 15 AVGRENSNING AV SKADER VED Å SLISSE FØR MEISLING .....	26
FIGUR 16 HÅNDMEISLING AV STØRRE SKADE I FELT 1 .....	26
FIGUR 18 KONTROLL AV ARMERINGSKONTINUITET MED "CM-2 REBAR CONTINUITY TESTER". POTENSIALET MELLOM PUNKTENE HAR FALT UMIDDELBART TIL 0V ETTER PÅTRYKT STRØMPULS, MOTSTANDEN ER 0 Ω. ARMERINGEN ER I KONTINUITET. ....	26
FIGUR 17 ETABLERING AV ARMERINGSKONTINUITET I FELT 1 VED SVEISING.....	26
FIGUR 19 MEISLET OG FORVANNET REPARASJON I FELT 1.....	27
FIGUR 20 MØRTLET OG FILSET REPARASJON I FELT 1.....	27
FIGUR 21 PÅFØRING AV ANODEMALING I STRIPER DER PDR-BÅND SENERE SKAL LIMES.....	28
FIGUR 22 MONTERING AV DOBBELTSIDIG TAPE FOR FESTE AV PDR-BÅND TIL PÅFØRT ANODESTRIBE .....	28
FIGUR 23 ENHETLIG PÅFØRING AV ANODE ETTER MONTERING AV PDR-BÅND .....	28
FIGUR 24 REFERANSEELEKTRODE AV SØLV/SØLVKLORID FESTET TIL BETONGOVERFLATE UTEN ANODE .....	29
FIGUR 25 KABLING AV REFERANSEELEKTRODER.....	29
FIGUR 26 LEDNINGER FRA REFERANSEELEKTRODENE SPLITTET OG MONTERT I NODEBOKSER I STYRESKAPET. ....	29
FIGUR 27 ETABLERING AV ARMERINGSKONTAKT .....	29
FIGUR 28 STYRESKAP MED REKKEKLEMMER FOR ANODEKABEL (RØD) OG ARMERINGSKONTAKT (SORT) .....	29
FIGUR 29 MONTERINGSSKINNE VED ANODETILFØRSEL 2 FOR TILKOBLING AV PDR-BÅND OG ENKEL MÅLING AV STRØM.....	30
FIGUR 30 PRØVEFELTET MED Plassering av PDR-BÅND, REFERANSEELEKTRODER, KABLING OG REPARASJONER .....	30
FIGUR 31 FOTO AV PRØVEFELT OG REPARASJONSMØRTLENE.....	31
FIGUR 32 PRINSIPP FOR MÅLING AV PIN-MOTSTAND (I ANODEMALING) .....	31
FIGUR 33 INSTRUMENTERING FOR MÅLING AV KVADRATMOTSTAND I ANODEN.....	32
FIGUR 34 MÅLING AV KVADRATMOTSTAND I ANODEN .....	32
FIGUR 35 INSTRUMENTERING AV STRØMPUTE FOR MÅLING AV STRØMGJENNOMGANG I ANODEN.....	33
FIGUR 36 MÅLING AV STRØMGJENNOMGANG I ANODEN. PRØVEPUTEN ER TILKOBLET +, ARMERINGEN - UTGANGEN PÅ EN LAB-LIKERETTER. ....	33
FIGUR 37 MÅLING AV STRØMGJENNOMGANG I PDR-BÅND MED MULTIMETER.....	34
FIGUR 38 MÅLING AV LOKAL STRØMGJENNOMGANG. ISOLERING AV ANODE VED SLISSING MED VINKELSLIPER MED TYKT BLAD.....	34
FIGUR 39 ISOLERING AV REPARASJON A I FELT 1 FOR MÅLING AV STRØMGJENNOMGANG.....	34

FIGUR 40 «HILTI FS 10» PLASSERT PÅ RUTENETT FOR SKANNING AV OVERFLATEN (ARMERINGSOVERDEKNING OG PLASSERING).....	35
FIGUR 41 MÅLING AV ARMERINGSOVERDEKNING OG -PLASSERING VED BRUK AV "PROFOMETER 3".....	35
FIGUR 42 EKVIPOTENSIALLINJER UT FRA LOKALE ANDER PÅ ARMERING (ELSENER, OUML ET AL. 1990).....	37
FIGUR 43 PRINSIPPET FOR BRUK AV 4-PUNKTSELEKTRODE (WENNER) FOR Å ESTIMERE MOTSTANDEN I BETONG (POLDER 2001). ....	38
FIGUR 44 MÅLING AV BETONGENS OVERFLATEMOTSTAND VED BRUK AV "RESIPOD PROCEQ" (WENNER).....	38
FIGUR 45 SPENNINGSFALL I ANODE UT FRA PDR-BÅND MÅLT MED MULTIMETER I ETABLERT RUTENETT.....	39
FIGUR 46 FESTE AV Ø 60 MM HEFTKOPPER TIL ANODEN VED BRUK AV TO-KOMPONENT EPOKSY. ....	40
FIGUR 47 MONTERING AV AVTREKKSUTSTYR FOR TESTING AV HEFTFASTHETEN TIL ANODEN.....	40
FIGUR 48 KLORIDPROFILENE I DEKKET OVER TILFLUKTSROMMET .....	43
FIGUR 49 MÅLING AV SPENNINGSFALL I ANODEN I ETABLERT AKSESYSTEM.....	45
FIGUR 50 MÅLT SPENNINGSFALL I ANODE I FELT 1 MED PDR BÅND 1 TILKOBLET I "MAT. FELT 1" .....	45
FIGUR 51 MÅLT SPENNINGSFALL I ANODE I FELT 2 MED PDR-BÅND 1 TILKOBLET I "G1" .....	46
FIGUR 52 MÅLT SPENNINGSFALL I ANODE I FELT 1 MED ALLE PDR-BÅND TILKOBLET. ....	46
FIGUR 53 MÅLT SPENNINGSFALL I ANODE I FELT 2 MED ALLE PDR-BÅND TILKOBLET. ....	47
FIGUR 54 MÅLT SPENNINGSFALL I ANODE I FELT 1 ETTER OVERMALING AV PDR-BÅND. PDR NR. 1 OG 7 TILKOBLET.....	47
FIGUR 55 MÅLT SPENNINGSFALL I ANODE I FELT 1 ETTER OVERMALING AV PDR. AVSTAND PDR-BÅND CIRKA 1,4 METER. ....	48
FIGUR 56 MÅLT SPENNINGSFALL I ANODE I FELT 2 ETTER OVERMALING AV PDR-BÅND. AVSTAND PDR-BÅND CIRKA 1,4 METER. ....	48
FIGUR 57 MÅLT SPENNINGSFALL I ANODE I FELT 1 ETTER OVERMALING AV PDR-BÅND. ALLE BÅND TILKOBLET. ....	49
FIGUR 58 MÅLT SPENNINGSFALL I ANODE I FELT 2 ETTER OVERMALING AV PDR-BÅND. ALLE BÅND TILKOBLET. ....	49
FIGUR 59 TOTAL DEPOLARISERING PÅ REFERANSEELEKTRODENE ETTER FØRSTE DEPOLARISERING, MED 2V PÅTRYKT SPENNING I TO DØGN. ....	50
FIGUR 60 RESULTATET VED SISTE DEPOLARISERING (8 TIMER) 31.MARS 19. ALLE PDR-BÅND TILKOBLET MED 4 V DRIFTSSPENNING.....	51
FIGUR 61 TOTAL DEPOLARISERING PÅ REFERANSEELEKTRODENE 25.MARS 19 FØR OVERMALING AV PDR-BÅND. ALLE BÅND TILKOBLET MED 2 V DRIFTSSPENNING. ....	51
FIGUR 62 UTVIKLING I TOTAL DEPOLARISERING FOR REFERANSEELEKTRODE NR. 7. ....	52
FIGUR 63 UTVIKLING I TOTAL DEPOLARISERING FOR REFERANSEELEKTRODE NR. 9, PLASSERT I DEN STØRSTE REPARASJONEN I FELT 1. ....	52
FIGUR 64 UTVIKLING I DEPOLARISERING FOR REFERANSEELEKTRODE NR. 15, PLASSERT UTENFOR REPARASJON I FELT 1 VED OMRÅDE MED HØYT KLORIDINNHOLD. ....	53
FIGUR 65 UTVIKLING I DEPOLARISERING FOR REFERANSEELEKTRODE NR. 19, BELIGGENDE I REPARASJON I FELT 2.....	53
FIGUR 66 UTVIKLING I DEPOLARISERING FOR REFERANSEELEKTRODE NR. 22. BELIGGENDE UTENFOR REPARASJON I FELT 2 MED HØYT KLORIDINNHOLD. ....	54
FIGUR 67 LOKALISERT OG FJERNET STÅLGJENSTAND FRA SØYLE VED "J/K 1", GJENNOM ANODEN OG NED TIL OVERKANTARMERING. ....	56
FIGUR 68 MÅLING AV LOKAL STRØMGJENNOMGANG VED BRUK AV "ELIMINERINGSMETODEN. RØD STREKER VISER HVOR DET ER SLISSET. ....	57
FIGUR 69 STRØMPUTE I FELT 2. TALL I MA .....	58
FIGUR 70 STRØMPUTE I FELT 1. TALL I MA. ....	58
FIGUR 71 HEFTPRØVER PÅ ANODEN I TILFLUKTSROMMET ETTER AVTREKK.....	60
FIGUR 72 SKAPET PÅ NERLANDSØY-SIDEN (AKSE 21). STRØMFORSYNING TIL SONE 1-4 + PRØVEFELT.....	61
FIGUR 73 UNDERKANT AV BRUDRAGER OG BRUDEKKE SETT FRA LANDKAR PÅ NERLANDSØY (AKSE 21). AVFLASSING, SPESIELT OVER EPOKSYFORSEGLING AV SØLVBÅND.....	62
FIGUR 74 BRUDRAGER SETT FRA AKSE 21. MALINGSAVFLASSING OG BETONGAVSKALLING OVER BØYLEARMERING FORÅRSAKET AV PÅGÅENDE ARMERINGSKORROSJON .....	63

FIGUR 75 STYRESKAP PÅ LEINE-SIDEN (MOT FOSNAVÅG). STRØMFORSYNING TIL SONE 5 OG 6 DER DET GÅR HENHOLDSVIS 170 OG 160 MA LIKESTRØM.....	64
FIGUR 76. BRUDRAGER OG BRUDEKKE SETT FRA REMØY-SIDEN. RISS PÅ BRUKASSE, AVFLASSING OG LITEN AVSKALLING. BLOKKERINGER AV JERNBINDERTRÅD MED NOEN NYE RUSTUTSLAG.....	64
FIGUR 77 FRA REMØY-SIDEN. NOE MALINGSAVFLASSING OG NOEN SMÅ AVSKALLINGER PÅ BRUDRAGER. ELLERS FÅ SYNLIGE SKADER.....	65
FIGUR 78 FRA LEINE-SIDEN. INGEN SYNLIGE SKADER. DET ER UTFØRT BLOKKERINGER AV JERNBINDERTRÅD I KONTAKT MED ANODEN.....	65
FIGUR 79 STYRESKAP I AKSE 9 (MOT VEIHOEN). INGEN STRØM UT I FELTENE JF LYSINDIKATOR PÅ CAMUR II FIXVOLT .....	66
FIGUR 80 MANUELL MÅLING AV SPENNING PÅ REKKEKLEMMER MELLOM ANODE (RØD) OG ARMERING (SORT) I SONE 1, 190 MV.....	66
FIGUR 81 MÅLING AV PIN-MOTSTAND PÅ BRUDRAGER VED STYRESKAP AKSE 9. ENKELTMÅLING I FIGUREN HAR VERDI 314,4 $\Omega$ .....	67
FIGUR 82 STYRESKAP I AKSE 1 (MOT HOPEN). AVSLÅTT CAMUR II CONTROLLER.....	67
FIGUR 83 FRA STYRESKAP I AKSE 9 MOT PILAR AKSE 8.....	68
FIGUR 84 FRA STYRESKAP I AKSE 1. VISUELT FREMSTÅR INNVENDIG SIDE AV SPENNET MELLOM AKSE 1 OG 2 SOM SKADEFRI, UTEN AVSKALLINGER ELLER MALINGSAVFLASSING.....	68
FIGUR 85 LO-SIDEN AV BRUDRAGER OG UNDERKANT BRUVINGE VED AKSE 1. AVFLASSING AV MALING OG DELVIS ANODE (I UNDERKANT BRUVINGE).....	69
FIGUR 86 UTFØRT PRØVETAKING PÅ VERJESKIFTBRUA 25.APRIL OG 03.MAI 2019 .....	69
FIGUR 87 DEPOLARISERING VERJESKIFTET, SONE 2, 01.MAI 2019. 2 V PÅTRYKT SPENNING FØR DEPOLARISERINGEN.....	70
FIGUR 88 DEPOLARISERING VERJESKIFTET, SONE 3 OG 4, 01.MAI 2019. 2V PÅTRYKT SPENNING FØR DEPOLARISERINGEN.....	71
FIGUR 89 RISS I MALING OG ANODE + LØS MALING, UNDERKANT DRAGER, LOKALITET 3.....	71
FIGUR 90 LØS EPOKSYFORSEGLING NEDERST PÅ PILAR AKSE 8. AVFLASSING AV FRITT EKSPONERT ANODE.....	72
FIGUR 91 RENT HEFTBRUDD MELLOM EPOKSY OG PRIMER (AHEAD MULTIPRIMER). PILAR AKSE 8, CIRKA 1,8 M OK FUNDAMENT.....	72
FIGUR 92 GENERELL SLITASJE OG AVFLASSING AV MALING VED LOKALITET 1. LOKALT OGSÅ AVFLASSET ANODE .....	73
FIGUR 93 LOKALITET 3 OG 4, UNDER MØTEPlass MIDT PÅ BROEN. VISUELT FREMSTÅR SPENNET INNVENDIG SOM SKADEFRI.....	73
FIGUR 94 MÅLT SPENNINGSFALL I ANODEN PÅ DRAGER, LOKALITET 8, AKSE 1 (VED LANDKAR MOT HOPEN)...	74
FIGUR 95 MÅLT SPENNINGSFALL I ANODEN NEDOVER FRA SØLVBÅND, LOKALITET 8 .....	75
FIGUR 96 MÅLT SPENNINGSFALL I ANODEN I UNDERKANT BRUDEKKE VED AKSE 1 (LANDKAR MOT HOPEN). AVSTAND ZEBRA-PDR-BÅND 1,2 METER.....	75
FIGUR 97 LOKALITET 1 ETTER TREKK AV HEFTPRØVER .....	77
FIGUR 98 LOKALITET 4 ETTER TREKK AV HEFTPRØVER .....	78
FIGUR 99 LOKALITET 5 ETTER TREKK AV HEFTPRØVER .....	78
FIGUR 100 SPENNINGSFALL I FELT 1 FØR OG ETTER OVERMALING AV STRØMFORDELINGSBÅND.....	82
FIGUR 101 SPENNINGSFALL I ANODEN UMIDDELBART UTENFOR STRØMFORDELINGSBÅND NR. 1 FØR OG ETTER OVERMALING.....	83
FIGUR 102 STRØMFORDELING VED ELIMINERINGSMETODEN .....	86
FIGUR 103 RESTSPENNINGEN MELLOM ANODE OG ARMERING ETTER UTFØRT DEPOLARISERING. BEMERK FORSKJELL ETTER 26.MARS.....	88
FIGUR 104 HVORDAN FJERNE OVERFLATEBEHANDLING VED GJENBEHANDLING? .....	96

## TABELLER

TABELL 1 BROENE I REGION MIDT SOM ER KATODISK BESKYTTET MED AHEAD/ZEBRA. ....	18
TABELL 2 DRIFTSDATA OG DEPOLARISERING FRA VERJESKIFTBRUA I APRIL 2005. VERDIER HENTET FRA FDV-DOKUMENTASJON.....	20
TABELL 3 DRIFTSDATA OG DEPOLARISERING PÅ VERJESKIFTBRUA, SEPTEMBER 2010 (RIISE 2011). ....	20
TABELL 4 DRIFTSDATA OG DEPOLARISERING ETTER FORNYING AV ANLEGGET I 2011 .....	21
TABELL 5 BENYTTETE METODER I OPPGAVEN.....	23
TABELL 6 REPARASJONSMØRTLER I PRØVEFELTET .....	27
TABELL 7 POTENSIALMÅLINGER FØR ETABLERING AV PRØVEFELT. ALLE TALL I MV VS. CU/CUSO <sub>4</sub> .....	42
TABELL 8 MOTSTANDSMÅLINGER (WENNER) FØR ETABLERING AV PRØVEFELT. ALLE TALL I KΩ.....	42
TABELL 9 RESULTATER MED SAMMENSTILLING AV FORUNDERSØKELSEN I TILFLUKTSROMMET.....	43
TABELL 10 SPENNING MELLOM ANODE OG ARMERING FØR POLARISERING, MÅLINGENE ER UTFØRT VED REFERANSEELEKTRODENE.....	44
TABELL 11 ARMERINGENS POTENSIAL MÅLT MOT REFERANSEELEKTRODER AV AG/AGCL FØR POLARISERING. ....	44
TABELL 12 ON- POTENSIAL PÅ REFERANSEELEKTRODER ( AG/AGCL) ETTER ET DØGN POLARISERING.....	44
TABELL 13 OHMSK SPENNINGSFALL (IR-FALL) REGISTRERT PÅ REFERANSEELEKTRODENE VED DEPOLARISERING 25.MARS. «REP» STÅR FOR REPARASJON. ....	50
TABELL 14 POTENSIALER MÅLT I BORHULL, L/M-8/9, KJØREBANE, FELT 1 .....	54
TABELL 15 POTENSIALER MÅLT I BORHULL, M3, KJØREBANE, FELT 1 .....	54
TABELL 16 POTENSIALER MÅLT I BORHULL, H/I-8/9, REPARASJON A, FELT 1.....	55
TABELL 17 POTENSIALER MÅLT I BORHULL, B/C-1/2, PARKERINGSPLASS, FELT 2 .....	55
TABELL 18 POTENSIALER MÅLT I UNDERKANT DEKKE, UNDER PRØVEFELTET. UNDER SØYLE VED A1 OG K1 .....	55
TABELL 19 POTENSIALER MÅLT I UNDERKANT DEKKE, UNDER PRØVEFELTET. UNDER SØYLE K10 OG EN REFERANSE UTENFOR PRØVEFELTET. ....	55
TABELL 20 AVLEST SPENNING OG STRØM I PRØVEFELTET GJENNOM FORSØKET.....	56
TABELL 21 STRØMGJENNOMGANG PÅ DE ULIKE STRØMFORDELINGSBÅNDENE I FELT 1 MED HENHOLDSVIS 2 OG 4 V.....	57
TABELL 22 STRØMGJENNOMGANG PÅ DE ULIKE STRØMFORDELINGSBÅNDENE I FELT 2 MED HENHOLDSVIS 2 OG 4 V.....	57
TABELL 23 STRØMFORDELING I FELT 1 VED "ELIMINERINGSMETODEN" .....	57
TABELL 24 STRØMFORDELING I FELT 2 VED "ELIMINERINGSMETODEN" .....	58
TABELL 25 STRØMGJENNOMGANG I ISOLERTE RUTER (10 X 10 CM) ANODE .....	58
TABELL 26 BULKRESISTIVITET PÅ UTBOREDE KJERNER FRA PRØVEFELTET.....	59
TABELL 27 OVERFLATEMOTSTAND MÅLT MED RESIPOD VED AVSLUTNING AV FORSØKET, 31.MARS 2019 .....	59
TABELL 28 RELATIV LUFTFUKTIGHET MÅLT I BOREHULL I PRØVEFELTET. ....	60
TABELL 29 DRIFTSDATA NERLANDSØY, STYRESKAP I AKSE 21. AVLEST 01.APRIL 2019, ETTER AT ANLEGGET BLE PÅSLÅTT.....	61
TABELL 30 DRIFTSDATA NERLANDSØY, STYRESKAP I AKSE 21. AVLEST 02.APRIL 2019, ETTER AT ANLEGGET HAR VÆRT PÅSLÅTT I 12 TIMER. ....	61
TABELL 31 DRIFTSDATA STYRESKAP PÅ REMØY-SIDEN. AVLEST 02.APRIL 2019 .....	63
TABELL 32 DRIFTSDATA STYRESKAP PÅ LEINE-SIDEN. AVLEST 02.APRIL 2019 .....	63
TABELL 33 MÅLT SPENNING STYRESKAP AKSE 9 (VEIHOLMEN) FØR OG ETTER AT KONTROLLER-ENHETEN I AKSE 1 BLE PÅSKRUDD. ....	66
TABELL 34 MÅLT SPENNING I STYRESKAP AKSE 1 (MOT HOPEN) ETTER AT KONTROLLER-ENHET BLE PÅSKRUDD. ....	68
TABELL 35 DRIFTSDATA FRA VERJESKIFTBRUA, AVLEST 25.04.2019.....	70
TABELL 36 DRIFTSDATA FRA VERJESKIFTBRUA, AVLEST 03.05.2019.....	70
TABELL 37 OPPSUMMERING AV VISUELL KONTROLL OG BOM-KONTROLL PÅ VERJESKIFTBRUA. ....	74
TABELL 38 MÅLT PIN-MOTSTAND I ANODEN PÅ LOKALITETENE PÅ VERJESKIFTBRUA. ....	76
TABELL 39 KLORIDPROFILER PÅ BRUDRAGER I LOKALITET 3 OG 4. «OD» STÅR FOR ARMERINGSOVERDEKNING	76
TABELL 40 KLORIDPROFIL I UNDERKANT BRUDEKKE, LOKALITET 9. «OD» STÅR FOR ARMERINGSOVERDEKNING .....	76

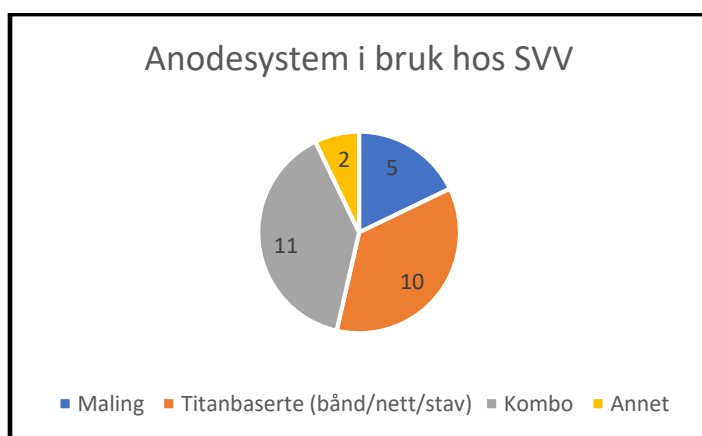
TABELL 41 HEFTPRØVER LOKALITET 1, BRUDRAGER. ....	76
TABELL 42 HEFTPRØVER LOKALITET 2, BRUDRAGER. ....	77
TABELL 43 HEFTPRØVER LOKALITET 3, BRUDRAGER. ....	77
TABELL 44 HEFTPRØVER LOKALITET 4, BRUDRAGER. ....	77
TABELL 45 HEFTPRØVER LOKALITET 5, BRUDRAGER. ....	78
TABELL 46 HEFTPRØVER LOKALITET 6, BRUDRAGER. ....	78
TABELL 47 HEFTPRØVER LOKALITET 7, PILAR MED LØS EPOKSYFORSEGLING. ....	78
TABELL 48 TØRRFILMTYKKELSE MALING, VERJESKIFTBRUA .....	79
TABELL 49 STRØMGJENNOMGANG I ULIKE OMRÅDER AV PRØVEFELTET. ELIMINERINGSMETODEN OG STRØMPUTE. ....	87

# 1 INNLEDNING

På slutten av 80-tallet ble det oppdaget at en rekke armerte betongkonstruksjoner, deriblant bruer, hadde omfattende skader. Et fellestrekk var at en stor del av konstruksjonene var fra 60 – 70-tallet, en tid da byggeaktiviteten var stor, mens inndeling av armerte betongkonstruksjoner i eksponerings- og tilhørende bestandighetsklasser enda ikke var blitt en realitet. Ved tilstandsanalyser fant man at den primære skadeårsaken på brukonstruksjonene var armeringskorrosjon som var initiert av kloridinntrengning (Grefstad 2005).

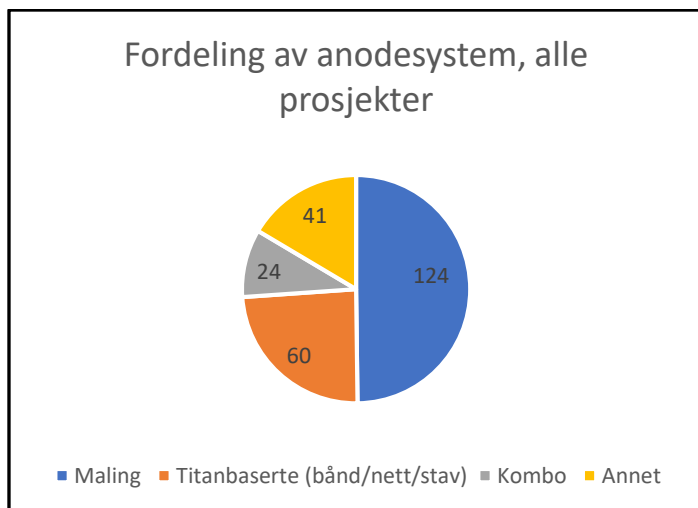
Ettersom armeringskorrosjonen hovedsakelig skyldtes klorider ville en tradisjonell mekanisk reparasjon være uegnet da dette i prinsipp ville innebære at all kloridinfisert betong måtte fjernes og erstattes, også områder uten synlige skader (Das, Pouya et al. 2011). Et slikt alternativ ville være ensbetydende med et enormt meislingsomfang og omfattende sikring av konstruksjonen under rehabilitering. Ikke minst ville en tradisjonell mekanisk reparasjon innebære store usikkerheter knyttet til i hvilken grad all kloridinfisert betong ble fjernet. Katodisk beskyttelse ble sett på som det foretrukne alternativ, samtidig manglet man her til lands erfaring med metoden. Det ble igangsatt prøveprosjekter der ulike anodesystem ble testet ut (Grefstad 2005). Katodisk beskyttelse av armerte betongkonstruksjoner er i dag en anerkjent metode, både i offentlig og privat sammenheng, det er bred enighet om at riktig dimensjonert og utført katodisk beskyttelse effektivt reduserer korrosjonshastigheten til et ubetydelig nivå (Bertolini, Bolzoni et al. 1998, Byrne, Norton et al. 2016)

Statens Vegvesen region Midt har fire bruer som ble katodisk beskyttet ved bruk av ledende maling på 90-tallet. Den første av disse bruene, Nerlandsøy, ble utført som et FOU-prosjekt og er i den forbindelse godt dokumentert. Med bakgrunn i at erfaringene var positive ble hele brua påført ledende maling (Rødum and Vennesland 1994), deretter fulgte de tre andre. I stor grad gikk Statens Vegvesen senere bort fra dette anodesystemet. Figur 1 er basert på «Norsk betongforening» sin database og viser hvilke anodesystem som var mest benyttet på katodisk beskyttede bruer i Norge per 2016. Det fremgår at de titanbaserte systemene er de klart mest benyttede, enten alene eller i kombinasjon. Figur 2 viser tilsvarende hvilke systemer som totalt sett var mest benyttet ved katodisk beskyttelse i Norge, her fremkommer det at ledende maling er det desidert mest benyttede systemet per 2016. Tallene er hentet fra (Norsk Forening for Betongrehabilitering- FKBB 2016)



Figur 1 Anodesystem benyttet på bruer (Norsk Forening for Betongrehabilitering- FKBB 2016)





Figur 2 Anodesystem benyttet i Norge per 2016 (Norsk Forening for Betongrehabilitering- FKBB 2016).

Behovet for vedlikehold på bruene på riks- og fylkesveinettet er fremdeles stort og Statens Vegvesen ser på ledende maling som et interessant alternativ til de mer tradisjonelle titanbaserte anleggene, som har vært det foretrukne alternativ siden midten av 90-tallet. Det har vært flere runder med evaluering av systemene basert på aktivert titan. Ettersom Vegvesenet langt på vei gikk bort fra ledende maling har det vært færre evalueringsrunder med dette systemet benyttet på brukonstruksjoner. I forhold til eventuell fremtidig bruk av ledende maling i Statens Vegvesen er det et behov for å få belyst langtidserfaringene som per i dag finnes med disse systemene og i hvilken grad anodesystemet er egnet.

Det er flere grunner til at ledende maling er et interessant alternativ til de tradisjonelle systemene basert på aktivert titan. Erfaring fra bransjen viser blant annet at selve monteringen er enklere. Ved bruk av titannett har Vegvesenet erfart at vannmeisling er foretrukket forbehandlingsmetode for å sikre heft mellom innstøpingsmørtel og betongen (Grefstad 2005). I flere tilfeller er tilkomst en utfordring ved vannmeisling, også hensynet som må tas til omgivelsene gjør at støvende og støvende forbehandling kan være uegnet. Her har de ledende malingene en fordel med bakgrunn i at selve forbehandlingen normalt vil være mindre omfattende enn ved bruk av titannett, da det oftest er sliping som benyttes (Norsk Forening for Betongrehabilitering 2016).

Et minst like viktig aspekt er at vektøkningen uteblir ved bruk av ledende maling. De tradisjonelle systemene, og spesielt titannett representerer en betydelig vektøkning på konstruksjonen ved at nettet støpes inn i mørtel, dette kan være problematisk i de situasjoner der konstruksjonen fra før nærmer seg maksimalt utnyttet hva gjelder lastkapasitet. Et tilbakevendende problem med innstøpningsmørtlene har dessuten vært opprissing og delaminering (Buhr, Henriksen et al. 2003).

Ledende maling påføres enhetlig på forbehandlet betongoverflate, og strømfordelingen i selve anoden vil normalt være meget god da strømmen fordeles ut over et stort areal, sammenliknet med stavanoder og båndanoder. Sist, men ikke minst, blir pris til stadighet trukket frem som den store fordel, både som følge av enklere montering og rimeligere anodematerial (Polder, Leegwater et al. 2014). Det er nærliggende å anta at den sistnevnte fordel veier tungt i det praktiske hverdagslivet.

Ulempene er knyttet til bestandigheten av anodemalingen, som med alle typer maling på betong er fukt med tilhørende blæring-/avflassing av den ledende malingen en utfordring. Til tross for at vanlig praksis er å påføre overflatebehandling vil anoden være mindre beskyttet mot nedbrytning enn ved de tradisjonelle systemene der anoden er beskyttet av mørtel. Vegvesenet har praktisert 20 års levetid på de katodiske anleggene, det har vært, og er fortsatt en utfordring i forhold til de ledende

malingene da estimert levetid ofte settes i intervallet 10 – 15 år (Buhr, Henriksen et al. 2003, Byrne, Norton et al. 2016, Norsk Forening for Betongrehabilitering 2016).

Den andre «haken» med ledende malingen ligger i spenningsbegrensningen som praktiseres på de fleste systemene. Ved dagens begrensning på rundt 2 V driftsspenning er den resulterende beskyttelsesstrømmen armeringen mottar naturlig begrenset. De titanbaserte systemer kan normalt driftes med en høyere spenning (Norsk Forening for Betongrehabilitering 2016). I en situasjon der man står overfor konstruksjoner med høy tetthet av armering, høye kloridinnhold og omfattende armeringskorrosjon kan en ikke unngå å stille seg det sentrale spørsmålet: Er anodesystemet, med den begrensede driftsspenningen, i stand til å beskytte all armering mot videre korrosjon samtidig med at bestandigheten av anoden ivaretas?

Siden første gang ledende maling ble benyttet på Nerlandsøybrua har mye skjedd med denne typen anodesystem. Hvilke begrensninger og hvilke muligheter finnes med systemet i dag? Kan de ledende malingene være et reelt alternativ på armerte brukonstruksjoner som skal beskyttes katodisk?

## 2 FORMÅL OG FREMGANGSMÅTE

Målet med oppgaven er å vurdere hvorvidt katodisk beskyttelse ved bruk av ledende maling er et reelt alternativ på bruene til Statens Vegvesen.

For å nå målet anses det som nødvendig å innhente langtidserfaring fra broer som har vært katodisk beskyttet med ledende maling over en periode på 20-30 år. I tillegg skal det vurderes hvorvidt dagens anodesystem av ledende maling er kapabelt til katodisk beskyttelse av broer, der både tettheten av armering og kloridinnholdet er høyt feltsvis av brua. Oppgaven har derfor følgende delmål:

*Del 1. Undersøkelse av dagens anodesystem av ledende maling med fokus på evnen til å beskytte betongkonstruksjoner/ broer med høy tetthet av armering, høyt kloridinnhold og med pågående armeringskorrosjon i varierende omfang. Strømfordeling og behovet for antall nødvendige strømfordelingsbånd skal undersøkes spesielt. Kritiske faktorer ved bruk av dagens anodesystem skal identifiseres. I prøvefeltet vurderes også uventede observasjoner og resultater som alltid vil avdekkes i slike prøvefelt.*

*Del 2. Kartlegging broer i Region Midt som har vært katodisk beskyttet ved bruk av ledende maling over lengre tid. Langtidseffektiviteten (elektrokjemiske og mekaniske egenskaper), skadebildet og årsaker til skadene skal kartlegges. Det skal belyses forhold man bør være oppmerksom på ved fremtidig bruk av ledende maling på bruer.*

### 2.1 Fremgangsmåte

Tilsvarende delmålene er oppgaven delt i to hoveddeler:

1. Etablering av et prøvefelt med katodisk beskyttelse ved bruk av ledende maling i et tilfluktsrom med høy armeringstetthet. Utførelse av omfattende prøvetaking og målinger i forkant, gjennom og i etterkant av forsøket.
2. Gjennomgang av anlegg med katodisk beskyttelse med ledende maling i Region Midt. Befaring av bruer og detaljundersøkelser av en utvalgt bro.

I del 1 blir et prøvefelt etablert i et tilfluktsrom med høy tetthet av armering, stedvis høyt kloridinnhold og avskallinger som følge av pågående armeringskorrosjon. Forundersøkelser utføres for å finne en plassering av prøvefeltet der armering både korroderer aktivt og er passiv. På basis av forundersøkelsene plasseres prøvefeltet, det legges vekt på at lokasjon av prøvefeltet representerer virkeligheten på best mulig måte (store variasjoner i tilstand).

Etableringen av prøvefeltet følger vanlig fremgangsmåte med lokalisering og utbedring av skader (kontroll av armeringskontinuitet, forbehandling av betongoverflaten, meisling og mørtling). Det brukes tre ulike reparasjonsmørtler for oppbygning av prøvefeltet. Strømfordelingsbånd installeres med lavere senteravstand enn normalt og kobles på en slik måte at ulike bånd enkelt kan aktiveres/deaktiveres. Referanseelektroder (23 stk Ag/AgCl av type sykehuselektroder) monteres tett (på overflaten) for å kunne vurdere polariseringen av armering over tid på ulike steder i prøvefeltet. Anodemaling påføres enhetlig i prøvefeltet i tråd med vanlig prosedyre, styreskap fra Protector AS benyttes for drift og overvåking av prøvefeltet. Spenning påtrykkes og responsen på referanseelektroden registreres. Strømfordelingen i anoden undersøkes jevnlig i takt med tilkoblingen av flere bånd. Avslutningsvis, før demontering, undersøkes strømfordelingen i ulike deler av prøvefeltet.

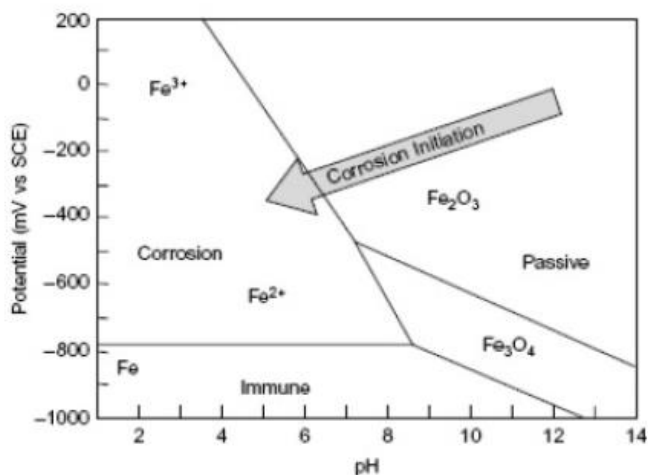
I del 2 kartlegges tre utvalgte kystbruer i Region Midt med ledende anodemaling. Først gjennomgås tilgjengelig arkivmaterieell fra rehabilitering av broene, fra oppfølgingsperioden og fra tiden deretter. Spesielt en av broene (Nerlandsøy) er godt dokumentert da rehabiliteringen ble utført som et FoU-prosjekt. Utfordringer og tanker i forkant og under rehabiliteringen skal dokumenteres. Deretter skal anleggene besøkes og vurderes opp mot dagens tilstand. Det utføres enkle inspeksjoner av både anlegg og brokonstruksjoner, der førstnevnte begrenser seg til å registrere hvilken likespenning og strøm som går i de ulike sonene (gitt at anlegget er i drift). Inspeksjonen av brokonstruksjonen begrenser seg til visuell inspeksjon fra landsidene. Med bakgrunn i befaringene velges det ut en bro det anses som interessant og hensiktsmessig å undersøke nærmere.

Den utvalgte broen undersøkes ved bruk av brolift samt ved å vurdere tilgjengelige driftsdata fra styringsskap. I tillegg til visuell inspeksjon foretas det hammerbanking og annen prøvetaking (nærmere beskrevet i kapittel 4). Undersøkelsene utføres både for å dokumentere funksjonaliteten av beskyttelsessystemet og for å kartlegge mekanisk og elektrokjemisk bestandighet av anodesystemet. Sentralt ved inspeksjonen er å gjøre målinger på anoden for å kunne vurdere strømfordelingen i de ulike felt. Skadebildet kartlegges og årsaken diskuteres. Erfaringene fra kartleggingen brukes til å belyse forhold man bør være oppmerksom på ved eventuell fremtidig bruk av anodesystemet på broer.

## 3 BAKGRUNN

### 3.1 Teoretisk

Betong og armering er i utgangspunktet en perfekt kombinasjon som et bestandig byggemateriale. Årsaken til dette ligger først og fremst i at porevæsken i sementpastaen er sterkt basisk grunnet et høyt innhold av hydroksidioner fra kalsiumhydroksid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) samt andre metallioner, som natrium- og kaliumioner. pH-verdien for ordinær betong med Portlandsement ligger i området rundt 13. Ved et så alkalisk miljø dannes en tynn og svært tett film av korrosjonsprodukter (jernoksid) rundt armeringsjernet (Geiker 2012). Filmen fungerer som en barriere og begrenser sterkt transporten av fukt og oksygen til armeringen, som dermed vil være passivert, det vil si at er stålet naturlig beskyttet mot korrosjon. Figur 3 viser Pourbaix-diagram for jern i vandig løsning. Slike diagram er basert på termodynamikk og viser i hvilken tilstand et metall kan forventes å befinne seg for ulike kombinasjoner av løsnings-pH og potensial. Drivkraften for korrosjon, potensialforskjeller på armeringen, er i passiv tilstand ubetydelig. Korrosjonsstrømmen er svært lav (Markeset 2008), i praksis neglisjerbar og stålet er dermed naturlig forhindret fra å korrodere.



Figur 3 Pourbaix-diagram for jern i vandig løsning ved 25 grader (Christodoulou, Webb et al. 2011).

Passiveringsfilmen på armeringsstålet kan med tiden brytes ned som følge av to ulike årsaker:

- Karbonatisering, en forsuringsprosess initiert av luftens innhold av  $\text{CO}_2$ , gassen vil diffundere inn i betongens poresystem og reagere med bestanddeler, primært kalsiumhydroksid pH i betongens porevæske reduseres og armering vil befinne seg i aktivt område av Pourbaix-diagrammet skissert i Figur 3. Resulterer gjerne i mikrocellekorrosjon, jevn korrosjon.
- Kloridioner i porevæsken over en kritisk grense. Med økende kloridinnhold reduseres potensialområdet der armeringen normalt er passiv (Bertolini, Bolzoni et al. 1998). Resulterer gjerne i makrocellekorrosjon, «pitting», som er kjennetegnet av lokal tæring.

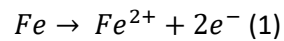
### 3.2 Armeringskorrosjon

Når passiveringsfilmen er nedbrutt, generelt eller lokalt, mister stålet sin naturlige beskyttelse og vil, i nærvær av vann og oppløst oksygen, begynne å korrodere. Denne prosessen involverer overføring av elektroner i stålet og ioner i betongen og er således en elektrokjemisk reaksjon. For at korrosjon skal være mulig kreves det følgende:

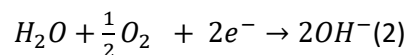
- En anode og en katode som til sammen utgjør en elektrokjemisk celle.

- Fukt og tilgang på oppløst oksygen (i porevæsken) ved stålets overflate.
- Metallisk kontakt mellom anode- og katodeområder.
- En væske som kan lede ioner, elektrolytt.

Ved anoden, der passivfilmen er nedbrutt, foregår en oksidasjon av jern til jernioner og elektroner frigjøres, som vist i ligningen under. Mer trivielt innebærer dette at jernet lokalt går i oppløsning.



Elektronene som frigjøres ved oksidasjonsreaksjonen transporteres metallisk til katoden (derav kravet om kontinuitet mellom anode og katode) hvor de forbrukes ved en reduksjonsreaksjon. I nøytrale/alkaliske miljø, som i betong, vil oppløst oksygen i porevæsken reduseres til hydroksidioner beskrevet ved følgende ligning:



Reaksjonen er i seg selv helt harmløs, likevel er den fullt ut nødvendig for opprettholdelse av korrosjonsprosessen da opphopning av elektroner ikke er mulig og de er nødt til å forbrukes ved reduksjonsreaksjonene ved katoden. Uten tilgang på reaktantene, fukt og oksygen, i porevæsken havner korrosjonsprosessen under «katodisk kontroll» og stopper i beste fall opp (Bardal 1994).

I betong er det porevæsken som utgjør elektrolytten og som muliggjør ionetransport mellom anode og katode slik at en lukket strømkrets dannes. Under forutsetning at nødvendige reaktanter er tilgjengelige ved katoden vil resistiviteten i elektrolytten (betongens porevæske) være avgjørende for korrosjonshastigheten. Dersom vannmetningsgraden i betongen er lav bremses ionestrømmen og korrosjonsprosessen blir motstandskontrollert (Hornbostel, Larsen et al. 2013). Ionene fra anode- og katodeområdet reagerer og jernhydroksid utfelles på ståloverflaten, dette er ikke et termodynamisk stabilt reaksjonsprodukt (Bardal 1994). Avhengig av tilgang på fukt dannes ulike jernoksider der volumet bestemmes av mengde fukt som er bundet opp og tilgangen på oksygen (Markeset and Myrdal 2008). Trivielt er reaksjonsproduktene bedre kjent som «rust».

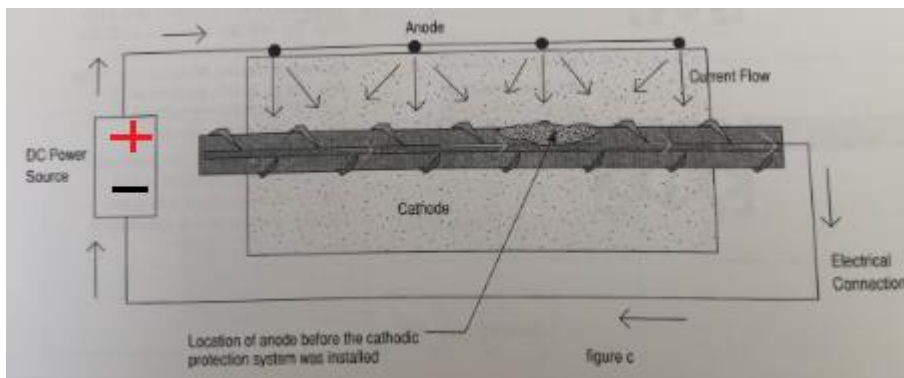
I passiv tilstand er stålets potensiale relativt positivt. Når armeringskorrosjon inntreffer vil potensialforskjeller mellom anode- og katodeområder oppstå, for å gjenopprette elektronøytralitet oppstår en strømkrets gjennom betongens porevæske mellom anode og katode. På anoden går jernet i oppløsning ved å sende jernioner ut i elektrolytten, et elektronoverskudd oppstår på jernet og potensialet blir mer negativt. Ved katoden er jernet fortsatt passivert og har stadig et relativt positivt potensial. Potensialforskjellen mellom anode- og katodeområder er den drivende kraften for videre armeringskorrosjon, korrosjonsstrømmen øker drastisk i forhold til passiv tilstand, i størrelsesorden er økning over flere dekaner mulig (Polder 1998). På denne måten dannes et naturlig batteri på armering og betong og potensialforskjellene mellom anode og katode kan registreres ved å avlese potensialet mellom armeringen og en referanseelektrode. Ulempen med denne tilstand, er at strømmen i kretsen er destruktiv og armeringsstålet løses opp. En har ikke kontroll på hvor de naturlige batteriene ligger.

Korrosjonsproduktene som dannes har fellestrekket at de innehar et større volum enn hva rent metallisk jern har. En volumekspansjon vil finne sted ved pågående armeringskorrosjon og sprengkrefter introduseres. Ved et punkt vil de opptredende spenningene overskride strekkfastheten til betongen, avhengig av hvilket korrosjonsprodukt som dannes (Markeset and Myrdal 2008). Resultatet er opprissing etterfulgt av avskalling av overdekningen. Ettersom stålet omdannes til mer voluminøse korrosjonsprodukter reduseres med tiden det effektive tverrsnittsarealet av armeringen og samvirke mellom armering og betong reduseres.

### 3.3 Katodisk beskyttelse av armerte betongkonstruksjoner

Armeringskorrosjon innebærer at en strømkrets oppstår i det elektriske feltet mellom anode- og katodeområde som følge av opptredende potensialforskjeller. Ved katodisk beskyttelse ønsker man å snu korrosjonsstrømmen mellom anode- og katodeområder, dette gjøres ved å etablere en ny strømsløyfe gjennom betongen. En strøm som i teorien må overkjøre den opprinnelige korrosjonsstrømmen, det vil si med motsatt retning og med større (absolutt) styrke. I praksis gjøres dette ved å montere en ekstern anode på eller i betongen og påtrykke en likestrøm mellom de to elektrodene, anode og katode (armering). På denne måten tvinges strømmen til å gå fra den monterte anoden og til armeringen der et elektronoverskudd favoriserer katodereaksjoner til fordel for anodereaksjoner (Liu and Shi 2009).

Ved hjelp av den påtrykte likestrømmen endres armeringens elektrokjemiske potensial i katodisk (negativ) retning, dette kalles polarisering. På denne måten reduseres potensialforskjellene mellom anode- og katodeområdene på armeringen og dermed drivkraften for korrosjonen (Polder 1998). Beskyttelsesstrømmen som er nødvendig for å polarisere armeringen leveres fra en ekstern anode som elektrisk strøm, via elektrolytten (betongens porevæske) som en ionisk strøm til stålets overflate som dermed polariseres. Den eksterne anoden kobles til positiv pol på en likeretter, armeringen blir koblet til den negative pol (Polder 1998). På denne måten blir en ny strømkrets etablert der armeringen blir elektronmottager og blir en enhetlig katode, herav navnet katodisk beskyttelse av armering. Prinsippet er vist skjematisk i Figur 4.



Figur 4 Prinsippskisse av katodisk beskyttelse ved påtrykt strøm (Emmons 1993)

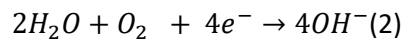
Anodereaksjonene (oksidasjon) vil nå foregå på den eksterne anoden hvilket resulterer i et elektronoverskudd på armeringen. Dette undertrykker de tidligere anodiske reaksjonene på armeringen (oppløsning av jern) og favoriserer katodiske reaksjoner, reduksjon av oksygen til hydroksidioner. Armering som en del av den nye strømsløyfen gjøres dermed til en katode, herav navnet. Korrosjonshastigheten reduseres ideelt sett til et ubetydelig nivå (Byrne, Norton et al. 2016).

### 3.4 De elektrokjemiske reaksjonene ved katodisk beskyttelse

I det etablerte elektriske feltet vil andre elektrokjemiske reaksjoner ta over ved de to elektrodene, den eksterne anoden og katoden (armering). Reaksjonene har i seg selv konsekvenser for miljøet i betongen og rundt armering.

Katodereaksjonen som foregår ved armeringen er beskrevet i ligning 2 og er den samme som katodereaksjonen beskrevet i korrosjonsprosessen, forskjellen er at den nå foregår enhetlig over all

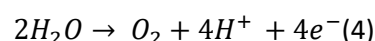
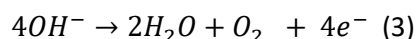
armering som er en del av den nye strømsløyfen. Reaksjonsproduktet ved katodereaksjonen er hydroksidioner, som en konsekvens av polariseringen vil konsentrasjonen av hydroksidioner, og dermed pH, i den omkringliggende porevæske i betongen rundt armeringen øke (Bertolini, Bolzoni et al. 1998).



Mellom ekstern anode og armering transporteres beskyttelsesstrømmen gjennom betongens porevæske som en ionisk strøm, dermed vil en ionemigrering oppstå der anioner beveger seg mot den positive elektroden (anoden) og kationer mot den negative elektroden (armering). I prinsipp vil dermed kloridinnholdet helt inne i nivå med armering reduseres, gitt at størrelsen på det elektriske feltet er stort nok til å kompensere for tilbakediffusjon av kloridioner (Eichler, Isecke et al. 2010) mens konsentrasjonen av hydroksidioner øker (Christodoulou, Goodier et al. 2018). Som konsekvens av disse gunstige sekundæreffektene av polariseringen muliggjøres en re-passivering av armering som i utgangspunktet korroderte. Tendensen etter flere års drift er at det frie korrosjonspotensialet ofte utvikler seg i anodisk retning, mot potensialer som typisk indikerer passivitet. Effektene ble undersøkt i (Koleva, Guo et al. 2009) der grensesjiktet mellom betong og armering ble analysert. Forsøket ble utført med strømtetthet 5 – 20 mA/m<sup>2</sup> (armering) og bekreftet effektene.

Spørsmålet angående hvorvidt de gunstige sekundæreffektene av polariseringen er vedvarende ble undersøkt i (Christodoulou, Webb et al. 2011) der broer som hadde vært katodisk beskyttet over lengre tid ble stående uten beskyttelsesstrøm i en periode over 3 år. Armeringens potensial og korrosjonsstrømtettheten ble målt/ estimert over tid, hvorav begge indikerte passiv armering selv etter tre år, dette til tross for til dels høye kloridinnhold.

Anodereaksjonene som er forventet å opptre i et katodisk beskyttelsesanlegg med påtrykt strøm er vist i ligningene under (Zhang, Abbas et al. 2018). Dominerende anodereaksjon er avhengig av anodepotensialet i forhold til likevektspotensial for reaksjonen. Det karakteristiske er at hydroksidioner forbrukes ved dannelsen av oksygen (ligning 3, elektroosmose), eventuelt spalting av vann ved elektrolysedrift (ligning 4). Begge tilfeller innebærer en reduksjon av pH i betongens porevæske i grensesjiktet mellom anode og betong, ensbetydende med forsurening.



Ligning 5, dannelsen av klorgass fra kloridioner, innebærer ikke et forbruk av hydroksidioner og er mindre skadelig for sementpastaen isolert sett. Bieffektene av de anodiske reaksjonene er mindre heldige og det er disse forholdene som normalt utgjør begrensningen i størrelsen av påtrykt strøm/spenning ved katodisk beskyttelse angitt i NS-EN 12696. Forsuringen i grensesjiktet mellom anode og betong ble undersøkt i (Zhang, Abbas et al. 2018) der man benyttet høy strømtetthet (2 - 4 A/m<sup>2</sup> anode) for å akselerere nedbrytningen.

Den høye påtrykte strømtettheten endret radikalt på porestrukturen i betongen. Ettersom hydroksidioner forbrukes i anodereaksjonen reduseres pH. I et forsøk på å gjenetablere likevekt vil hydratiseringsproduktene oppløses (kalsiumhydroksid og CSH-gel) og hydroksidioner frigis, dette er assosiert med en uttømming av kalsium. Uttømmingen finner først sted ved oppløsning av kalsiumhydroksid, dernest som oppløsning av CSH-gelen. Visuelt fortøner dette seg tilslutt som en oppsmuldring av sementpastaen under anoden.



Forholdet beskrevet ovenfor har to konsekvenser som vil påvirke effekten av det katodiske beskyttelsessystemet:

- Økt motstand i reaksjonssonen, dette som følger av endret mikrostruktur i betongen og redusert ionekonsentrasjon i porevæsken umiddelbart under anoden.
- Hefttap mellom anode og betong som følger av oppløsningen av sementpastaen i reaksjonssonen.

Forsøket beskrevet ovenfor var akselerert, og benyttet strømtetthet var i størrelsesorden 1000 ganger høyere enn ved normal drift av et KB-anlegg. Målet var å relatere nedbrytningen til den totale ladning. Dette for å vurdere tidsaspektet ved «ordinær» strømtetthet benyttet ved katodisk beskyttelse. Det er ingen enkel korrelasjon mellom akselerert forsøk og normal drift fordi strømtettheten i seg selv forsterker nedbrytningen. Man har to transportmekanismer, migrering i feltet og tilbakediffusjon som følge av de oppbygde konsentrasjonsgradientene. Ved ordinær strømtetthet for katodisk beskyttelse vil disse to mekanismene langt på vei utligne hverandre slik at oppløsningen av sementpastaen vil gå vesentlig tregere enn i et akselerert forsøk (Zhang, Abbas et al. 2018). Det er dermed ikke mulig å forutsi tiden det tar før forsuringen vil gi effekt.

Det påpekes i litteraturen, blant annet i (Polder 1998) at forsuring normalt ikke vil utgjøre et problem innenfor levetiden av beskyttelsesanlegget ved den strømtetthet (eventuelt driftsspennning) som vanligvis benyttes. (Cheaitani 2017) viser til viktigheten av lokal strømtetthet, og at høye fuktinnhold i denne sammenheng er uheldig.

### 3.5 Beskyttelsesstrøm og strømfordeling ved katodisk beskyttelse

Med utgangspunkt i å stoppe den pågående armeringskorrosjonen er det først og fremst opprinnelig korrosjonshastighet som er utslagsgivende for hvilken beskyttelsesstrøm som kreves i hver enkelt situasjon (Chess 1998). Den påtrykte strømmen skal på sin vei fra anoden til armering overvinne flere «enkeltpotensialer» som samlet utgjør kretsmotstanden i den etablerte strømkretsen mellom anode og katode (armering):

- Motstand i anoden
- Overgangsmotstand mellom anode og betong/mørtel
- Motstanden i betongen/ reparasjonsmørtel.
- Overgangsmotstand betong/mørtel og ren armering (katode)
- Motstanden i et eventuelt sjikt med korrosjon

Ettersom strømmen transporteres ionisk gjennom betongens porevæske vil ofte motstanden (geometriavhengig) eller resistiviteten (materialegenskap) i betongen bli utslagsgivende for hvilken beskyttelsesstrøm armering mottar. Resistiviteten i betongen avhenger igjen av rekke faktorer der vannmetningsgraden i porestrukturen har vist seg å være faktoren med størst innvirkning. Det er i litteraturen vist til at resistivitet i betong varierer innenfor vide grenser (  $10^6 \Omega\text{m}$  ovenstørket betong til  $10 \Omega\text{m}$  vannmettet betong) (Hornbostel, Larsen et al. 2013). I (Polder and Peelen 2018) er  $20 \text{ mA/m}^2$  (armering) angitt som tommelfingerregel for nødvendig strømtetthet i oppstartsfasen, samtidig understrekes det at det ikke eksisterer en universell verdi. Strømtetthet vil også variere med blant annet hvor mye armering betongen inneholder.

I (Christodoulou, Goodier et al. 2018) er det pekt på at selv en høy katodisk beskyttelsesstrømtetthet ikke nødvendigvis er tilstrekkelig til å stanse en makrokorrosjon-celle (pitting). Erfaring gjennom mange år viser at langt lavere størrelser på den påtrykte strømmen likevel benyttes med godt

resultat (Glass and Hassanein 2003), man mener dette kan tilskrives foredlingen av korrosjonspotensialet som følge av de gunstige sekundæreffektene beskrevet tidligere

En jevn strømfordeling tilstrebes da dette vil medføre lavere nødvendig strømtetthet på anoden, og dette er gunstig med tanke på langtidsbestandigheten av beskyttelsessystemet. For armert betong er det imidlertid svært vanskelig å oppnå jevn strømfordeling fordi både resistiviteten i betongen og korrosjonstilstanden på armering i en reell situasjon varierer. Fordelingen av strøm ved katodisk beskyttelse av armert betong er kompleks og er først i den senere tid undersøkt til en viss grad, følgende er framkommet:

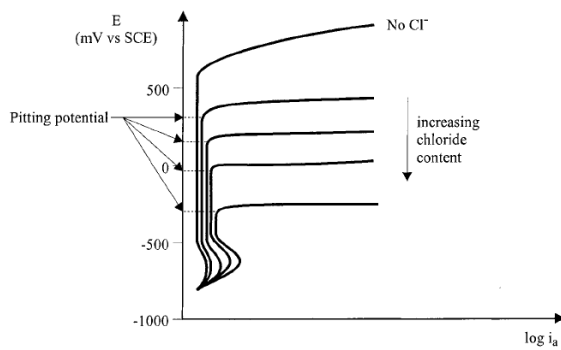
- Strømfordelingen er relativt jevn ved lav korrosjonshastighet. Passiv armering langt unna anoden kan polarisere betydelig selv ved relativt beskjeden beskyttelsesstrøm (Bertolini, Bolzoni et al. 1993)
- Strømfordelingen blir mer ujevn både for økende resistivitet og der den opprinnelige korrosjonsstrømtettheten er høy (Hassanein, Glass et al. 2002).
- Armeringslaget nærmest anoden vil i alle situasjoner motta mest strøm, og dette laget kan fungere som skjerming av de underliggende lag, situasjonen forverres i tråd med punktet ovenfor. Det ble vist, både ved forsøk og simuleringer at armering lengst unna anoden i ugunstige situasjoner mottar en ytterst begrenset andel av beskyttelsesstrømmen (Bertolini, Bolzoni et al. 1993) .
- En økning av strømtettheten forverrer fordelingen, særskilt der korrosjonshastigheten opprinnelig var høy (Xu and Yao 2009).

Det vil normalt være behov for å utbedre skader i forkant av katodisk beskyttelse. Utfra ønske om jevn strømfordeling blir kompatibiliteten mellom betong og reparasjonsmørtel i forhold til resistivitet viktig. Dette punktet er omtalt i standarden NS-EN 12696 og i (Polder and Peelen 2018).

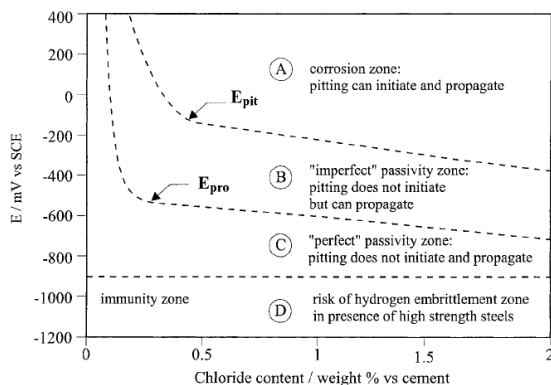
For katodisk beskyttelse av armert betong er det overordnede målet å bringe armering tilbake til passivtilstanden og på den måten stanse korrosjonsprosessen. Generelt gjelder at jo høyere kloridinnhold jo mindre blir passivområdet. Dette er skissert i Evans-diagrammet i Figur 5 som viser hvordan den anodiske polariseringskurven for jern endres ved økende kloridinnhold.

Passivitetsområdet finnes der anodisk polariseringskurve er loddrett. Pourbaix introduserte begrepene «imperfect passivity» og «perfect passivity». I førstnevnte kan ikke armeringskorrosjon initieres, men pågående korrosjon kan utvikles. I sistnevnte er både initiering og utvikling av korrosjon umulig. Prinsippet er vist i Figur 6 og en merker seg at området definert som C «Perfect passivity zone» smaler inn ettersom kloridinnholdet øker (Bertolini, Bolzoni et al. 1998), kraftigere katodisk polarisering er nødvendig og dermed også høyere strømtetthet.

En variant av katodisk beskyttelse har man der passiv armering ved påtrykt likestrøm polariseres katodisk, dette har fått navn katodisk forebygging og har vist seg å være effektivt. Passivt stål lar seg lettere polarisere, og nødvendig påtrykt strøm er i størrelsesorden 1/10 sammenliknet med katodisk beskyttelse. Stålet vil forbli passivt ved en eventuelt økt kloridionkonsentrasjon ettersom potentialet til enhver tid vil befinne seg under det kritiske pittingpotensial,  $E_{pit}$  (Bertolini, Bolzoni et al. 1993).



Figur 5 Endring av anodiske polariseringskurver ved økt kloridinnhold (Bertolini, Bolzoni et al. 1998).



Figur 6 Pedeferri-diagrammet viser hvordan de ulike sonene endrer seg ved økt kloridinnhold (Bertolini, Bolzoni et al. 1998)

### 3.6 Beskyttelseskriteriene etter NS-EN 12696

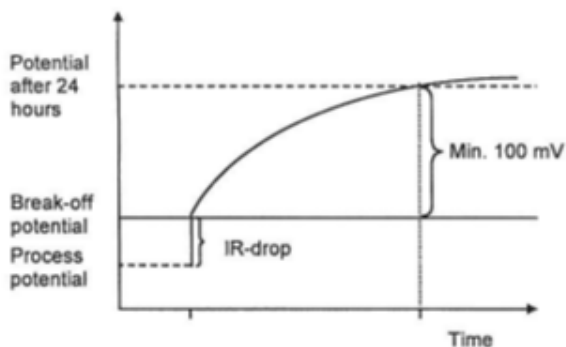
Katodisk beskyttelse av armerte betongkonstruksjoner er behandlet i NS-EN 12696. I alle tilfeller baserer kontrollen seg på avlesning av armeringens elektrokjemiske potensial målt mot innstøpte referanseelektroder. Som nevnt medfører den påtrykte spenning/ strøm en polarisering av armeringen i katodisk retning, som dermed er skjøvet ut av likevekt. Ved å bryte strømmen vil armering over tid vende tilbake til likevekt med sine omgivelser, registrert som en depolarisering i motsatt (anodisk) retning. Depolarisering kan også forstås som en utladning av armeringsoverflaten. I NS-EN 12696 settes det krav til størrelsen på depolariseringen over et visst tidsrom for å verifisere tilstrekkelig beskyttelse. Verdiene er utelukkende basert på erfaring (Martínez, Andrade et al. 2007).

I vurderingen av beskyttelseeffekten er det bruddpotensialet (engelsk: instant-off) som benyttes. Spenningen som er nødvendig for å drive beskyttelsesstrømmen fra anode til katode, det ohmske spenningsfallet (engelsk: IR-drop), skal ikke medregnes i depolariseringen. For å eliminere IR-fallet avleses bruddpotensialene umiddelbart etter at strømkretsen brytes. Prinsippet er skissert i Figur 7. For å verifisere tilstrekkelig beskyttelse av armering opererer standarden med følgende tre beskyttelseskriterier:

- Minst 100 mV depolarisering fra instant-off i løpet av 24 timer
- Minst 150 mV depolarisering fra instant-off på en periode over 24 timer
- Et instant-off-potensial som er mer negativt enn -720 mV vs. Ag/AgCl

I tillegg er det satt en nedre grense for instant off-potensialene, ingen potensialer skal være mer negative enn -1100 mV vs. Ag/AgCl for slakkarmerte konstruksjoner, mens spennarmerte har en

nedre grense på -900 mV vs. Ag/AgCl. Bakgrunnen for dette er å unngå hydrogensprøhet som følge av at hydrogenutvikling tar over som katodereaksjon ved meget negative potensialer (Polder 1998).



Figur 7. Prinsipiell skisse som viser depolariseringsforløpet etter at likestrømmen/ likespenningen er brutt (Vennesland 2009)

### 3.7 Ledende maling

Fokuset for denne oppgaven er katodisk beskyttelse ved bruk av ledende maling med grafitt som fyllstoff. De tradisjonelle systemene, basert på titan belagt med ulike oksider (MMO- «mixed metal oxid») vil ikke bli nærmere omtalt.

Anodesystemet ledende maling består i prinsipp av to anoder, selve malingen som påføres betongoverflaten, og strømfordelingsbånd, også kalt primæranoder (etter engelsk «primary anodes») som kobles til positiv pol på likeretteren (Poltavtseva, Ebell et al. 2015). Malingene som finnes har alle et betydelig innhold av grafitt i seg, men utenom dette finnes det et «hav» av ulike varianter, der nøyaktig sammensetning og innhold stort sett er bedriftshemmeligheter. Basert på tilgjengelige åpne artikler kan følgende karakteristikker gjøres angående malingene:

Som pigmenter/fyllstoff benyttes karbon i ulike varianter, blant annet grafittpulver, «carbon black» og karbonfibre. I et eldre forsøk utført i 2003 der elektrokjemiske karakteristikker skulle undersøkes ble malinger med grafittinnhold i området 30 – 50 % utsatt for 45 mA/m<sup>2</sup> over en periode på 72 dager. I studiet fant man at det optimale grafittinnholdet lå i øvre del av skalaen, 40 – 50 % (Orlikowski, Cebulski et al. 2004).

Bindemiddelet i malingen kan være både uorganisk mineral og organisk polymer (Poltavtseva, Ebell et al. 2015). I hvilken grad bindemiddelet er elektrisk ledende har avgjørende betydning for malingens grafittinnhold og den elektrokjemiske bestandighet. Flere av de ledende anodemalingene i dag har et betydelig lavere innhold av grafitt enn anbefalingen gitt i (Orlikowski, Cebulski et al. 2004). Dette skyldes at bindemiddelet som er benyttet også er elektrisk ledende.

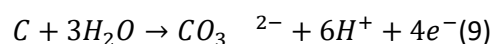
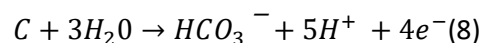
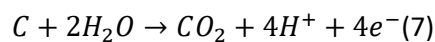
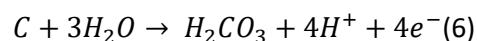
Strømfordelingsbåndene har til hensikt å mate strøm fra likeretteren ut i anodemalingen. Båndene plasseres på betongoverflaten eller i små slisser der senteravstanden bestemmes av prosjekterende som dimensjonerer det katodiske anlegget i hvert enkelt tilfelle (Van Den Hondel and Van Den Hondel 2018). For å sikre en jevn strømfordeling i anoden er det essensielt at båndene plasseres med en avstand som sikrer at store spenningsfall («hengekøyer») unngås. På denne måten sikres det at armering beliggende midt mellom strømfordelingsbånd også mottar tilstrekkelig beskyttelsesstrøm (Poltavtseva, Ebell et al. 2015). I standarden for katodisk beskyttelse av armert betong, NS-EN 12696,

er det satt et høyeste anbefalt spenningsfall internt i en sone på 10% av driftsspenningen, dette som et mål på strømfordelingen. Selve båndene kan bestå av en rekke kombinasjoner. Det vesentlige er at den elektriske ledningsevnen er god, samtidig med at overflaten av båndet er elektrokjemisk stabil. I (Van Den Hondel and Van Den Hondel 2018) oppsummeres erfaringene med ledende maling etter 25 års bruk i Nederland på totalt 108 prosjekter, heri også erfaringene med strømfordelingsbånd. Følgende erfaring er gjort med de benyttede strømfordelingsbåndene:

- Sølvbånd: Svarte flekker dukket opp på båndene, etter 8 – 10 år. I enkelte installasjoner oppsto problemer med strømfordelingsbåndene og også fullt brudd, dette var relatert til skarpe kanter og hjørner på betongen der båndene ble strukket og sølvet ble liggende eksponert i anoden.
- Platinabelagte kobberbånd: Funksjonaliteten er i alle beskrevne tilfeller ivaretatt. Feilen det rapporteres om hyppigst er små grønne flekker forårsaket av oksidering av kobber eksponert i anoden, dette gjelder lokale steder der belegningen rundt kobberet av ulike årsaker lokalt er ødelagt. Problemet er i all hovedsak betegnet som estetisk. Kobberet benyttes grunnet meget god elektrisk ledningsevne, belegningen med platina gjør overflaten elektrokjemisk stabil.

### 3.7.1 Mulige anodereaksjoner ved karbonbaserte anodesystemer

Ved katodisk beskyttelse av armert betong, kan de elektrokjemiske reaksjonene nevnt tidligere forventes å skje ved anoden. Fellestrekket for de tre reaksjonsligningene er at reaktantene er å finne i elektrolytten. For de karbon/ grafittbaserte anodesystemene er oksidasjon av anodene i seg selv, mer presist deres grafittinnhold, teoretisk mulig som anodereaksjon (Pruckner 2001):



Den dominerende anodereaksjonen er avhengig av anodepotensial som igjen er styrt av kretsmotstand i systemet og driftsspennning. Fellestrekket for reaksjonsproduktene i ligningene ovenfor er at den elektriske ledningsevnen reduseres i forhold til utgangspunktet, grafitt (Poltavtseva, Ebell et al. 2015). Følgelig vil betydelig grafittoksidasjon medføre en økning av motstanden i anoden. Et fellestrekk for grafittoksidasjon (ligning 6 – 9) er at de elektrokjemiske reaksjonene er komplekse, der interaksjoner med de andre mulige anodereaksjonene og egenskaper ved elektrolytten spiller en viktig rolle. De kjemiske og fysiske egenskapene ved type grafitt i de ulike anodemalingene har også avgjørende betydning for omfanget av grafittoksidasjon (Poltavtseva, Ebell et al. 2015). Dermed er det i liten grad mulig å forutsi anodepotensialet som er nødvendig før grafittoksidasjon blir dominerende (Eichler 2011). For grafittfylte anoder til bruk ved katodisk beskyttelse viser erfaringen at anodepotensialet må være høyt før grafittoksidasjon får noen praktisk betydning (Pruckner) (Broomfield 2005). Dessuten fremgår det i (Eastwood, Christensen et al. 1999) at oksygenutvikling ser ut til å ha forrang i de tilfeller elektrolytten inneholder karbonater (som jo er tilfellet for betong).

Det er også av betydning hvilken form for karbon som anvendes i anoden. I de fleste karbonbaserte malinger er grafittpulver benyttet, for denne typen reduseres omfanget av oksidasjon betraktelig (Eastwood, Christensen et al. 1999) .

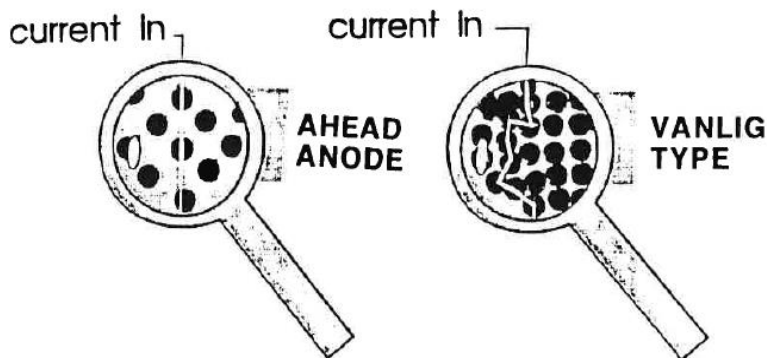
I (Cramer, Bullard et al. 2002)er Yaquina Bay Bridge i USA undersøkt etter 15 år med katodisk beskyttelse, det benyttede anodesystemet var en løsemiddelbasert akryl-karbonmaling. Strømtettheten over lengre tid var cirka 2 mA/m<sup>2</sup> anode og langtidsforbruket av karbon var minimalt. Man mente dette skyldtes at dannelsen av klorgass (ligning 5) var den dominerende anodereaksjonen. Det har i litteraturen ikke har vært rapportert om tilfeller der langtidsforbruk av ledende anodemalinger har utgjort et bestandighetsproblem for anodesystem med ledende maling (Broomfield)

### 3.7.2 AHEAD-anoden

Denne anoden er brukt på bruene Nerlandsøy, Remøy og Verjeskiftet og er derfor omtalt her.

Første generasjon anodesystem fra Protector AS (den gang Coating International AS) var ELkinet-AHEAD-systemet fra det østeriske firmaet Eltac. Systemet hadde opprinnelig blitt brukt til uttørking av murverk (elektroosmoseanlegg) i Østerrike. Til dette formål hadde systemet vist seg bestandig forutsatt at anlegget ble driftet ved elektroosmose (ligning 3) og ikke elektrolyse (ligning 4) (Ødegård 1992). I selve malingen ble grafitt benyttet som fyllstoff mens bindemiddelet var syntetisk (organisk kopolymer). Som strømfordelingsbånd (primæranode) ble sølvbånd benyttet.

Det karakteristiske ved anodemalingen i forhold til tidligere anodemalinger var at bindemiddelet som ble benyttet var en elektrisk ledende kopolymer, som følge av dette var grafittinnholdet i malingen betydelig lavere enn hva som var vanlig på denne tiden. Dette gir sterkere anode da mer grafitt er erstattet med bindemiddel/bæremateriale. Ved at bindemiddelet var gjort elektrisk ledende kunne ladningsoverføringen foregå i bindemiddelet og ikke bare fra grafittkorn til grafittkorn, som var tilfellet for de tidligste malingerne. Den prinsipielle forskjellen er vist i Figur 8.



Figur 8 Prinsipiell forskjell i ledningsevne mellom datidens anodemaling og AHEAD-anoden (Ødegård 1992)

Den øvre grensen for den påtrykte spenningen ved AHEAD-systemene ble satt til 2 V, dette med bakgrunn i å ivareta langtidsbestandigheten av anode og grensesjiktet i betongen. Konkret var målet å sikre elektroosmose-drift for dermed å unngå forsurening, gassdannelse og grafittoksidasjon av praktisk betydning (Ødegård 1994).

### Langtidsbestandigheten av AHEAD-systemet

I (Polder, Peelen et al. 2006) ble grensesjiktet mellom betong og AHEAD-anodemaling undersøkt. Det ble tilsendt kjerneprøver fra en boligblokk i Norge, beskyttet over 9 år og et prosjekt fra Nederland, beskyttet over en periode på 4 til 6 år. I samtlige prosjekter fungerte anleggene godt og beskyttelseskriteriet på minst 100 mV depolarisering var oppfylt, driftsspenningen var i området 1,5-2 V med resulterende gjennomsnittlig strømtetthet 0,5 – 1 mA/m<sup>2</sup> betongoverflate. Målet var å undersøke dybden av oppløst sementpasta som følge av forsuring av betongen i grensesjiktet mot anoden. En teoretisk årlig oppløsningsdybde av sementpastaen på 2,4 µm under anoden ble regnet ut som utgangspunkt. Tallet baserte seg på følgende:

- 1 mA/m<sup>2</sup> anodeoverflate
- 0,33 mol hydroksidioner per m<sup>2</sup> grensesjikt konsumert i året
- Hensyn til at noe av forsuringen nøytraliseres ved ionemigrering av hydroksidioner fra katode til anode, anslått at 80 % av strømmen ble båret av hydroksidioner (transporttall 0,8)

SEM-analyser (oppløsning 1 µm) og UV-lysmikroskopi (oppløsning 10 µm) ble benyttet for å detektere faktisk oppløsningsdybde på de tilsendte kjernene. Selv ikke ved SEM-analyser var det mulig å spore oppløst sementpasta på noen av kjernene. Forsøket viste at faktisk dybde av oppløst sone er mindre enn beregnet, og dermed er også forsuringproblematikken mindre vesentlig. Det kunne konkluderes med at bestandigheten av AHEAD-systemet (ved spenning 1,5 – 2 V over en periode på inntil 9 år) ikke påvirkes av forsuring i grensesjiktet anode/sementpasta.

AHEAD-systemet har også blitt utsatt for akselererte forsøk for å undersøke hvordan nedbrytningen utarter seg ved høy strømtetthet. I (Larbi and Polder 1996) benyttet man strømtetthet 60 mA/m<sup>2</sup> anodeoverflate og 20 Ah akkumulert totalladning. Etter testingen kunne et 50 – 600 µm hulrom mellom anode og mørtel konstateres. Anoden var helt løs fra underlaget og det satt mørtel igjen på anoden. Mikrostrukturen i mørtelen som satt igjen til anoden fremsto helt annerledes enn bulkmørtelen. Dermed konkluderte man med oppløsning av mørtelen i grensesjiktet som følge av forsuring. Selve anoden fremsto i all hovedsak som intakt og upåvirket av det akselererte forsøket.

### 3.7.3 ZEBRA-anoden

AHEAD-systemet har vært evaluert starten av 90-tallet. Systemet er vurdert både internt (Protector AS) og eksternt. Formålet med undersøkelsene har vært å optimalisere anodesystemet. AHEAD-systemet er i dag erstattet av ZEBRA-systemet.

ZEBRA-systemet består av anodemaling og strømfordelingsbånd, ZEBRA PDR (tverrsnitt 0,3 X 1,5 mm) som har kobberkjerne med en belegning av titan og et ytre lag platina. Denne belegningen med edelt metall (platina) gjør båndet elektrokjemisk stabilt, og gir lavere elektrisk overgangsmotstand mot materialer den er i kontakt med.

ZEBRA-anodemalingen benytter grafitt som fyllstoff. Bindemiddelet er mineralsk og består av to komponenter, A, en silikatforbindelse og B, magnesiumkarbonat. De to komponentene reagerer og danner en gel. Eksponert for luft kan denne gelen reagere med betong/mørteloverflaten og danne et mineral-liknende reaksjonsprodukt (teknisk rapport Protector AS). I følge Protector AS har dette bindemiddelet flere fordeler fremfor bindemidler av organisk kopolymer:

- Mekaniske egenskaper, heftfastheten, er forbedret fra første generasjon anodemaling
- Resistiviteten i ZEBRA er betydelig redusert i forhold til AHEAD.
- Overgangsmotstanden mellom anode og betong er lavere for ZEBRA
- Akselererte tester viser at motstand i anoden og overgangsmotstanden til betongen i ZEBRA er mer stabil over tid enn AHEAD.

Betongoverflaten forbehandles grundig før påføring av anode. Det er i produktdatabladet anbefalt å montere PDR-båndene i slisser i betongoverflaten. I de tilfeller betongoverflaten ikke er eksponert for kjøretøy/gangtrafikk er imidlertid vanlig praksis å tape båndene på betongoverflaten. PDR-båndene monteres på en stripe med anodemaling, enten på overflaten eller i slisser. Tettheten av båndene bestemmes særskilt i hvert tilfelle og avhenger av betongens resistivitet, armeringstetthet og opprinnelig korrosjonstilstand på armeringen. Etter montering av båndene påføres anoden enhetlig i ett strøk. I produktdatabladet oppgis det at anodemalingen skal påføres med et forbruk angitt til 0,30 – 0,35 kg/m<sup>2</sup>, avhengig av betongoverflatens beskaffenhet.

Anodesystem med ledende maling generelt krever beskyttende overflatebehandling og denne må dermed ses på som en del av anodesystemet. Avhengig av konstruksjonsdel benyttes ulike systemer. På bruer blir anoden etter herding (verifiseres ved å måle motstand i anoden) påført heftforbedrer (AHEAD Multiprimer, vannbasert akrylprimer) før en tykkfilmmaling basert på akryl påføres. I produktdatabladet for ZEBRA er det oppgitt en spenningsbegrensning på 2,5 V og en høyeste strømtetthet på 20 mA/m<sup>2</sup> anode med samme bakgrunn som for AHEAD-anoden.

#### **Bestandighet av ZEBRA. Akselererte forsøk:**

Det er utarbeidet en rekke tekniske rapporter av Protector AS der ZEBRA er sammenliknet med AHEAD i akselererte forsøk. På nyeste generasjon ZEBRA ble det ikke registrert noen tegn til nedbrytning, dog er det ikke oppgitt hvilken ladning disse prøvestykkene på forhånd hadde vært eksponert for. Det ble fremhevet at det mineralske bindemiddelet som reagerer med underliggende sementpasta har en fordel ved de akselererte forsøkene. Dessuten er, ifølge tekniske rapporter fra Protector AS, gelen som dannes mer syreressistent enn anodemalinger med bindemiddel av organisk polymer. Spenningsbegrensningen er for ZEBRA økt til 2,5 V.

Problemene knyttet til anodesystemet ledende maling (generelt) har vist seg å være avflassing (Polder, Neeft et al. 2010, Byrne, Norton et al. 2016, Norsk Forening for Betongrehabilitering 2016), der mulige årsaker er påpekt:

- Mangelfull forbehandling, dette medfører redusert heftfasthet fra starten av
- Påføring under uheldige betingelser. Påføring ved for lav temperatur/ for høy relativ luftfuktighet har gitt treg herding. Eller for kort herdetid før påfølgende overflatebehandling.
- Høyt fuktinnhold (vannmetningsgrad) i betongen, enten fra påføring eller ved tilsig av fukt i senere tid. Dette i likhet med all annen maling på betong. Ledende malinger generelt er fuktømfintlige og krever overflatebehandling

Det er med bakgrunn i avflassingsproblematikken for alle typer anodemalinger forventet levetid på 10 -15 år settes. Samtidig fremheves betydningen av eksponering og det hevdes 20 år kan oppnås i gunstige tilfeller. I en undersøkelse av tre ledende anodemalinger (Poltavtseva, Ebell et al. 2015) ble det vist at den elektriske motstanden (ikke elektrolytt) økte ved fukt eksponering. Av denne årsak var anbefalingen at anodene beskyttes med overflatebehandling.

### **3.8 Anodesystemet anvendt på bruer i region Midt.**

Tabell 1 viser en oversikt over de fire broene som er katodisk beskyttet ved bruk av AHEAD/ZEBRA-systemet og når KB-anlegget ble installert. Knarrlagsundet er ikke lenger i drift.



Tabell 1 Broene i Region Midt som er katodisk beskyttet med AHEAD/ZEBRA.

Bro	Oppført	Katodisk beskyttet	Anodesystem	Status 2019
15-0997 Nerlandsøybrua	1966-67	1991-1993 (FoU) 1994-1995	AHEAD	I drift, ustabil
15-0788 Remøybrua	1966-67	1995	AHEAD	I drift
15-1678 Verjeskiftbrua	1977	2000 og 2011	AHEAD + ZEBRA	I drift, ustabil
16-0638 Knarrlagsundet bru	1965	1997	AHEAD	Ikke i drift

I 2005 ble en vurdering av anodesystemet anvendt i region Midt gjort. Verjeskiftbrua skilte seg ut med bedre tilstand enn øvrige, men konklusjonen den gang var at anleggene fungerte på samtlige av bruene. I forbindelse med tilstand på bru og anlegg var det noen fellestrekk (Østmoen 2007): Avflassing av anode og dekkmalning ble observert i varierende omfang på samtlige broer. Spesielt fremtredende over epoksyforseglingene av strømfordelingsbånd og i forbindelse med riss. Dessuten var det lokal avflassing hist og her på broene der mangelfull forbehandling og/eller tynn overflatebehandling ble påpekt som årsak.

Betongavskallinger som følge av armeringskorrosjon ble observert på samtlige bruer bortsett fra Verjeskiftbrua. Hovedtendens var at skadene hadde dukket opp i eller bak reparasjoner, man mente dette skyldtes dels at det ikke var meislet nok ved skadeutbedring og dels at motstanden i reparasjonsmørtlene var høy, slik at det var begrenset hvilken beskyttelsesstrøm armering i reparasjonene hadde mottatt. Sistnevnte forhold er i de senere år blitt viet større oppmerksomhet (Polder and Peelen 2018). Strømtetthet på de fire broene i 2005 var i området 0,4 – 1,5 mA/m<sup>2</sup> betongoverflate, utfra en påtrykt spenning i området 2 V. Det ble påpekt at dette var relativt lavt og trolig årsaken til at armeringskorrosjon med tilhørende betongavskallinger med tiden hadde dukket opp.

### 3.9 Nerlandsøy

Nerlandsøy Bru befinner seg i Møre og Romsdal og var den første av bruene i Region Midt som ble beskyttet med ledende maling, AHEAD-systemet ble benyttet. Rehabiliteringen ble utført som et FoU-prosjekt der målet var å undersøke hvorvidt anodesystemet var egnet til katodisk beskyttelse av kystbruer. Rehabiliteringen av Nerlandsøy er viet stort fokus fordi designet man endte opp med langt på vei ble malen for rehabiliteringen av de tre andre bruene i region Midt.

Kapittelet 3.9 finnes i vedlegg A.

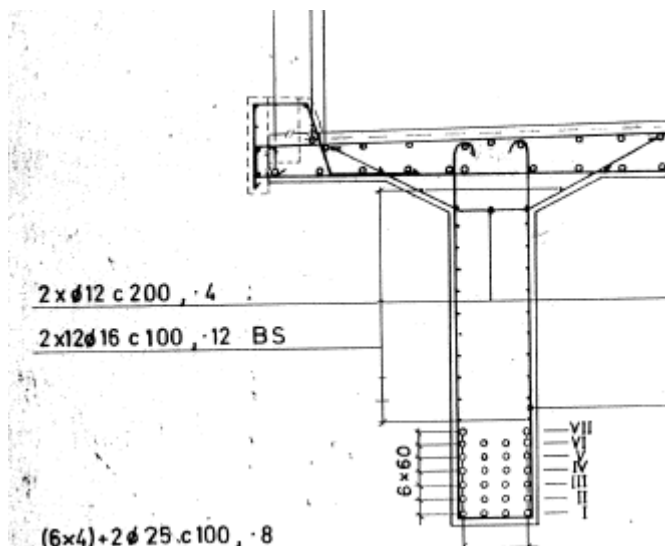
### 3.10 Verjeskiftbrua

Broen ble bygget i 1977 og er en ettspors-bro med total lengde 256 meter. I Figur 9 ses brua fra Hopen mot Veiholmen. På 90-tallet fikk broen en fullstendig mekanisk reparasjon da skader hadde oppstått. Forundersøkelser og rehabiliteringen var omfattende, det ble brukt mye tid på å lokalisere områdene med pågående armeringskorrosjon som enda ikke var synlig /registrerbart. Det ryktes at det ble utført meisling etter kartlegging av potensialmålinger med Bloodhound-systemet. Dette til tross, nye skader dukket med tiden opp i randsoner av reparasjoner og i 2000-2001 ble Verjeskiftbrua rehabilitert ved katodisk beskyttelse. Det benyttede anodesystemet var ELkinet- AHEAD med strømfordelingsbånd av sølv lagt i forsegling. Systemet var det samme som på Nerlandsøy.



Figur 9 Verjeskiftbrua sett fra Hopen-siden mot Veiholmen

Til dels er brokonstruksjonen tett armert, spesielt brudragere der det som lengdearmoring i feltmidte er benyttet kam.  $\varnothing 25$  armering i et antall varierende fra 12 – 30 stk. armeringsstenger. Under møteplassen er antallet kam.  $\varnothing 25$  mm i feltmidte 46. Figur 10 viser armeringstegning fra midtsnitt i felt 2,3 6 og 7, her er det benyttet 26 stk.  $\varnothing 25$  som underkantarmoring i drager. Som skjærarmoring er det bøylor av  $\varnothing 12$ mm med senteravstand 200 mm (i feltmidte) benyttet. Basert på enkel utregning er forholdet mellom armering- og betongoverflate i bunn av drageren i Figur 10 cirka 1,8 (beregnet pr løpemeter drager). Regnes hele drageren (minus kapitél) er tilsvarende tall 1,1. Forholdet mellom armerings- og betongoverflate, brukes ofte i katodisk beskyttelse for å anskueliggjøre armeringstettheten.



Figur 10 Armering i midtsnitt av drager på Verjeskiftbrua, felt 2,3,6 og 7.

Ved inspeksjon i april 2005 ble det ikke gjort observasjoner av betongskader på broen. Det ble derimot observert riss på broens to dragere, men disse hadde ikke ført til synlige brudd på strømfordelingsbåndene. Broen er inndelt i fire soner, Tabell 2 viser driftsdata og depolarisering for samtlige soner. Det fremgår av tabellen at mange av referanseelektrode viste lav depolarisering.

Tabell 2 Driftsdata og depolarisering fra Verjeskiftbrua i april 2005. Verdier hentet fra FDV-dokumentasjon.

Sone	Driftsspennning	Strømtetthet (betongoverflate)	Depolarisering over 100 mV	Depolarisering over 50 mV
1	2 V	0,7 mA/m <sup>2</sup>	4 av 8	6 av 8
2	2 V	0,7 mA/m <sup>2</sup>	3 av 8	8 av 8
3	1,95V	0,9 mA/m <sup>2</sup>	0 av 7	5 av 7
4	1,92V	0,7 mA/m <sup>2</sup>	3 av 7	6 av 7

Inspeksjonen i juni 2005 var en tilstandsvurdering av broen etter at katodisk beskyttelse var installert, det ble ikke utført depolariseringsmålinger. Ingen observasjoner av armeringskorrosjon eller betongskader ble gjort. Skadene man registrerte knyttet seg til lokal avflassing av malingen over anoden, spesielt over epoksyforseglinger av strømfordelingsbåndene (Østmoen 2007). Mangelfull forbehandling og stedvis tynn maling ble pekt på som mulig forklaring.

I september 2010 ble det katodiske anlegget inspisert og kontrollert (Riise 2011). Driftsdata og depolarisering for samtlige soner er vist i Tabell 3. I denne omgangen ble det også målt spenning mellom armering og forskjellige punkter i anoden, et til tider stort spenningsfall i forhold til avlest spenning i styreskap kunne registreres. Enkeltmålinger viste 0,9 V spenning, dette ble forklart med bakgrunn i mulig brudd på strømfordelingsbånd. Spesielt stort var spenningsfallet i sone 3 og 4, responsen på referanseelektrodene var også dårligst i disse sonene. Tallene markert med \* i tabellen står for at flere av referanseelektrodene av grafitt var blitt ustabile.

Tabell 3 Driftsdata og depolarisering på Verjeskiftbrua, september 2010 (Riise 2011).

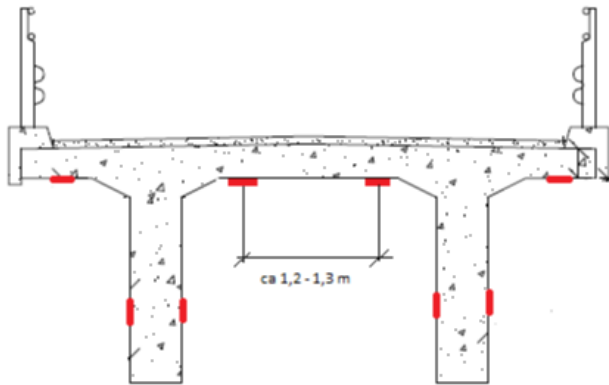
Sone	Driftsspennning	Strømtetthet (betongoverflate)	Depolarisering over 100 mV	Depolarisering over 50 mV
1	1,98V	0,47 mA/m <sup>2</sup>	2 av 8	6 av 8
2	1,98V	0,62 mA/m <sup>2</sup>	5 av 8	7 av 8
3	1,82V	0,57 mA/m <sup>2</sup>	0 av 7*	0 av 7*
4	1,82V	0,96 mA/m <sup>2</sup>	1 av 7*	3 av 7*

Det ble funnet få betongskader på broen og stikkprøver med hammer avdekket få bom. Et av de store problemene som ble oppdaget under inspeksjonen var knyttet til elektronikken. Styresystemet var gammelt og fungerte i liten grad. Modemene fungerte ikke, og anlegget logget ikke lenger verdier. Anbefalingen etter inspeksjonen var å skifte ut styresystemet til et nyere, samt å utbedre områder med avflassing av dekkmalings og anode og skifte ut strømfordelingsbånd med brudd.

### 3.10.1 Rehabiliteringen av Verjeskiftet Bru

Anbefalingen fra september 2010 ble fulgt opp. I 2011 ble Verjeskiftet rehabilitert. Før arbeidene startet ble broen grundig kartlagt for å finne fram til årsaken til skadene på anlegget. Betongskader ble reparert og nye referanseelektroder installert i hver sone, denne gangen ble det benyttet ERE 20. Områder med malingsavflassing ble slipt og fikk nyeste anode fra Protector AS påført, ZEBRA. Den gamle AHEAD-anoden fikk ligge der den fremsto som intakt. Strømfordelingsbånd ble skiftet ut ved områder der ny anode ble påført, da Protector AS hadde gått bort fra sølvbånd ble ZEBRA PDR benyttet. De nye båndene ble skjøtet på de eksisterende sølvbåndene. Entreprenøren som ble valgt har lang erfaring med både AHEAD og etter hvert også ZEBRA-systemet og har en egen prosedyre på oppgradering av gamle AHEAD- til ZEBRA-systemer som ble fulgt. Broen ble vasket og primet før ny dekkmalings ble påført på alle overflater.

På broen er strømfordelingsbåndene plassert som vist i Figur 11. Denne plasseringen ble valgt ved første katodiske beskyttelse i 2000 og man beholdt designet ved fornying i 2011. For hver fjerde meter går det strømfordelingsbånd i tverretning for å redusere spenningsfallet i anoden. Den store forskjellen etter rehabiliteringen i 2011 var etableringen av flere nye +kabler for mating av strøm til båndene, erfaringen fra første runde katodiske beskyttelse viste at spenningsfallet i felt til tider var stort. Grundig FDV fra entreprenøren viste tydelig at flere matepunkt til strømfordelingsbånd i anoden, reduserte spenningsfallet på båndene.



Figur 11 Plassering av strømfordelingsbånd på Verjeskiftbrua

Tabell 4 viser driftsdata og depolarisering for sone 1 og 2 etter oppstart. Det fremgår at strømtettheten økte samt at depolariseringen også er betydelig forbedret. Det har ikke vært mulig å fremskaffe data for sone 3 og 4.

Tabell 4 Driftsdata og depolarisering etter fornying av anlegget i 2011

Sone	Driftsspennning	Strømtetthet (betongoverflate)	Depolarisering over 100 mV	Depolarisering over 50 mV
1	1,98V	1,73 mA/m <sup>2</sup>	5 av 8	7 av 8
2	1,98V	2,09 mA/m <sup>2</sup>	8 av 8	8 av 8

Det har ikke vært mulig å fremskaffe rapporter fra inspeksjon av det katodiske anlegget. I tråd med vedlikeholdsprogrammet til Vegvesenet er imidlertid Verjeskiftbrua inspisert i flere runder, resultatet er registrert i brudatabasen Brutus. Ved siste hovedinspeksjon oppført i Brutus ble det ikke gjort observasjoner av verken delaminering (bom), avskallinger eller synlig armeringskorrosjon. Derimot registrerte man «svarteflekker» av anoden gjennom overflatebehandlingen og lokale områder der overflatebehandling og anode flasket av. Inspeksjonen var en hovedinspeksjon og det katodiske anlegget ble ikke inspisert. Det har i de senere år vært problemer med fjernovervåking og -styringen av det katodiske beskyttelsessystemet. Ved utløp av garantiperioden på tre år ble det av entreprenøren utført noe garantiarbeid i forbindelse med at lokal malingsavflassing hadde oppstått.

### 3.11 Tilfluktsrom i garasjeanlegg i Oslo, prøvelfelt med KB

For å undersøke i hvilken grad anodesystemet ZEBRA er kapabelt til katodisk beskyttelse av konstruksjoner med høy armeringstetthet og pågående armeringskorrosjon, var det nødvendig å lokalisere en armert betongkonstruksjon som oppfylte disse kriteriene. Av praktiske hensyn måtte dette være en konstruksjon der rehabiliteringsarbeider pågikk.

Nord i Oslo ligger en frittstående garasje i tre plan med søyler, dekke og dragere i armert betong. Konstruksjonen ble oppført i perioden 1972-1973 med kamstål og betongkvalitet B300. Da den ene halvdel av nedre plan er et tilfluktsrom er halve dekke over nedre plan også en del av tilfluktsrommet og dermed er armeringstettheten høy. Denne delen av dekket hadde, i motsetning til

de øvrige dekker i garasjen, ikke tidligere vært katodisk beskyttet. Over betongdekke var det vanlig Agb-asfalt, i forbindelse med pågående rehabiliteringsarbeider i garasjen ble asfalten fjernet, og det ble funnet omfattende betongavskallinger på dekke fra armeringskorrosjon. Etter entreprenørens første runde med meisling viste et grovt estimat at cirka 60% av dekkearealet hadde betongavskalling. De til dels store variasjonene i skadeomfang framgikk også tydeligere. Det var en klar tendens til størst skader i biloppstillingsplasser, mens større arealer av kjørebane sto igjen urørt etter første runde.

Ødegård og Lund AS var involvert i rehabiliteringen som rådgivere og takket være dem oppstod muligheten for å etablere et forsøksfelt. og Utfordringen var å finne et egnet område der prøvefelt beskrevet under fremgangsmåte kunne etableres. Forundersøkelsene dannet grunnlaget for plasseringen, dette er beskrevet nærmere i kapittel 4. Rehabiliteringsarbeidene pågikk under hele forsøket, det ble gitt tillatelse fra både styre og entreprenøren, Consolvo AS, til at forsøket kunne gjennomføres. Consolvo bistod i tillegg med etableringen av prøvefeltet og innspill ble gitt av Protector AS og hjelp fra Ødegård og Lund AS.

## 4 EKSPERIMENTELT

I oppgaven er flere metoder benyttet for å fremskaffe resultater, både velkjente og mer utradisjonelle. Til de ulike delmålene ble varierte forsøk utført. Tabell 5 gir en oversikt over benyttede metoder relatert til del 1 (prøvefelt) og del 2 (kartlegging av bruer). Flere av de velkjente metodene er godt beskrevet andre steder, disse finnes i tabellen. I de tilfeller det eksperimentelle prøveoppsettet avviker fra referansene er dette nærmere forklart under hvert enkelt delkapittel. Noen av metodene er benyttet både i del 1 og i 2, men med ulikt prøveoppsett.

Tabell 5 Benyttede metoder i oppgaven.

Hva	Benyttet	Ref
4.1 Bruundersøkelser	Bro	Se 4.1
4.2 Prøvefelt	Prøvefelt	Se 4.2
4.3 Armeringsoverdekning og -plassering	Begge	(Fletcher and Woolhouse 2012, Vegdirektoratet 2018)
4.4 Kloridprøver	Begge	(Vegdirektoratet 2014, Vegdirektoratet 2018)
4.5 Potensialmålinger	Prøvefelt	(Ebell, Burkert et al. 2018, Vegdirektoratet 2018)
4.6 Motstandsmålinger i betong	Prøvefelt	(Gowers and Millard 1999, Polder 2001)
4.7 Spenningsfall i anodemaling	Begge	(NS-EN 12696, pkt 6.2.1)
4.8 Prøving av heftfasthet	Begge	(Vegdirektoratet 2018)
4.9 Måling av motstand i anode, Verjeskiftbrua	Bro	--
4.10 Betongens relative luftfuktighet	Prøvefelt	(NS 3511:2014)
4.11 Tørrfilmtykkelse av overflatebehandling	Bro	--

### 4.1 Bruundersøkelser

Med tanke på å innhente langtidserfaringer fra katodisk beskyttede bruer med ledende maling, i tråd med delmål 2, var følgende tre bruer aktuelle å undersøke med brulift:

- Nerlandsøy, ved Fosnavåg, Møre og Romsdal
- Remøy (tidligere Nordre Vaulen) ved Fosnavåg, Møre og Romsdal
- Verjeskiftbrua, på Smøla, Møre og Romsdal

Status for de katodiske anleggene var ukjent og det var heller ikke mulig å oppnå kontakt med styreskapene via nett. Med denne bakgrunn ble det besluttet å utføre enkle inspeksjoner av de respektive anleggene. Følgende skulle undersøkes:

- Om anleggene var påslått
- Avlesning av spenning og strøm i de ulike sonene
- Avlesning av ON-potensial på referanseelektroden dersom mulig
- Kontroll av avleste verdier ved bruk av Multimeter på rekkeklemmer
- Visuell inspeksjon fra land for å se etter betongavskallinger og avflassing av dekkmalings og anode.

Forundersøkelsene skulle avgjøre hvorvidt det var hensiktsmessig å utføre en inspeksjon av de katodisk beskyttede bruene med lift.

Da det ikke hadde vært påtrykt spenning på Nerlandsøybrua på lang tid og det var usikkert hvor mye Remøy hadde vært i drift i de seneste år, ble Verjeskift valgt for inspeksjon med brulift. Det

eksperimentelle knyttet til del 1 ble utført på bruinspeksjon ved bruk av lift 25.april 2019. Utfra praktiske hensyn var det ønskelig å begrense bruk av destruktive metoder for å unngå forringelse av beskyttelseeffekten på bruene. Med denne bakgrunn måtte sår etter destruktiv prøvetaking repareres.

Grunnet tidsbegrensning ble prøvetaking utført på utvalgte lokaliteter spredt utover broen. På lokalitetene ble innledningsvis hammerbanking og fingertuppkontroll benyttet, dette for å søke etter delamineringer, altså skader under utvikling som enda ikke har medført synlig avskalling. Fingertuppkontroll ble benyttet fordi den er fint egnet til å avdekke delaminering av overflatebehandling som ikke er synlig. Med 4.8 Prøving av heftfasthet var hensikten å undersøke de mekaniske egenskapene til anoden og beskyttende overflatebehandling etter 19 år (AHEAD-systemet) og 8 år (ZEBRA-systemet). I tillegg kunne denne prøvetakingen si noe om langtidsbestandigheten av grensesjiktet mellom anode og betong ettersom den akkumulerte strøm i anoden over tid kan resultere i oppløsning av sementpastaen i grensesjiktet. For å undersøke den elektrokjemiske bestandigheten av anoden ble pin-motstanden målt og sammenliknet med produktdatabladet til AHEAD- og ZEBRA-anoden.

4.3 Armeringsoverdekning og -plassering ble benyttet for å kunne utføre 4.4 kloridprøver i profiler tilpasset overdekningen. Kloridprøver ble analysert for å undersøke hvorvidt polariseringen over lengre tid hadde resultert i en omfordeling av kloridioner mellom elektrodene (anode og armering) i det elektriske feltet. 4.7 Spenningsfall i anodemaling ble benyttet som et mål på strømfordelingen i anoden, dette sier noe om design og funksjonalitet av beskyttelsesanlegget. Bakgrunnen for bruk av 4.11 Tørrfilmtykkelse av overflatebehandling var å kontrollere om beskyttelseslaget over anoden hadde påkrevd tykkelse for å beskytte anodemalingen. Plassering av lokaliteter for prøvetaking er vist i kapittel 5.

## 4.2 Prøvefelt i garasje i Oslo

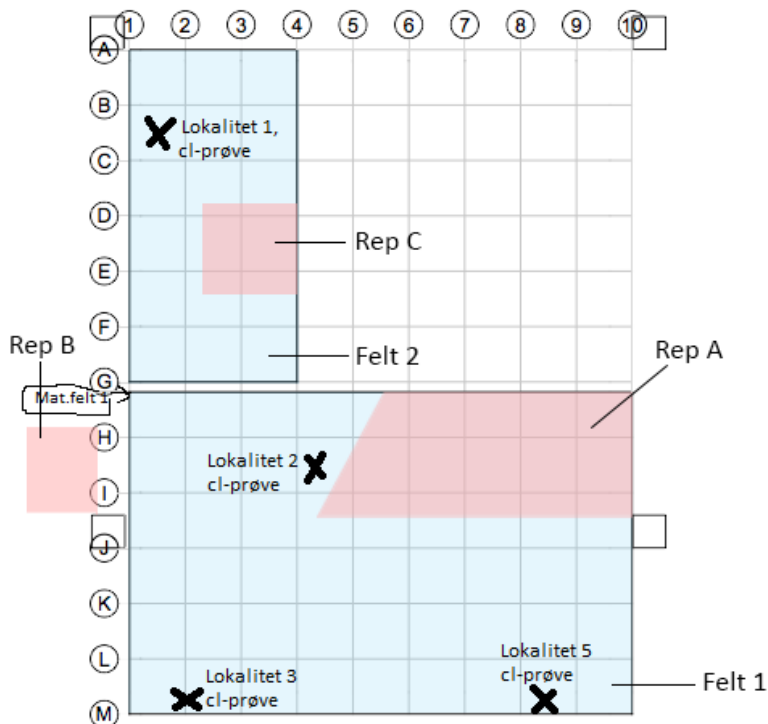
I del 1 ble et prøvefelt med katodisk beskyttelse etablert (bakgrunn finnes i 3.11). Figur 12 viser plassering og aksenummerering av feltet. Forundersøkelser ble gjort for å finne optimal plassering av prøvefeltet. Kriteriene var som følger:

- Høy armeringstetthet
- Områder med både høy og lav sannsynlighet for armeringskorrosjon.
- Områder med betongavskallinger, men også områder med kloridinfisert betong uten synlige skader.

Metode 4.3 ble benyttet for å finne overdekning samt plassering av armering. Dette var nødvendig både av hensyn til kriteriet angående høy armeringstetthet og i forbindelse med de videre undersøkelsene, kloridprøver, potensialmålinger og overflatemotstand (Wenner). Evaluering av sannsynligheten for armeringskorrosjon ble gjort med bakgrunn i sammenstilling disse metodene.

Utførelsen av prøvefeltet er beskrevet nedenfor, det samme er instrumentering og målinger som ble gjort særskilt for bruk i prøvefeltet. Under prøveperioden ble metode 4.7 Spenningsfall i anodemaling benyttet jevnlig som et verktøy for å undersøke spenningsfordelingen i anoden ettersom stadig flere strømfordelingsbånd ble tilkoblet. Formålet med dette var å undersøke hvor tett strømfordelingsbåndene må plasseres i situasjoner med ulik mengde armering. Kontroll av heftfastheten mellom anode og betong ble utført ved bruk av metode 4.8, mest for å verifisere at forbehandling og påføring var tilfredsstillende utført. Metode 4.10 omfatter fuktinnholdet i betongen og ble benyttet både i forkant og ved avslutning av forsøket. Det er den relative

fuktigheten som er målt, dette er ingen nøyaktig indikator for karakterisering av fuktinnholdet i betong, i denne sammenheng ble metoden benyttet for å se etter tendenser, først og fremst korrelasjon mellom kloridinnhold, målt overflatemotstand og relativ luftfuktighet.



Figur 12 Prøvefeltet og det etablerte aksesystemet. 50 cm grid.

#### 4.2.1 Utbedring av skader

På dekke i prøvefeltet hadde det tidligere vært benyttet vanlig Agb-asfalt, denne var fjernet i forkant av forsøket men rester med bitumen satt fortsatt igjen på betongoverflaten. Restene ble fjernet ved bruk av eksentrisk slipemaskin med diamantkopp. For å komme til ved ujevnheter i overflaten ble det benyttet mindre håndholdt slipeutstyr med diamantkopp. En ren betongoverflate var nødvendig både i forhold til forundersøkelser for og som forbehandling før påføring av anode på betongen.



Figur 13 Forbehandling. Sliping av betongoverflaten



Figur 14 Diamantsliping av bitumenrester med vinkelsliper.



I tråd med entreprenøren, Consolvo AS, sin praksis og ordinær prosedyre (Norsk Forening for Betongrehabilitering 2016) startet etableringen av prøvefeltet med lokalisering av skader. Hammerbanking ble benyttet for å finne størrelsen på felter med delaminering mellom armering og betong. Skadene ble avgrenset med vinkelsliper for ikke å skape ny delaminering som følge av meislingen (Figur 15). Figur 16 viser utstyret som ble benyttet til dette formålet. Armeringskontinuiteten ble kontrollert ved bruk av «CM-2 Rebar Continuity Tester», utstyret er vist i Figur 18. Det sendes en strøm gjennom armering og motstanden mellom testpunktene måles. Kravet ved katodisk beskyttelse, jf. NS-EN 12696, er motstand under  $1,0 \Omega$ . Ved manglene kontinuitet ble det sveiset fast jernbindertråd til armering i randsonene av prøvefeltet (Figur 17)

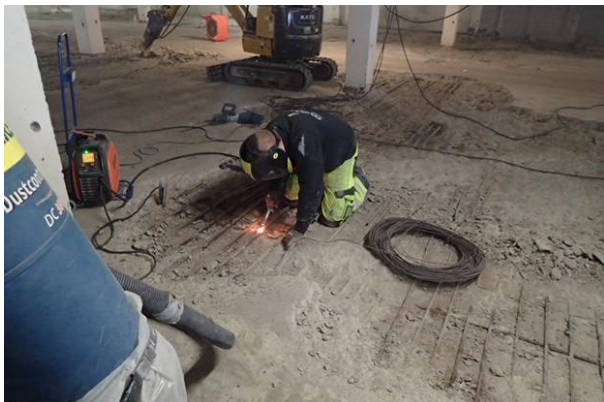


Figur 15 Avgrensning av skader ved å slisse før meisling



Figur 16 Håndmeisling av større skade i felt 1

Løs betong ble fjernet ved bruk av håndholdt meiselmaskin, en tyngre meisel ble benyttet til å fjerne overdekningen. For å fjerne betong mellom og under armering ble en lettere meiselmaskin benyttet. Figur 16 viser meisling i en større avskalling.



Figur 17 Etablering av armeringskontinuitet i felt 1 ved sveising



Figur 18 Kontroll av armeringskontinuitet med "CM-2 Rebar Continuity tester". Potensialet mellom punktene har falt umiddelbart til 0V etter påtrykt strømpuls, motstanden er  $0 \Omega$ . Armeringen er i kontinuitet.

I prøvefeltet var det tre bomfelt/ avskallinger som ble utbedret ved meisling. Reparasjonene ble forvannet og støpt ved håndmørtling. Ulik mørtel ble benyttet i hver av reparasjonene (Tabell 6), blandingsforholdet angitt i produktdatabladene ble fulgt. Figur 19 viser ferdig meislet og forvannet reparasjon.

Tabell 6 Reparasjonsmørtler i prøvefeltet

	Mørtel A	Mørtel B	Mørtel C
Antall kg benyttet	500 kg (20 sekker)	150 kg (6 sekker)	150 kg (6 sekker)
Blandeforhold	1 tråd med produktdatablad	1 tråd med produktdatablad	1 tråd med produktdatablad

Figur 19 viser ferdig meislet og forvannet reparasjon. Figur 20 viser utstøping med mørtel A. Reparasjonene ble glattet og sprayet med vann før plastfolie ble påført. Reparasjonene ble ettervannet de første fem dagene og fikk herde i 14 (mørtel C) og 16 dager (mørtel A og B).



Figur 19 Meislet og forvannet reparasjon i felt 1



Figur 20 Mørtlet og filset reparasjon i felt 1.

#### 4.2.2 Påføring av anodemaling og PDR-bånd.

Plasseringen av strømfordelingsbånd i prøvefeltet ble bestemt i samråd med Protector AS. De benyttede båndene var av merke «ZEBRA PDR», beskrevet i kapittel 3. Figur 30 viser prøvefeltet med plassering av strømfordelingsbånd med en avstand på cirka 70 cm.

På slipt og støvsugd overflate ble anodemalingen, ZEBRA, i første omgang påført i striper der strømfordelingsbåndene senere skulle monteres. Malingen er to-komponent og ble blandet med visp i cirka 5 minutter. Malingen ble påført med rull av mannskap i Consolvo for å sikre riktig påføringsteknikk. Figur 21 viser påføringen. Stripene fikk tørke til målt anodemotstand (pin) var under 40  $\Omega$ . Pin betyr motstanden som måles i  $\Omega$  ved å trykke målepinnene på et multimeter mot anodeflaten med 5 cm avstand, dette er omtalt senere. Det presiseres at Consolvo AS sin vanlige prosedyre ville vært å montere PDR-bånd i slisser i dekket som følge av kjøretøybelastning. Dette ble ikke gjort da man ønsket et likt design som på bruer og andre overflater som ikke er trafikkbelastet.



Figur 21 Påføring av anodemaling i striper der PDR-bånd senere skal limes.

En tosidig tape ble festet på stripene med ZEBRA-anode slik det brukes i systemet, strømfordelingsbåndene ble montert på disse. I siste etappe ble anodemalingen påført enhetlig med rulle over hele prøvefeltet. Anoden fikk tørke til målt pin-motstand var i området 20 – 80  $\Omega$ , ingen enkeltmålinger skulle være over 100  $\Omega$ , i tråd med produktdatabladet. Overflaten fikk påmontert tape der referanseelektroder senere skulle monteres, se Figur 22.



Figur 22 Montering av dobbeltsidig tape for feste av PDR-bånd til påført anodestripe



Figur 23 Enhetlig påføring av anode etter montering av PDR-bånd

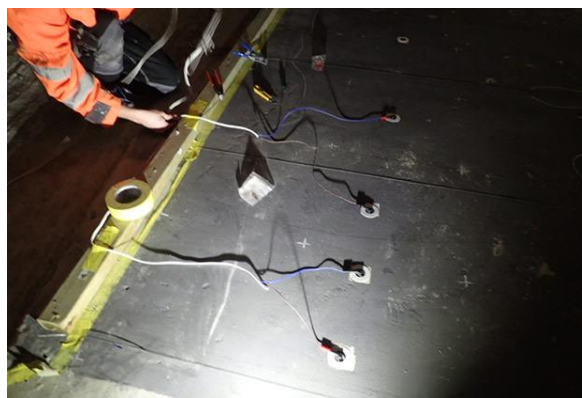
#### 4.2.3 Installasjon av det katodiske anlegget

Referanseelektrodenes for overvåking og vurdering av prøvefeltet var overflatemonterte i motsetning til vanlig praksis der de støpes inn i ulike dybder avhengig av hvilket lag armering det skal måles mot. I alt ble det montert 23 stk. sykehuselektroder av type Ag/AgCl. Disse gir stabile verdier med en gang. Kontrollmålinger med Cu/CuSO<sub>4</sub> referanselektroder viste samsvarende verdier etter omregning av forskjellen til referanseelektrodenes spesifikke potensial. Skulle man f. eks. støpt inn 23 stk. ERE 20, ville dette gitt store sår og en måtte vente til referanseelektrodenes ga stabile verdier.

Referanseelektrodenes ble limt til ruter på overflaten uten anodemaling (Figur 25). Plassering ble bestemt utfra kloridprøver og potensialmålinger, og er vist i Figur 30. Kabling fra referanseelektrodenes til nodebokser i loggeskapet ble utført ved bruk av isolert lampett-ledning med kjerne av 2 x 0,75 mm<sup>2</sup> kobberkabler. Kontaktene fra referanseelektrodenes ble avisolert og koblet til nodeboks som vist på Figur 26. En egen armeringstilkobling ble etablert for referanseelektrodenes, denne ble festet til nodeboksen i skapet.



Figur 24 Referanseelektrode av sølv/sølvklorid festet til betongoverflate uten anode



Figur 25 Kabling av referanseelektroder.

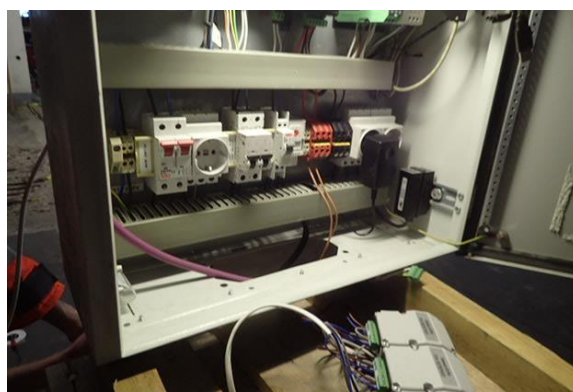


Figur 26 Ledninger fra referanseelektrodenes splittet og montert i nodebokser i styreskapet.

To armeringstilkoblinger av 1,5 mm<sup>2</sup> kobberkabel ble etablert i hver ende av feltet, plassering er vist på Figur 30, det ble boret i armeringsjern og selvgjengende skruer ble benyttet, avisolert kabel ble festet til skruen ved hjelp av kabelsko (Figur 27). Bananstikk (totalt cirka 70 stk. i hele feltet) ble benyttet for enkel måling av strøm gjennom kontaktene. Kablene ble ført til skap og skrudd fast på svart rekkeklemme (negativ), dette er vist i Figur 28.



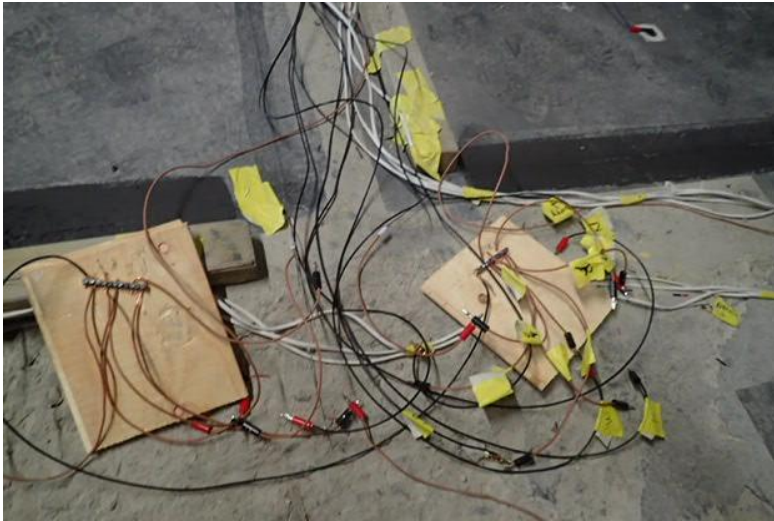
Figur 27 Etablering av armeringskontakt



Figur 28 Styreskap med rekkeklemme for anodekabel (rød) og armeringskontakt (sort)

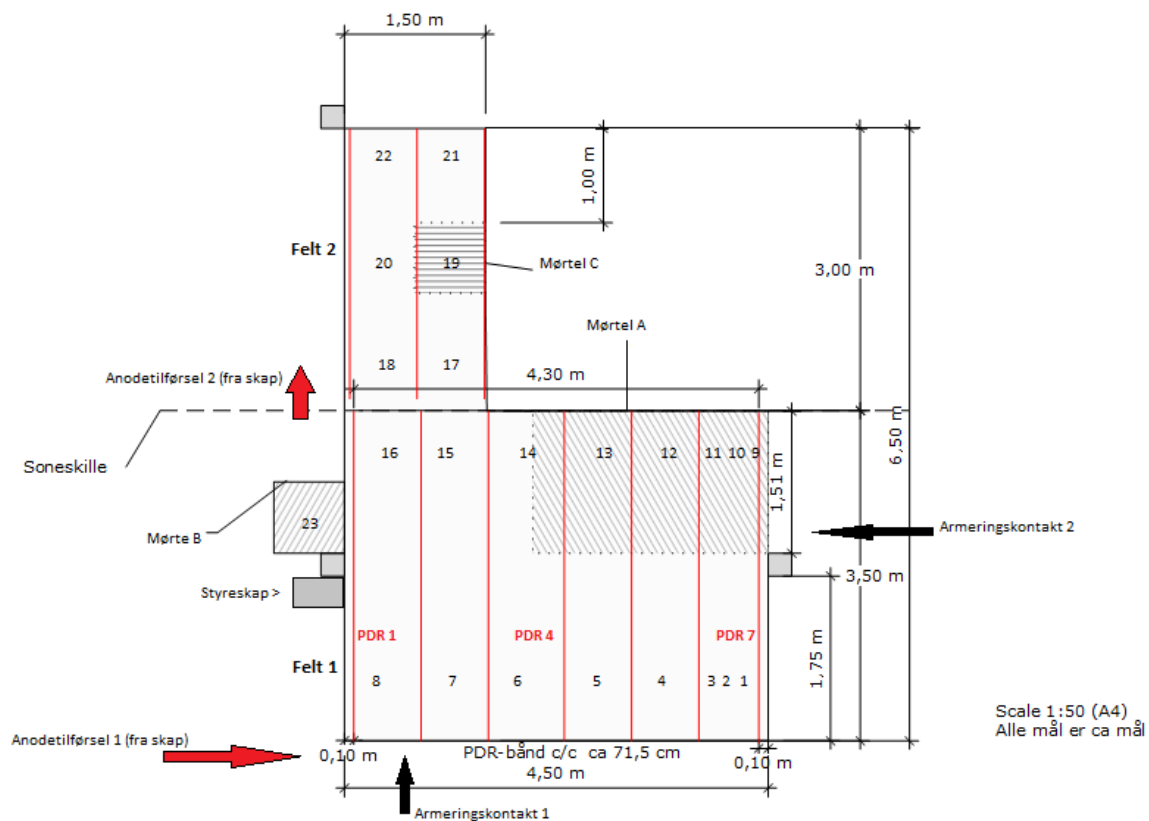
To anodekontakter ble montert i feltet, 1,5 mm<sup>2</sup> kobberkabel ble benyttet. I skapet ble avisolerte ender festet til rekkeklemmene, i andre enden ble avisolert kabel festet til monteringsskinne for tilkobling til strømfordelingsbåndene. Utstikkende ender av strømfordelingsbånd ble koblet med kobberkabler ved bruk av koblingsklemme («sukkerbit»). Kablene fra hvert ZEBRA PDR-bånd ble ført

til monteringskinnene der de ble festet til hver sin utstikkende kabel ved bruk av bananstikk. På denne måten var det enkelt å koble de ulike båndene til og fra anlegget samt å måle strømmen gjennom hvert bånd med multimeter. Monteringskinnen og tilkoblingene er vist i Figur 29.



Figur 29 Monteringsskinne ved anodetilførsel 2 for tilkobling av PDR-bånd og enkel måling av strøm.

En skisse av prøvefeltet med strømfordelingsbånd (PDR), nummerering og plassering av referanseelektroder og reparasjoner er vist i Figur 30. Her ses også anode- og armeringskontakter (tilførsel). Foto av prøvefeltet ( Figur 31) viser felt 1 og 2 samt reparasjonsmørtlene.



Figur 30 Prøvefeltet med plassering av PDR-bånd, referanseelektroder, kabling og reparasjoner



Figur 31 Foto av prøvefelt og reparasjonsmørtlene

#### 4.2.4 Instrumentering for måling av motstand i anode

I prøvefeltet ble den elektriske motstanden i anodemalingen målt ved to ulike metoder, henholdsvis «pin-motstand» og «kvadratmotstand». Motstanden målt både før polarisering og ved demontering av prøvefeltet.

Målinger av pin-motstand ble utført ved bruk av multimeter «*HIOKI 3244 CARD HiTester*» med to fastmonterte prøvepigge som ble plassert i cirka 5 cm avstand på anoden. Pin-motstand ble målt med  $\Omega$ -funksjonen på multimeteret. Målinger ble utført i etablert rutenett på 50 X 50 cm, i Figur 32 ses multimeteret og prøvepiggen som ble benyttet.

Usikkerhetene er knyttet til prøvetakingen. Piggene er løse og avstanden som benyttes ved hver måling vil gi variasjoner i utslag på den målte motstanden. Den andre usikkerheten ligger i at arealet av piggespissen er svært begrenset, dermed kan lokale forskjeller i tilstanden på anoden påvirke resultatet. I det praktiske benyttes metoden mest som en indikasjon på når anoden er herdet tilstrekkelig til at beskyttende overflatebehandling kan påføres. Dette er i praksis tilstrekkelig for å vise nivået til motstand i herdet anode som skal være under 100  $\Omega$



Figur 32 Prinsipp for måling av pin-motstand (i anodemaling)

Med bakgrunn i forholdene beskrevet ovenfor ble det etter samtale med Protector AS ved Filip Johansen bestemt å lage et prøveutstyr for å kunne måle kvadratmotstanden i anodemaling. Tilsvarende utstyr er tidligere benyttet av Franz Pruckner, under hans arbeid med sine doktorgrader og som tidligere ansatt i Protector AS.

Det ble skåret ut en pute av trykkfast isolasjon med dimensjon 10 X 10 cm. På hver ende av prøveputen ble det festet et sølvbånd i to lag. Sølvbåndene ble metallisk forbundet til hver sin avisolerte 1,5 mm<sup>2</sup> kobberkabel. I motsatt ende ble bananstikk montert på avisolert kabel for tilkobling til Multimeter. Figur 34 viser ferdig montert utstyr for måling av kvadratmotstand. Tilkoblingene ble kontrollert ved å måle motstand mellom sølvbånd og bananplugg.



Figur 33 Instrumentering for måling av kvadratmotstand i anoden

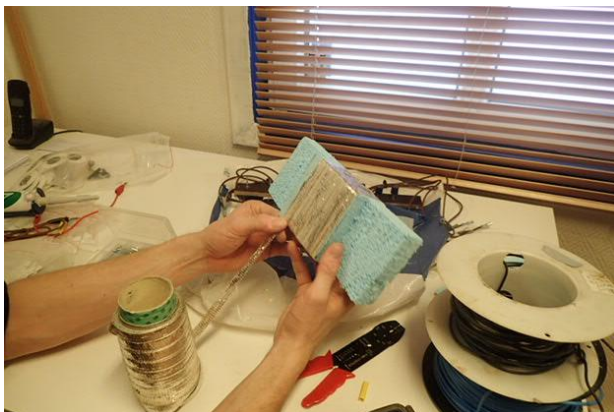


Figur 34 Måling av kvadratmotstand i anoden

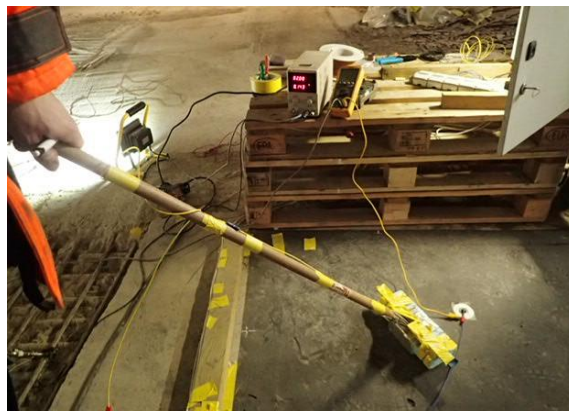
Kvadratmotstanden i anodemalingen ble målt ved å koble bananpluggene til hver sin utgang på et Multimeter av type «HIOKI 3803 Digital Tester». Prøveputen ble presset mot anodemalingen og motstanden ble målt (Figur 34). I tilfluktsrommet ble målingene utført i det etablerte rutenettet 50 X 50 cm, både før og etter polariseringen (Figur 12).

#### 4.2.5 Instrumentering for måling av strømgjennomgang i anodemaling

En pute med størrelse 10 X 10 cm ble skåret ut av en isolasjonsplate med tykkelse 50 mm. Overflaten ble heldekket med sølvbånd som ble festet på overflaten av puten med en avstand slik at hele prøveflaten var tildekket. Figur 35 viser puten etter at båndet er påført. Sølvbåndet ble koblet med avisolert 1,5mm<sup>2</sup> kabel ved bruk av skjøtehylse. Avslutningsvis ble motstanden mellom sølvbånd på underside av puten og bananstikk kontrollert til 0  $\Omega$ . Designet er basert på Franz Pruckner sin ide og etter videre samtale med Filip Johansen (Protector AS) og Olav Ødegård (Ødegård og Lund AS). Figur 36 viser ferdig montert strømpute på kosteskaft, tilkoblet positiv utgang på lab-likeretter.



Figur 35 Instrumentering av strømpute for måling av strømgjennomgang i anoden..



Figur 36 Måling av strømgjennomgang i anoden. Prøveputen er tilkoblet +, armeringen - utgangen på en lab-likeretter.

Puten ble koblet til positiv pol på en likeretter (*RND Lab DC Power Supply RND 320 KD30*) som var innstilt på 2 V likespenning, armeringskontakt ble tilkoblet negativ pol. Ved å plassere puten i et fastlagt rutenett på 50 X 50 cm ble strømgjennomgangen i prøvefeltet målt. For hver rute ble størrelsen på strømmen registrert. Puten ble påtrykt i 5 sekunder. Etter denne tiden ble potensial på en fast bestemt referanseelektrode registrert. På denne måten var det mulig å måle lokal strømgjennomgang mellom strømputen (en «mobil primæranode på anodemalingen») og armering, samt å danne seg et inntrykk av den umiddelbare polariseringen på armering.

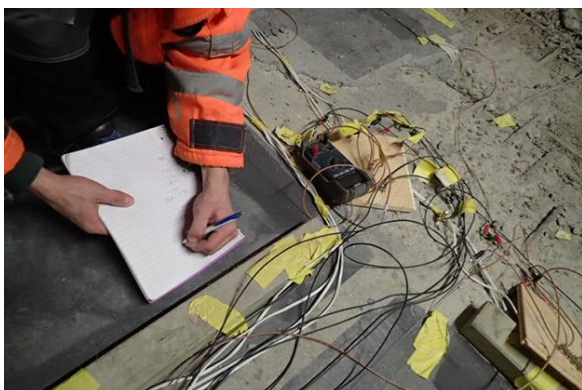
Ved avslutning av forsøket i prøvefeltet ble prøveruter på 10 X 10 cm isolert fra feltet ved å slisse med vinkelsliper, puten ble påtrykt i rutene og strømmen ble registrert på tilsvarende måte. Planen var å slisse med vinkelsliper i randsonen av målefeltet og ned til armeringen for å måle strømmen som gikk rett ned til armeringen. Denne delen ble det ikke tid til å utføre. Dette ble gjort som et supplement for å få mer erfaring med strømgjennomgangen mellom anode og armering.

#### 4.2.6 Strømfordeling i prøvefeltet

Fordelingen av strøm i prøvefeltet ble ved slutten av prøveperioden beregnet ved «eliminajonsmetoden». Før prøvefeltene ble revet, ble reparasjoner og ulike områder av feltet delt opp ved å slisse gjennom anode og PDR med vinkelsliper. Alle PDR-bånd var tilkoblet og nedgangen av strøm ble registrert for hvert delfelt/reparasjon som ble fjernet. Følgende fremgangsmåte ble benyttet:

- Tilkoblingen til PDR-bånd på den ene siden av prøvefeltet ble koblet ut slik at hvert strømfordelingsbånd var matet kun fra en side.
- Spenningsfallet i strømfordelingsbåndet fra matepunkt til motsatt ende ble registrert.
- Prøvefeltet fikk stå til avlest strøm på loggeren var i stabilt område.
- Rundt hvert område som skulle testes ble det slisset med vinkelsliper med 6 mm tykt blad (Figur 38).
- I rekkefølge ble strømfordelingsbåndene i hver testzone kappet slik at sonen var isolert fra anodesystemet (Figur 39).
- Etter hver isolering ble strømmen i feltet avlest på loggeren.





Figur 37 Måling av strømgjennomgang i PDR-bånd med Multimeter



Figur 38 Måling av lokal strømgjennomgang. Isolering av anode ved slissing med vinkelsliper med tykt blad



Figur 39 Isolering av reparasjon A i felt 1 for måling av strømgjennomgang.

#### 4.2.7 Styring av det katodiske anlegget

Prøvefeltet med katodisk beskyttelse ble styrt via eget styreskap på stedet. Utstyret ble lånt fra Protector AS, skapet inneholdt likeretter, styreenhet (Camur II Controller), bus-rekke for tilkobling til referanseelektroder, Camur II P4 og harddisk. Programvaren «Tight VNC Viewer» ble installert for oppkobling med egen PC til harddisken. Loggdata ble lastet ned for hver periode.

Fra programmet var det også mulig å justere driftsspenningen samt å legge inn fremtidige depolariseringer. Ved måling av depolarisering ble standardoppsettet benyttet, dette innebærer at opptak av instant off-potensialer ble gjort 0,5 sekunder etter at strømmen var brutt. Deretter fulgte et hyppig opptak av verdier før verdiene ble registrert en gang hvert 15.minutt. Det ble valgt å utføre depolarisering over en periode på 4 timer. Systemet er koblet slik at registreringer av potensial foregår med hyppigere intervall like etter at depolarisering starter.

#### 4.3 Måling av armeringsoverdekning og plassering

Måling av armeringens overdekning ble utført ved bruk av Covermeter, prinsippet er basert på elektromagnetisme og instrumentene fungerer i realiteten som en metaldetektor. Prinsippet er ytterligere beskrevet i (Fletcher and Woolhouse 2012). Ved utføring av målingene ble prosedyren i (Vegdirektoratet 2018) fulgt.

I tilfluktsrommet ble måling av armeringsoverdekning og -plassering kartlagt på tre lokaliteter i prøvefeltet, plasseringen er vist i Figur 12. Et Covermeter av merke «Profometer 3» ble benyttet, begrensningen ved dette instrumentet er cirka 60 mm og unøyaktigheten øker for økende overdekning. Da diameter på armeringen var kjent fra opphugninger på stedet ble dette stilt inn for mest mulig nøyaktig resultat. Figur 41 viser «Profometer 3». For å registrere større overdekning ble «HILTI-skanner FS 10» benyttet, dette instrumentet registrerer overdekning inntil 120 mm. HILTI-skanner FS 10 gir avlesning med intervall 5 mm og viser rutearmeringen som et bilde på displayet. Det plasseres på betongoverflaten der overdekning skal lokaliseres et laminert målenett som er på 60 X 60 cm, dette er vist i Figur 40. Oppgitt overdekning ble verifisert ved manuell måling i opphugninger.



Figur 40 «HILTI FS 10» plassert på rutenett for skanning av overflaten (armeringsoverdekning og plassering).

Under bruinspeksjonen ble armeringsoverdekning og -plassering kartlagt ved bruk av «Profometer 3». Det ble utført målinger på hver lokalitet med areal ca. 1m<sup>2</sup>, formålet med målingene var å bore ut kloridprofiler tilpasset overdekningen.



Figur 41 Måling av armeringsoverdekning og -plassering ved bruk av "Profometer 3"

#### 4.4 Kloridprøver

Prøving av kloridinnholdet i betong er utført ved utboring av støvprøver for senere kjemisk våtanalyse. Utboringen av betongstøvet fulgte i all hovedsak fremgangsmåten som er beskrevet i (Vegdirektoratet 2018), avvik fra metoden er omtalt nedenfor for henholdsvis tilfluktsrommet og brua.

#### 4.4.1 Kloridprøver i tilfluktsrom

Betongstøv til senere analyse i laboratorium ble samlet ved utboring av profiler fra overflaten i to parallelle borehull, til selve utboringen ble et Ø25 mm slagbor benyttet. Profilene ble tilpasset armeringsoverdekning, det ble boret i sjikt a 10 mm inntil 100 mm dybde. For hver profil ble borstøvet samlet i ZIP-pose etterfulgt av støvsuging med industristøvsuger før neste profil. Dette er viktig for å oppnå riktig kloridinnhold slik at den ene prøven ikke påvirker den neste. Det ble tatt fem lokaliteter som resulterte i totalt 50 stk kloridanalyser. Til kjemisk våtanalyse ble «Quantab-metoden» benyttet. Borstøv løses i syre, nøytraliseres med kalsiumkarbonat (bufferløsning), og avlest nivå viser kloridinnholdet i løsningen. Benyttet fremgangsmåte for kloridanalysene er beskrevet i (Vegdirektoratet 2014), avvik fra metoden er omtalt nedenfor. Det presiseres at håndboken er utgått og at Vegdirektoratet har gått bort fra kloridanalyser ved bruk av Quantab da de anser unøyaktigheten til å være for stor. Dog gir den klare indikasjoner for kloridinnholdet. Prøvene gir raskt svar som i dette tilfelle var viktig i bestemmelse av armeringstilstand i prøvefeltene. Laboratoriet hos Ødegård og Lund AS ble benyttet, med nødvendig utstyr for å utføre analysen.

Kloridinnholdet i betong oppgis i tråd med vanlig praksis i vektprosent klorider av sementvekt (Angst, Elsener et al. 2009). Dette er den største usikkerheten ved prøvetakingen, da betongresepten for tilfluktsrommet var ukjent måtte sementvekt antas. Basert på erfaring med tilsvarende konstruksjoner fra 70-tallet med betongkvalitet B300, er en sementvekt på 280 kg/m<sup>3</sup> betong antatt. Den andre usikkerheten knytter seg til hvor representativt borstøvet er og til det faktum at betong er et inhomogent materiale. Påtreffes tilslag i en punktprøve kan kloridinnholdet i profilen vise lavere kloridinnhold enn hva som er tilfelle for sementpastaen i samme dybdesjikt. Denne usikkerheten ble forsøkt redusert ved å bore to parallelle hull og ved å benytte Ø25 mm bor.

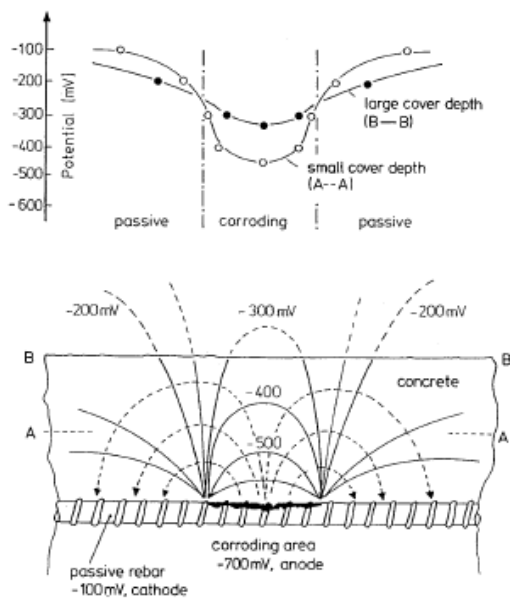
#### 4.4.2 Kloridprøver på bruinspeksjonen

Utboring av kloridprøver på Verjeskiftbrua fulgte samme oppsett som i tilfluktsrommet. I tråd med Vegvesenets håndbok R 211 (Vegdirektoratet 2018) ble det boret tre parallelle borehull med Ø 20 mm der støvet ble samlet i trakt påmontert ZIP-pose. Prøvene ble tatt i 3 lokaliteter, hvorav to på brudrager og en i underkant brudekke. Formålet med kloridprøvene på bruinspeksjonen var å undersøke hvorvidt den akkumulerte strømmen over 19 år hadde resultert i en omfordeling av kloridioner mellom armering og anode, dog var kloridprofilene før installasjon av KB-anlegget ukjent. Med bakgrunn i dette var det ønskelig å redusere usikkerhetene knyttet til analysen. Borstøvet ble dermed sendt til analyse hos SINTEF der de ble analysert ved potensiometrisk titrering.

### 4.5 Potensialmålinger

Prinsippet med potensialmålinger går ut på å måle potensialforskjellene mellom anode- og katodeområder på armering som vil oppstå ved armeringskorrosjon. Disse potensialene måles ved hjelp av en referanseelektrode (med kjent og stabilt potensial). Utførelsen av målingene fulgte beskrivelsen gitt i (Vegdirektoratet 2018). Potensialmålinger er mye anvendt i praksis og er godt beskrevet i (Ebell, Burkert et al. 2018). Det er velkjent at potensialmålingene må tolkes med omhu som følge av at de avleste potensialene kan påvirkes av en rekke faktorer beskrevet i (Ebell, Burkert et al. 2018) og (Pruckner 2002). Av hovedfaktorer nevnes mangel på oppløst oksygen i porevannet som følge av høy vannmetningsgrad (innebærer en polarisering i katodisk retning). For eksempel vil EKP målinger i bunn av brusøyler som står i – og suger opp vann, gi svært negative verdier som kan feiltolkes som at armeringen er i korrosjonstilstand. Karbonatisering og overdekningens størrelse er også faktorer som kan påvirke avlest potensial. Potensialgradienter blir for eksempel vanskeligere å

oppdage ettersom overdekningen  $\varnothing$ ker (Pruckner 2002), dette er vist i Figur 42 som illustrerer hvordan ekvipotensiallinjer prinsipielt brer seg ut i betongen fra lokale anoder på armeringen.



Figur 42 Ekvipotensiallinjer ut fra lokale anoder på armering (Elsener, ouml et al. 1990)

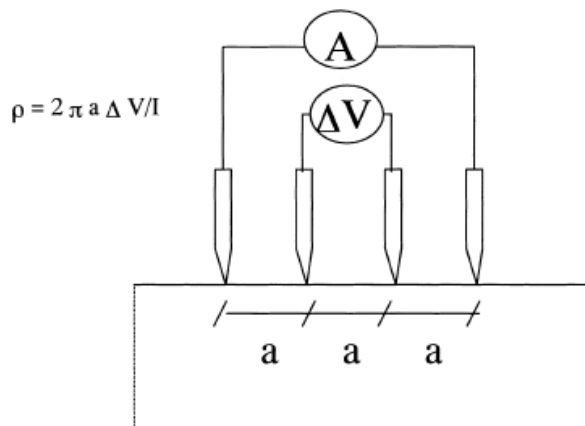
Potensialmålinger i prøvelfeltet ble utført med håndholdt referanseelektrode av mettet kobber/kobbersulfat. Før målingene ble betongoverflaten slipt slik at referanseelektroden var i direkte kontakt med betongoverflaten. Det ble sørget for armeringskontinuitet ved at armeringen i to randsoner av prøvelfeltet ble sveiset sammen med sveisetråd. Armeringskontinuitet betyr at all armering har elektrisk kontakt.

I prøvelfeltet ble potensialmålingene utført i et rutenett med måleavstand 50 cm. For å sikre kontakt mellom referanseelektrode og betong ble målepunktene oppfuktet og holdt fuktig i en time før målingene ble utført. Et ordinært multimeter med høy indre motstand ble benyttet til avlesning av potensialet mellom armering og håndholdt referanseelektrode.

To aspekter ble vurdert ved utføring av EKP-målingene. For det første ble avleste verdier vurdert i forhold til veiledende grenser i ASTM-C876-standard, der det er forsøkt å tilknytte potensialintervaller til ulik sannsynlighet for armeringskorrosjon. Grensene er omdiskuterte og i (Ebell, Burkert et al. 2018) er det påpekt at dette kriteriet alene ikke bør ilegges for stor vekt ved tolkningen av resultater, hovedfokus bør være lokalisering av potensialgradienter. Dette var det andre aspektet ved utføring av EKP-målingene.

#### 4.6 Motstandsmålinger i betong

I tilfluktsrommet ble betongens overflatemotstand målt ved bruk av «Resipod Proceq» som består av 4 separate elektroder av rustfritt stål. Selve målingen utføres ved at prøveutstyret presses mot betongoverflaten. Prinsippet baserer seg på at det sendes en vekselstrøm mellom de to ytterste elektrodene (Hornbostel 2015). De midterste elektrodene registrerer det resulterende potensialfallet, basert på Ohms lov omregnes det til motstand, Figur 43 viser prinsippet. Metoden benyttes mye til praktisk prøvetaking i felt og er beskrevet i (Polder 2001) og (Gowers and Millard 1999) sammen med begrensninger og usikkerheter knyttet til metoden.



Figur 43 Prinsippet for bruk av 4-punktselektrode (Wenner) for å estimere motstanden i betong (Polder 2001).

I tilfluktsrommet ble målinger utført i det etablerte 50 X 50 cm-rutenettet. Avstanden mellom elektrodene på Resipod var 35 mm. Det ble tatt 5 parallelle målinger per lokalitet og gjennomsnittsverdien ble regnet ut. I litteraturen er det ofte gjort forsøk på å tilknytte betongens resistivitet opp mot sannsynligheten for armeringskorrosjon, se tabell 1 i (Hornbostel, Larsen et al. 2013). Da korrosjonsprosessen består av flere partielle prosesser (katodisk, anodisk og ohmsk) som i ulik grad påvirkes av betongens resistivitet ble det i (Hornbostel, Angst et al. 2016) funnet at slike grenseverdier i praksis ikke eksisterer, riktignok var dette bulk-resistivitet. Motstandsmålingene ble med denne bakgrunn benyttet sammen med kloridprøvene og potensialmålingene for å få et bedre tolkningsgrunnlag angående lokalisering av steder med høy sannsynlighet for armeringskorrosjon. Dessuten ble de benyttet for å se tendenser i ulike områder av prøvefeltet knyttet opp mot strømfordeling.



Figur 44 Måling av betongens overflatemotstand ved bruk av "Resipod Proceq" (Wenner)

#### 4.7 Spenningsfall i ledende anodemaling

Punkt 6.2.1 i NS-EN 12696 omhandler anodesystemer med organisk ledende belegg. Her er det fremhevet at kombinasjonen av strømfordelingsbånd (i standarden kalt primæranoder) og ledende anodemaling skal være slik at «prosjektert anodeytelse oppnås». Videre er det gitt at avstanden mellom strømfordelingsbånd skal være slik at variasjonene i anodestrømmen som skyldes motstand i

det organisk ledende belegget (malingen) ikke overskrider 10% av påtrykt spenning, målt som et spenningsfall i anoden, mellom strømfordelingsbåndene.

Ved å benytte et multimeter ble spenningsfallet i anodemalingen målt fra strømfordelingsbåndene og ut i sekundæranoden. Dette ble gjort både på bruinspeksjonen og i tilfluktsrommet. En kontakt til båndene ble sikret ved å montere bananplugg på strømfordelingsbåndet, på bruinspeksjonen ble kabel trukket fra rekkeklemme i styreskap. Prøvepiggen for testing i anoden ble tilkoblet multimeterets andre inngang. Målinger ble utført i etablert rutenett på 50 X 50 cm (tilfluktsrom, vist i Figur 45) og med lavere avstand for å registrere gradienter ut fra båndene. På bruinspeksjonen var benyttet avstand mellom målepunktene 10 cm, med lavere avstand umiddelbart ut fra epoksyforsegling av strømfordelingsbåndene.



Figur 45 Spenningsfall i anode ut fra PDR-bånd målt med multimeter i etablert rutenett.

#### 4.8 Prøving av heftfasthet

Heftfastheten av anoden til betongen ble testet på bruinspeksjonen og i tilfluktsrommet. Utførelse av metoden er beskrevet i (Vegdirektoratet 2018) og følger i hovedtrekk NS-EN 1542 «Produkter og systemer for beskyttelse og reparasjon av betongkonstruksjoner. Prøvmetoder. Måling av heftfasthet ved uttrekksprøving».

Ø 60 mm metallkopper ble limt til overflaten med to-komponent epoksyylim, på Verjeskiftbrua ble hurtigherdende epoksy benyttet på grunn av begrenset tid. Etter herding ble det brukt tilpasset kjernebor rundt de pålimte koppene og det ble boret gjennom overflatebehandling, anode og noen millimeter ned i betongen/reparasjonsmørtelen. Det håndholdte hydrauliske prøveutstyret som ble benyttet til uttrekksprøvingen er vist på Figur 47. Kraft ble påført med jevn hastighet til brudd. Avtrekksverdien avlest på manometeret ble konvertert til MPa og bruddflaten ble registrert.

I tilfluktsrommet ble det tatt en prøveserie bestående av totalt 3 heftprøver. Plasseringen av prøveserien er vist i Figur 46. Prøvingen ble utført for å måle heftfastheten av anodemalingen til betongunderlaget.



Figur 46 Feste av  $\varnothing$  60 mm heftkopper til anoden ved bruk av to-komponent epoksy.



Figur 47 Montering av avtrekksutstyr for testing av heftfastheten til anoden.

På broen ble det tatt heftprøver på 7 lokaliteter, totalt 20 enkeltprøver, sted for prøvetaking er vist i Figur 86. En lokalitet besto av tre enkeltprøver i motsetning til beskrevet fremgangsmåte i (Vegdirektoratet 2018), med bakgrunn i at prøvene er destruktive og et ønske om å fordele tilgjengelige kopper over flere områder. Med brulift er det dessuten begrenset med tid.

#### 4.9 Motstand i anodemaling på Verjeskiftbrua

Målinger av pin-motstand i anoden på Verjeskiftbrua ble utført på tilsvarende måte som pin-motstand i tilfluktsrommet, fremgangsmåten er beskrevet nærmere under 4.2.4 Instrumentering for måling av motstand i anode. Prøvepiggene fra Multimeter ble plassert med cirka 5 cm avstand på anoden. For tilkomst måtte beskyttende overflatebehandling (tykkfilmsmaling av akryl) og primer (AHEAD Multiprimer) lokalt fjernes, en tynn flat skrutrekker ble brukt til dette. Etter målingene ble hullene tettet med en tykkfilmsmaling av akryl beregnet for utendørs bruk på betongkonstruksjoner.

#### 4.10 Måling av betongens relative luftfuktighet.

Målingene ble utført basert på NS 3511:2014. *Måling av relativ fuktighet (RF) i betong.* Det ble boret hull  $\varnothing$ 12 mm i ulike dybder: 0-20, 0-40, 0-60, og 0-80 mm. Prøvene ble utført i ulike dybder for å se om det kunne måles forskjell i relativ fuktighet i de ulike dybdeintervallene, og om kloridprofilene ga påvirkning. Hullene fikk stå i et døgn før prøveprobe ble plassert. Probene ble montert i overflaten og tettet med plastelina. Etter et døgn var det mulig å avlese lufttemperatur, duggpunktstemperatur og relativ luftfuktighet i borehullet.

#### 4.11 Tørrfilmtykkelse av beskyttende overflatebehandling

Ved bruk av en tapetkniv og en bred flat skrutrekker ble små flak av beskyttende overflatebehandling over anoden skåret ut på Verjeskiftbrua. Rester av anode og slemmemasse/semmenthud som fulgte med ble forsiktig slipt vekk med sandpapir. Ferdig preparert malingsflak ble målt med standard mikrometerskrue. Tykkelsen ble sammenliknet med materialleverandøren sin anvisning.



## 5 RESULTATER

### 5.1 Plassering av prøvefelt

Tabell 7 og Tabell 8 viser resultatet fra henholdsvis potensialmålinger og motstandsmålinger (Wenner) i etablert rutenett (50 x 50 cm) i prøvefeltet. Rutenettet er vist i Figur 12.

El	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	-383	-492	-496	-498						
B	-467	-401	-432	-440						
C	-436	-410	-398	-436						
D	-446	-482	Mørtel C							
E	-394	-437								
F	-416	-381	-446	-452						
G	-375	-346	-394	-469						
MF1	-381	-282	-341	-392	-390					
H	-435	-385	-459	-470	-488			Mørtel A		
I	-296	-302	-417	-462	-447					
J	-132	-165	-220	-328	-324	-292	-323	-381	-336	-271
K	-164	-193	-120	-284	-274	-170	-128	-142	-146	-172
L	-144	-128	-141	-153	-179	-163	-172	-193	-220	-245
M	-255	-182	-172	-180	-243	-231	-201	-198	-212	-220

Tabell 7 Potensialmålinger før etablering av prøvefelt. Alle tall i mV vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	42,7	17,8	15,1	12,6						
B	11,5	13	11,4	10,2						
C	16,5	13,2	12,8	12,9						
D	15,8	17,9								
E	18,7	17,8	Mørtel C							
F	15	12,6	13,9	11,5						
G	17,3	23,2	14	16,3						
MF1	93	511,7	156,5	78,3	32,1					
H	23,7	359,3	20,2	111	17,5			Mørtel A		
I	519,8	257,2	69,9	55,8	34,1					
J	756,3	169,3	138,8	44,4	258,7	63	96,1	42,5	95,7	26,9
K	197	295,2	342,8	50,5	36,1	113,9	229,8	184,4	72,2	116,1
L	257,8	113,2	130,4	106,8	88,8	97,8	123,9	146,8	138,8	51,6
M	129,7	75,7	90,7	70,9	70,1	50,2	51,6	18,8	46,6	44,3

Tabell 8 Motstandsmålinger (Wenner) før etablering av prøvefelt. Alle tall i kΩ

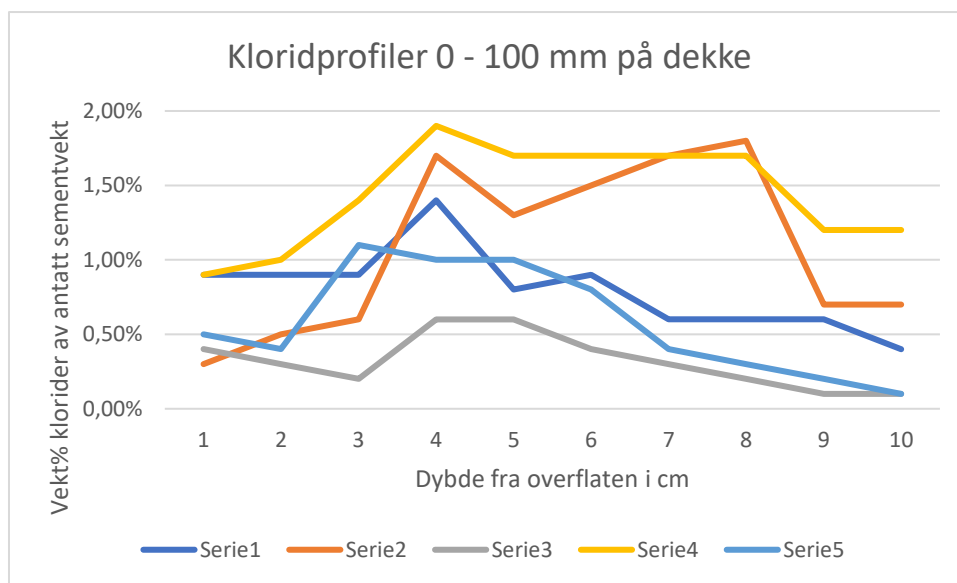
I Tabell 9 er resultatene fra forundersøkelser satt sammen. Overdekning, kloridinnhold, potensialmåling, motstandsmåling og armeringstetthet er sammenstilt for hver lokalitet. Sammen dannet dette tolkningsgrunnlaget for plassering av prøvefeltet og referanseelektrodene.

Tabell 9 Resultater med sammenstilling av forundersøkelsen i tilfluktsrommet.

Lokalitet	1	2	3	4	5
Plassering i rutenett	C 1-2	I 4-5	M 2	IKKE I PRØVEFELT	M 8-9
Minste overdekning (mm)	50	70	60	70 - 80	70
Kloridinnhold ved laveste overdekning (vekt% klorider av antatt sementvek)	0,9%	1,8%	0,3%	1,7%	0,3%
Potensial (mV vs. Cu/CuSO <sub>4</sub> )	-410	-488	-128	--	-193
Motstandsmåling	13,2 kΩ	17,5 kΩ	113,2 kΩ	--	146,8 kΩ
Armeringstetthet	Ordinær	Høy	Høy	Ordinær	Høy

Ut fra armeringstegninger og oppmølinger i tilfluktsrommet var det mulig å beregne forholdet mellom armering- og betongoverflateareal. Betegnelsen «ordinær» er i områder hvor arealforholdet armering/betongoverflate er 0,75. Dette med bakgrunn i to lag Ø12 mm armering med senteravstand 100 mm. Betegnelsen «høy» er områder der tilsvarende forholdstall er 1,95. Dette med bakgrunn i to lag Ø 25 med senteravstand 100 mm og et underliggende lag Ø 12 mm med senteravstand 100 mm. (Denne armeringstetthet stemmer godt over ens med bunn av brudrager som har størst armeringstetthet på Verjeskiftbrua)

Resultatet fra de utførte kloridprofilene er vist i Figur 48. Det fremgår av figuren hvordan kloridinnholdet varierer nedover i betongen fra overflaten.



Figur 48 Kloridprofilene i dekket over tilfluktsrommet

## 5.2 Oppstart av prøvefelt

Før polariseringen startet ble egenspenningen mellom anode og armering målt, resultatet ses i Tabell 10. Potensialene på armering målt mot de monterte referanseelektrodene av sølv/sølvklorid før polarisering er vist i Tabell 11. De to innledende målingene ble gjort for å ha et sammenlikningsgrunnlag ved senere vurdering av resultater. Merk at de utførte potensialmålingene i forkant av etableringen av prøvefeltet ble gjort mot referanseelektrode av kobber/kobbersulfat.

Tabell 10 Spenning mellom anode og armering før polarisering, målingene er utført ved referanseelektrodene.

Ref	mV	Ref	mV	Ref	mV
V.Ref 1	251	V.Ref 9	263	V.Ref 17	305
V.Ref 2	249	V.Ref 10	265	V.Ref 18	307
V.Ref 3	247	V.Ref 11	263	V.Ref 19	310
V.Ref 4	239	V.Ref 12	257	V.Ref 20	309
V.Ref 5	219	V.Ref 13	234	V.Ref 21	309
V.Ref 6	197	V.Ref 14	211	V.Ref 22	309
V.Ref 7	165	V.Ref 15	138	V.Ref 23	218
V.Ref 8	132	V.Ref 16	138		

Tabell 11 Armeringens potensial målt mot referanseelektroder av Ag/AgCl før polarisering.

Ref	mV vs. Ag/AgCl	Ref	mV vs. Ag/AgCl	Ref	mV vs. Ag/AgCl
Ref 1	-44	Ref 9	-363	Ref 17	-343
Ref 2	-68	Ref 10	-395	Ref 18	-282
Ref 3	-78	Ref 11	-422	Ref 19	-370
Ref 4	-27	Ref 12	-365	Ref 20	-351
Ref 5	-43	Ref 13	-408	Ref 21	-332
Ref 6	-172	Ref 14	-301	Ref 22	-352
Ref 7	-30	Ref 15	-330	Ref 23	-343
Ref 8	-18	Ref 16	-216		

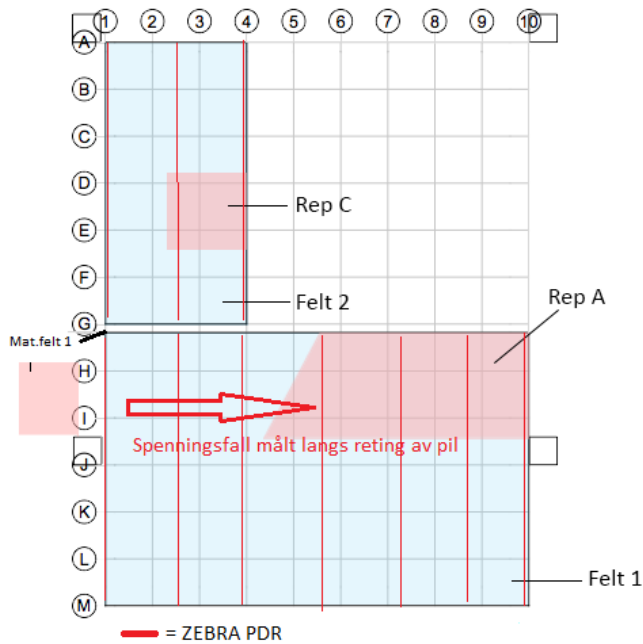
Potensialer på referanseelektrodene etter ett døgn med 2V påtrykt likespenning kan ses i Tabell 12. Det fremgår av tabellen at en katodisk polarisering har funnet sted på alle referanseelektrodene, men med varierende størrelse. Potensialene i Tabell 12 er avlest med påtrykt spenning og inkluderer IR-fallet. Først og fremst registreres det at en utjevning av potensialene mellom referanseelektrode 1-16 har foregått. I vedlegg B er avleste potensialer gjennom hele forsøket vist for alle referanseelektroder.

Tabell 12 ON- Potensial på referanseelektroder (Ag/AgCl) etter et døgn polarisering.

Ref	mV vs. Ag/AgCl	Ref	mV vs. Ag/AgCl	Ref	mV vs. Ag/AgCl
Ref 1	-296	Ref 9	-446	Ref 17	-795
Ref 2	-372	Ref 10	-472	Ref 18	-845
Ref 3	-442	Ref 11	-505	Ref 19	-770
Ref 4	-431	Ref 12	-465	Ref 20	-912
Ref 5	-476	Ref 13	-577	Ref 21	-737
Ref 6	-510	Ref 14	-583	Ref 22	-732
Ref 7	-513	Ref 15	-649	Ref 23	-733
Ref 8	-517	Ref 16	-598		

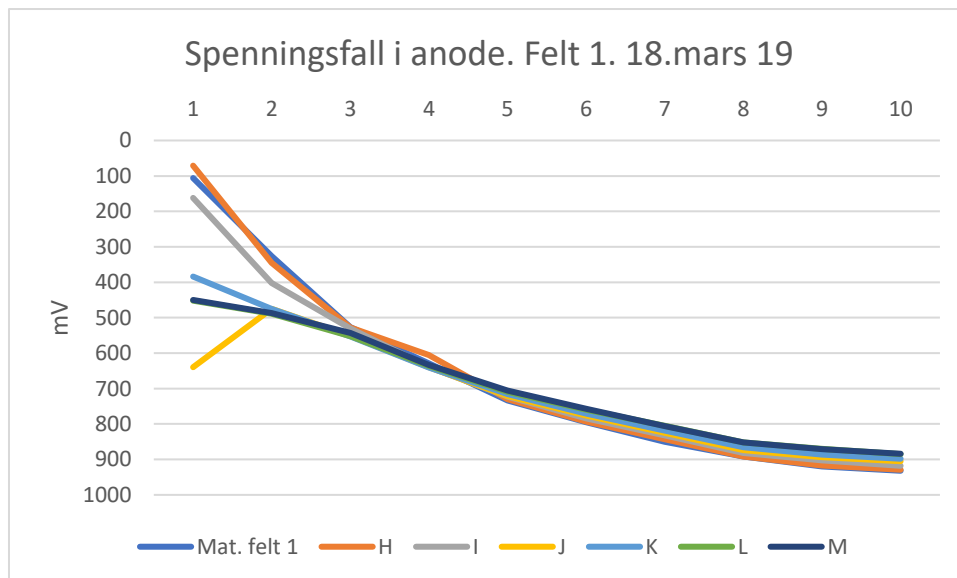
## 5.2 Spenningsfall i anode med et lag ZEBRA over PDR-bånd

Alle målinger av spenningsfallet i anoden ble gjort med 2 V påtrykt spenning mellom anode og armering. Målingene ble utført i det etablerte aksesystemet i prøvelfeltet, med 50 cm avstand mellom målepunktene. Figur 49 viser aksesystemet med plasseringen av PDR-bånd.

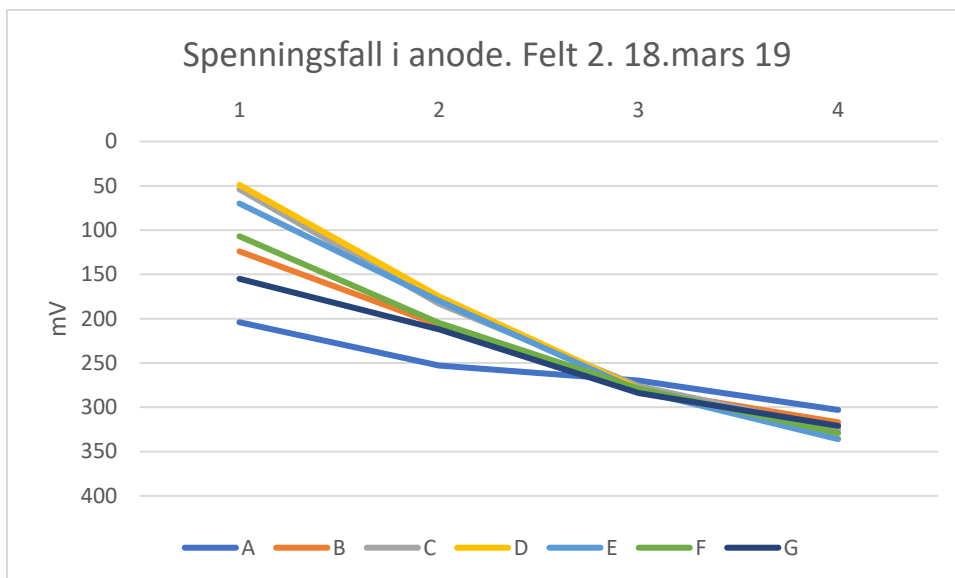


Figur 49 Måling av spenningsfall i anoden i etablert aksesystem

I Figur 50 og Figur 51 vises spenningsfallet målt i anoden i henholdsvis felt 1 og 2. Verdiene er målt med PDR-bånd 1 tilkoblet i en ende. For felt 1 var tilkoblingen i «Mat felt 1», i felt 2 var tilkoblingen i «A1».

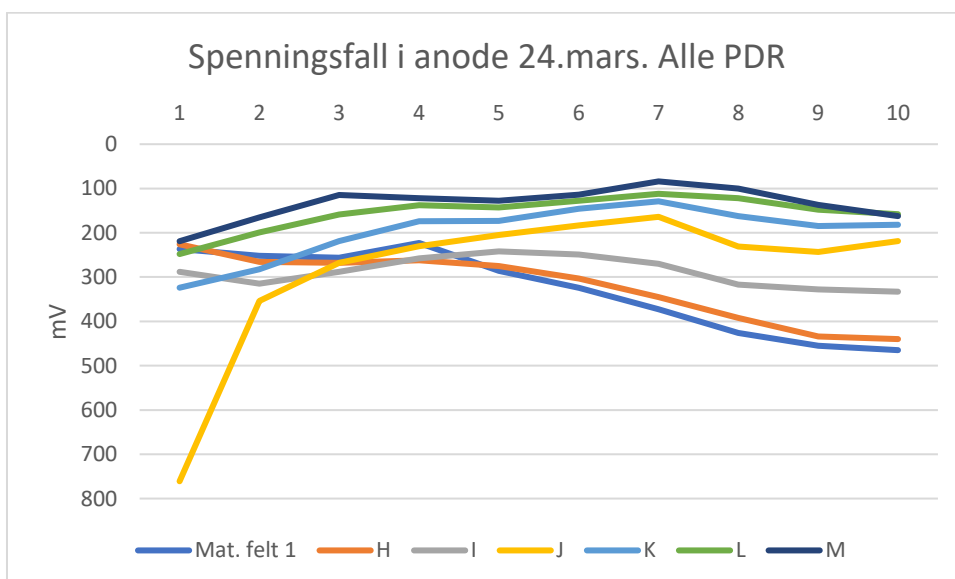


Figur 50 Målt spenningsfall i anode i felt 1 med PDR bånd 1 tilkoblet i "Mat. felt 1"

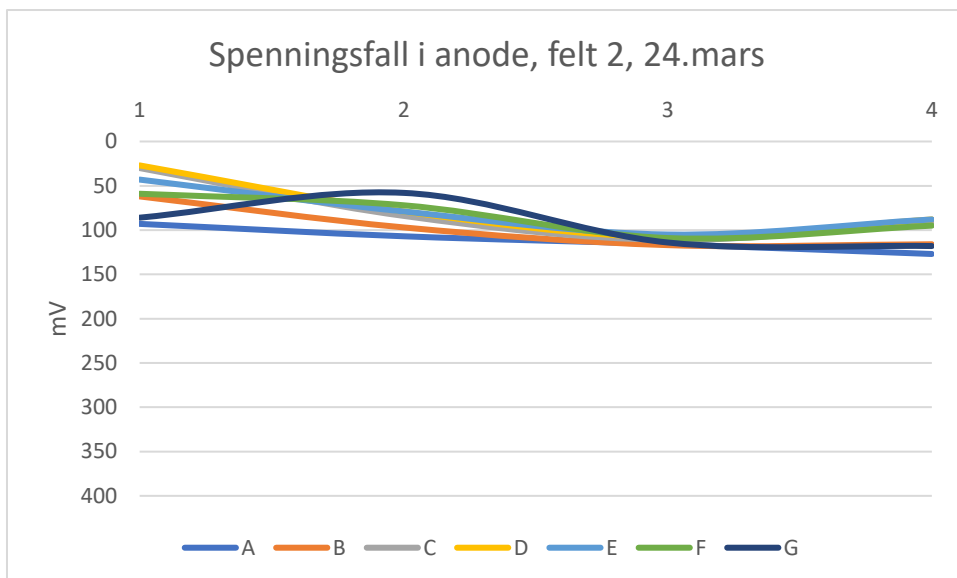


Figur 51 Målt spenningsfall i anode i felt 2 med PDR-bånd 1 tilkoblet i "G1"

Spenningsfallet i anoden ble målt etter hver tilkobling av nye PDR-bånd. I Figur 52 og Figur 53 ses det målte spenningsfallet med samtlige PDR-bånd tilkoblet i henholdsvis felt 1 og 2. Avstanden mellom båndene var ved denne målingen omtrent 70 cm.



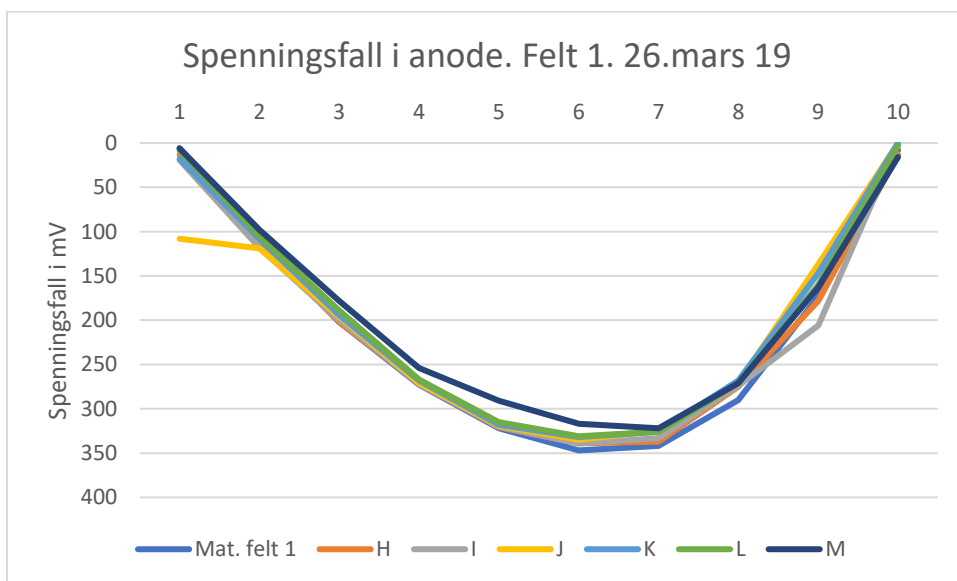
Figur 52 Målt spenningsfall i anode i felt 1 med alle PDR-bånd tilkoblet.



Figur 53 Målt spenningsfall i anode i felt 2 med alle PDR-bånd tilkoblet.

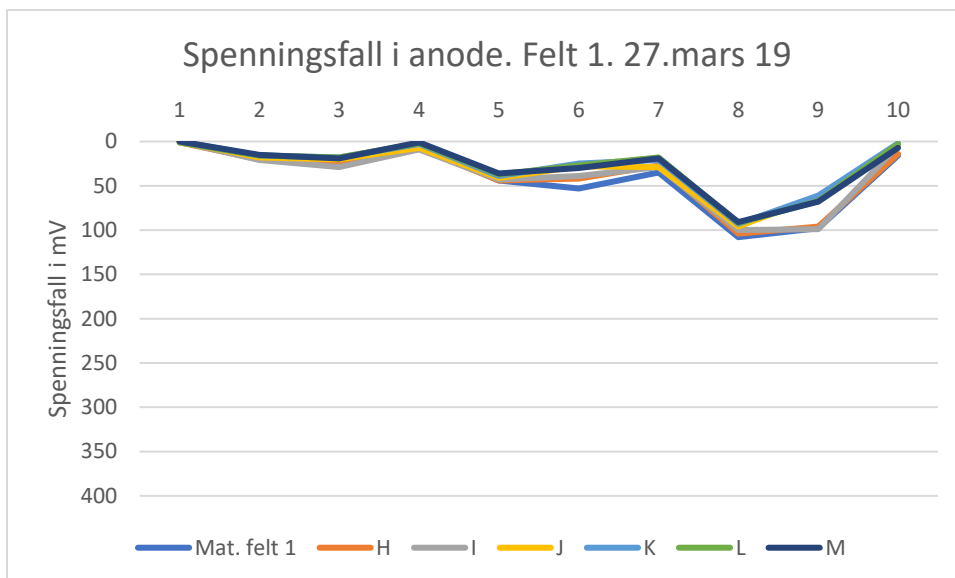
### 5.2.1 Spenningsfall i anode etter overmaling av PDR

Under en depolarisering med alle bånd tilkoblet den 25.mars 2019 ble det påført en cirka 10 cm bred stripe med et nytt lag ZEBRA-anodemaling over PDR-båndene. Ved depolariseringen ble bånd frakoblet slik at båndene i hver ende av feltene (nr. 1 og 7) var eneste tilkoblede. I Figur 54 er spenningsfallet i felt 1 med overmalte PDR-bånd vist.



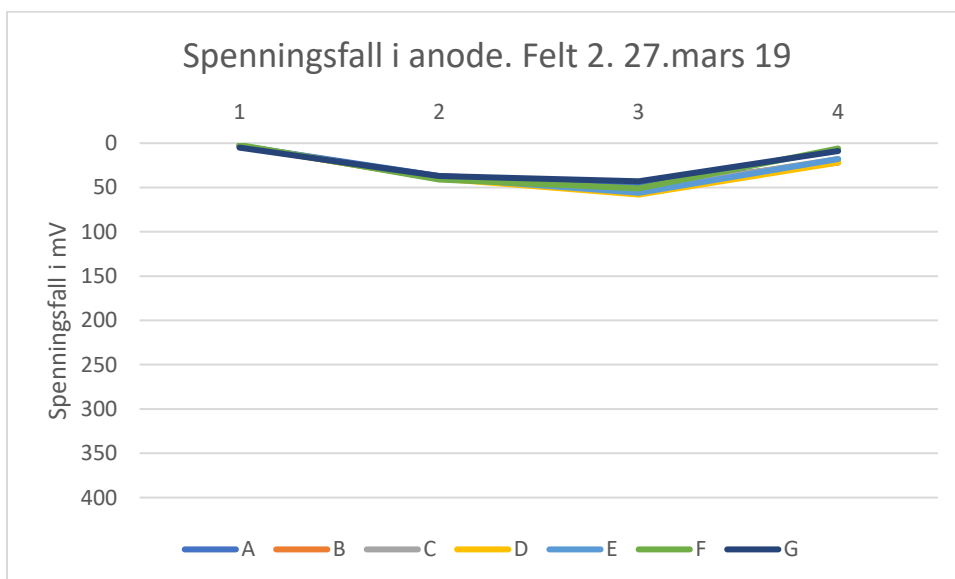
Figur 54 Målt spenningsfall i anode i felt 1 etter overmaling av PDR-bånd. PDR nr. 1 og 7 tilkoblet.

Etter overmaling ble båndene tilkoblet gradvis og spenningsfallet registrert for hver ny tilkobling. I Figur 55 er spenningsfallet i felt 1 med bånd 1, 3, 5 og 7 tilkoblet, senteravstanden var i dette tilfellet omtrent 1,4 meter. I felt to var bånd 1 og 3 tilkoblet ved målingen med tilsvarende senteravstand, resultatet av dette ses i Figur 56.



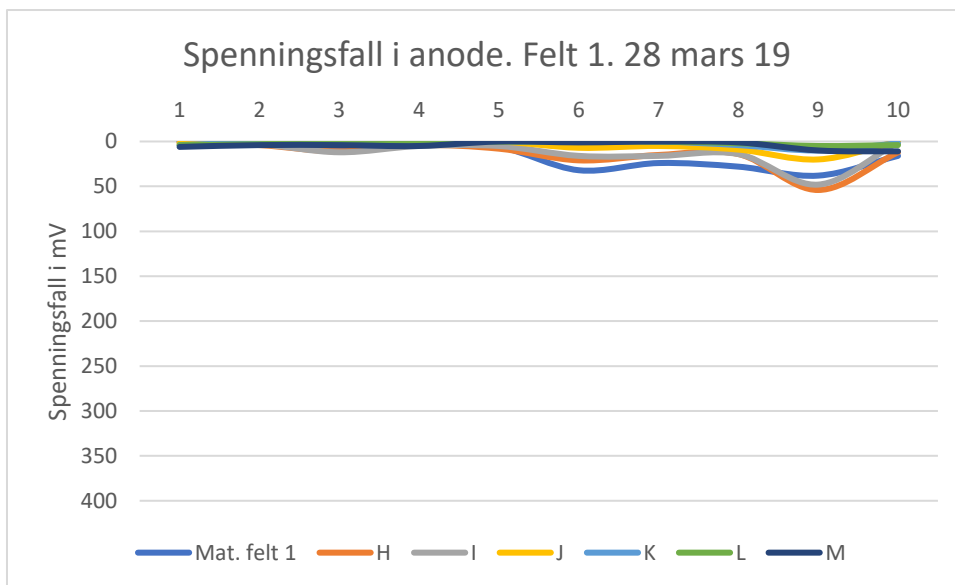
Figur 55 Målt spenningsfall i anode i felt 1 etter overmaling av PDR. Avstand PDR-bånd cirka 1,4 meter.

Ved målingen 27.mars ble det registrert at det høye lokale spenningsfallet ved punktet K/J-1 ved søyle er borte etter at en ståltråd fra søyle gjennom anoden, ned til armering ble lokalisert og tilintetgjort.

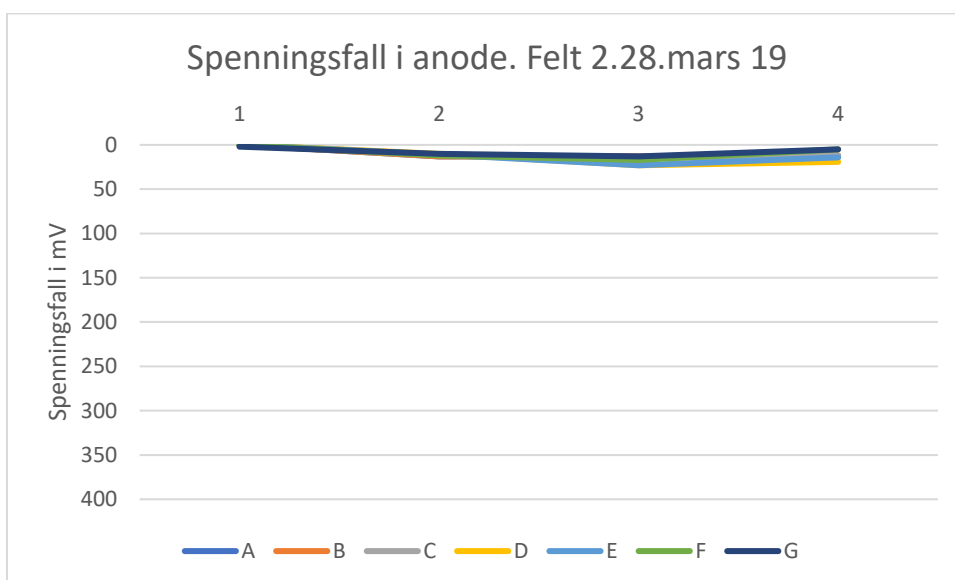


Figur 56 Målt spenningsfall i anode i felt 2 etter overmaling av PDR-bånd. Avstand PDR-bånd cirka 1,4 meter.

Den 28.mars 2019 ble spenningsfallet målt med alle overmalte PDR-bånd tilkoblet i felt 1 og 2. I dette tilfellet var senteravstanden mellom båndene cirka 70 cm. Verdiene er målt med 2 V driftsspenning og ses i Figur 57 (felt 1) og Figur 58 (felt 2). I store deler av feltet er spenningsfallet under 20 mV, tilsvarende 1% av driftsspenningen. I realiteten er spenningsfallet neglisjerbart.



Figur 57 Målt spenningsfall i anode i felt 1 etter overmaling av PDR-bånd. Alle bånd tilkoblet.



Figur 58 Målt spenningsfall i anode i felt 2 etter overmaling av PDR-bånd. Alle bånd tilkoblet.

### 5.3 Depolarisering på armering gjennom forsøket

Tabell 13 viser det ohmske spenningsfallet registrert på referanseelektroden 25.mars, dette tallet har fremkommet ved å subtrahere bruddpotensialet (instant-off) fra potensialet med påtrykt spenning (on). Resultatet fra den første depolariseringen 19.mars 2019 er vist i

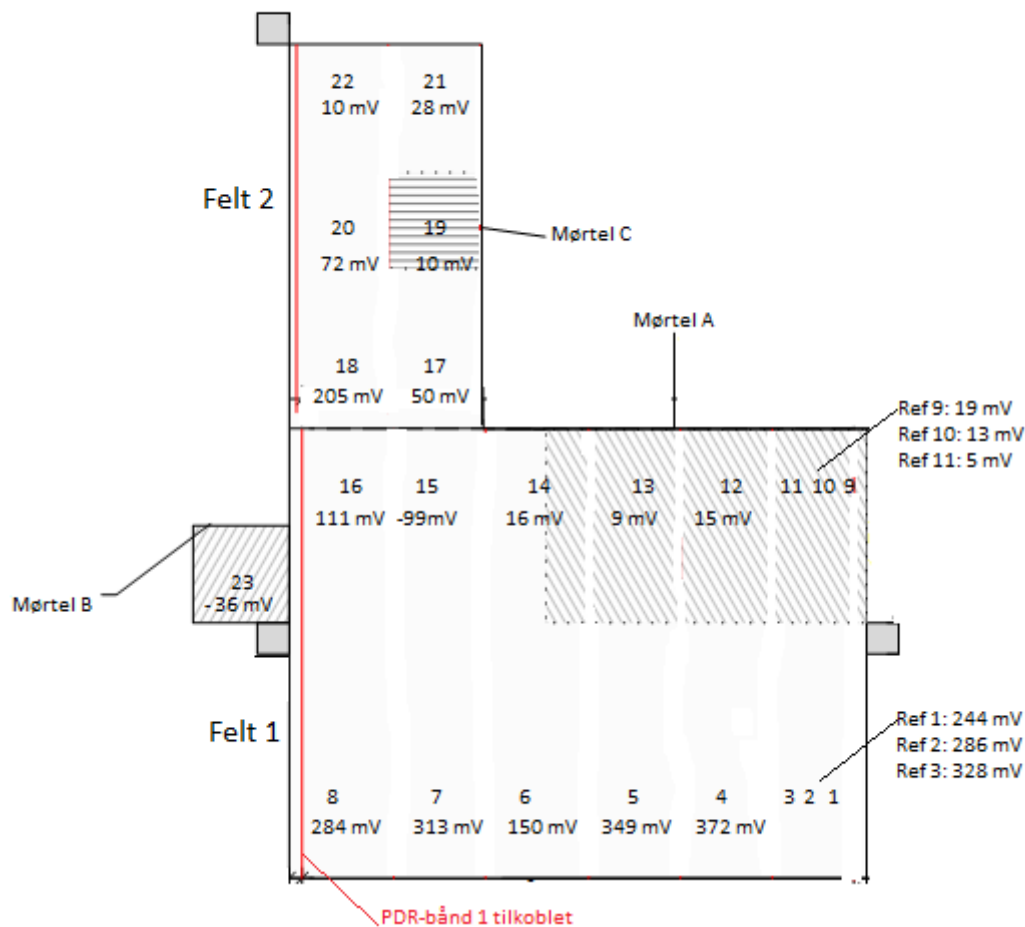
Figur 59. I dette tilfellet hadde 2 V driftsspenning vært påtrykt i nærmere to døgn. Det var PDR-bånd nummer 1 som var virksomt i denne perioden og båndet var tilkoblet i en ende. Total depolarisering er utregnet ved å subtrahere potensialet etter 4 timer fra bruddpotensialet (registrert 0,5 sekunder etter strømavbrudd)



Tabell 13 Ohmsk spenningsfall (IR-fall) registrert på referanseelektrode ved depolarisering 25.mars. «Rep» står for reparasjon.

Ref	mV	Ref	mV	Ref	mV
Ref 1	94	Ref 9 (rep A)	84	Ref 17	329
Ref 2	151	Ref 10 (rep A)	76	Ref 18	265
Ref 3	241	Ref 11 (rep A)	49	Ref 19 (rep C)	291
Ref 4	228	Ref 12 (rep A)	76	Ref 20	363
Ref 5	234	Ref 13 (rep A)	117	Ref 21	643
Ref 6	241	Ref 14	261	Ref 22	318
Ref 7	197	Ref 15	288	Ref 23 (rep B)	105
Ref 8	161	Ref 16	110		

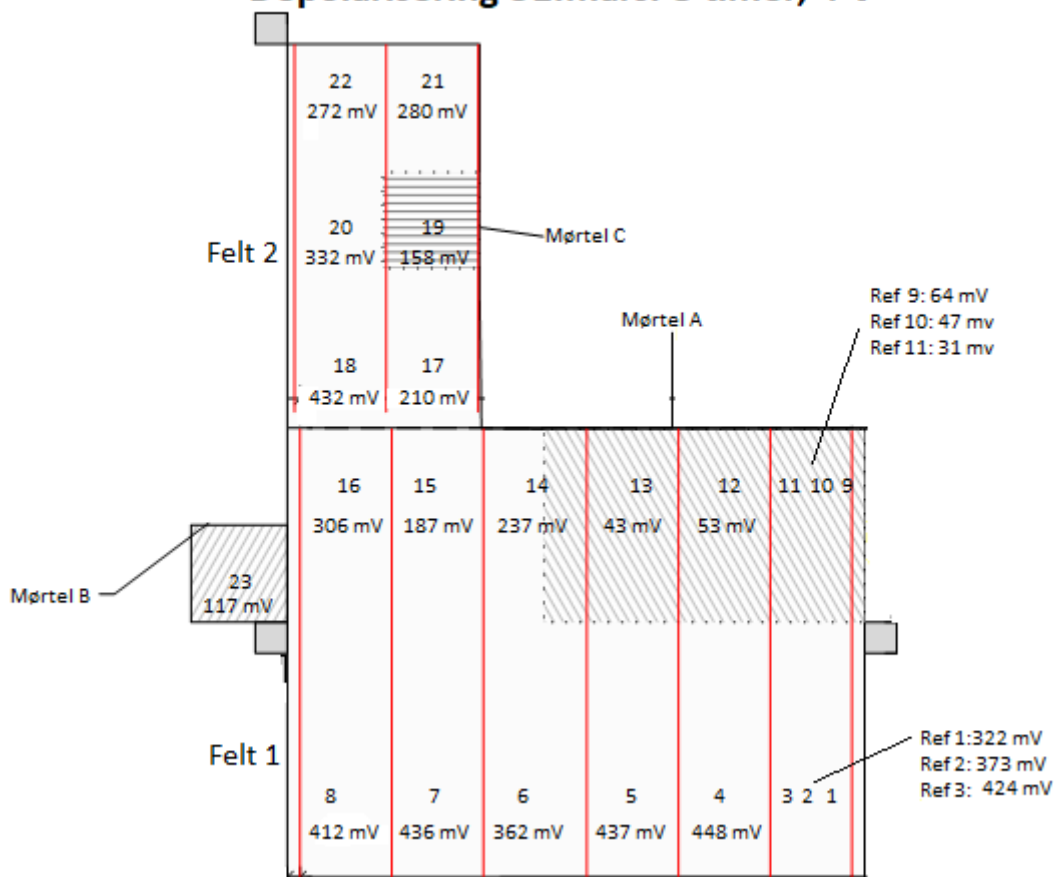
### Depolarisering 19.mars



Figur 59 Total depolarisering på referanseelektrode etter første depolarisering, med 2V påtrykt spenning i to døgn.

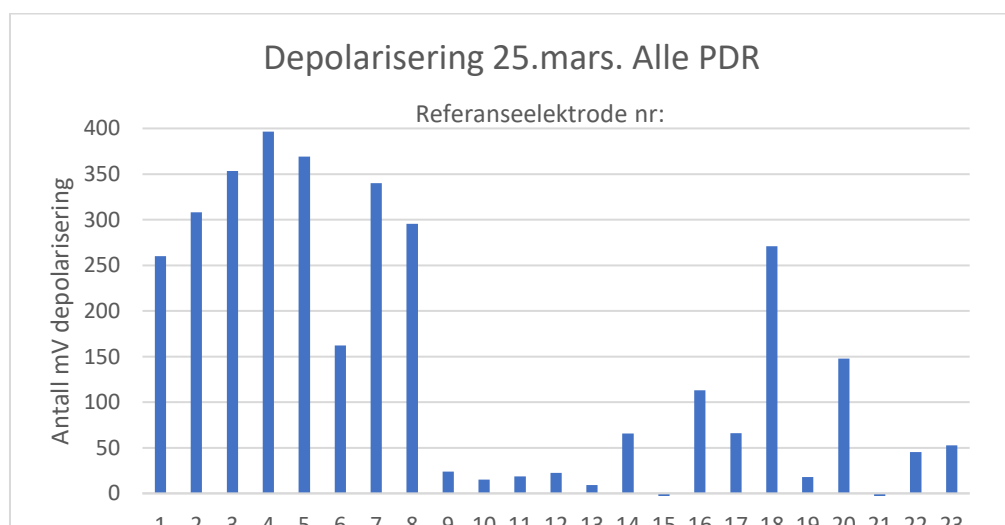
I Figur 60 er resultatet fra den siste depolariseringen 31.mars 2019 vist, 4 V driftsspenning hadde vært påtrykt i nærmere to døgn i forkant av depolariseringen. I den siste runden ble depolariseringen utført over en utvidet periode på 8 timer.

## Depolarisering 31.mars. 8 timer, 4 V



Figur 60 Resultatet ved siste depolarisering (8 timer) 31.mars 19. Alle PDR-bånd tilkoblet med 4 V driftsspenning.

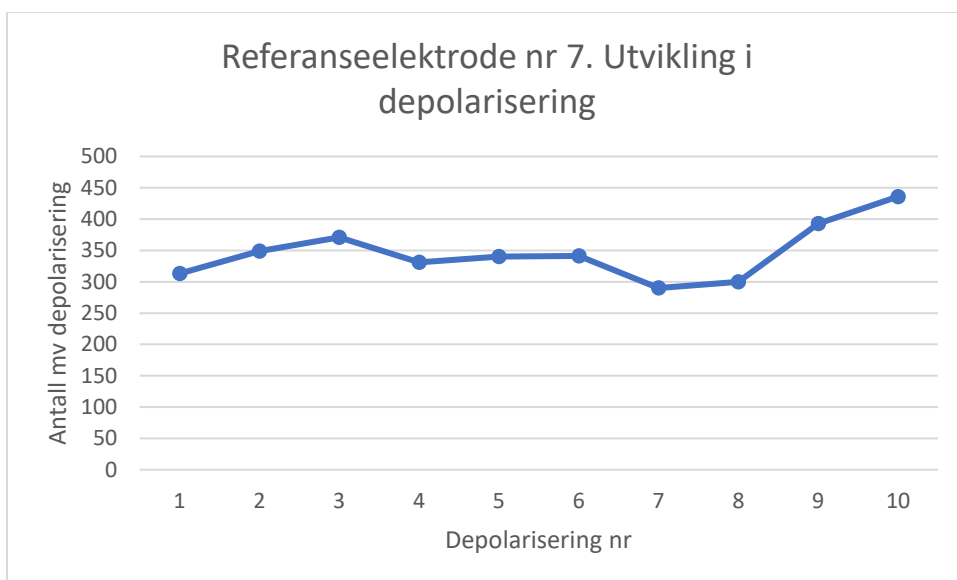
Den siste depolariseringen før overmaling av PDR-båndene ble utført 25.mars 2019, samtlige PDR-bånd i prøvefeltet hadde vært virksomme i perioden før depolariseringen. Total depolarisering på referanseelektrodenes ses i Figur 61. Det registreres at to referanseelektroder ender opp med et potensial som er mer negativt enn instant-off.



Figur 61 Total depolarisering på referanseelektrodenes 25.mars 19 før overmaling av PDR-bånd. Alle bånd tilkoblet med 2 V driftsspenning.

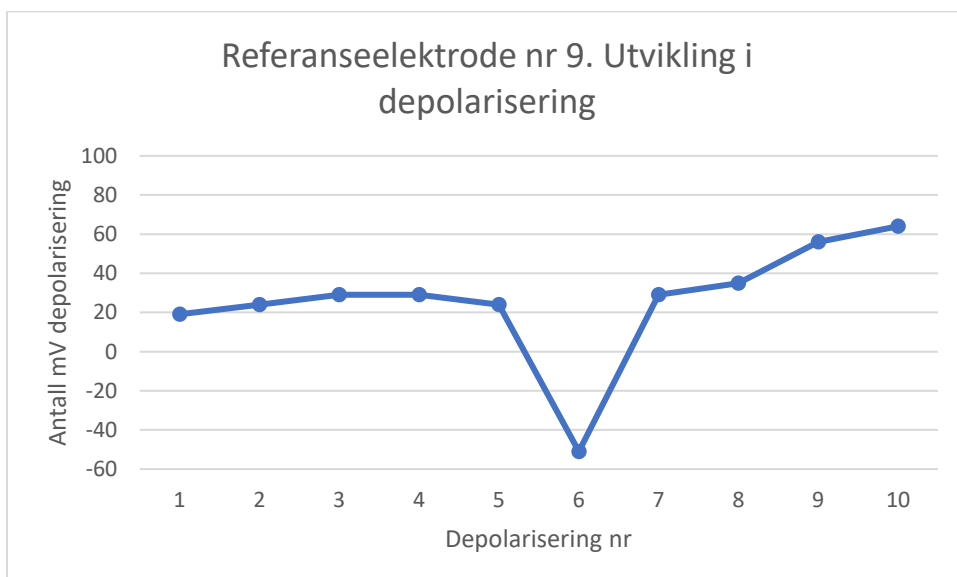
Figur 62-Figur 66 viser utviklingen i depolarisering over tid. Et stort antall referanseelektroder viser lignende oppførsel og dermed er kun representative kurver tatt med i dette kapitlet. Legg merke til reduksjonen ved depolarisering nummer 6, dette går igjen på flere og skyldes at den etablerte armeringskontinuiteten i forkant av polariseringen ble brutt ved arbeid i området. Kontinuiteten ble gjenetablert.

Referanseelektrode nr. 7 måler mot armering som befinner seg i kjørebanelen der kloridinnholdet var lavt og der potensialmålinger indikerte lav sannsynlighet for armeringskorrosjon.



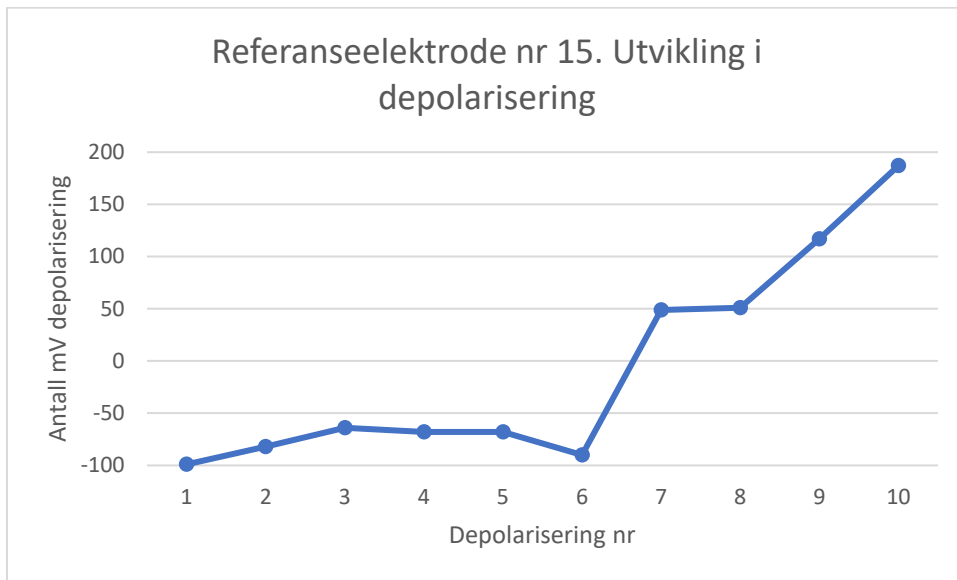
Figur 62 Utvikling i total depolarisering for referanseelektrode nr. 7.

Referanseelektrode nr. 9 måler mot armering som befinner seg i reparasjon A i hjulplassing i felt 1.



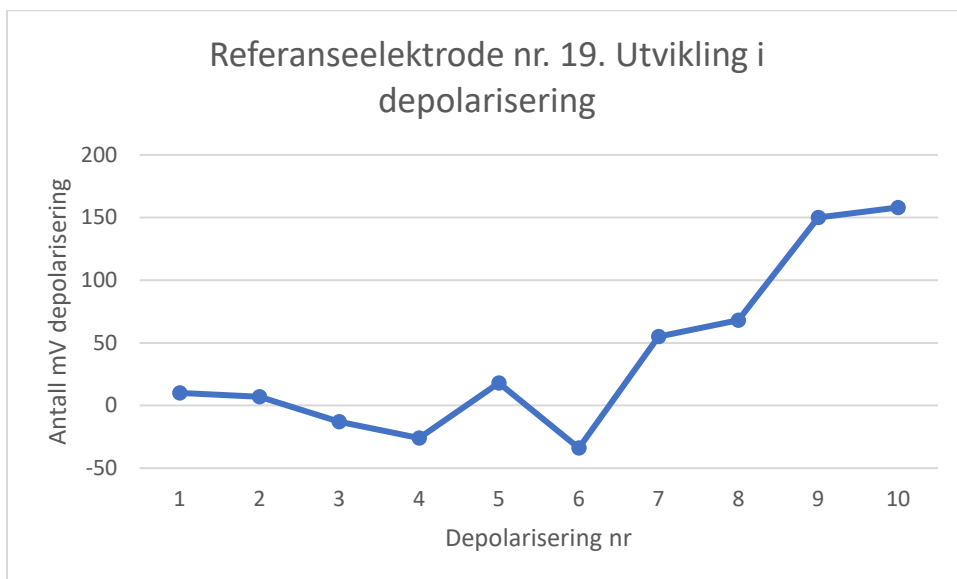
Figur 63 Utvikling i total depolarisering for referanseelektrode nr. 9, plassert i den største reparasjonen i felt 1.

Referanseelektrode nr. 15 måler mot armering som befinner seg i opprinnelig betong i hjulplassering der kloridinnhold er høyt og potensialmålinger indikerer korrosjon.



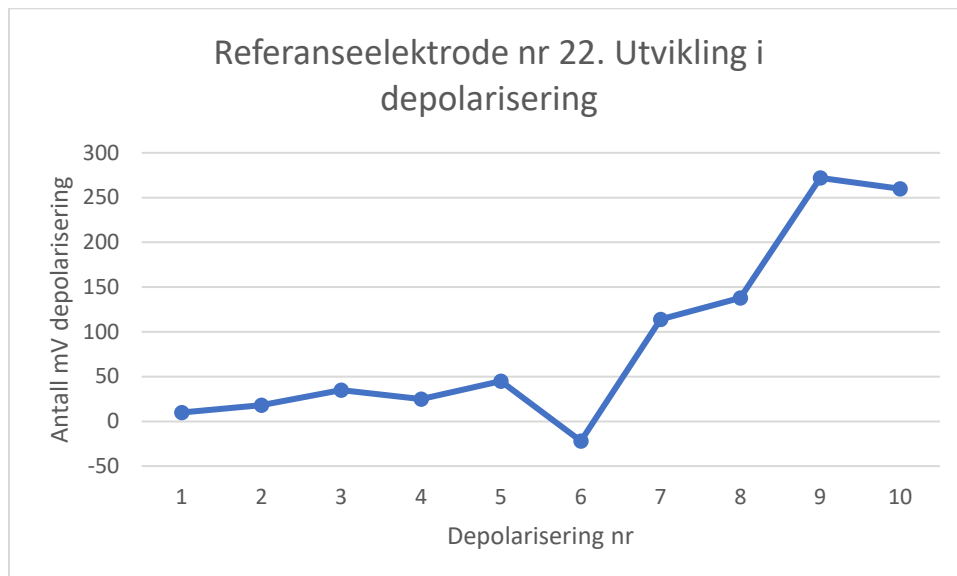
Figur 64 Utvikling i depolarisering for referanseelektrode nr. 15, plassert utenfor reparasjon i felt 1 ved område med høyt kloridinnhold.

Referanseelektrode nr. 19 befinner seg i reparasjon C i hjulplassering i felt 2.



Figur 65 Utvikling i depolarisering for referanseelektrode nr. 19, beliggende i reparasjon i felt 2.

Referanseelektrode nr. 22 befinner seg i opprinnelig betong i hjulplassering felt 2, der kloridinnholdet i nivå med armering var høyt, overflatemotstanden lav og potensialmålingene indikerte armeringskorrosjon.



Figur 66 Utvikling i depolarisering for referanseelektrode nr. 22. Beliggende utenfor reparasjon i felt 2 med høyt kloridinnhold.

Utvikling i depolarisering fremgår i figurene, imidlertid fremgår ikke depolariseringsforløpet i løpet av de fire timene. I vedlegg C er utvikling av depolarisering gjennom hele forsøket vist for alle referanseelektroder. I vedlegg D er depolariseringskurvene ved 21.mars og 31.mars vist for utvalgte referanseelektroder beliggende i opprinnelig betong og i reparasjonene.

#### 5.4 Potensialmålinger med håndholdt referanseelektrode i prøvofeltet

Mens anlegget var påslått med 4 V driftsspennning ble det på utvalgte lokaliteter boret hull fra overflaten og nedover. I borehullene ble armeringens potensial målt med håndholdt referanseelektrode av Cu/CuSO<sub>4</sub>. I samme hull ble potensialene igjen målt påfølgende dag etter at anlegget hadde vært skrudd av i 9 timer. Resultatene er vist i Tabell 14 -Tabell 17.

Tabell 14 Potensialer målt i borehull, L/M-8/9, kjørebane, felt 1

Plassering: L/M-8/9. Dybde fra overflaten	Potensial 30.mars, 4V [mV vs. Cu/CuSO <sub>4</sub> ]	Potensial 31.mars, 9 timer av [mV vs. Cu/CuSO <sub>4</sub> ]
2 cm	-1734	-358
4 cm	-1046	-260
6 cm	-812	-277
10 cm	-577	-273

Tabell 15 Potensialer målt i borehull, M3, kjørebane, felt 1

Plassering: M3. Dybde fra overflaten	Potensial 30.mars, 4V [mV vs. Cu/CuSO <sub>4</sub> ]	Potensial 31.mars, 9 timer av [mV vs. Cu/CuSO <sub>4</sub> ]
2 cm	-1994	-336
4 cm	-914	-258
6 cm	-824	-255

Tabell 16 Potensialer målt i borehull, H/I-8/9, reparasjon A, felt 1

Plassering: H/I-8/9. Dybde fra overflaten	Potensial 30.mars, 4V mV vs. Cu/CuSO <sub>4</sub> ]	Potensial 31.mars, 9 timer av mV vs. Cu/CuSO <sub>4</sub> ]
0,5 cm	-1417	-723
4 cm	-950	-737
6 cm	-869	-787
10 cm (nær PDR)	-899	-805

Tabell 17 Potensialer målt i borehull, B/C-1/2, parkeringsplass, felt 2

Plassering: B/C-1/2. Dybde fra overflaten	Potensial 30.mars, 4V [mV vs. Cu/CuSO <sub>4</sub> ]	Potensial 31.mars, 9 timer av [mV vs. Cu/CuSO <sub>4</sub> ]
2 cm	-1929	-516
5 cm	-1519	-507
8 cm	-1002	-471
10 cm (nær PDR)	-1051	-463

#### 5.4.1 Potensialmålinger i nedre plan under prøvefelt i underkant dekke

Dekke i tilfluktsrommet hadde en tykkelse på 56 cm. Da kontrollmålinger viste at det var kontinuitet mellom overkant- og underkantarmoring ble det utført potensialmålinger med håndholdt referanseelektrode av Cu/CuSO<sub>4</sub> i nedre plan, direkte under prøvefeltet. Målingene ble utført på samme punkter på følgende tid:

- 30.mars: Det var påtrykt 4 V spenning på anlegget over
- 31.mars: Påtrykt spenning hadde vært avslått i 9 timer
- 03.april: Påtrykt spenning hadde vært avslått i fire døgn

Resultater fra målingene ses i Tabell 18 og Tabell 19.

Tabell 18 Potensialer målt i underkant dekke, under prøvefeltet. Under søyle ved A1 og K1

Under søyle A1 (felt 2)	Lok 1 mV	Lok 2 mV	Under søyle K1 (felt 1)	Lok 3 mV	Lok 4 mV	Lok 5 mV	Lok 6 mV
30.mars	-484	-473	30.mars	-280	-380	-370	-228
31.mars	-298	-330	31.mars	-159	-250	-241	-107
03.april	-178	-142	03.april	-97	-149	-128	-63

Tabell 19 Potensialer målt i underkant dekke, under prøvefeltet. Under søyle K10 og en referanse utenfor prøvefeltet.

Under søyle K10 (felt 1)	Lok 7 mV	Lok 8 mV	Utenfor prøvefelt	Lok 9 mV
30.mars	-198	-461	30.mars	-108
31.mars	-108	-352	31.mars	-110
03.april	-12	-132	03.april	-

#### 5.5 Strøm og strømfordeling i prøvefeltet

I Tabell 20 ses loggdata (driftsspenning og total strøm i feltene) fra prøveperioden med antall virksomme strømfordelingsbånd og eventuelle hendelser spesifisert. Det er bevisst unngått å avlese strøm like etter en endt depolarisering.

Tabell 20 Avlest spenning og strøm i prøvefeltet gjennom forsøket.

Dato og tid	PDR-bånd tilkoblet ( felt 2 i parentes)	Spenning	Strøm	Hendelse
18.03.19 kl.1715	1 (1)	2 V	486 mA	-
19.03.19 kl.1715	1 (1)	2 V	498 mA	-
20.03.19 kl.1715	1+7 (1+3)	2 V	506 mA	Flere PDR tilkoblet
21.03.19 kl.1715	1+4+7 (1+3)	2 V	554 mA	Flere PDR tilkoblet
22.03.19 kl.1715	1+4+7 (1+3)	2 V	540 mA	-
23.03.19 kl.1715	1+3+4+5+7 (1+2+3)	2 V	544 mA	Flere PDR tilkoblet
24.03.19 kl.1715	1+2+3+4+5+6+7 (1+2+3)	2 V	524 mA	Alle PDR tilkoblet
25.03.19 kl.1715	1 + 7 (1)	2 V	<b>804 mA</b>	PDR-bånd overmalt
26.03.19 kl.1320	1+7 (1)	2 V	771 mA	-
26.03.19 kl.2135	1+3+5+7 (1+3)	2 V	847 mA	Flere PDR tilkoblet
26.03.19 kl.2140	1+3+5+7 (1+3)	2 V	<b>362 mA</b>	Ståltråd ved «J/K 1» fjernet
27.03.19 kl.1715	1+3+5+7 (1+3)	2 V	376 mA	
28.03.19 kl.1715	1+2+3+4+5+6+7 (1+2+3)	2 V	362 mA	Alle PDR tilkoblet
28.03.19 kl.2130	1+7 (1)	4 V	1404 mA	Driftsspenning økt fra 2 til 4 V
29.03.19 kl.1715	1+7 (1)	4 V	1057 mA	-
30.03.19 kl.1715	1+2+3+4+5+6+7 (1+2+3)	4 V	1192 mA	Alle PDR tilkoblet
31.03.19 kl.0130	1+2+3+4+5+6+7 (1+2+3)	4 V	975 mA	-

To strømverdier er uthevet i Tabell 20, den første verdi, 804 mA er avlest strøm etter overmaling med et andre strøk anode over PDR-båndene. Andre uthevede tall, 362 mA, er avlest verdi etter lokalisering og fjerning av en stålgenstand fra søylebunn ved J/K 1 videre ned i dekke til katodisk beskyttet overkantarmoring. Etter at gjenstanden var isolert fra feltet ved kapping i begge ender ble en reduksjon i strøm på 485 mA observert. Stålgenstanden er vist i Figur 67.



Figur 67 Lokalisert og fjernet stålgenstand fra søyle ved "J/K 1", gjennom anoden og ned til overkantarmoring.

Før 26.mars kl 21:40 var det ikke mulig å avlese stabile strømverdier på PDR-båndene. Etter stålgenstanden som gikk fra søyle ved J/K 1 og ned til overkantarmoringen i dekke ble lokalisert og fjernet ble det avlest stabile strømverdier på PDR-båndene. Tabell 21 og Tabell 22 viser hvordan strømmen fordelte seg mellom de ulike båndene for henholdsvis felt 1 og 2 med 2V og 4V driftsspenning.

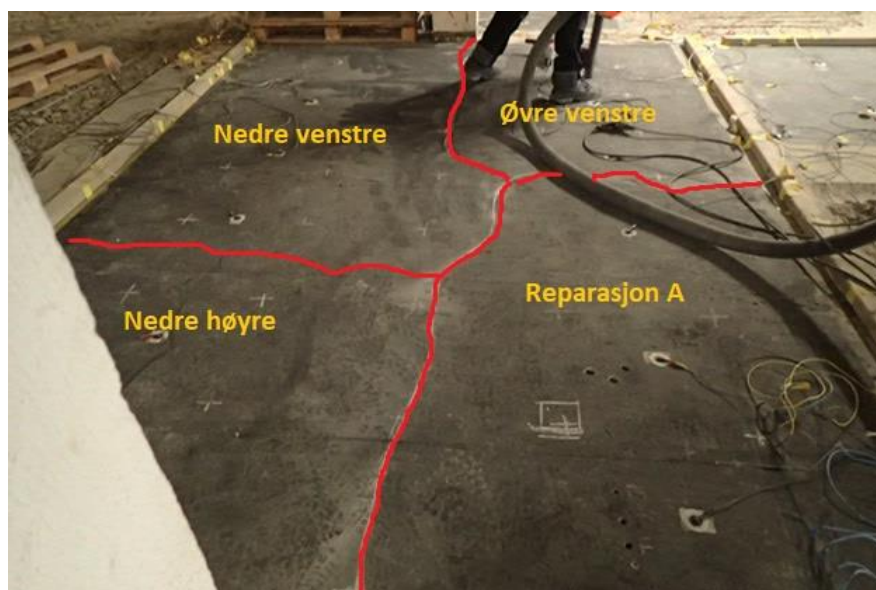
Tabell 21 Strømgjennomgang på de ulike strømfordelingsbåndene i felt 1 med henholdsvis 2 og 4 V

Felt 1, 28.mars, 2V		30.mars, 4V
Bånd 1	23 mA	87 mA
Bånd 2	36 mA	101 mA
Bånd 3	12 mA	109 mA
Bånd 4	31 mA	121 mA
Bånd 5	43 mA	105 mA
Bånd 6	45 mA	122 mA
Bånd 7	27 mA	95 mA
<b>SUM felt 1</b>	<b>217 mA</b>	<b>740 mA</b>

Tabell 22 Strømgjennomgang på de ulike strømfordelingsbåndene i felt 2 med henholdsvis 2 og 4 V

Felt 2, 28.mars, 2V		30.mars, 4V
Bånd 1	18 mA	51 mA
Bånd 2	44 mA	132 mA
Bånd 3	25 mA	76 mA
<b>SUM felt 2</b>	<b>87 mA</b>	<b>259 mA</b>

Ved avslutning av prøvefeltet ble det mulig å registrere strømfordeling i prøvefelt 1 og 2, beskrevet som «elimineringsmetoden». Strømfordelingen ble registrert med 2 V driftsspenning på anlegget. Resultatet er vist i Tabell 23 og Tabell 24 for henholdsvis felt 1 og 2. Figur 68 viser hvor i prøvefeltet de ulike områdene i angitt i tabellen befinner seg. Rød strek markerer hvor det er slisset gjennom anode og strømfordelingsbånd.



Figur 68 Måling av lokal strømgjennomgang ved bruk av "elimineringsmetoden". Rød streker viser hvor det er slisset.

Tabell 23 Strømfordeling i felt 1 ved "elimineringsmetoden"

Felt 1	Hele felt 1	Mørtel A	Øvre venstre	Nede venstre	Nede høyre
Areal [m <sup>2</sup> ]	13,33	2,94	2,60	3,38	3,38
Strøm [mA]	178	21	106	28	23
Strømtetthet anode	13,35	7,14	40,77	8,28	6,80
Strømtetthet armering*	6,85	3,66	20,91	4,25	3,49



Tabell 24 Strømfordeling i felt 2 ved "elimineringmetoden"

Felt 2	Hele felt 2	Mørtel C
Areal [m2]	5,36	0,79
Strøm [mA]	111	11
Strømtetthet anode	20,68	13,92
Strømtetthet armering*	27,57	18,56

I Figur 69 og Figur 70 ses strømgjennomgangen mellom strømpute plassert i anoden på akse-systemet og armering ved bruk av Lab-likereetter «RND». Tilsvarende måling ble gjort i utvalgte ruter 10 x 10 cm med anode isolert fra øvrig anode, resultatene fra disse ses i Tabell 25.

	1	2	3	4
A	66	56	56	52
B	143	74	90	92
C	122	87	85	100
D	130	94	14	19
E	135	90	13	19
F	122	79	75	100
G	89	71	71	94

Figur 69 Strømpute i felt 2. Tall i mA

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Topp mat 1	107	56	64	95	34	21	31	29	23	21
H	100	67	77	95	49	29	31	28	21	19
I	129	80	61	72	74	28	28	31	8	19
J	153	75	64	87	26	28	28	54	39	26
K	24	24	24	28	26	25	26	29	26	26
L	21	23	24	26	26	26	26	28	24	26
M	23	23	23	26	24	23	24	28	21	24

Figur 70 Strømpute i felt 1. Tall i mA

Tabell 25 Strømgjennomgang i isolerte ruter (10 x 10 cm) anode

Isolerte ruter anode	Strøm [mA]
I3 (opprinnelig betong, hjulplassering med høy cl)	23
I8 (reparasjon A)	3
K7 (opprinnelig betong, kjørebane)	4
B2 (felt 2 opprinnelig betong, hjulplassering)	23
D/E – 3/4 (reparasjon C)	27

## 5.6 Motstand i anodemaling ved oppstart og avslutning av prøvefeltet

Ved oppstart, før polarisering, og ved avslutning av prøvefeltet ble både pin- og kvadratmotstand i anoden målt. I det følgende oppsummeres hovedtrekk fra målingene.

Før oppstart:

- Variasjonene i målt motstand var til dels store, men de målte verdiene er i alle tilfeller lave. Majoriteten av pin-verdiene var i intervallet 10 – 30 Ω. For kvadrat-motstanden var majoriteten av målingene under 10 Ω.

Ved avslutning:

- Variasjonene i målt motstand var til dels store, men de målte verdiene er i alle tilfeller lave. Majoriteten av pin- og kvadratverdiene befant seg i samme intervall som før oppstart.
- I områder som før oppstart hadde blitt fuktet (H9, I9) er målte motstandsverdier (pin og kvadrat) redusert betydelig.
- Sett bort fra punktet ovenfor er det ingen generell tendens til verken økt eller redusert anodemotstand ved sammenlikning av verdier før oppstart og ved avslutning.

### 5.7 Motstand i betong og mørtel ved avslutning av forsøket.

Tre parallelle kjerner ble boret ut i henholdsvis reparasjon A og B, felt 1 kjørebane og felt 1 hjulplassering, kjernene ble boret med en dybde ned til armering. I Tabell 26 ses målt bulkresistivitet i prøvene. To kjerner ble ødelagt og er ikke medtatt, det samme gjelder for reparasjon C da resultatene åpenbart var feil (2500 kΩcm), og skyldes feil med kontaktgelen.

Tabell 26 Bulkresistivitet på utborede kjerner fra prøvefeltet.

Kjernenummer og plassering	Resistivitet [kΩcm]
1. Felt 1, kjørebane	48,0
2. Felt 1, kjørebane	77,4
3. Felt 1, hjulplassering	24,7
4. Felt 1, hjulplassering	24,5
5. Felt 1, hjulplassering	22,8
6. Felt 1, reparasjon A	4,7
7. Felt 1, reparasjon A	3,8
8. Reparasjon B	8,3
9. Reparasjon B	8,2
10. Reparasjon B	7,8

Ved avslutningen av forsøket ble anoden slipt bort i reparasjonene for måling av overflatemotstand med *Resipod Proceq (Wenner)*. Snittet av fem parallelle enkeltmålinger er vist i Tabell 27.

Tabell 27 Overflatemotstand målt med Resipod ved avslutning av forsøket, 31.mars 2019

Prøve	Motstand [kΩ.cm]
Reparasjon A	26,1
Reparasjon B	32,8
Reparasjon C	31,7

### 5.8 Relativ luftfuktighet målt i borehull i prøvefeltet

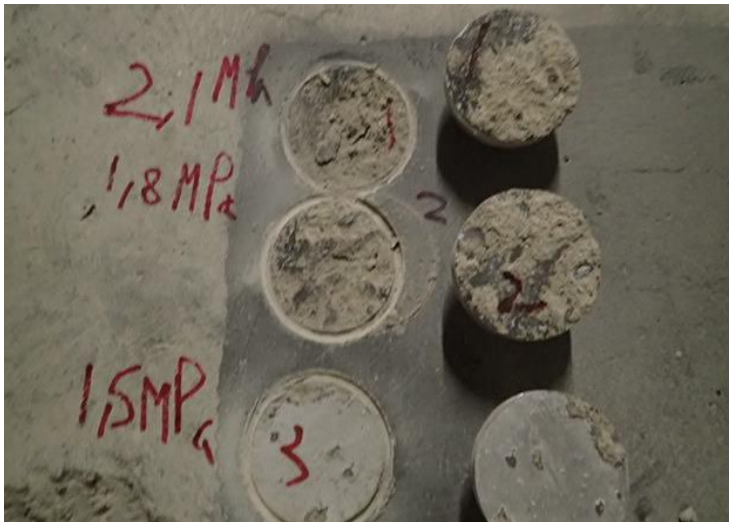
I Tabell 28 er relativ luftfuktighet målt i borehull i varierende dybde fra overflaten. Det er spesifisert hvorvidt prøvene er plassert i kjørebane eller i hjulplassering. Lufttemperaturen var fra 5 til 7°C ved målingene.

Tabell 28 Relativ luftfuktighet målt i borehull i prøvefeltet.

Plassering og dybde	Dato	RH [%]
B/C-1/2, felt 2 hjulplassering, 00 - 20 mm	24.03.19	81,6
B/C-1/2, felt 2 hjulplassering, 00 - 40 mm	03.03.19	92,7
B/C-1/2, felt 2 hjulplassering, 00 - 80 mm	03.03.19	96,3
H-1/2, felt 1 hjulplassering, 00 - 20 mm	24.03.19	74,9
H-1/2, felt 1 hjulplassering, 00 - 40 mm	03.03.19	92,6
H-1/2, felt 1 hjulplassering, 00 - 80 mm	03.03.19	89,7
I2, felt 1 hjulplassering, 00 - 40 mm	03.03.19	92,6
I2, felt 1 hjulplassering, 00 - 80 mm	03.03.19	89,7
L/M-8/9, felt 1 kjørebane, 00 - 20 mm	24.03.19	76,1
L/M-8/9, felt 1 kjørebane, 00 - 40 mm	24.03.19	77,7
L/M-8/9, felt 1 kjørebane, 00 - 80 mm	24.03.19	82,8
M/N-3/4, felt 1 kjørebane, 00 - 20 mm	24.03.19	67,7
M/N-3/4, felt 1 kjørebane, 00 - 40 mm	03.03.19	74,5
M/N-3/4, felt 1 kjørebane, 00 - 80 mm	03.03.19	78,1

### 5.9 Heftprøver i tilfluktsrom

Ved siden av felt 2 ble det ved påføring av anode malt en tilsvarende rute for måling av heftfasthet. Heftprøvene ble trukket 27.mars 2019. Figur 71 viser prøveserien med totalt tre enkeltprøver etter avtrekk. Registrert heftstyrke i MPa er vist i samme figur. Prøve 1 og 2 var et blandingsbrudd med et stort innslag av betongbrudd. Prøve 3 hadde størstedelen av bruddet mellom lim og prøvekoppen, her var ikke limet tilstrekkelig herdet, det vil si at heftstyrken til anoden er høyere.



Figur 71 Heftprøver på anoden i tilfluktsrommet etter avtrekk

### 5.9 Brubefaring i forkant av inspeksjon med lift

I starten av april 2019 ble det utført befaringer på de tre aktuelle kandidatene for bruinspeksjon med brulift. Befaringene ble utført som enkle inspeksjoner av de katodiske anleggene på bruene, i tillegg ble en enkel visuell befaring av tilgjengelige overflater gjort. Følgende bruer ble befart på angitt dato.

- Nerlandsøy, 1. og 2.april 2019.
- Remøy (tidligere Nordre Vaulen), 2.april 2019.
- Verjeskift, 10.april 2019.

I 5.9.1-5.9.3 er resultater fra inspeksjonene omtalt.

### 5.9.1 Brubefaring på Nerlandsøy

På Nerlandsøy er totalt to styreskap montert på hvert sitt landkar. Totalt er det syv soner og et prøvefelt. Styreskap på Nerlandsøy-siden i akse 21 (Figur 72) var ved ankomst avslått. Det ble observert at automatsikringen hadde gått, denne ble vippt opp igjen og anlegget skrudde seg på. Totalt forsynes sone 1-4 og et prøvefelt med strøm fra skapet. På Figur 72 ses skapet som befinner seg i akse 21. Tabell 29 viser spenningen og strømmen som ble avlest på strømforsyningene den 1. april, dette er oppstartsverdier. En ny avlesning ble gjort påfølgende morgen etter at anlegget hadde stått på over natta, verdiene er vist i Tabell 30.

Tabell 29 Driftsdata Nerlandsøy, styreskap i akse 21. Avlest 01.april 2019, etter at anlegget ble påslått.

Strømforsyning	Spenning	Strøm	Areal	Strømtetthet(betongoverflate)
1	2,03 V	0,44 A	665	0,66 mA/m2
2	1,94 V	0,65 A	650	1,00 mA/m2
3	--	0,09 A	375	0,24 mA/m2
4	2,10 V	0,10 A	360	0,03 mA/m2
Prøvefelt	--	--	118	--

Tabell 30 Driftsdata Nerlandsøy, styreskap i akse 21. Avlest 02.april 2019, etter at anlegget har vært påslått i 12 timer.

Strømforsyning	Spenning	Strøm	Areal	Strømtetthet(betongoverflate)
1	2,00 V	0,30 A	665	0,45 mA/m2
2	2,00 V	0,59 A	650	0,91 mA/m2
3	0,433 V	-0,03 A	375	0 mA/m2
4	2,10 V	0,07 A	360	0,19 mA/m2
Prøvefelt	0,256 V	0,03 A	118	0,25 mA/m2

De avleste spenningene på strømforsyningene ble kontrollert med manuell måling på rekkeklemmene ved bruk av multimeter, det ble ikke målt avvik.



Figur 72 Skapet på Nerlandsøy-siden (akse 21). Strømforsyning til sone 1-4 + prøvefelt.

I skapet var det to Camur Controller-enheter som ble påslått. Avlesning av potensial på referanseelektroder ble utført. Verdiene sprikte i alle retninger og kan ses i sin helhet i vedlegg E.

På Fosnavåg-siden var også anlegget avslått ved ankomst, det var ikke mulig å få startet opp igjen. Tre soner forsynes i utgangspunktet med strøm fra skapet. Spenning mellom armering og anode uten strøm på anlegget ble avlest manuelt ved bruk av multimeter og lå fra 0,25 – 0,58 V.



*Figur 73 Underkant av brudrager og brudekke sett fra landkar på Nerlandsøy (akse 21). Avflassing, spesielt over epoksyforsegling av sølvbånd.*

Basert på den visuelle inspeksjonen fra land er det til dels store variasjoner i tilstanden på det katodiske beskyttelsessystemet, visuelt bærer systemet preg av den høye alderen. Det ble gjort observasjoner av skader på brua. Skadene som ble registrert fra land er både på det katodiske beskyttelsesanlegget og på selve brua. Generelt var det avflassing av både maling og underliggende anode, spesielt gjaldt dette på epoksyforsegling over strømfordelingsbånd av sølv (vist i Figur 73) og rundt riss på drager.

Av betongskader på selve broen kunne avskallinger og korrodert armering i dagen observeres flere steder, både på drager, brudekke og pilarer. Eksempel på registrert avskalling i underkant av drager, forårsaket av pågående korrosjon på bøylearmering er vist i Figur 74, den avskallede overdekningen lå igjen på bakken under drageren.



Figur 74 Brudrager sett fra akse 21. Malingsavflassing og betongavskalling over bøylearmering forårsaket av pågående armeringskorrosjon

Skader av estetisk karakter ble observert i varierende omfang over hele broen, disse skadene fortonet seg som rustutslag (små «rustflekker») på den hvitmalt overflaten, forårsaket av jernbindertråd og andre stållegemer i overflaten i direkte kontakt med anoden. Det ble registrert at flere slike skader opp gjennom tidene var isolert med epoksy, men at nye hadde dukket opp. På Figur 74 ses eksempel på slike rustutslag i overflaten.

#### 5.9.2 Brubefaring på Remøy

Befaring av det katodiske anlegget på Remøy ble utført 02.april 2019. Det er to styreskap på broen, ved hvert side. I begge skap sto strømmen på og både lys og varmeelement i skapene fungerte. Modemene lyste rødt og var ute av funksjon. Broen er inndelt i 6 soner hvorav sone 1 til 4 styres fra Remøy-siden, sone 5 og 6 fra Leine-siden (mot Fosnavåg). Tabell 31 viser avlest spenning og strøm for styreskapet på Remøy-siden (akse 21). Tabell 32 viser tilsvarende avlesninger gjort på Leine-siden (akse 1). Avleste spenninger ble også kontrollert ved manuell måling med multimeter. Armeringens potensial mot innstøpte referanseelektroder ble avlest på Camur Controller og er vist i vedlegg F.

Tabell 31 Driftsdata styreskap på Remøy-siden. Avlest 02.april 2019

Strømforsyning	Spenning	Strøm	Areal	Strømtetthet(betongoverflate)
1	2,00 V	0,11 A	486	0,23 mA/m <sup>2</sup>
2	0,12 V	0 A	737	0 mA/m <sup>2</sup>
3	1,43 V	0,08 A	390	0,21 mA/m <sup>2</sup>
4	0,00 V	0 A	629	0 mA/m <sup>2</sup>

Tabell 32 Driftsdata styreskap på Leine-siden. Avlest 02.april 2019

Strømforsyning	Spenning	Strøm	Areal	Strømtetthet(betongoverflate)
5	2,00 V	0,17 A	374	0,45 mA/m <sup>2</sup>
6	2,03 V	0,16 A	376	0,43 mA/m <sup>2</sup>



Figur 75 Styreskap på Leine-siden (mot Fosnavåg). Strømforsyning til sone 5 og 6 der det går henholdsvis 170 og 160 mA likestrøm.

Skader på Remøy-brua ble observert, både på det katodiske beskyttelsessystemet og på selve broen. Omfanget av riss på brudrageren er til dels stort og i området rundt rissene er det en generell tendens til avflassing av maling, i flere tilfeller med avflassing også av underliggende anode. Dog er omfanget av avflassing markant mindre enn på Nerlandsøy. Riss med avflassing på brudrager er vist i Figur 76, tatt fra Remøy-siden.



Figur 76. Brudrager og brudekke sett fra Remøy-siden. Riss på brukasse, avflassing og liten avskalling. Blokkeringer av jernbindertråd med noen nye rustutslag.

Observasjoner av avskallinger og blottlagt korrodert armering gjøres på broen, eksempler på en mindre lokal avskalling på brudekke er vist i Figur 76. Omfanget er mindre enn på Nerlandsøy. Fra land ble det ikke gjort observasjoner på større avskallinger.



Figur 77 Fra Remøy-siden. Noe malingsavflassing og noen små avskallinger på brudrager. Ellers få synlige skader.

En tydelig forskjell i tilstand ble funnet mellom Remøy- og Leine-siden av broen der sistnevnte visuelt fremsto nærmest skadefri. Figur 78 er tatt ved landkar på Leine-siden (akse 1), det ses ingen synlige skader sett bort fra to lokale rustutslag, i realiteten estetiske skader. Legg merke til at strømtettheten i de to sonene som styres fra denne siden er noe høyere enn på Remøy-siden.



Figur 78 Fra Leine-siden. Ingen synlige skader. Det er utført blokkeringer av jernbindertråd i kontakt med anoden.

### 5.9.3 Brubefaring på Verjeskiftbrua

Befaring av anlegget på Verjeskift ble utført 10.april 2019. Det er et styreskap på hvert landkar, akse 9 mot Veiholmen og akse 1 mot Edøy. I forbindelse med rehabilitering av Verjeskift i 2011 ble elektronikk byttet ut. Undersøkelser i forkant av befaringen avdekket at man mistet kontakt med brua over nett ved årsskiftet 2014-2015, og at siste status dermed var ukjent.

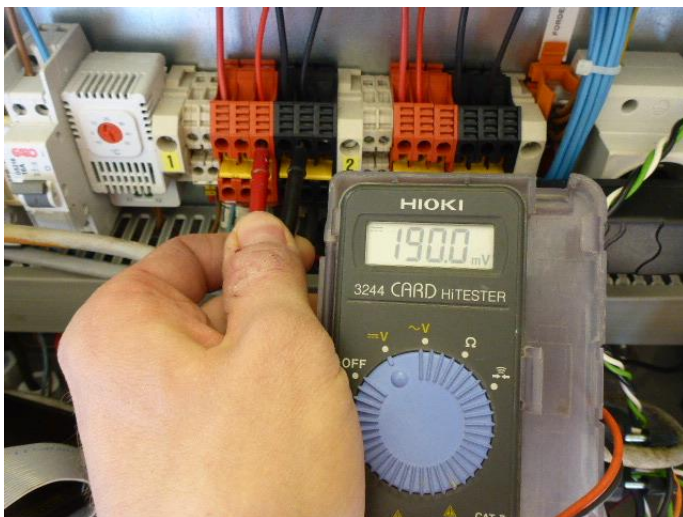


I styreskapet mot Veiholmen (akse 9) var det strøm inn til skapet (236 V vekselspanning i stikkontakt). På de to strømforsyningene lyste indikatoren for «Power On», de resterende «Output ON» og «output OK» lyste imidlertid ikke, se Figur 79.



Figur 79 Styreskap i akse 9 (mot Veiholmen). Ingen strøm ut i feltene jf. lysindikator på Camur II FixVolt

Utførte manuelle målinger med multimeter på rekkeklemmene viste spenning mellom anode og armering på noen hundre mV og bekreftet mistanken om at det var strøm inn til skapet, men ikke ut i feltene. Figur 80 viser måling av spenning mellom anode (rød kabel) og armering (sort kabel) i sone 1 med multimeter.



Figur 80 Manuell måling av spenning på rekkeklemmer mellom anode (rød) og armering (sort) i sone 1, 190 mV.

Etter at kontroller-enheten var lokalisert og påslått i det andre skapet ble spenningen igjen målt på rekkeklemmene, målingene før og etter påskrudd kontroller-enhet er vist i Tabell 33. De målte verdiene stemmer overens med de siste loggdata før kontakten med anlegget ble brutt ved årsskiftet 2014-2015.

Tabell 33 Målt spenning styreskap akse 9 (Veiholmen) før og etter at kontroller-enheten i akse 1 ble påskrudd.

Sone	Spenning ved ankomst	Spenning etter påskrudd anlegg
1	0,19 V	0,91 V
2	0,23 V	0,91 V

Det ble tatt stikkprøver av pin-motstand i anoden ved styreskapet i akse 9. På Figur 81 utføres en måling etter at malingen lokalt er fjernet med flat skrutrekker. Totalt ble det utført fire slike målinger i samme område. Målt pin-motstand varierte mellom 230 – 400  $\Omega$ .



Figur 81 Måling av pin-motstand på brudrager ved styreskap akse 9. Enkeltmåling i figuren har verdi 314,4  $\Omega$

I styreskapet mot Hopen (akse 1) var det på tilsvarende måte strøm inn til skapet, men ikke ut i felt. I skapet ble Camur-kontroller-enheten lokalisert, denne var avslått (Figur 82). Etter påslått enhet lyste samtlige lys på strømforsyningen grønt og dermed gikk det strøm ut i anlegget.



Figur 82 Styreskap i akse 1 (mot Hopen). Avslått Camur II Controller.

Da styresystemet er nyere enn på Nerlandsøy og Remøy og baserer seg på fjernovervåking via nett var det ikke mulig å avlese spenning og strøm i de ulike sonene. Avlesninger for dette styresystemet gjøres via programmet «Camur Monitor». Til dette trengs en skjerm tilkoblet kontroller-enheten eller en bærbar PC tilkoblet Camur-nettverket. Dermed var det heller ikke mulig å endre driftsspenningen. Måling av spenning etter at kontroller-enheten var påslått ble gjort manuelt, resultatet er vist i Tabell 34. Målte verdier samsvarer med de siste loggdata man har fra broen før kontakten ble brutt 27. desember 2014.

Tabell 34 Målt spenning i styreskap akse 1 (mot Hopen) etter at kontroller-enhet ble påskrudd.

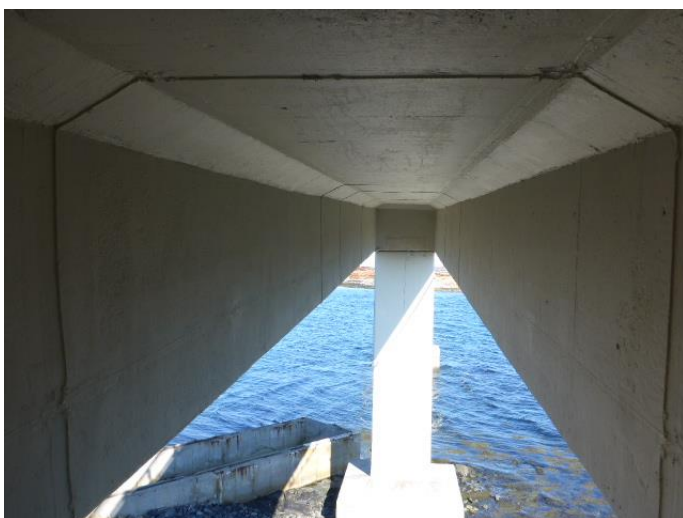
Sone	Spenning
3	1,11 V
4	0,91 V
Vannanoder	2,99 V

Det ble ikke gjort observasjoner av synlig armeringskorrosjon eller betongavskallinger på befaringen den 10.april 2019. Hovedinntrykket fra den visuelle inspeksjonen fra land er at det er lite skader. Skadene som var relaterte seg til avflassing av maling og delvis anode. Figur 83 er fra innvendig side av spennet mellom akse 8 og 9, malingen har flasset av på tre områder på brudragere samt på pilar akse 8.



Figur 83 Fra styreskap i akse 9 mot pilar akse 8.

Figur 84 er fra innvendig side av spennet mellom akse 1 og 2, dette spennet fremsto som skadefritt. Ledningen som ses på dragere og i underkant brudekke er matekabel for strøm til strømfordelingsbånd og ble etablert ved siste rehabilitering i 2011. Dette var et av mange nye matepunkt på brua.



Figur 84 Fra styreskap i akse 1. Visuelt fremstår innvendig side av spennet mellom akse 1 og 2 som skadefritt, uten avskallinger eller malingsavflassing.

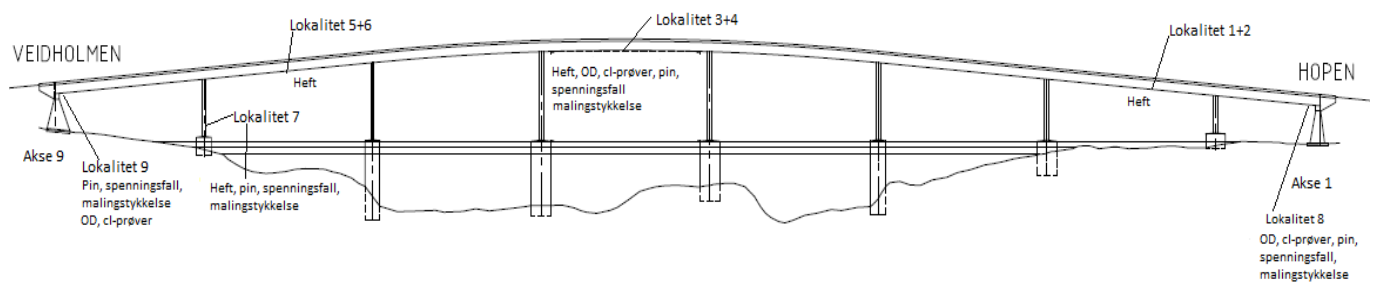
Figur 85 er tatt på lo-siden og viser malingsavflassing både på brudrager og i underkant brudekke. Basert på flatene som kunne inspiseres fra land den 10.april later problemet med avflassing til å være noe større på lo-siden av brudrager og ytterst på underkant bruvinga.



Figur 85 Lo-siden av brudrager og underkant bruvinga ved akse 1. Avflassing av maling og delvis anode (i underkant bruvinga).

## 5.10 Bruinspeksjon med brulift på Verjeskiftbrua

Den 25.april 2019 ble Verjeskiftbrua inspisert med brulift. I Figur 86 ses en oversikt over brua med avmerking av sted for prøvetaking. Merk at den gamle aksenummereringen på Verjeskiftbrua var motsatt. Heftprøver ble tatt i 7 lokaliteter, måling av spenningsfall og pin-motstand i anoden ble utført på 5 lokaliteter. Den planlagte prøvetakingen ble endret da brua kunne holdes stengt i maksimalt 20 minutter av gangen. Dette medførte at måling av spenningsfall og pin-motstand i lokalitet 1-2 og 5-6 ble flyttet til akse 1 og 9, da dette kunne utføres på landkarene uten å hindre trafikkavviklingen på brua. De siste målingene på Verjeskiftbrua ble gjort 03.mai 2019.



Figur 86 Utført prøvetaking på Verjeskiftbrua 25.april og 03.mai 2019

### 5.10.1 Driftsdata fra Verjeskiftbrua

Det siste intervallet med loggdata var fra perioden 10.04.2019 (ved siste brubefaring) til 25.04.2019. Fra loggdata kunne det registreres at anlegget hadde vært av siden 02.09.2018 og frem til første besøket av undertegnede, 10.04.19. Lenger tilbake i tid er det mange avbrudd, det var ikke mulig å finne ved hvilket tidspunkt driftsavbruddene oppstod. Det ses at driftsspenningen i mai/juni 2012 i sonene var fra 0,5 - 0,7 V. Tabell 35 viser driftsdata avlest 25.04.2019, i Tabell 36 er tilsvarende

driftsdata fra 03.05.2019 vist. **Driftsspenningen ble økt på kvelden den 25.04.2019 etter undersøkelsen med brulift.**

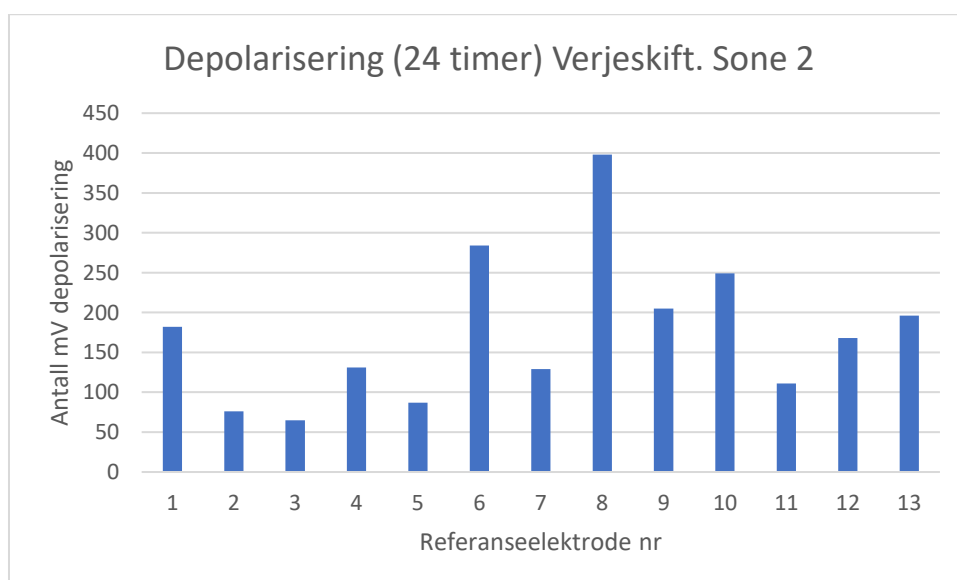
Tabell 35 Driftsdata fra Verjeskiftbrua, avlest 25.04.2019

Sone	Spenning	Strøm	Areal	Strømtetthet (betongoverflate)
1	0,90 V	221 mA	850 m <sup>2</sup>	0,26 mA/m <sup>2</sup>
2	0,90 V	182 mA	916 m <sup>2</sup>	0,20 mA/m <sup>2</sup>
3	1,10 V	318 mA	924 m <sup>2</sup>	0,34 mA/m <sup>2</sup>
4	0,90 V	197 mA	730 m <sup>2</sup>	0,27 mA/m <sup>2</sup>

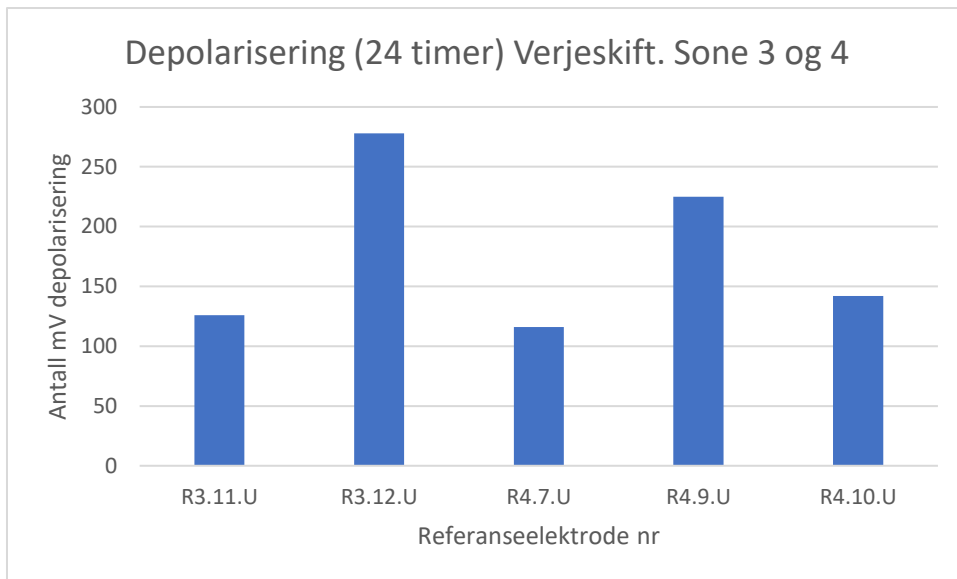
Tabell 36 Driftsdata fra Verjeskiftbrua, avlest 03.05.2019

Sone	Spenning	Strøm	Areal	Strømtetthet (betongoverflate)
1	2,00 V	1023 mA	850 m <sup>2</sup>	1,20 mA/m <sup>2</sup>
2	2,00 V	782 mA	916 m <sup>2</sup>	0,85 mA/m <sup>2</sup>
3	2,00 V	921 mA	924 m <sup>2</sup>	1,00 mA/m <sup>2</sup>
4	2,00 V	1097 mA	730 m <sup>2</sup>	1,50 mA/m <sup>2</sup>

Styresystemet tar automatisk en 24 timers depolarisering den første i hver måned. Ved siste besøk på Verjeskiftbrua, 03.mai 2019, var det mulig å laste ned resultatene fra depolariseringen 01- 02.mai. I tidsrommet fra kvelden 25.april frem til depolariseringen natt til 01.mai hadde driftsspenningen vært på 2 Volt (justert fra PC tilkoblet kontroller-enheten). Det var ikke mulig å oppnå kontakt med referanseelektrodene i sone 1. Det var heller ikke mulig å oppnå kontakt med referanseelektrodene montert ved rehabilitering i 2011 (halvcelle, ERE 20) da disse er koblet til nodebokser ute på broen som kommuniserer trådløst med kontroller-enheten. Modemet var ute av drift og signalene fra nodeboksene kunne derfor ikke mottas. Dermed er resultatene basert på de opprinnelige, ROVER grafittlektrodene. I Figur 87 og Figur 88 ses resultatet av depolariseringen 01.mai i henholdsvis sone 2, 3 og 4.



Figur 87 Depolarisering Verjeskiftet, sone 2, 01.mai 2019. 2 V påtrykt spenning før depolariseringen.



Figur 88 Depolarisering Verjeskiftet, sone 3 og 4, 01.mai 2019. 2V påtrykt spenning før depolariseringen.

### 5.10.2 Visuell inspeksjon og hammerbanking

Det ble innledningsvis utført visuell befaring, hammerbanking og «fingertuppkontroll» på samtlige lokaliteter, resultatet er gitt i Tabell 37. Stikkprøver utført på de 9 lokalitetene avdekket ikke delaminering av overdekning (bom). Observasjoner av betongavskallinger eller synlig armeringskorrosjon ble heller ikke gjort, verken fra brulift eller fra land.

Riss på overflaten ble observert i varierende omfang. Spesielt fremtredende var opprissing i underkant av brudragere, enkelte steder hadde både maling og underliggende anode risset opp. Det var også områder som visuelt fremsto som skadefrie. Figur 89 viser opprissing i underkant av drager ved lokalitet 3. Ovenfor risset ses et område med løs maling som løsnet ved lett skraping med hammer, dette ble avdekket ved «fingertuppkontroll»



Figur 89 Riss i maling og anode + løs maling, underkant drager, lokalitet 3

Fingertuppkontroll avdekket områder med løs maling som vanskelig lot seg avdekke ved bruk av hammer, dog var områdene i stor grad knyttet til lokalitetene med synlig malingsavflassing, 1 og 2. I underkant av brudrager lokalitet 3 avdekket fingertuppkontrollen lokale felt med løs maling, her fremsto betongoverflaten som **ru**.

Ved siste rehabilitering ble pilarene forseglet med epoksy 2 meter opp fra overkant fundament, formålet var å bedre beskytte anoden da erfaring fra første runde rehabilitering viste at slitasjen var stor i bunnpartiet av pilarer. Ved bruinspeksjonen 10. og 25.april ble det avdekket at denne epoksyforseglingen generelt har løsnet. Figur 90 er fra lokalitet 7 og viser område der maling, epoksy og underliggende anode har flasket av. Fingertuppkontroll avdekket store områder i bunn av pilaren med løs overflatebehandling.



Figur 90 Løs epoksyforsegling nederst på pilar akse 8. Avflassing av fritt eksponert anode

Lenger opp på forseglet område av pilaren er tendensen at anoden er intakt. Figur 91 viser samme pilar cirka 1,6 meter opp fra overkant av fundament, forseglingen er løs mens anoden enda sitter til underlaget, det ble tatt heftprøver direkte på anoden på dette stedet (Tabell 47).



Figur 91 Rent heftbrudd mellom epoksy og primer (AHEAD Multiprimer). Pilar akse 8, cirka 1,8 m OK fundament.

Malingsavflassing kunne observeres i varierende grad. I spennet ved lokalitet 1 og 2 var det omfattende avflassing av maling, visuelt fremstod malingen her som tynn. Spesielt fremtredende var avflassing på innvendig side av brudragerne og i underkant av brudekke, se Figur 92. Sett bort fra lokalitet 1 og 2 fortonet avflassing seg først og fremst som lokale punktskader.



*Figur 92 Generell slitasje og avflassing av maling ved lokalitet 1. Lokalt også avflasset anode*

Figur 93 er fra midtspennet under møteplassen, ved lokalitet 3 og 4, og er eksempel på område der det ikke ble gjort observasjon av avflassing eller andre synlige skader. Dog avdekket nærmere granskning og «fingertuppkontroll» et lokalt område med løs maling i underkant av høyre brudrager på figuren.



*Figur 93 Lokalitet 3 og 4, under møteplass midt på broen. Visuelt fremstår spennet innvendig som skadefritt.*

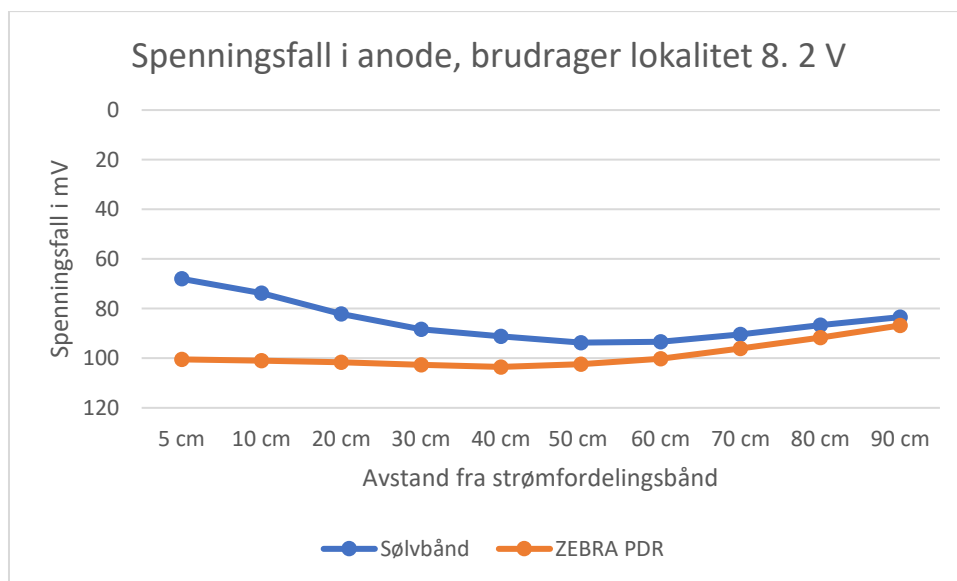


Tabell 37 Oppsummering av visuell kontroll og bom-kontroll på Verjeskiftbrua.

Lokalitet	Bom/avskalling i betong?	Riss?	Fingertupp- bom i maling?	Avflassing?
1	Nei	Ja	Ja, lokalt	Ja, store deler av spennet
2	Nei	Ja	Ja, lokalt	Ja. Lokalt på lo-side av drager og uk bruvinge
3	Nei	Ja	Liten bom UK drager	Nei
4	Nei	Nei	Nei	Nei
5	Nei	Nei	Nei	Nei
6	Nei	Nei	Nei	Nei
7	Nei	Ja	Bom i epoksyforsegling på de nederste 2 m av pilar.	Ja, epoksy løs, stedvis avflassing av underliggende anode
8	Nei	Nei	Nei	Nei
9	Nei	Nei	Lokale områder med løst	Nei

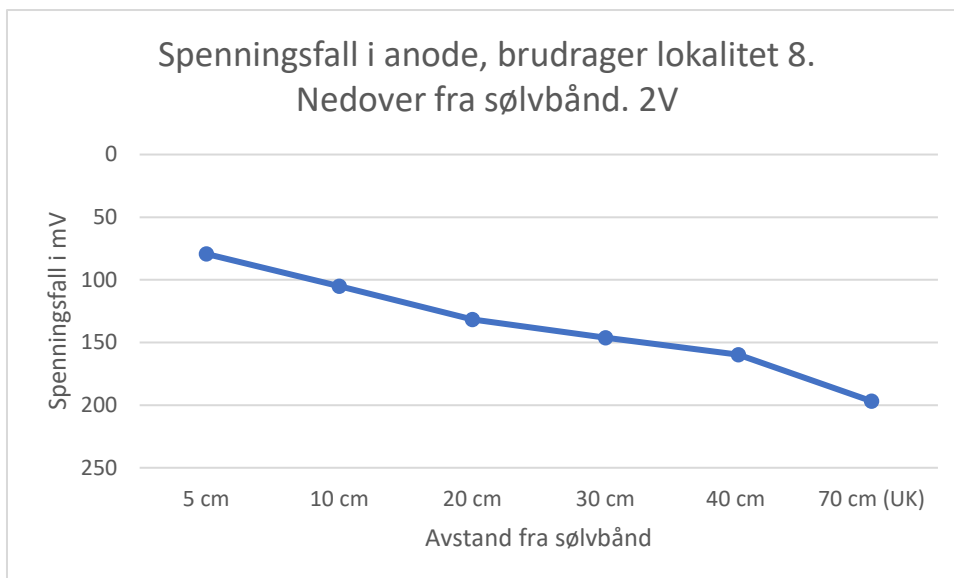
### 5.10.3 Spenningsfall i anoden på Verjeskiftbrua

Spenningsfallet i anoden ble målt på 5 lokaliteter, hvorav to ble målt med bare 0,9 V driftsspenning, av denne grunn er de ikke medtatt. Figur 94 viser spenningsfallet i anoden i lokalitet 8, østvendt drager, ved 2 V driftsspenning. Målingene er gjort i to parallelle striper utfra henholdsvis sølvbånd (fra første rehabilitering) og ZEBRA-PDR-bånd (fra siste rehabilitering). Spenningsfallet ble også målt på vestvendt brudrager i lokalitet 8 der sølvbånd var benyttet, dette er ikke medtatt da resultatene fra begge dragere var i samme størrelsesorden.



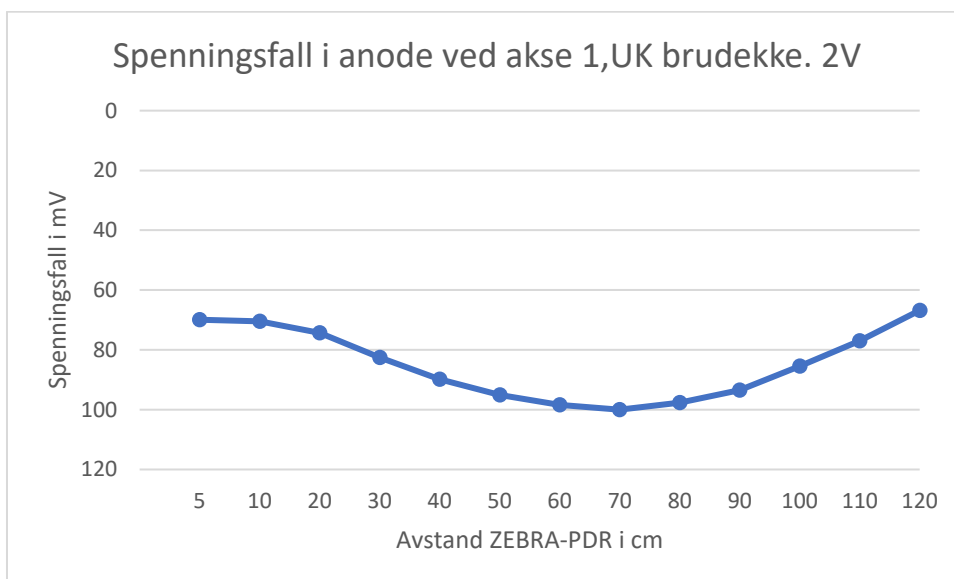
Figur 94 Målt spenningsfall i anoden på drager, lokalitet 8, akse 1 (ved landkar mot Hopen)

Spenningsfallet nedover på drageren fra PDR-båndet ble også målt, resultatet kan ses i Figur 95. Den siste måleverdien «70 cm UK» er tatt midt på underkant av drageren. Resultatene fra vestvendt brudrager var også her av samme størrelsesorden.



Figur 95 Målt spenningsfall i anoden nedover fra sølvbånd, lokalitet 8

Spenningsfallet mellom PDR-bånd i underkant brudekke med avstand 1,2 meter er vist i Figur 96. Tilsvarende spenningsfall mellom strømfordelingsbånd i underkant brudekke ble målt i akse 9, her var sølvbåndene beholdt.



Figur 96 Målt spenningsfall i anoden i underkant brudekke ved akse 1 (landkar mot Hopen). Avstand ZEBRA-PDR-bånd 1,2 meter.

#### 5.10.4 Pin-motstand i anoden på Verjeskiftbrua

Stikkprøver av pin-motstand i anoden ble utført der det var mulig å komme gjennom overflatebehandling og underliggende primer. Målingene ble utført på samme lokaliteter som måling av spenningsfallet i anoden. Resultatet ses i Tabell 38 .

Tabell 38 Målt pin-motstand i anoden på lokalitetene på Verjeskiftbrua.

Lokalitet	Plassering (synsfelt mot Hopen) og konstruksjonsdel	ZEBRA / AHEAD benyttet?	Pin-motstand i anode [ $\Omega$ ]
3	Spenn akse 5/6, brudrager venstre	AHEAD	280 – 350
3	Spenn akse 5/6, brudrager venstre, UK	ZEBRA	45 – 51
4	Spenn akse 5/6, brudrager høyre	AHEAD	225 – 310
7	Akse 8, pilar, bunn	ZEBRA	80 – 100
8	Spenn akse 1/2, brudrager venstre	AHEAD	410
8	Spenn akse 1/2, brudrager høyre	ZEBRA	31 – 64
		AHEAD	340 – 370
8	Spenn akse 1/2, UK brudekke	ZEBRA	50 – 65
9	Spenn akse 8/9, brudrager venstre	AHEAD	230 – 390
9	Spenn akse 8/9, brudrager høyre	AHEAD	161 – 384
9	Spenn akse 8/9, UK brudekke	AHEAD	350 – 380

### 5.10.5 Overdekning og kloridprøver, Verjeskiftbrua

Kloridprøver ble tatt i profiler som ble tilpasset lokal armeringsoverdekning. Tabell 39 viser minste overdekning og kloridinnhold (i vekt% klorider av betongvekt) i utborede profiler på lokalitet 3 og 4 på brudrager. I Tabell 40 er tilsvarende vist for underkant brudekke, lokalitet 9. Disse prøvene er analysert av SINTEF ved potensiometrisk titrering

Tabell 39 Kloridprofiler på brudrager i lokalitet 3 og 4. «OD» står for armeringsoverdekning

Lokalitet 3, OD fra 26 mm (bøyer $\varnothing$ 12)	Kloridinnhold i masse% av betongvekt	Lokalitet 4, OD fra 30 mm (bøyer $\varnothing$ 12)	Kloridinnhold i masse% av betongvekt
<b>Brudrager</b>		<b>Brudrager</b>	
00 – 10 mm	0,223	00 – 10 mm	0,223
10 – 20 mm	0,143	10 – 20 mm	0,135
20 – 30 mm	0,175	20 – 30 mm	0,125
30 – 40 mm	0,161	30 – 40 mm	0,129

Tabell 40 Kloridprofil i underkant brudekke, lokalitet 9. «OD» står for armeringsoverdekning

Lokalitet 9, OD fra 33 mm ( $\varnothing$ 12)	Kloridinnhold i masse% av betongvekt
<b>Brudekke UK</b>	
00 – 10 mm	0,233
10 – 20 mm	0,135
20 – 30 mm	0,024
30 – 40 mm	<0,005
40 – 50 mm	0,031

### 5.10.6 Heftprøver på Verjeskiftbrua

I syv lokaliteter ble heftfastheten testet, hvorav seks fordelte seg på brudrager og en på pilar i akse 8. Bruddstyrke og -flate er angitt i Tabell 41 - Tabell 47. Under tabellen er enkelte av lokalitetene vist etter avtrekk i Figur 97 - Figur 99 .

Tabell 41 Heftprøver lokalitet 1, brudrager.

Lokalitet 1	Avlest heft	Bruddflate
Prøve nr. 16	1,7 MPa	I anode
Prøve nr. 17	0,6 MPa	Anode/semmenthud
Prøve nr. 18	Løsnet v bor	I anode



Figur 97 Lokalitet 1 etter trekk av heftprøver

Tabell 42 Heftprøver lokalitet 2, brudrager.

Lokalitet 2	Avlest heft	Bruddflate
Prøve nr. 13	1,7 MPa	15% anode, 30% sementhud, 30% slemmemasse, 25% lim
Prøve nr. 14	Løstnet	Datt i sjøen ved montering
Prøve nr. 15	Løstnet	Datt i sjøen ved montering

Tabell 43 Heftprøver lokalitet 3, brudrager.

Lokalitet 3	Avlest heft	Bruddflate
Prøve nr. 10	2,4 MPa	50% anode, 50% sementhud/slemmemasse
Prøve nr. 11	2,4 MPa	30% anode, 50% slemmemasse, 20% sementhud
Prøve nr. 12	2,6 MPa	50% anode, 50% slemmemasse (NB: anoden er noe tynn)

Tabell 44 Heftprøver lokalitet 4, brudrager.

Lokalitet 4	Avlest heft	Bruddflate
Prøve nr. 7	1,1 MPa	Anode, noe innslag av sementhud
Prøve nr. 8	0,9 MPa	90% anode, 5% lim, 5% sementhud
Prøve nr. 9	1,3 MPa	I anode



Figur 98 Lokalitet 4 etter trekk av heftprøver

Tabell 45 Heftprøver lokalitet 5, brudrager.

Lokalitet 5	Avlest heft	Bruddflate
Prøve nr. 4	3,0 MPa	50% anode, 25% mørtel, 25% slemmemasse
Prøve nr. 5	3,0 MPa	50% anode, 25% mørtel, 25% slemmemasse
Prøve nr. 6	3,0 MPa +	85% anode/mørtel/slemmemasse, 15% betong



Figur 99 Lokalitet 5 etter trekk av heftprøver

Tabell 46 Heftprøver lokalitet 6, brudrager.

Lokalitet 6	Avlest heft	Bruddflate
Prøve nr. 1	1,5 MPa	I anode
Prøve nr. 2	1,7 MPa	I anode
Prøve nr. 3	1,5 MPa	I anode

Tabell 47 Heftprøver lokalitet 7, pilar med løs epoksyforsegling.

Lokalitet 7	Avlest heft	Bruddflate
Prøve nr. 19	2,7 MPa	Reparasjonsmørtel (100%)
Prøve nr. 20	2,4 MPa	Reparasjonsmørtel (100%)

### 5.10.7 Tørrfilmtykkelse av overflatebehandling

I Tabell 48 er de utførte målingene av tørrfilmtykkelse på den beskyttende malingen vist. Anoden følger med da den ikke lot seg separere fra malingen. På hver lokalitet er det skåret ut flere flak i samme område for å få med variasjonene i tykkelse. Tabellen viser høyeste og laveste målte tykkelse for hver lokalitet

Tabell 48 Tørrfilmtykkelse maling, Verjeskiftbrua

Lokalitet	Plassering	Tørrfilmtykkelse [ $\mu\text{m}$ ]
3	Brudrager, østvendt, utside	700 - 970
4	Brudrager, vestvendt, innside	940 - 1080
7	Pilar (epoksyforsegling+maling)	800 – 830 Kun maling: 260
8	Brudrager, østvendt, innside	710 – 800
8	Brudekke, underkant	750 Ny anode+ maling: 360
9	Brudrager, østvendt, innside	680 - 720
9	Brudrager, vestvendt, innside	340 – 360
9	Brudekke, underkant	480 – 500

## 6 DISKUSJON

For å vurdere hvorvidt anodesystemet ledende maling er et reelt alternativ for katodisk beskyttelse av kystbruer er kapittel 6 inndelt i temaområder der tilfluktsrommet (prøvefeltet) og bruinspeksjonene diskuteres opp mot formålet. Det er under arbeidene lagt vekt på å belyse erfaringer som kan nyttiggjøres ved eventuell fremtidig bruk av ledende maling som katodisk beskyttelse av bruer. Kritiske faktorer er også belyst. Kapittel 6.1 Karakterisering av prøvefeltet er innledende før følgende temaområder blir behandlet:

- 6.2 Design
- 6.3 Funksjonalitet
- 6.4 Utførelse
- 6.5 Drift
- 6.6 Bestandighet
- 6.7 Gjenbehandling

Del 2 av formålet, å innhente langtidserfaringer fra bruer som har vært katodisk beskyttet med ledende maling over en periode på 20 – 30 år viste seg utfordrende. Ustabilitet i drift og oppfølging gjør at KB-anleggene har vært av i lengre perioder. Dermed er det vanskelig å vurdere langtidsfunksjonalitet og bestandighet, fordi slike vurderinger bør gjøres under forutsetning av en viss kontinuitet i driften. I tillegg kommer de praktiske utfordringene knyttet til tilgang på brulift og begrensningen i tid ute på brua. Med denne bakgrunn er resultater og erfaringer fra prøvefeltet i tilfluktsrommet viet noe større plass i det følgende.

### 6.1 Karakterisering av prøvefeltet

Ønsket var at prøvefeltet på best mulig måte skulle representere virkeligheten med store lokale variasjoner i tilstand. Det ble funnet at prøvefeltet tilfredstilte følgende kriterier:

- Høy armeringstetthet
- Områder med både høy og lav sannsynlighet for armeringskorrosjon.
- Områder med betongavskallinger, men også områder med kloridinfiltrert betong uten synlige skader.

Etter to døgn med 2 V påtrykt likespenning ble det ved første depolarisering over 4 timer, klart at 23 stk. referanseelektroder (Ag/AgCl), hvis plassering også var gjort med bakgrunn i forundersøkelsene, kan grupperes som følger:

- Referanseelektrode 1-8, felt 1: Befinner seg i kjørebane der armeringstettheten er høy (forholdstall 1,95, dette tilsvarer en tett armert bru, f.eks. underkant drager på Verjeskiftet). målingene indikerte passiv armering og dette ble bekreftet ved et lavt kloridinnhold ved armering. Da prøvefeltet ble meislet vekk, ble det avdekket ren armering. Disse elektrodene måler de mest anodiske (positive) potensialet på armering før oppstart. Allerede ved første runde registrerte referanseelektrodene 200 – 300 mV depolarisering på armering over en periode på 4 timer og potensialet fortsatte å utvikle seg i anodisk retning innenfor denne perioden.
- Referanseelektrode 9 -16 og 23, felt 1: Befinner seg på biloppstillingsplasser der potensialmålingene indikerte høy sannsynlighet for armeringskorrosjon og der kloridinnholdet i nivå med armering var høyt (1,8 vekt% klorider av antatt sementvekt). Ved første runde depolariserte armering særdeles lite (med unntak av nr. 16). Flere av

referanseelektrode snur i løpet av de fire timene, dette er illustrert i vedlegg D. Etter all sannsynlighet pågår armeringskorrosjon i dette området og armeringstettheten er høy (1,95). Referanseelektrode 9 – 13 befinner seg i reparasjon A, og dekker det siste kriteriet angående betongavskallinger.

- Referanseelektrode 17 -22, felt 2: Eneste forskjell fra gruppen over er armeringstettheten, som i dette tilfellet er «ordinær», estimert forhold armering- og betongareal er 0,75. Dessuten viste elektrode nr. 18,20 og 21 tegn på passiv oppførsel med betydelig depolarisering fra første runde.

Det kunne allerede etter første runde depolarisering fastslås at anodesystemet i høyeste grad er kapabelt til å beskytte store areal med passiv armering, dette basert på den betydelige depolariseringen av armeringen i kjørebanelen. Observasjonen er ikke overraskende, og dette stemmer godt med at det er enklere å polarisere armering som er passiv (Bertolini, Bolzoni et al. 1998). Pedferri med flere viste til at nødvendig strømtetthet ved forebygging er i størrelsesorden 1/10 lavere enn ved katodisk beskyttelse (Bertolini, Bolzoni et al. 1998). I området ved referanseelektrode 1-8 i kjørebanelen er det all grunn til å tale om katodisk forebygging snarere enn katodisk beskyttelse.

Mer interessant, i tråd med formål, er spørsmålet som gjelder i hvilken grad anodesystemet er kapabelt til å beskytte mot armeringskorrosjon ved høy armeringstetthet og høyt kloridinnhold. Utfra de første resultatene er det helt tydelig at armering med pågående armeringskorrosjon krever større total ladning enn passiv armering, som ventet, og i tråd med litteraturen (Liu and Shi 2009)

## 6.2 Design

I designfasen legges grunnlaget for det katodiske beskyttelsessystemets videre funksjonalitet. For ledende maling vil designfasen blant annet innebære å bestemme plassering av strømfordelingsbånd (for dette systemet kalt PDR), antall tilkoblingspunkter mellom anodekontakter og strømfordelingsbånd samt tykkelsen av anoden. Disse faktorene vil innvirke på strømfordelingen i anoden. I prøvefeltet og på brua ble viktige forhold knyttet til design belyst.

Dekket i tilfluktsrommet (felt 1) hadde en meget høy tetthet av armering med pågående korrosjon i varierende omfang. Som en del av formålet ble det sett på som vesentlig å undersøke strømfordelingen i anoden. Måling av spenningsfall i anoden var en viktig del av forsøket og ble utført jevnlig i takt med aktivering av flere PDR-bånd, i denne anledning fikk man en meget interessant erfaring som kan nyttiggjøres ved fremtidig design av KB-anlegg med ledende maling:

### *Design - Strømfordeling fra strømfordelingsbånd ut i anodemalingen*

Med ett strømfordelingsbånd var spenningsfallet i anoden som ventet stort, inntil 1 V i felt 1 (Figur 50). Det overraskende var at spenningsfallet forble høyt til tross for at stadig flere bånd ble koblet inn. Forventningen var at kurven som fremkom ved å plote spenningsfallet ut fra båndene ville fortone seg som en klassisk parabel eller en «hengekøye». Dette ble ikke observert. Isteden fortonet spenningsfallet seg som et umiddelbart 200 – 400 mV fall i kanten av båndene. Videre ut i anoden var spenningsfallet relativt lavt. Selv ved cirka 70 cm senteravstand mellom aktiverte bånd, måtte man konstatere et spenningsfall som i felt 1 var opp mot 20% av driftsspenningen på 2V. I felt 2 med lavere tetthet av armering så man samme tendens, men ikke like fremtredende som i felt 1.

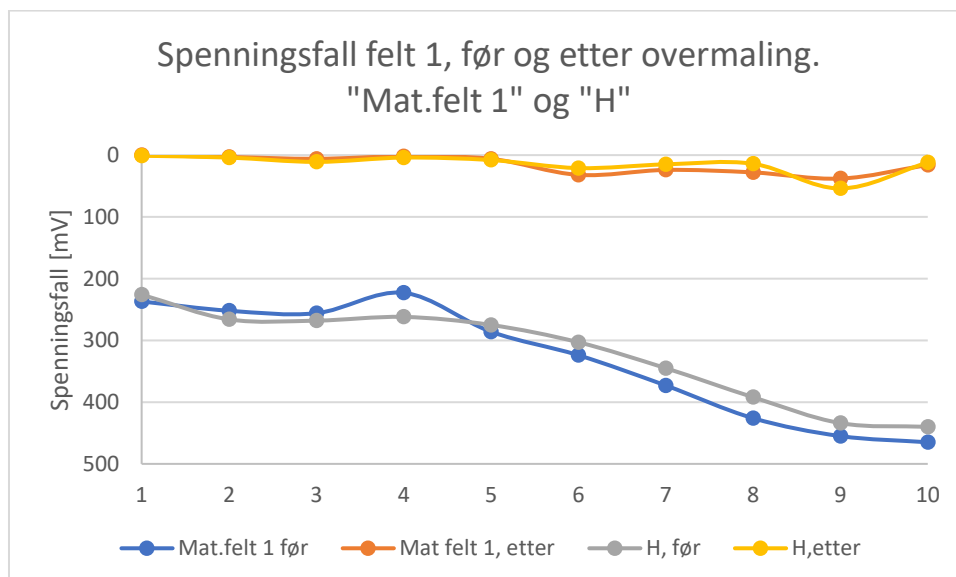
Det ble ansett som mest sannsynlig at det høye spenningsfallet måtte skyldes overgangen mellom PDR-bånd og anode, med følgende bakgrunn:



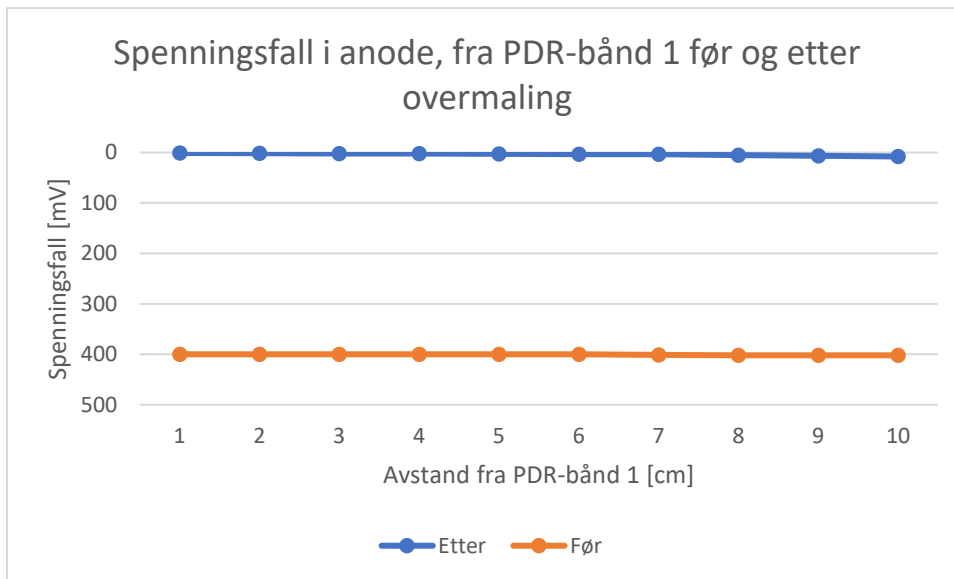
- Målt motstand i anoden var lav, 20 – 50  $\Omega$  (pin-motstand). Det kunne dermed utelukkes at spenningsfallet skyldtes høy motstand i anoden.
- Størsteparten av spenningsfallet kom umiddelbart utenfor båndet.
- Spenningsfallet langs selve båndet (3m) var i størrelsesorden noen få mV. I produktdatabladet er det vist til at båndene (ZEBRA PDR) har en motstand på 0,09  $\Omega$  per meter.

Da det var lavere virkning av anoden enn forventet selv ved innkobling av flere strømfordelingsbånd ble et ekstra strøk anode påført over strømfordelingsbåndene. Forskjellen etter overmalingen var overraskende stor utfra at tykkelse på anode ble påført i tråd med vanlig praksis og ikke ble vurdert som en begrensning. Etter overmaling kunne følgende registreres:

- Spenningsfallet direkte utenfor båndene ved 2V påtrykt spenning, var redusert fra flere hundre mV til noen få mV, forskjellen er vist i Figur 101.
- Størrelsen på spenningsfallet var redusert betraktelig, vist i Figur 100. Selv med to bånd tilkoblet i felt 1 (senteravstand cirka 4,2 meter) var største fall i spenning lavere enn med alle bånd tilkoblet (senteravstand cirka 0,7 meter) før overmalingen.
- Loggdata fra dagen etter overmaling viste at strømmen i feltet var økt med 280 mA, til tross for at tilkoblede strømfordelingsbånd var redusert fra 7 til 2.



Figur 100 Spenningsfall i felt 1 før og etter overmaling av strømfordelingsbånd.



Figur 101 Spenningsfall i anoden umiddelbart utenfor strømfordelingsbånd nr. 1 før og etter overmaling.

Figur 100 viser spenningsfallet i felt 1 med likt antall bånd tilkoblet før og etter overmaling, her synliggjøres den store forskjellen. **Den helt ulike oppførselen skyldes trolig følgende:**

Før overmaling var anoden tynn og lokalt brutt over PDR-båndene slik at kontaktarealet mellom bånd og anodemaling var for lite, dermed kunne ladningsoverføringen fra PDR-båndet ut i anoden foregå i begrensede tverrsnitt. Dette medførte høy overgangsmotstand mellom bånd og anode. Resultatet var et spenningsfall som umiddelbart utenfor båndene var i størrelsesorden 10 – 30 % av driftsspenningen i felt 1.

Ved overmalingen økte kontakten mellom anodemalingen og strømfordelingsbåndet, dermed kunne ladningsoverføringen foregå over et betydelig større tverrsnitt og strømmen ble fordelt ut i anoden på en helt annen måte. Overgangsmotstanden mellom bånd og anode gikk fra å være betydelig til å bli neglisjerbar, Figur 101 viser det umiddelbare spenningsfallet utenfor strømfordelingsbånd nr. 1 før og etter overmaling. Denne forklaringen støttes opp av loggdata som viste at det for samme spenning på 2V gikk 280 mA mer strøm i prøvefeltet (Tabell 20).

Faktum er at man i prinsipp fikk et forbedret katodisk beskyttelsessystem ved å påføre ytterligere et lag med anode over båndene. I takt med påkobling av stadig flere PDR-bånd foregikk en langt tydeligere reduksjon i spenningsfallet ettersom en større hengekøye stadig ble erstattet av flere mindre.

Situasjonen på brua er liknende tilfluktsrommet i den forstand at spenningsfallet direkte utenfor epoksyforseglingen er stort når det sammenliknes med det største fallet som måles mellom båndene. Dog er høyeste spenningsfall betydelig mindre, under 10%-anbefalingen. Ettersom prosedyren ved montering av strømfordelingsbånd og påføring av anode på broen var tilsvarende som i tilfluktsrommet (bortsett fra epoksyforseglingen) blir forklaringen også den samme.

Strømfordelingen i anoden er en del av totalen i feltet, både motstand i betongen og tilstand på armering vil innvirke på hvilken strømfordeling man får i kretsen, men disse to faktorene har man i liten grad mulighet til å påvirke (Chess 1998). Med tanke på den begrensede driftsspenningen gjelder det å vurdere ledd i den totale kretsmotstanden som har forbedringspotensial. Et så enkelt tiltak som overmaling av strømfordelingsbåndene ga et forbedret anodesystem ved at overgangsmotstanden

mellom strømfordelingsbånd og anodemaling ble kraftig redusert. Overmalingen resulterte i to forhold som utfra funksjonaliteten er svært viktig:

- En jevnere strømfordeling i anoden
- Mer beskyttelsesstrøm levert med samme driftsspenning

Erfaringen fra de to feltene i tilfluktsrommet viser også at gevinsten med overmaling av båndene er spesielt stor i de tilfeller tettheten av armering er høy, altså der behovet for beskyttelsesstrøm og jevn strømfordeling er størst. Erfaringen med overmaling bør nyttiggjøres ved fremtidig bruk av anodesystemet. Gjennom forsøket i tilfluktsrommet er det også tydeliggjort hvordan tilstrekkelig tykkelse av anoden over båndene enkelt kan kontrolleres ved å måle spenningsfall under rehabiliteringsarbeidene.

#### *Design - Nødvendige strømfordelingsbånd*

I produktdatabladet til de benyttede båndene, ZEBRA PDR, heter det seg at nødvendig avstand mellom bånd bestemmes i hver enkelt situasjon, og at valget avhenger av armeringsmengde, motstand i betongen og korrosjonstilstand på armering. Dette ble også erfart, både i tilfluktsrommet og på bru.

Med lik avstand mellom båndene i felt 1 og 2 var det målte spenningsfallet i anoden høyere i felt 1, (forholdstall armering- anode 1,95). Det er helt tydelig at båndene må stå tettere for å sikre jevn strømfordeling i anoden i situasjoner med høy armeringstetthet. Tar man NS-EN 12696 til etterretning gikk spenningsfallet i felt 1 under 10% av driftsspenningen **ved en avstand mellom båndene på cirka 1,4 meter** (største fall var da 120 mV, eller 6% av driftsspenningen). Likevel hadde overmaling av båndene en betydelig større effekt på strømfordelingen i anoden, før overmaling forble spenningsfallet stort til tross for lav senteravstand mellom strømfordelingsbåndene.

Samme tendens ble observert på Verjeskiftbrua. Studerer man plasseringen av strømfordelingsbåndene på brua er disse plassert symmetrisk, armeringsføringen på brua er derimot høyst ujevnt fordelt. For eksempel er armeringstettheten som forventet størst i nedre del av dragerne. Ved måling av spenningsfall ut fra strømfordelingsbåndene så man tydelig at spenningsfallet økte når man gikk mot høyere armeringstetthet i nedre del av dragere. Samme tendens ble erfart under FoU-prosjektet på Nerlandsøy og det ble anbefalt å legge strømfordelingsbåndene tettere der mye armering var samlet (vedlegg A).

Ved fremtidig bruk av anodesystemet på kystbruer anbefales det å etablere et prøvefelt. Her kan man gjøre målinger av spenningsfall i anoden for å finne nødvendig senteravstand på strømfordelingsbåndene. Da armeringstetthet vil variere på en bro kan avstanden mellom båndene differensieres. Dette vil bedre strømfordelingen i anoden, samt gi høyere strøm i områder med høyt beskyttelsesbehov.

En bør også være oppmerksom på at spenningsfall i anoden på maks 10% bare er en anbefaling i NS-EN 12696. Ved halvering av senteravstanden til 0,7 meter ble også spenningsfallet ubetydelig. Den andre gevinsten ved tettere plassering var økt totalstrøm i feltet, hvilket er en betydelig gevinst i seg selv. Innenfor rimelighetens grenser ses dermed ingen grunn til å spare på bruk av båndene.

### *Design- Spenningsfall i strømfordelingsbånd*

Men den begrensede lengden av strømfordelingsbåndene i tilfluktsrommet (cirka 3 meter) var spenningsfallet på strømfordelingsbåndet ved 2 V ubetydelig (0- 7 mV). Erfaringen fra rehabiliteringen på Verjeskiftbrua i 2011 viser at spenningsfallet i strømfordelingsbåndene kan bli betydelig ved store avstander mellom strømmatepunktene til anodesystemet. Spenningsfallet man trodde var forårsaket av brudd på strømfordelingsbånd viste seg å skyldes avstanden mellom matepunktene. Størrelsen på beskyttelsesstrømmen på Verjeskiftbrua ble forbedret da man etablerte flere tilkoblingspunkt mellom anodekabel og strømfordelingsbånd, en viktig erfaring å ta med seg ved eventuell fremtidig bruk av anodesystemet på bruer, der sonene oftest er store.

### *Design- Slemmemasser*

En ytterligere faktor som kan reduseres størrelsen på beskyttelsesstrømmen ble observert på Verjeskiftbrua, dette hører inn under design fordi det er i denne fasen vurderingen bør gjøres. Under den eldste anoden ligger en slemmemasse. Uavhengig av egenskapene vil et slikt sjikt fungere som en ytterligere barriere mot ladningsoverføringen, i det man får både motstanden i selve massen og overgangsmotstanden mellom slemmemasse og betong som ekstra ledd i kretsmotstanden mellom anode og armering. Egenskaper ved slemmemassene bør undersøkes nøye før det vurderes tiltak. På Nerlandsøybrua ble det i sin tid erfart at påføring av en slemmemasse resulterte i en kraftig redusert beskyttelsesstrøm (Rodum 1994).

## 6.3 Funksjonalitet

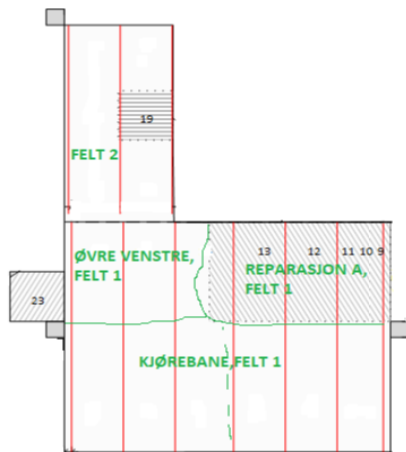
Funksjonaliteten av anodesystemet er vurdert både på prøvefeltet og bru. For prøvefeltet presiseres at KB-anlegget fikk begrenset tid for stabilisering etter at spenning var påtrykt. Likevel ble det benyttet depolarisering for å vurdere effekten av KB. Dette ga klare tendenser i virkning for konstruksjonens betongkvalitet B300 som er benyttet

Sentralt for funksjonaliteten er hvilken beskyttelsesstrøm som leveres armering fra 2 V driftsspenning, lokal strømfordeling og polarisering på ulike lag armering. Vurdering av funksjonalitet opp mot beskyttelseskriteriet i NS-EN 12696 er også gjort. Basert på erfaringen fra tilfluktsrom og bru er forhold man bør være oppmerksom på ved fremtidig bruk av anodesystemet belyst. Vurderinger angående anvendbarheten av ledende maling er også belyst.

Med 2 V driftsspenning, alle bånd tilkoblet og problemene (strømsluk og overmaling) utbedret gikk det i prøvefeltet 362 mA likestrøm. Regnet i forhold til anodearealet var strømtettheten for hele prøvefeltet 18,5 mA/m<sup>2</sup>. Ut fra erfaring med de ledende malingsanodene er tallet høyt, selv i oppstartfasen. Den høye strømtettheten skyldes trolig flere forhold, god forbehandling, lav senteravstand mellom strømfordelingsbånd og ikke minst overmalingen. Over tid er det ventet at en reduksjon i strømtetthet ville funnet sted, hovedsakelig med bakgrunn i at polariseringen medfører fuktvandring i retning av katoden. Erfaringen fra garasjeanlegg med ledende maling viser at strømstyrken går ned over tid, forklart med økt motstand i betongen.

### *Funksjonalitet- Strømfordeling i felt med variasjon i tilstand*

Et like interessant spørsmål er hvordan beskyttelsesstrømmen vil fordele seg i en reell situasjon der kloridinnhold, fuktighet i betongen, tilstand på armering og tetthet av armering varierer. Det er selvsagt at størst beskyttelsesstrøm vil følge minste motstands vei, men hvor vil dette være i en situasjon med store variasjoner i tilstand? Prøvefeltet i tilfluktsrommet var plassert nettopp med utgangspunkt i å gjenspeile virkeligheten og strømfordelingen kunne derfor undersøkes. Figur 102 viser plasseringen av områdene som i det følgende omtales:



Figur 102 Strømfordeling ved elimineringsmetoden

I felt 1 viste elimineringsmetoden overraskende nok at strømtetthet i mørtel A var lav ( $7 \text{ mA/m}^2$  anode) sammenliknet med felt 1 totalt ( $13 \text{ mA/m}^2$  anode) og de andre områdene i feltet. Regnet mot armering er strømtettheten  $3,7 \text{ mA/m}^2$ . Dette kan være forklaringen på hvorfor de siste rundene viser lavere depolarisering i reparasjonen (referanseelektrode 9-13) enn i resten av prøvefeltet.

Det interessante spørsmålet er hvorfor det går mindre strøm gjennom reparasjon A til tross for at motstanden (overflate- og bulkmotstand) i mørtelen er lav (Tabell 26 og Tabell 27), også i forhold til tilstøtende betong. Da forbehandlingen ble gjort grundig og anoden påført enhetlig antas motstanden i anoden og overgangen mellom anoden og betong i hele prøvefeltet å være av samme størrelsesorden. I kapittel 3 pekes det på to forhold med spesielt stor betydning for strømfordelingen: Resistivitet i betong/ mørtel og tilstanden på armering, sistnevnte må ses nærmere på:

I tråd med vanlig praksis ved katodisk beskyttelse ble løs overflatekorrosjon fjernet i reparasjon A, det lå fortsatt korrosjonsprodukter på armeringen. Hva vil skje med overgangsmotstanden mellom elektrolytt (mørtelens porevæske) og negativ elektrode (ren armering) i dette tilfellet? Laget med korrosjonsprodukter er ikke en del av elektroden, snarere tvert imot. Et sentralt spørsmål er hvordan det spesifikke korrosjonsproduktets ioneledningsevne er sammenliknet med mørtelens porevæske. I et forsøk på å forklare den lave strømmen i reparasjon A ble det vurdert om korrosjonslaget rundt armering kunne utgjøre en barriere mot ionetransport slik at overgangsmotstanden mellom mørtel og armering ble utslagsgivende.

På den andre siden skulle en betydelig overgangsmotstand mellom mørtel og armering gitt utslag på det ohmske spenningsfallet («IR-fallet»). I denne situasjonen må motstand forstås som kretsmotstand, bestående av flere enkeltmotstander. Det registreres, stikk i strid med teorien i avsnittet over, at det ohmske spenningsfallet i reparasjon A er betydelig lavere enn for resten av felt 1 (Tabell 13). Et banalt, men interessant spørsmål er i hvilken grad IR-fallet i reparasjon A er lavere enn resten av feltet fordi:

- Beskyttelsesstrømmen gjennom mørtelen er lav (I)
- Motstanden mellom elektrodene er lav (R)

En ytterligere diskusjon er utenfor oppgavens omfang, med denne bakgrunn behandles ikke temaet videre. Det ses en positiv utvikling også i reparasjon A gjennom de siste depolariseringene, men betydelig tregere enn øvrige felt. Reparasjonen representerer usikkerhetsmomentet og det ville vært interessant å følge utviklingen.

Et annet forhold må også nevnes i forsøket på å forklare den lave depolariseringen i reparasjon A. Det er et faktum at reparasjon A var den største (cirka 550 kg reparasjonsmørtel ble benyttet). Til tross for at reparasjonene hadde herdet i 31 dager var temperaturen gjennom forsøket stabilt lav (6 – 8°C). Potensialene som registreres etter 8 timer depolarisering er meget katodiske, fra -580 til – 735 mV vs. *Ag/AgCl*. Det kan ikke utelukkes at den trege depolariseringen dels kan forklares med bakgrunn i fortsatt høy vannmetningsgrad i mørtelen. Om dette er tilfellet kan den trege og beskjedne depolariseringen muligens forklares ved begrenset tilførsel av oppløst oksygen i porevæsken (Xu and Yao 2009) med direkte innvirkning på den katodiske polariseringskurven.

Det store strømsluket i prøvefeltet er området merket «øvre venstre i Figur 102 der kloridinnholdet var høyt, den relative fuktigheten høy og målte potensialer før polarisering meget negative. Det var ingen avskallinger/ bom og dermed er ikke eventuelle korrosjonsprodukter like fremtredende som i reparasjon A. I dette området gikk det totalt 106 mA, svarende til 40,8 mA/m<sup>2</sup> anodeoverflate. Den høye strømtettheten gjenspeiles på de siste rundene med depolarisering der den begrensede målte responsen på referanseelektroden i starten er erstattet av gode resultater i de siste rundene (referanseelektrode 14 og 15).

I felt 2 med «ordinær» armeringstetthet var strømtettheten regnet mot anode (20,7 mA/m<sup>2</sup>) og mot armering enda høyere (27,6 mA/m<sup>2</sup>). Dette illustrerer hvorfor det er enklere å polarisere lavere mengder armering. I reparasjonen C i feltet er strømtettheten noe lavere (19 mA/m<sup>2</sup> ståloverflate), og dette har trolig sammenheng med at det ble målt høyere motstand i mørtelen enn i tilstøtende betong. Målingene av overflatemotstand utført før etableringen av KB viste gjennomgående lavere motstand i betongen i felt 2 enn felt 1 (Tabell 8), dessuten var kloridinnholdet høyt. Disse to forhold resulterer i effektiv ionetransport gjennom porevæsken. Den høye strømtettheten i felt 2 gjenspeiles ved de siste runder depolarisering, på samtlige referanseelektroder (nr. 17 – 22), også reparasjon C, registreres minst 100 mV depolarisering på armering.

Måling med strømpute (Tabell 23 - Tabell 25) på anoden i aksesystemet og på isolerte ruter anode bekrefter samme tendens som beskrevet over i forhold til lokal strømgjennomgang. Det gikk mest strøm mellom strømpute og armering i de områdene der elimineringsmetoden viste høy lokal strømtetthet og vice versa. Dette er vist i Tabell 49 der resultat fra elimineringsmetoden og strømpute-målinger er sammenliknet for de ulike områdene. Oppsummert går store deler av beskyttelsesstrømmen i felt 2 og i området til venstre for reparasjon A. Strømbehovet er også stort i disse områdene.

Tabell 49 Strømgjennomgang i ulike områder av prøvefeltet. Elimineringsmetoden og strømpute.

	Rep. A, f.1	Øvre v.f.1	Kjørebane, f.1	F.2
<b>Strømtetthet(anode) [mA/m<sup>2</sup>]</b>	7,1	40,7	6,8 – 8,3	20,7
<b>Strømpute i anode [mA]</b>	8 – 31	56 – 153	21 – 29	52 - 143
<b>Strømpute, isolert anode [mA]</b>	3 («I8»)	23 («I3»)	4 («K7»)	23 («B2»)

Den lokalt høye strømtettheten går på bekostning av lavere strømtetthet andre steder i prøvefeltet. For det første gjelder det kjørebane, her er imidlertid armeringen passiv slik at behovet for beskyttelsesstrøm er lavt. For det andre gjelder det reparasjon A, som beskrevet ovenfor.

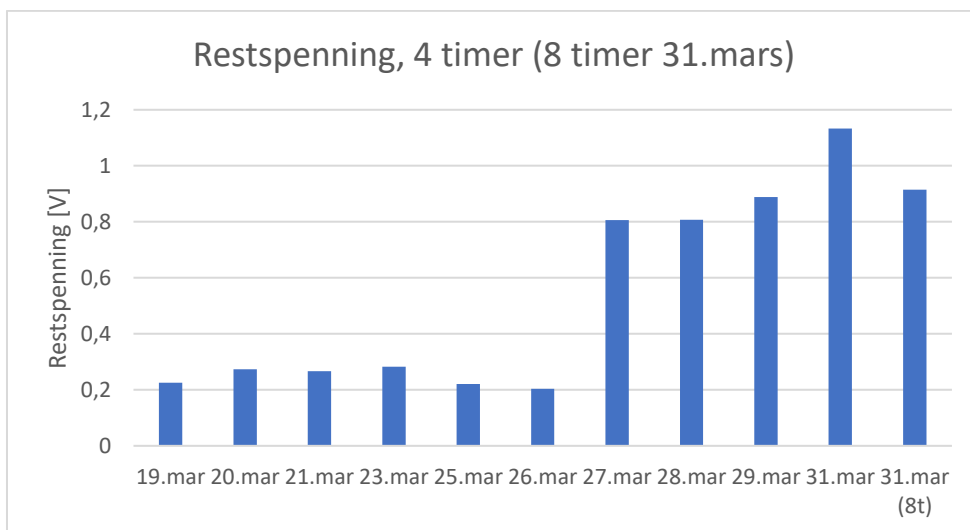
#### *Funksjonalitet - Forhold som vurderes kritisk for ledende malingsanoder.*

I forsøket i tilfluktsrommet ble det identifisert en ståltråd som koblet armeringen i søylen sammen med armeringen i dekket. Ved søylen lå ståltråden helt i overflaten slik at det ble kontakt med anoden. Ståltråden fungerte som en «strømtyv» og dro alene nærmere 0,5 A (Tabell 20). Det gikk mye tid før dette ble oppdaget. I utgangspunktet hadde armeringen i dekke god overdekning og en

var derfor ikke på vakt mot at det eksisterte et strømsluk/ en lekkstrøm. Hendelsen påvirket i stor grad funksjonaliteten av anlegget i negativ retning. På den annen side er erfaringen svært viktig da den tydelig illustrerer et forhold man bør være oppmerksom på ved bruk av anodesystemet.

Ståltråden resulterte ikke i kortslutning slik en metallanode (f.eks. titannett/bånd) ville gjort, snarere et «strømsluk». Hendelsen forklarer hvorfor avlest strøm i første del var unormalt høy (40 – 45 mA/m<sup>2</sup> anodeoverflate) og responsen på armering i korrosive områder likevel så lav. Ståltråden som forbant anode og armering forklarer dessuten det lokalt store spenningsfallet i anoden, på denne måten ble ståltråden lokalisert. I ettertid forstås det også hvorfor det før ståltråden ble fjernet ikke var mulig å måle reproducerbare strømverdier ved bruk av multimeter i anodekretsene. Ingenting stemte ved summering av strømmen som gikk til armering og anode, ei heller med avlest verdi i styreskapet.

Ved å se på restspenningen, den spenningen som måles mellom anode og armering etter en depolarisering, får man klare indikasjoner på at armering i prøvefeltet har mottatt særdeles lite strøm i tiden før ståltråden ble oppdaget. Restspenningen er et mål for størrelsen på beskyttelsesstrømmen armering har mottatt over tid, ladningen. Dess mer oppladet armering dess lenger tid tar også utladningen ved depolarisering. Det går et markant skille mellom 26. og 27.mars, da ståltråden ble tilintetgjort, dette er vist i Figur 103. I tiden før er restspenningen cirka 0,2 V uten nevneverdig endring, dette tilsvarer egenspenningen som ble målt mellom armering og anode før spenning ble påtrykt (Tabell 10). Restspenning av denne størrelsen viser at armering er «utladet» innen 4 timer, og forklarer hvorfor enkelte referanseelektroder snur i løpet av de fire timene i tiden før ståltråden ble fjernet.



Figur 103 Restspenningen mellom anode og armering etter utført depolarisering. Bemerk forskjell etter 26.mars.

Etter fjerning av ståltråden øker restspenningen til cirka 0,8 V, samtidig ser man en klar forbedring på tidligere trøblete referanseelektroder, armeringen depolariserer betraktelig mer. Dette er ensbetydende med at armering har mottatt markant mer beskyttelsesstrøm.

Erfaringen belyser et kritisk aspekt som er viktig å være klar over ved bruk av anodesystemet ledende maling. Det sentrale spørsmålet er i hvilken grad slike «semi-kortslutninger» er mulig å oppdage, særlig kritisk er det at anlegget tilsynelatende fungerer «greit» også før strømtynen oppdages. Merk at ståltråden ikke kunne oppdages med varmesøkende kamera eller ved rutinemessig måling av vekselmotstand mellom strømfordelingsbånd og armering før polariseringen. For å redusere faren

for liknende situasjoner og på den måten sikre funksjonaliteten av fremtidige KB-anlegg med ledende maling foreslås følgende sjekklister:

- Vurdere strømtetthet (anode) i hver enkelt sone avlest i styreskapet, virker den **unormalt** høy gjøres følgende:
- Måle strømgjennomgangen i anode- og armeringskontakter ved bruk av et multimeter av høy kvalitet, målingene summeres opp for å kontrollere om avlest strøm på anodekontakter (+) og armeringskontakter (-) er av samme størrelsesorden. Tallene sammenliknes med punkt 1, avlest strøm i styreskapet.
- Dersom avlest strøm i styreskapet ikke samsvarer ved summering av henholdsvis + og - utføres måling av spenningsfallet i anoden. Det ses etter store lokale spenningsfall, fortrinnsvis i områder der man mistenker at stålgenstander kan forbinde anode og armering. For eksempel ved tilstøtende konstruksjonsdeler.
- Lokalisert stålgenstand i kontakt med både anode og armering isoleres/fjernes fra anoden og punkt 1 og 2 kontrolleres på nytt.

Av naturlige årsaker bør kontrollen utføres før anoden blir påført isolerende overflatebehandling, for eksempel i forbindelse med prøvepolarisering.

#### *Funksjonalitet- Beskyttelse av de nedre lag av overkantarmoring*

Med overflatemonterte referanseelektroder har man liten mulighet til å vurdere polarisering på de nedre lag med armering. For å undersøke beskyttelseeffekten på de nedre lag av overkantarmoringen ble armeringens potensial målt i borehull i ulik dybde fra overflaten. Dette ble utført mens 4 V likespenning var påtrykt og påfølgende dag etter at anlegget hadde vært avskrudd i 9 timer. Målingene ble gjort for å se tendenser. Strømfordeling til ulike lag armering ved katodisk beskyttelse har vært undersøkt i en viss grad (Hassanein, Glass et al. 2002, Xu and Yao 2009), hovedfunnene er gjengitt i kapittel 3.5.

Den generelle tendensen er at en betydelig polarisering har forekommet også på de nedre lag armering, spesielt stor er effekten i områdene hvor det gikk mye strøm og i områdene der armering er passiv. I tråd med (Bertolini, Bolzoni et al. 1993) avtar effekten med økende avstand fra anoden, det vil si: Potensialet målt lenger ned er mindre katodisk (med påtrykt spenning) og differansen mellom «on» og «off etter 9 timer» avtar med økende dybde fra overflaten. Spesielt tydelig blir denne tendensen i reparasjon A (Tabell 16) som fra før mottar lite strøm. Her avtar den nevnte effekten langt hurtigere enn øvrige områder. Ved å se på den nedre målingen (10 cm) og ta hensyn til at IR-fallet øker med dybden er det tvilsomt i hvilken grad polarisering av det nederste laget armering har forekommet. Reparasjon A representerer usikkerhetsmomentet i den videre utviklingen, tiden i forsøket var begrenset og det ville vært svært interessant å følge utviklingen i reparasjonen over lengre tid.

Erfaringene fra de fire broene i region Midt (Østmoen 2007) viste at avskallingene som hadde dukket opp skyldtes armeringskorrosjon hovedsakelig i og bakenfor reparasjoner. Man mente årsaken var todelt:

- Lav total strømtetthet over tid, med bakgrunn i spenningstaket på 2 V.
- Høy motstand i reparasjonsmørtlene sammenliknet med betongen og dermed mindre strømgjennomgang. Kompatibiliteten mellom mørtel og betong ved katodisk beskyttelse ble viet langt mindre fokus på første halvdel av 90-tallet.

En økt driftsspenning vil gi totalt høyere strømtetthet og på den måten har anodesystemet med ledende maling en svakhet i forhold til spenningsbegrensningen. Samtidig kan det stilles spørsmål til i



hvilken grad en økt driftsspenning ville bedret strømfordelingen. I (Xu and Yao 2009) fant man en forverring i strømfordelingen ved økt påtrykt strømtetthet, spesielt fremtredende i tilfeller der korrosjonshastigheten fra før var høy. Dette kan tyde på at problemstillingen er aktuell også for andre anodesystem som kan driftes på høyere spenning.

Sistnevnte forhold, motstand i mørtelen var man mindre bevisst på tidligere, høy motstand i mørtlene kan meget vel være del av forklaringen på hvorfor avskallingene hovedsakelig dukket opp i reparasjonene. I nyere tid har denne problematikken blitt viet større fokus (Polder and Peelen 2018) og utfordringen behandles blant annet i Vegvesenets pågående prosjekt «Bedre Bruvedlikehold». Den lave strømtettheten og begrensede effekten nedover i reparasjon A kan ikke forklares med høy motstand i mørtelen, prøvetaking viser tvert imot lav motstand (overflate: 26,1 kΩ.cm og bulk 4,3 kΩcm).

Erfaringen fra prøvefeltet viste at det vanskeligste område å oppnå tilstrekkelig polarisering (og depolarisering) var nettopp i en betongreparasjon. Armeringen i reparasjonen ble rengjort i tråd med NS-EN 12696, punkt 5.10.3, med åpenbar gjenværende korrosjonsaktivitet ved oppstart av anlegget. Den praktiske erfaringen med broene (Østmoen 2007) viser også at reparasjoner har vært en utfordring. Dermed bør utviklingen i reparasjonene følges. Forarbeidene i forhold til rengjøring av armering, sammen med det faktum at strømfordeling mellom reparasjonsmørtel og gjenværende betong *in-situ* er ukjent, gjør at plassering av referanseelektroder i reparasjoner i flere tilfeller kan være fornuftig. Dette i kontrast til det generelle rådet i NS-EN 12696 pålydende at referanseelektroder ikke skal plasseres i reparasjoner.

#### *Funksjonalitet- beskyttelse av underkantarmering*

For å undersøke eventuell effekt av det katodiske beskyttelsessystemet i dekke under prøvefeltet ble det utført potensialmålinger med håndholdt referanseelektrode. Målingene viste 90 – 186 mV endring i potensial i anodisk retning fra anlegget var på (30.mars) til målinger utført etter 9 timer med avskrudd anlegg. Ytterligere en måling ble foretatt etter totalt 4 døgn med avskrudd anlegg, potensialene hadde da utviklet seg videre slik at forskjellen fra målingen ved påskrudd anlegg var 165 – 331 mV. Det er helt tydelig at polarisering har foregått også på underkantarmering. Dekket er 56 cm og observasjonene er overraskende. På den annen side indikerte potensialmålinger i underkant dekke utenfor prøvefeltet armering som etter all sannsynlighet er passiv (potensial cirka – 100 mV vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>). Indikasjonene ble styrket ved at målt kloridinnhold var 0,1% av antatt sementvekt. Erfaringen fra prøvefeltet i etasjen over, og fra litteraturen (Bertolini, Bolzoni et al. 1993) har vist at selv en beskjeden strømtetthet på passiv armering kan resultere i flere hundre mV depolarisering.

#### *Funksjonalitet- vurdering av anodesystemet*

Forsøket viser at et anodesystem med ledende maling er i stand til å beskytte også konstruksjoner med høy armeringstetthet, høyt kloridinnhold og der større områder av armeringen har pågående armeringskorrosjon. Dette med bakgrunn i at samtlige referanseelektroder, unntatt reparasjon A, registrerte minst 100 mV depolarisering på armering under siste runde.

Dog ses det at det kreves mer av anodesystemet i denne situasjonen og at det er flere kritiske faktorer man må ha kontroll over. Høy armeringstetthet krever tettere plasserte strømfordelingsbånd og gevinsten av å overmale båndene spiller meget positivt inn da disse to forhold sikrer god strømfordeling i anoden. Komplikasjonene som oppstod viser seg ekstra tydelig i områder med korrosjon der en høyere strømtetthet er nødvendig for å redusere korrosjonshastigheten til ubetydelige nivåer.

Veiskille under forsøkene i tilfluktsrommet var da ståltråden beskrevet ovenfor ble fjernet. I tiden før mottok armering svært lite beskyttelsesstrøm og anleggets effektivitet var begrenset. I tiden etter

mottok armeringen betydelig mer beskyttelsesstrøm. Ved de siste depolariseringene så man at samtlige referanseelektroder registrerte armeringspotensial som gikk anodisk (potensial utviklet seg i positiv retning) under hele depolariseringen. Da denne tendensen var stadfestet ble det bestemt å økte driftsspenningen til 4 V. Valget ble gjort da gjenstående tid var begrenset, og man ville etter all sannsynlighet sett samme utvikling ved 2 V over noe lengre tid.

Depolariseringen ble brukt for å se utvikling og tendenser og ikke som et absolutt beskyttelseskriterium, til dette skulle tiden etter «strømtøyen» vært lenger. Selv i reparasjon A, det mest utfordrende området, er utviklingen på rett vei, vist i Figur 63 for referanseelektrode nummer 9. **Restspenningen etter 8 timer (0,9V) viser at armering var langt fra utladet (tilsvarende cirka 0,2V) og at man med fordel kunne forlenget antall timer depolarisering, og trolig fått et noe bedre resultat også i reparasjon A dersom beskyttelseskriteriet skulle vært anvendt absolutt.** Utviklingen i reparasjonen hadde vært svært interessant å følge, det er positivt at Vegvesenet nå behandler problemområdet i «Bedre bruvedlikehold».

#### *Funksjonaliteten av eldre anodesystem anvendt på kystbruer*

Funksjonaliteten av anodesystemet på Verjeskiftet er vurdert både ut fra loggdata og depolarisering. Beskyttelseskriteriene er vurdert på vanlig måte etter NS-EN 12696, selv om anlegget hadde polarisert i underkant av en måned. Kriteriet 100 mV depolarisering på 24 timer er benyttet.

Resultatene viste at 15 av 18 referanseelektroder registrerte 100 mV eller høyere depolarisering. Mange av disse hadde i størrelsesorden 200 – 400 mV depolarisering. Det var ikke mulig å lokalisere plassering av de ulike referanseelektroder da nummereringen ikke samsvarer med FDV. Dette er uheldig når beskyttelseeffekten skal vurderes, med bakgrunn i at referanseelektroder plassert i anodiske områder er mest interessante, da det er disse KB-anlegget bør styres etter. Det var få betongskader på broen både ved første og andre runde rehabilitering og det fremgår av FDV-dokumentasjon at de fleste referanseelektroder av den grunn ble plassert i områder uten skader. Dermed måler trolig et flertall av referanseelektroder mot armering som er passiv, dette forklarer den til dels meget store depolariseringen selv med en begrenset strømtetthet (Bertolini, Bolzoni et al. 1998). Dette ble også erfart på prøvefeltet i tilfluktsrommet der det viste seg at det var enkelt å polarisere passiv armering.

I tre av 18 tilfeller er målt depolarisering under 100 mV. Resultatene (65 – 87 mV) indikerer likevel en beskyttelseeffekt. Dessuten er restspenningen i sonen etter 24 timer 0,7 V, ensbetydende med at armering ikke er «utladet» (egenspenning anode-armering cirka 0,2 V). De tre referanseelektroder er trolig plassert i områder der armeringen ikke kan betegnes som passiv, dermed synliggjøres viktigheten av å sikre kontinuerlig drift på anlegget, med høyere spenning enn 0,9V.

Når beskyttelseeffekten av KB-anlegg skal vurderes henvises man per i dag til referanseelektroder, for funksjonaliteten er det problematisk at det ikke oppnås kontakt med flere av disse. Ved å få modemet operativt vil man trolig oppnå kontakt med de nyeste referanseelektroder, dette fordi referanseelektroder er koblet til nodebokser ute på brua som kommuniserer trådløst med styreskapet. Det synliggjøres at trådløse løsninger også kan ha en bakside da det blir vanskeligere å drifte anlegget på «reserveløsning». Flere av de eldste (ROVER-grafittelektroder) oppnås det ikke kontakt med, dette kan skyldes at de er defekte etter 19 år og/eller brudd i kabling. Det er erfart at disse med tiden har en tendens til å bli ustabile. På loggdataene viste imidlertid referanseelektroder som det var kontakt med normal oppførsel. Da grafittelektroder ikke er ekte halvceller er kun depolarisering vurdert, i tråd med NS-EN 12696.

## 6.4 Utførelse

Både gjennom arbeidet i tilfluktsrommet og bruinspeksjonen har forhold knyttet til utførelsen blitt belyst. Dette gjelder forbehandling og påføringstykkelse.

I tilfluktsrommet gikk det, basert på erfaring mye strøm. Dette har naturligvis sammenheng med alle båndene og overmalingen. Men forbehandlingen spiller trolig inn, det ble slipt grundig i to runder. Ved sliping fikk man også fjernet deler av sement huden og åpnet porestrukturen. Med konsekvens at overgangsmotstanden mellom anode og betong ble redusert. Selv om forbehandlingen ved ledende maling normalt anses som mindre omfattende enn system der anoden støpes inn i mørtel, bør det ikke tas for lett på. Ikke minst er god forbehandling viktig av hensyn til mekaniske egenskaper over lengre tid, dette er omtalt under «bestandighet»

Gjennom heftprøver og måling av motstand i anoden ble det erfart at anoden trolig har noe ujevn tykkelse. Ved heftprøvene kunne dette ses ved at den ru overflaten etter avtrekk har «oppstikkende punkt» uten anode. Da motstanden i anoden ble målt observerte man selv innen små områder betydelig forskjell i motstand, dette gjaldt AHEAD-anoden. En bør være bevisst på påføringstykkelsen under utførelsen. Spesielt gjelder dette der overflaten fremstår som ru, her kan anoden legges tykkere eller overflaten kan jevnes ved egnet forbehandling. Under pågående rehabiliteringsarbeider kan tykkelsen kontrolleres ved stikkmålinger av motstand i anoden

## 6.5 Drift

Forutsetningen for funksjonaliteten av alle former for katodisk beskyttelse ved påtrykt strøm er nettopp at det til enhver tid er påtrykket en likestrøm/spenning. Både på Nerlandsøy og på Verjeskift var anleggene av ved ankomst. Det sentrale spørsmålet er hvor lenge anleggene har vært ute av funksjon, dette vites ikke. Det er også vesentlig hvordan ustabiliteten i drift har innvirket på bestandigheten av bruene. I forbindelse med driften av anleggene er det to forhold som ses på som kritiske:

- Ustabilitet i styresystemet
- Manglende oppfølging

Ustabilitet i styresystem er en generell utfordring for alle anodesystem, på de befarte broene viser tidligere kartlegging problemer et godt stykke tilbake i tid. Problemet har vært at anlegg skruer seg av og forblir ute av funksjon. Eller at anlegget etter en driftsstans innstiller seg på en tilfeldig lav spenning (0,5 – 1,1 V på Verjeskiftbrua). Modem ute av funksjon er ofte forekommende og spesielt på avsidesliggende broer, der man i realiteten er avhengig av fjernovervåkning og -styring er dette kritisk.

Manglende oppfølging medfører at problemene beskrevet ovenfor blir kritiske med bakgrunn i at de ikke oppdages. Faktum er at skadene på Nerlandsøy hovedsakelig dukket opp etter utløpet av oppfølgingsperioden. På Verjeskiftbrua utløp oppfølgingsperioden i 2015 og er ikke fornyet. Også i andre land er oppfølging en utfordring, det har av flere vært påpekt som den største utfordringen ved katodisk beskyttelse. Et forsøksprosjekt er utført i Nederland der 30 broer beskyttet med ledende maling har fått en oppfølgingsperiode på 20 år (van den Hondel, Klamer et al. 2016). Det anses som essensielt å sikre oppfølgingsavtaler over lengre tid slik at eventuelle feil ved styresystemet og anlegget generelt kan oppdages og rettes opp på et tidlig stadium.

Det er registrert at bruene til Statens Vegvesen jevnlig blir befart/ inspisert for skader. Et forslag er å inkludere en enkel kontroll av KB-anlegget ved inspeksjonene. Kontrollen kan begrense seg til å kontrollere om KB-anlegget er påskrudd og eventuelt kontrollere spenning. Dette er et minimum men på den måten kan tiden det går før feil oppdages reduseres.

## 6.6 Bestandighet

Innledningsvis spesifiseres det at Nerlandsøy og Remøy har stått langt lenger enn hva som beregnes som normal levetid for ledende maling (10 – 15 år), og at de har ikke hatt oppfølging siden utløpet av drifts- og oppfølgingsavtalen i 2004. Nerlandsøy er ikke lenger prioritert da det skal bygges ny bro i nærmeste fremtid, for Remøy er fremtiden uvisst.

Brubefaringene på Nerlandsøy og Remøy viste at det, i varierende omfang, var oppstått skader. Når det gjelder skadene på betongen var dette avskallinger som skyldtes korrosjon på bakenforliggende armering. Avskallingene observeres lokalt spredt ut over broen. Tidligere inspeksjoner utført av Vegvesenet med bruk av brulift avdekker derimot større felt med både avskalling og delaminering, sistnevnte indikerer at flere skader er under utvikling.

Av skader på beskyttelsesanleggene er avflassing det eneste som er mulig å observere fra land, dette gjaldt både av beskyttende overflatebehandling og av selve anoden. Trolig er årsaken til skadene på Remøy og Nerlandsøy sammensatt:

- Med tiden økende omfang avflassing av anode og derav en redusert beskyttelsesstrøm.
- Stort omfang av riss og derav trolig brudd på flere strømfordelingsbånd, observert av (Riise 2011).
- Få tilkoblingspunkt mellom anodekabel (+) og strømfordelingsbånd og dermed et betydelig spenningsfall på strømfordelingsbåndene av sølv. I tråd med hva som ble erfart av entreprenør på Verjeskiftbrua.
- Ustabilitet i drift og manglende oppfølging, beskyttelsesanleggene har vært av i lengre perioder.
- Manglende armeringskontinuitet (Remøy) ble påvist av (Riise 2011)

### *Bestandighet- skadebildet og årsak på Verjeskiftbrua*

Ustabiliteten i driften til tross, det oppdages ingen betongskader som følge av armeringskorrosjon på Verjeskiftbrua. Følgende kan trolig være forklaringer på at det til tross for ustabil drift over en lengre periode ikke observeres skader knyttet til armeringskorrosjon:

- En rehabilitering av brua ved omfattende mekanisk reparasjon på 90-tallet. De største skadene ble trolig fjernet den gang og armeringen ble igjen passivert (i utbedrede skader)
- Nye skader etter den mekaniske reparasjonen var primært i randsoner mellom reparasjon og betong, hvilket er typisk for mekanisk reparasjon i kloridinfisert betong (Polder, Leegwater et al. 2012). Skadene ble utbedret ved første gangs katodiske beskyttelse i 2000/2001 før armering ble katodisk polarisert.
- De få skadene som hadde dukket opp på broen ble utbedret ved andre gangs katodiske beskyttelse i 2011. Som følge av utbedringene er store deler av armeringen trolig passiv og dermed gir det mer mening å snakke om katodisk forebygging snarere enn beskyttelse.
- Broen har vært katodisk beskyttet siden 2000/2001, over denne lange perioden kan polariseringen ha hatt en langtidseffekt ved at gunstige sekundæreffekter i grensesjiktet mellom armering og betong har medført en repassivering av områder hvor armeringen ved oppstart var i korrosjonstilstand. Slike gunstige langtidseffekter ble observert utenfor Birmingham på broer som hadde vært katodisk beskyttet med ledende maling over lengre tid

(Christodoulou, Webb et al. 2011). I dette tilfellet hadde strømtettheten vært beskjedne (2 mA/m<sup>2</sup> anode).

- Prinsipielt er det mulig at skader relatert til armeringskorrosjon er under utvikling, men at de befinner seg på et tidlig stadium i utviklingsfasen der de ikke er mulig å oppdage.

Senere års erfaring har vist at selv en begrenset strømtetthet kan være tilstrekkelig til å opprettholde beskyttelsen av armering, dette som følge av miljøendringene rundt armering, se kapittel 3. Det ble funnet at slike langtidseffekter i noen tilfeller kan ha en vedvarende effekt (Christodoulou, Webb et al. 2011). Armeringen på Verjeskiftbrua kan enten ha vært passiv siden installeringen av katodisk beskyttelse, eller den kan ha blitt passiv som en direkte konsekvens av polarisering over lengre tid. Med bakgrunn i den i alle tilfeller beskjedne driftsspenningen samt en rekke driftsavbrudd, var antagelsen at det ikke ville være mulig å se noen omfordeling av ionekonsentrasjon mellom armering og anode. Om dette var en riktig antagelse er diskutabelt, i (Eichler, Isecke et al. 2010) fant man ved forsøk i laboratorium en tydelig omfordeling av kloridioner selv ved 2 V påtrykt spenning over en periode på cirka 80 dager. Her hadde til gjengjeldt likespenningen vært påtrykt kontinuerlig.

Tre kloridprofiler ble tatt mellom anode og armering i sjikt på 10 mm. Av disse viser en profil tatt i underkant brudekke prinsipielt tegn på hva som kan være en langtidseffekt. Her er kloridinnholdet høyt i ytre sjikt (0,233% av betongvekt), og avtar inn til armering (<0,005% av betongvekt). En profil, tatt på brudrager er flat og kan, i tråd med (Cramer, Bullard et al. 2002) indikere en langtidseffekt med bakgrunn i de to «konkurrerende» transportmekanismene, diffusjon (innover som følge av konsentrasjonsgradienter) og ionemigrering (utover som følge av det elektriske feltet mellom anode og armering). En siste profil viser overhodet ingen tendens. Med bakgrunn i at kloridprofilene før KB er ukjent kan det ikke konkluderes vedrørende langtidseffekter.

#### *Bestandigheten av anodesystemet, aldringseffekter.*

En høy påtrykt spenning/ strøm akselererer nedbrytningen av et hvilket som anodesystem, dette er verifisert ved akselererte forsøk (Pruckner 2001, Zhang, Tang et al. 2018). I alle tilfeller settes nedbrytningen av anoden opp mot den akkumulerte strømmen, ladningen. Nedbrytning av anoden forstås i denne sammenheng som anodeforbruk (grafittoksidasjon) og oppløsning av sementpastaen under anoden (forsuring). I forbindelse med aldringseffektene var det interessant å undersøke i hvilken grad **en begrenset strøm over lengre tid (og dermed en viss totalldning) medfører nedbrytning av anoden og underliggende sementpasta**. I denne anledning poengteres følgende:

KB-anlegget har i lengre perioder vært ute av funksjon. Varigheten og hyppigheten av avbruddene er ikke kjent og dermed er den «elektrokjemiske alderen» av anoden ukjent. Det kan, utfra loggdata, fastslå at den faktiske ladningen ikke tilsvarer påtrykt strøm sammenhengende siden monteringen av anlegget i år 2000. Utfra prøvetakingen er det ikke mulig å si noe om hvor mye akkumulert strøm anoden tåler over en periode på 19 år. Likevel:

Motstanden målt i anoden på Verjeskiftet (Tabell 38) er i størrelsesorden den samme som oppgitt i produktdatabladene. Dette indikerer at det ikke har foregått anodeforbruk av betydning (grafittoksidasjon). De mulige reaksjonsproduktene har dårligere ledningsevne enn grafitt (Poltavtseva, Ebell et al. 2015) og ville medført en markant økt motstand i anoden. Resultatene er som forventet. Med en begrensning i driftsspenning, og dermed også anodepotensial, vil ikke grafittoksidasjon bli den dominerende anodereaksjonen. Resultatet er i tråd med langtidserfaringene gjort av flere, dette er beskrevet i kapittel 3. Forskjellene i Tabell 38 har sin naturlige årsak i at motstanden i ZEBRA-anoden er kraftig redusert i forhold til AHEAD-anoden.

Heftprøvene gir ingen indikasjoner på forsuring av betydning i grensesjiktet anode/betong. Eventuell forsuring av betydning ville fortone seg som en oppløsning av det ytre sjiktet av sementpastaen

(kapittel 3). Målt heftstyrke er jevnt over høy og det er ingen brudd i sementpasta. Det presiseres dessuten at heftprøvene ble plassert i nærhet av strømfordelingsbånd, der det er forventet å finne den høyeste lokale strømtetthet i anoden og dermed også de første tegnene til forsuring av praktisk betydning. Resultatene er som forventet tatt i betraktning den begrensede driftsspenningen. I (Polder, Peelen et al. 2006) ble utborede kjerner som hadde vært katodisk beskyttet med AHEAD-systemet i 9 år analysert. Man fant ikke sporbar forsuring og konklusjonen var at det er andre faktorer som styrer langtidsbestandigheten av AHEAD-systemet ved drift i overenstemmelse med spenningsbegrensningen.

#### *Bestandighet- mekaniske egenskaper*

Heftprøvene viser at de mekaniske egenskapene til anode og beskyttende overflatebehandling på generell basis er ivaretatt etter henholdsvis 19 år (AHEAD) og 8 år (ZEBRA). Fra et praktisk ståsted er dette noe av den viktigste prøvetakingen på broen, fordi den viser at avflassingene som finnes er av lokal, og ikke generell art. Målt heftfasthet er i seg selv over generelt heftkrav ved overflatebehandling (1,2 MPa). Majoriteten av målingene har heftstyrke 1,5 – 2,5 MPa med brudd i anode eller mellom anode og sementhud. «Helligdager» med heft under 1,2 MPa finnes, men de er få og hovedsakelig begrenset til områder med synlig avflassing. Heftstyrken til overflatebehandlingen er generelt høyere enn målte verdier ettersom det ikke observeres noen brud mellom anode og primer/dekkmalning.

Resultatene synliggjør at anodesystemet i seg selv har langtidsbestandige heftegenskaper, og at forbehandling og påføringsteknikk trolig er de avgjørende faktorene for en lang levetid. Anoden på Verjeskiftbrua er beskyttet av akrylmaling påført i to runder med målt tørrfilmtykkelse fra 300 µm (ett lag) – 1000 µm (to lag), dette har helt klart effektivt beskyttet anodemalingen. Malingen bærer fortsatt preg av å være elastisk og har dermed en viss rissoverbyggende egenskap. Tykkelsen og elastisiteten av overflatebehandlingen er trolig medvirkende årsak til at det enda er relativt lite avflassing på broen.

Et viktig spørsmål er ved hvilken tykkelse overflatebehandlings vanddamppermeabilitet blir for lav, og dermed medfører blæring/ avflassing av anode og dekkmalning. Det er med bakgrunn i befaringen av broen ikke grunn til å tro at observerte avflassing har sin årsak i for lav vanddamppermeabilitet på den tykke akrylmalingen. Området med mest fremtredende avflassing (lokalitet 1 og 2) er på et sted der den gamle malingen ble fjernet ved siste rehabilitering og der malingen tvert imot fremstår som tynn. Det er en tendens i at epoksyen som ble lagt nederst på pilarene for å beskytte anoden har løsnet, trolig har fuktinnholdet i betongen vært for høyt i forhold til epoksyens vanddamppermeabilitet.

Man står igjen med bestandighetsproblemet kjennetegnet som hovedutfordringen ved ledende maling, avflassing av overflatebehandling og anode. Som nevnt er avflassing på Verjeskiftbrua fremdeles av lokal art, men utviklingen er i gang. Ledende anodemalinger trenger beskyttende overflatebehandling, dette viser både erfaring og forsøk utført i laboratorium (Poltavtseva, Ebell et al. 2015). Avgjørende faktorer er allerede nevnt, grundig forbehandling og riktig påføring av tykk maling. Gitt at fukt ikke akkumuleres bak overflatebehandling og anode burde dette sikre bestandigheten innenfor de normalt angitte 10 – 15 årene (Norsk Forening for Betongrehabilitering 2016). En kommer likevel ikke utenom det faktum at ledende maling anvendt som anodesystem krever gjenbehandling for lengre varighet.

## 6.7 Gjenbehandling

Rehabiliteringen av Verjeskiftbrua i 2011 er et godt eksempel på fornuftig drift av anodesystem med ledende maling. Ved at handling fra Vegvesenets side ble iverksatt på et tidlig stadium hindret man nye betongskader i å utvikle seg i et stort omfang. På denne måten kunne omfattende meisling og mørtling unngås. Konsekvensen av at anodesystemet blir fornyet på et relativt tidlig tidspunkt er at behovet for beskyttelsesstrøm kan holdes lavt. Ved eventuell fremtidig bruk av anodesystemet på kystbruer bør eksempelet fra Verjeskiftbrua følges.

Et sentralt spørsmål dukker i denne forbindelse opp, når skal gjenbehandlingen finne sted? Da det ikke finnes noe fasitsvar på hvor lenge en beskyttende dekkmaling holder er det nødvendig å følge utviklingen (derav behovet for oppfølging). Den store forskjellen mellom for eksempel en garasje og en bru er tilkomsten. For sistnevnte er det forventet at tilrigging med stillas vil utgjøre en betydelig del av rehabiliteringskostnaden. En bør derfor utfra kost/nytte-beregninger vurdere hvor mye avflassing som kan tolereres før gjenbehandling må igangsettes.

Man bør ved fornying av anodesystemet være bevisst på forbehandlingen i randsonene av avflasset anode. I tråd med vanlig praksis fjernes noe av den intakte overflatebehandlingen og anoden. Spørsmålet er i hvilken grad det er mulig å fjerne rester etter slemmemasse, anode og gammel maling i randsoner som i utgangspunktet sitter godt. Under et forsøk på å fjerne maling på Verjeskiftbrua ble diamantsliping forsøkt utført. Det viste seg svært vanskelig å måle motstand i anoden fordi rester av maling og slemmemasse nærmest «smeltet» (Figur 104). Trolig ble samme forbehandling benyttet ved rehabiliteringen og spørsmålet er i hvilken grad man fikk slipt seg ned i sement huden. Dersom rester ligger igjen vil økt overgangsmotstand mellom anode og betong resultere i redusert størrelse på beskyttelsesstrømmen. Det faktum at malingen hefter godt og beholder sine elastiske egenskaper er heldig ut fra et bestandighetsperspektiv. I forbindelse med fornying av anodesystemet representerer de gode bestandighetsegenskapene i realiteten en utfordring i de tilfellene malingen må fjernes. I så henseende bør man i samråd med entreprenør arbeide med å finne egnede forbehandlingsmetoder



Figur 104 Hvordan fjerne overflatebehandling ved gjenbehandling?

## 7 KONKLUSJON

Det overordnede målet med oppgaven var å vurdere hvorvidt katodisk beskyttelse ved bruk av ledende maling kan være et reelt alternativ på bruene til Statens Vegvesen. For å svare på dette ble det etablert et prøvefelt med katodisk beskyttelse i et tilfluktsrom med varierende armeringstetthet og varierende omfang armeringskorrosjon. Bruer som har vært katodisk beskyttet med ledende maling over en lengre periode ble også inspisert for innhenting av langtidserfaringer.

Forsøket i tilfluktsrommet viser at ledende maling anvendt som anodesystem er kapabelt til å beskytte et stort areal armering der betongen har høyt kloridinnhold og pågående armeringskorrosjon i varierende omfang. Dette verifisert på referanseelektroder plassert i områder som før oppstart åpenbart hadde aktiv armeringskorrosjon. Ved avslutning oppnås beskyttelseskriteriet på minst 100 mV depolarisering av armering, og dette i løpet av 8 timer. Unntaket er en reparasjon, omtalt nedenfor.

Reparasjon A i prøvefeltet representerer usikkerhetsmomentet, her går det lite strøm og depolariseringen er beskjedent. Mørtelen A har lav motstand, også i forhold til tilstøtende betong, andre forhold må spille inn i strømfordelingen. Ser man på erfaringene med KB-bruene med ledende maling oppstod flesteparten av skadene i eller bak reparasjoner. På de nedre lag av underkantarmeringen i reparasjon A indikerer potensialmålinger begrenset polarisering. I denne sammenheng **kan** spenningsbegrensningen med de ledende beleggene være problematisk. På den andre siden viser **forsøk at høyere strømtetthet, især der korrosjonshastigheten opprinnelig var høy, fører til en forverret strømfordeling. Det kan tenkes at strømfordelingen med tiden ville bedret seg ettersom motstanden vil øke i de områdene som per nå har høyest strømtetthet.** Det ville vært svært interessant å følge utviklingen i reparasjon A.

Passiv armering viste seg, i tråd med teorien, å være svært enkel å polarisere. Det kreves mer av anodesystemet ved høy armeringstetthet og pågående korrosjon, og flere forhold bør man ha kontroll over. Under arbeidet med prøvefeltet ble flere erfaringer som kan nyttiggjøres gjort, disse er nevnt avslutningsvis i kapitlet. Effekten en fikk av å overmale PDR-båndene med et ekstra strøk anodemaling var av de mest overraskende funnene, denne enkle arbeidsoperasjonen reduserte overgangsmotstanden mellom PDR-bånd og anode og bedret strømfordelingen i anoden betydelig.

Kritiske faktorer med direkte innvirkning på KB-anleggets effektivitet er belyst ved ståljenstanden i kontakt med anode og armering. Denne var vanskelig å oppdage og anlegget fungerer tilsynelatende «greit» også i tiden før. I ettertid ble det erfart at armering i tiden før hadde mottatt svært lite beskyttelsesstrøm. Erfaringen belyser en usikkerhet ved anodesystemet sammenliknet med for eksempel titananoder som ville gitt en direkte kortslutning. En sjekklister for hvordan slike «strømtyver» kan oppdages er gitt i kapittel 6, det bør kontrolleres under rehabiliteringsarbeidene.

Drift og oppfølging er hovedutfordringen ved bruk av ledende maling, på lik linje med alle former for katodisk beskyttelse ved påtrykt strøm. I denne kategorien havner både utfordringen med å sikre stabilitet i styresystemet og utfordringen med å sikre jevnlig oppfølging, på denne måten kan feil rettes opp før de går på bekostning av funksjonaliteten. For Nerlandsøy og Remøy er driften og oppfølgingen trolig hovedårsaken til skadebildet. Da Nerlandsøy skal rives og erstattes med ny bro er det forståelig at fokuset legges andre steder.



Prøvetakingen på Verjeskiftbrua vitner om generelt god tilstand, det observeres ingen betongskader til tross for ustabilitet i drift og oppfølging og lav driftsspennning i den tiden anlegget har vært i funksjonalitet. Tidligere omfattende mekaniske reparasjoner og mulige langtidseffekter av polariseringen har trolig resultert i at store deler av armeringen er passiv. I et større bilde kan det ikke forventes at utgangspunktet på andre bruer er like heldig som Verjeskiftbrua. Dog viste depolariseringen at det også finnes referanseelektroder som måler mot ikke-passiv armering, der kontinuerlig drift er nødvendig.

På grunn av ustabilitet i driften er det ikke mulig å si noe om hvor mye akkumulert strøm anoden tåler over en tidsperiode på 19 år. Imidlertid kan det konkluderes med at strømgjennomgang i anoden over lengre (dog ukjent) tid med inntil 2V driftsspennning ikke gir nedbrytning av elektrokjemiske egenskaper av betydning. Verken anodeforbruk (grafittoksidasjon) eller oppløsning av sementpastaen under anoden (forsuring).

Generelt viser heftprøvetakingen et anodesystem (inkludert dekkmalings) med fortsatt gode hefteegenskaper. Dette forteller at forbehandling og overflatebehandling påført under riktige forhold er avgjørende for å sikre vedvarende gode mekaniske egenskaper. Skadene er primært avflassing av maling, og delvis også anode, fortsatt er dette av lokal art på Verjeskiftbrua. Det anses svært viktig at den beskyttende overflatebehandlingen legges tykt slik at anodemalings beskyttes. I området med mest avflassing på Verjeskiftbrua fremstår dekkmalings som tynn. I helt spesielle tilfeller av kontinuerlig høy vannmetningsgrad i betongen og stadig tilsig av fukt vil anode og dekkmalings løsne, og her er ikke anodesystemet egnet.

En kommer ikke utenom at KB-anlegg med ledende maling for funksjonalitet utover 10 – 15 år (avhengig av eksponering) normalt vil kreve gjenbehandling. For å fatte riktig beslutning vedrørende når gjenbehandlingen skal utføres må utviklingen følges, og derav behovet for oppfølging. Verjeskiftbrua ser ut til å ha blitt fornyet på et fornuftig tidspunkt, dette fordi kun et begrenset antall betongavskallinger hadde oppstått. Ved gjenbehandling bør man i randsonene være påpasselig med å fjerne isolerende sjikt. Med dette synliggjøres en utfordring: Tykke, elastiske overflatebehandlinger, nødvendige av bestandighetshensyn, er vanskelig å fjerne i randsoner, det bør arbeides sammen med entreprenør for å finne egnede forbehandlingsmetoder.

På generell basis bør alle ledd i kretsmotstanden med forbedringspotensial søkes redusert tatt i betraktning den gjeldende spenningsbegrensningen. Basert på observasjoner fra prøvefeltet og brubefaring bør man ved fremtidig bruk av anodesystemet i tilfeller der behovet for beskyttelsesstrøm er stort rette fokus mot følgende:

- Omstendelig forbehandling ned i sement huden. En slik prosedyre vil redusere overgangsmotstanden mellom anode og betong og er dessuten en forutsetning for varig heftfasthet av beskyttelsessystemet.
- Vurdere om eventuelle slemmemasser på betongoverflaten bør fjernes. Uavhengig av materialets resistivitet representerer disse et ekstra ledd i kretsmotstanden mellom anode og armering
- Plassere strømfordelingsbånd med senteravstand som bestemmes ut fra et etablert prøvefelt i forkant av rehabiliteringen. Differensiering avhengig av lokal tetthet av armering kan med fordel gjøres.
- Påføre anoden tykkere over strømfordelingsbånd, dette vil gi to gevinster: Overgangsmotstanden mellom bånd og anode reduseres i praksis til ubetydelig. Dessuten bedret strømfordeling i anoden, dette er en god forutsetning for jevn strømfordeling mellom anode og armering.

- Søkte etter «strømtyper» tilsvarende det som ble observert i tilfluktsrommet, da disse i stor grad kan påvirke effekten av beskyttelsessystemet. Et slikt arbeid bør gjøres under rehabiliteringen, før overflatebehandling påføres.

Med dette tatt i betraktning er konklusjonen at katodisk beskyttelse med ledende maling er et reelt alternativ til de tradisjonelle systemene. Anodesystemet er kapabelt til å beskytte et stort armeringsareal med pågående armeringskorrosjon. Erfaringene gjort i denne oppgaven kan med fordel nyttiggjøres ved fremtidig bruk. Dog må anodesystemet, i likhet med øvrige system, følges opp. Langtidsbestandigheten av KB-systemet ledende maling ser ut til å være styrt av avflassing av anode og dekkmaling. For å sikre seg mot dette må forbehandlingen være omstendelig og dekkmalingen påføres tykt. Det bør også kalkuleres inn en gjenbehandling, tiden for når dette skal gjøres avhenger helt og holdet av hvor godt arbeidene gjøres i første omgang og av eksponeringen.

#### Videre arbeid

Det er flere temaområder som ville vært interessant å undersøke videre, avslutningsvis nevnes to:

- Undersøke betydningen gjenværende korrosjonsprodukter (etter lett rengjøring) har på strømfordelingen i reparasjonen og utenfor. Hvilken beskyttelsesstrøm mottas og hvilken polarisering forekommer på de nedre lag armering i reparasjonen i dette tilfellet? Hvilken utvikling ses over tid? Det kan for eksempel utføres reparasjoner med tilsvarende mørtel der man rengjør armeringen i ulik grad.
- I FoU-prosjektet på Nerlandsøy var utgangspunktet å undersøke hvor lav spenning som kunne påtrykkes og likevel sørge for oppfyllelse av beskyttelseskriteriene. Dette bør alltid være utgangspunkt, da målet i ethvert prosjekt bør være å oppnå beskyttelseskriteriene med så lav driftsspenning som mulig. Man har over lengre tid erfart at inntil 2 – 2,5 V spenning ikke utgjør et bestandighetsproblem for anoden. Det ville vært interessant å finne ut **hvor høy spenning anodesystemet faktisk tåler i et lengre tidsperspektiv**. Det kjennes til at flere garasjeanlegg beskyttet ved bruk av ZEBRA-anoden over lengre perioder er driftet på 3 – 3,5 V uten at problemer til nå har oppstått.

## 8 REFERANSER

- Angst, U., et al. (2009). "Critical chloride content in reinforced concrete - A review." Cement and Concrete Research **39**(12): 1122-1138.
- Bardal, E. (1994). Korrosjon og korrosjonsvern. Trondheim, Fagbokforlaget.
- Bertolini, L., et al. (1993). "Cathodic protection of new and old reinforced concrete structures." Corrosion Science **35**(5-8): 1633-1639.
- Bertolini, L., et al. (1998). "Cathodic protection and cathodic prevention in concrete: Principles and applications." Journal of Applied Electrochemistry **28**(12): 1321-1331.
- Broomfield, J. The Protector AS Camur-ZEBRA Conductive Coating Impressed Current Anode System, John P. Broomfield Consultants.
- Broomfield, J. (2005). The Protector AS Camur-ZEBRA Conductive Coating Impressed Current Anode System, John P. Broomfield Consultants.
- Buhr, B., et al. (2003). Katodisk beskyttelse. State-of-the-art. København, Vejdirektoratet.
- Byrne, A., et al. (2016). "State-of-the-art review of cathodic protection for reinforced concrete structures." Magazine of Concrete Research **68**(13): 664-677.
- Cheitani, A. (2017). Review of cathodic protection systems for concrete structures in Australia. NACE - International Corrosion Conference Series. **3**: 2121-2129.
- Chess, P. (1998). Design of a cathodic protection system. Cathodic Protection of Steel in Concrete. P. Chess. Copenhagen, E & FN Spon. **1**: 37 - 58.
- Christodoulou, C., et al. (2018). Towards arresting reinforced concrete corrosion-a review. MATEC Web of Conferences.
- Christodoulou, C., et al. (2011). Corrosion risk of reinforced concrete structures following 3 years of interrupted cathodic protection. 18th International Corrosion Congress 2011.
- Cramer, S. D., et al. (2002). Carbon paint anode for reinforced concrete bridges in coastal environments. NACE - International Corrosion Conference Series. **2002-April**.
- Das, S. C., et al. (2011). "Corrosion mitigation of chloridecontaminated reinforced concrete structures: A state-of-the-art review." Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials **164**(1): 21-28.

Eastwood, B. J., et al. (1999). "Electrochemical oxidation of a carbon black loaded polymer electrode in aqueous electrolytes." Journal of Solid State Electrochemistry **3**(4): 179-186.

Ebell, G., et al. (2018). "Detection of Reinforcement Corrosion in Reinforced Concrete Structures by Potential Mapping: Theory and Practice." International Journal of Corrosion **2018**.

Eichler, T. (2011). Gutachtliche Stellungnahme zur Eignung des ZEBRA-Anodensystems der Fa. Protector AS als Fremdstromanode beim Kathodischen Korrosionsschutz von Stahl in Beton. Berlin, CORR LESS Isecke & Eichler Consultion GmbH & Co. KG.

Eichler, T., et al. (2010). "Investigations on the chloride migration in consequence of cathodic polarisation." Materials and Corrosion **61**(6): 512-517.

Elsener, B., et al. (1990). Potential Mapping and Corrosion of Steel in Concrete. N. Berke, V. Chaker and D. Whiting. West Conshohocken, PA, ASTM International: 143-156.

Emmons, P. H. (1993). Concrete Repair and Maintenance Illustrated. Problem Analysis. Repair Strategy. Techniques.

Fletcher, J. F. and C. I. Woolhouse (2012). Practical operation of data-logging covermeters and the interpretation of results. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III - Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2012.

Geiker, M. (2012). Reinforcement corrosion. Compendium TKT 4215. Concrete Technology **1**. Trondheim, NTNU- Department of Structural Engineering: 1-7.

Glass, G. K. and A. M. Hassanein (2003). "Surprisingly effective cathodic protection." Journal of Corrosion Science and Engineering **4**.

Gowers, K. R. and S. G. Millard (1999). "Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using wenner technique." ACI Materials Journal **96**(5): 536-541.

Grefstad, K. (2005). "Cathodic protection applied on Norwegian concrete bridges. Experiences and recommendations " EuroCorr 05.

Hassanein, A. M., et al. (2002). "Protection current distribution in reinforced concrete cathodic protection systems." Cement and Concrete Composites **24**(1): 159-167.

Hornbostel, K. (2015). The role of concrete resistivity in chloride-induced macro-cell. Structural Engineering. Trondheim, NTNU. **Philosophiae Doctor**.

Hornbostel, K., et al. (2016). "Influence of mortar resistivity on the rate-limiting step of chloride-induced macro-cell corrosion of reinforcing steel." Corrosion Science **110**: 46-56.

Hornbostel, K., et al. (2013). "Relationship between concrete resistivity and corrosion rate - A literature review." Cem. Concr. Compos. **39**: 60-72.

Koleva, D. A., et al. (2009). "The beneficial secondary effects of conventional and pulse cathodic protection for reinforced concrete, evidenced by X-ray and microscopic analysis of the steel surface and the steel/cement paste interface." Materials and Corrosion **60**(9): 704-715.

Larbi, J. and R. Polder (1996). Microscopic examination of two mortar core samples with a conductive primer from Coating International A.S., Norway, TNO Building and Construction Research.

Liu, Y. and X. Shi (2009). "Cathodic protection technologies for reinforced concrete: Introduction and recent developments." Reviews in Chemical Engineering **25**(5-6): 339-388.

Markeset, G. and R. Myrdal (2008). Modelling of reinforcement corrosion in concrete. State of the art, SINTEF Building and Infrastructure.

Markeset, G. M., R. (2008). Modelling of reinforcement corrosion in concrete. State of the art, SINTEF Building and Infrastructure.

Martínez, I., et al. (2007). "Efficiency control of cathodic protection measured using passivation verification technique in different concrete structures." Corrosion **63**(9): 880-892.

Norsk Forening for Betongrehabilitering- FKBB (2016). "FKBBs referansedatabase." Retrieved October 2nd, 2018, from <https://betongrehabilitering.net/faggrupper/fkbb/>.

Norsk Forening for Betongrehabilitering (2016). Katodisk beskyttelse. Betongrehabilitering- Reparasjonsmetoder, utførelse og kontroll. J. Lindland. Oslo, Norsk Forening for Betongrehabilitering. **1**: 292-309.

Orlikowski, J., et al. (2004). "Electrochemical investigations of conductive coatings applied as anodes in cathodic protection of reinforced concrete." Cement and Concrete Composites **26**(6): 721-728.

Polder, R., et al. (2010). "Performance and working life of Cathodic Protection systems for Concrete structures."

Polder, R. and W. Peelen (2018). "Cathodic protection of steel in concrete – experience and overview of 30 years application." MATEC Web of Conferences **199**: 01002.

Polder, R. B. (1998). "Cathodic protection of reinforced concrete structures in the Netherlands - Experience and developments: Cathodic protection of concrete - 10 years experience." Heron **43**(1): 3-14.

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**(2-3): 125-131.

Polder, R. B., et al. (2012). Working life of cathodic protection systems for concrete structures - Analysis of field data. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III - Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2012.

Polder, R. B., et al. (2014). "Service life and life cycle cost modelling of cathodic protection systems for concrete structures." Cement and Concrete Composites **47**: 69-74.

Polder, R. B., et al. (2006). Microscopy study of the interface between concrete and the conductive coating used as an anode for cathodic protection. Corrosion of Reinforcement in Concrete: Monitoring, Prevention and Rehabilitation Techniques: 277-287.

Poltavtseva, M., et al. (2015). "Electrochemical investigations of carbon-based conductive coatings for application as anodes in ICCP systems of reinforced concrete structures." Materials and Corrosion **66**(7): 627-634.

Pruckner, F. Leitende Beschichtungen als Anodenmaterial für KKS, V&C Kathodischer Korrosionsschutz Ges.m.b.H.

Pruckner, F. (2001). Anode Test (NACE T-3K-6), Protector AS.

Pruckner, F. (2001). Corrosion and Protection of Reinforcement in Concrete. Measurements and Interpretation. Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Universität Wien. **Doctor rer.nat.**

Pruckner, F. (2002). Diagnosis and protection of corroding steel in concrete. Structural Engineering. Trondheim, NTNU. **Dr.Ing**: 185.

Riise, K. (2011). KB-anlegg Region Midt. Verjeskiftet bru, Corroteam AS.

Riise, K. (2011). Kontroll av KB-anlegg 18-0788 Remøybrua, Corroteam AS.

Riise, K. (2011). Kontroll av KB-anlegg 20-0997 Nerlandsøybrua, Corroteam AS.

Rodum, E. and Ø. Vennesland (1994). Statusrapport for FoU-prosjektet "Katodisk beskyttelse med ledende primer- Nerlandsøy Bru", SINTEF Konstruksjoner og betong.

Rodum, E. V., Ø. (1994). Statusrapport for FoU-prosjektet "Katodisk beskyttelse med ledende primer- Nerlandsøy Bru", SINTEF Konstruksjoner og betong.

Van Den Hondel, A. and H. Van Den Hondel (2018). Cathodic protection of concrete with conductive coating anodes: 25 years of experience with projects and monitoring results. MATEC Web of Conferences.

van den Hondel, A. J., et al. (2016). Application of cathodic protection on 30 concrete bridges with pre-stressing steel: Remaining service life extended with more than 20 years. Proceedings of the 4th International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2015.

Vegdirektoratet (2014). 15.552 Kloridinnhold i betong ved Quntab-test. Feltundersøkelser. Retningslinje Håndbok R211, Statens Vegvesen

Vegdirektoratet (2018). 3.1.4 Utboring av betongstøv for bestemmelse av kloridinnhold. Feltundersøkelser. Retningslinje Håndbok R211

Statens Vegvesen 235 - 237.

Vegdirektoratet (2018). 3.3.1 Armeringslokalisering og -overdekning. Feltundersøkelser. Retningslinje Håndbok R211. Vegdirektoratet, Statens Vegvesen: 257 - 259.

Vegdirektoratet (2018). 3.3.2 Bestemmelse av heftfasthet/ overflatestrekkfasthet betong. Feltundersøkelser. Retningslinje Håndbok R211. Vegdirektoratet, Statens Vegvesen: 260 - 261.

Vegdirektoratet (2018). 3.4.5 Armeringens elektrokjemiske potensial (EKP). Feltundersøkelser. Retningslinje Håndbok R211. Vegdirektoratet, Statens Vegvesen 274 - 276.

Vennesland, O. (2009). Electrochemical maintenance and repair methods. Compendium NTNU Course TKT 4255. Ø. Vennesland. Trondheim, NTNU.

Xu, J. and W. Yao (2009). "Current distribution in reinforced concrete cathodic protection system with conductive mortar overlay anode." Construction and Building Materials **23**(6): 2220-2226.

Zhang, E. Q., et al. (2018). "Predicting degradation of the anode–concrete interface for impressed current cathodic protection in concrete." Construction and Building Materials **185**: 57-68.

Zhang, E. Q., et al. (2018). "Effect of the paste–anode interface under impressed current cathodic protection in concrete structures." Materials and Corrosion **69**(8): 1104-1116.

Ødegård, O. (1992). Nerlandsøy Kystbru. Forsøk med ELKINET-AHEAD-systemet.

Ødegård, O. (1994). Nerlandsøy kystbru FoU Prosjekt ledende primer. Fase 4+ Vurdering av AHEAD-systemet.

Østmoen, T. (2007). Kontroll av katodisk beskyttelse med ledende belegg. Oslo, Aas-Jakobsen.

## VEDLEGG

Vedlegg A: Kapittel 3.9 Nerlandsøy

Vedlegg B: Avlest potensial på referanseelektroder gjennom hele forsøket

Vedlegg C: Utvikling av depolarisering gjennom forsøket

Vedlegg D: Depolariseringskurver 21. og 31.mars for utvalgte referanseelektroder

Vedlegg E: Befaringsrapport Nerlandsøy

Vedlegg F: Befaringsrapport Remøy



# VEDLEGG A - Nerlandsøy Bru

## 3.9 Nerlandsøy Bru - Historikk

Nerlandsøy bru befinner seg i Møre og Romsdal og ble bygget i 1966-67. Midtspennet og de to tilstøtende sidespenn er spennarmert, de resterende delene er vanlig slakkarmert betong i prosjektert kvalitet B350 (cirka C30). Broen er meget slank og svært tett armert (Rodum 1994). Tilstandsanalyser ved starten av 90-tallet avdekket omfattende armeringskorrosjon initiert av forhøyet kloridinnhold og betongavskallinger, senere undersøkelser viste at omfanget var økende. Opprissing som følge av broens slanke dimensjon var også et faktum. Det ble klart at rehabilitering av den armerte betongbroen var nødvendig.



Tradisjonell mekanisk reparasjon ville innebære et stort meislingsomfang og var i prinsipp uegnet på den slanke betongkonstruksjonen. Katodisk beskyttelse ble sett på som det reelle alternativ. Grunnet opprissingen av den slanke brukonstruksjonen og at lastkapasiteten nærmet seg fullt utnyttet ble bruk av titannett sett på som uegnet da omstøpningsmørtelen ville utgjøre en betydelig tilleggsbelastning. Det ble bestemt at brua skulle rehabiliteres katodisk ved bruk av ledende maling. Prosjektet ble et FoU-prosjekt hvor man ønsket å innhente erfaringer med ledende maling brukt på broer i kyststrøk. Konkret var formålet å finne ut i hvilken grad ledende maling kunne anbefales som anodesystem ved katodisk beskyttelse av bruer i marine miljø. Nerlandsøy bru var den første av Vegvesenet broer som ble beskyttet med ledende maling, rehabiliteringen starten opp i mars 1992 (Ødegård 1992).

### 3.9.1 Anodesystemet

Det benyttede anodesystemet var AHEAD, beskrevet i oppgaven. Det lave grafittinnholdet i malingen gjenspeiles ved at heftstyrken er høyere enn for tradisjonelle anodemalinger på denne tiden. Ved at bindemiddelet hadde en viss ledningsevne ble både mekaniske og elektrokjemiske egenskaper ivarettatt (Ødegård 1992). Malingen kunne påføres i tørrfilmtykkelse på rundt 150 µm, betydelig lavere enn generell anbefaling for ledende maling, 250 – 500 µm (Byrne, Norton et al. 2016). Som

strømfordelingsbånd ble sølvbånd benyttet, disse ble i de første fasene bakt inn i anoden og tilkoblet positivkabel fra likeretteren.

### 3.9.2 Fase 1 – 3, utviklingsfasene

I første fase var hensikten å undersøke hvor lav driftsspenning som kunne påtrykkes samtidig som ønsket beskyttelseeffekt ble oppfylt. Med bakgrunn i dette var driftsspenningen 1,3 V. Kriteriet som ble benyttet innebar at 7 av 10 referanseelektroder skulle oppnå minst 100 mV depolarisering på 4 timer (som ble brukt den gangen). De fleste målinger var innenfor beskyttelseskriteriet.

Mens anlegget var på ble det utført målinger av spenningsfall i den ledende malingen på en søyle. Fra sølvbåndet og horisontalt til tilstøtende søyleflate hadde potensialet falt 160 mV, dette ble karakterisert som en høy verdi. Størst var potensialfallet i hjørne av søylen der armeringstettheten var høyest. Også vertikalt var det et høyt potensialfall fra matningspunktet i toppen av søylen og nedover. Erfaringen man trakk med seg var at strømfordelingsbåndene burde legges tettere, med mulighet for parallelle bånd i områder med spesielt høy armeringstetthet. For å redusere det vertikale potensialfallet ble det også anbefalt å mate strømmen inn midt på søylen (Ødegård 1992).

I fase 3 ble det gjort forsøk med å påføre slemmemasse på overflaten før påføring av AHEAD-anoden. Dette fordi erfaringen gjennom de første to fasene var at utstikkende jernbindertråd og annet stål i direkte kontakt med anoden ble anodisk oppløst og ga rustflekker i overflaten. Ved å påføre et slemmelag under anoden skulle dette estetiske problemet unngås. Motstanden i slemmemassen var meget høy, dermed fikk man en reduksjon i beskyttelsesstrømmen. Som et eksperiment forsøkte man å øke driftsspenningen til 4 V, man fikk da gasdannelse på anoden og belegget løsnet, på denne måten ble slemmemassen effektivt fjernet.

### 3.9.3 Fase 4, hovedinstallasjonen

Den viktigste endringen som ble gjort var utformingen av strømfordelingsbåndene av sølv. Gjennom de første utviklingsfasene erfarte man at kloridioner reagerte med ubeskyttet sølvbånd og at det ble dannet sølvklorid, med betydelig dårligere elektrisk ledningsevne enn sølv og dermed var reaksjonen svært uheldig i forhold til sølvbåndenes primærhensikt, å lede strøm ut i anodemalingen (Ødegård 1994). Problemet ble løst ved å forsegle sølvbåndene med ionetett epoksybelegg, en 5 cm bred stripe ble lagt på betongoverflaten, båndene ble plassert på stripen og bakt inn i ledende maling, deretter ble en tilsvarende stripe lagt over.

Heft av anoden til betongoverflaten ble kontrollert i fase 4 ved totalt 22 heftprøver. Av disse hadde 20 stykker heftstyrke i området 1,5 – 2,5 MPa. De to siste hadde henholdsvis 0,4 og 0,6 MPa dette ble forklart utfra tilfeldige forhold, for eksempel dårlig rengjøring eller feil ved påføring.

Depolariseringen for den enkelte referanseelektrode viste store variasjoner fra gang til gang, det ble vist til at temperaturforskjeller blant annet ville spille inn. Resultatene lå tett opptil eller over kravet. Driftsspenningen hadde fra første fase blitt justert opp til 1,8 V, det ble besluttet at spenningen skulle økes ytterligere til spenningstaket på 2 V, man forventet at dette ville bedre depolariseringen.

Følgende kritiske aspekter ved anodesystemet ble avslutningsvis vurdert i siste FoU-rapport fra (Ødegård 1994):

- Forsegling av strømfordelingsbånd
- Kobling mellom strømfordelingsbånd og positivkabel fra likeretter.
- Driftsspenning og anodeforbruk

Av disse ble første punkt nevnt ovenfor. Punkt to ble løst ved å bruke en klemhylse i koblingen mellom kobber og sølv. På Nerlandsøy ble koblingen lagt i meislede groper i betongen. Sårveggene og gropen ble fylt med ionetett epoksy, i prinsipp hadde man dermed to sikringer mot kloriddiffusjon. Løsningen ble vurdert som bestandig, ved senere rehabilitering på de andre broene har tilsvarende løsning vært benyttet med gode erfaringer.

Det tredje kritiske aspektet knyttet seg til den elektrokjemiske bestandigheten av anodematerialet. Avgjørende faktor i dette tilfellet er hvorvidt anlegget driftes ved elektroosmose eller elektrolyse, dette er igjen bestemt av størrelsen på den påtrykte spenningen (Ødegård 1994), det ble sagt at grensen i praksis går ved 2 V driftsspenning. Da det fra et bestandighetsmessig perspektiv var ønskelig å holde seg innenfor elektroosmose-området ble det øvre spenningstaket satt til 2 V.

Ved drift i elektrolyseområdet ville betydelig mengde gasser blitt dannet, og gassene ville reagert med anoden slik at en nedbrytningsprosess ble initiert. Først og fremst tenkte man på reaksjonen mellom klogass og grafitt. Et stort omfang av gassdannelse kunne også ha medført at anode og overflatebehandling løsnet fra betongunderlaget, slik som skjedde i fase 3 der overflaten var slemmet i forkant.

#### **3.9.4 Oppfølgingsperioden på Nerlandsøy**

Utførende entreprenør på Nerlandsøy bru (Strøm Gundersen AS) fikk en vedlikeholds- og driftsavtale av anlegget over en periode på 10 år, dette innebar jevnlig målinger av depolarisering og jevnlig inspeksjoner med brulift og utbedring av skader. Områder med avflassing av anode og dekkmalning ble utbedret. Tilgjengelig dokumentasjon fra denne perioden avdekker ingen store problemer med anodesystemet, med unntak av styresystemet som det var en mye problemer med. Hovedsikringen i styreskapene hadde en tendens til å slå seg av. Resultatet fra depolarisering var varierende, på den annen side ble det ved inspeksjon ikke oppdaget avskalling eller delaminering i anode eller betong. Det ble registrert en gradvis reduksjon av strømmen, og tilsvarende en reduksjon i referanselektroder som oppnådde 100 mV depolarisering.

Oppfølgingsavtalen utløp i 2004-2005 og ble ikke fornyet. Etter dette har det katodiske anlegget på Nerlandsøy vært vurdert i to runder, i 2005 og 2010. I siste runde konkluderte (Riise 2011) med at skadene på anlegget og på brua var betydelige, det ble observert et stort omfang av armeringskorrosjon og avskallinger. Hammerbanking viste at nye skader var under utvikling.

# VEDLEGG B

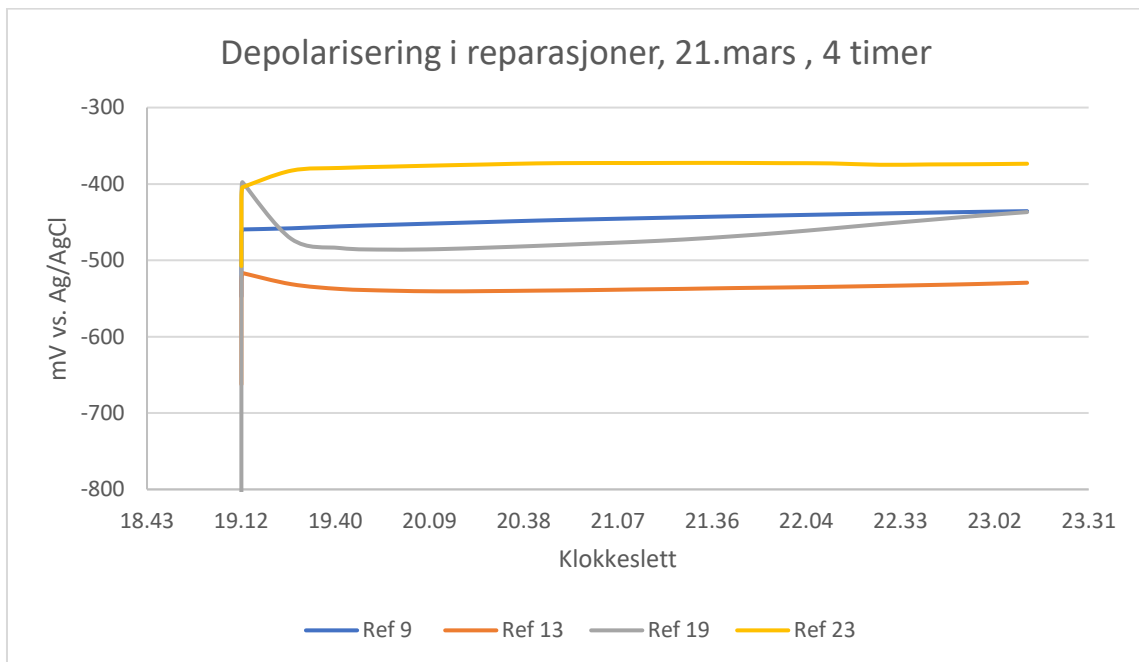
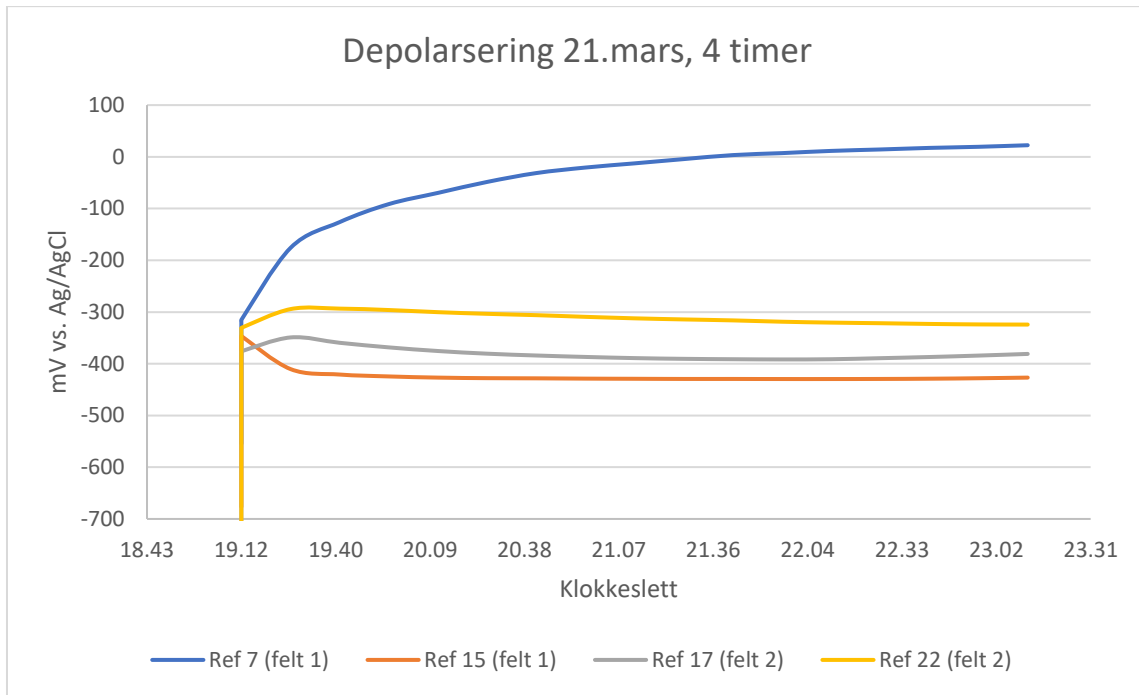
## Avlest potensial på referanseelektroder gjennom hele forsøket

Potensial mot referanseelektroder (Ag/AgCl) før og under polarisering													
Bånd tilkoblet:	ON-Potensial (MED IR)												
	B1	B1	B1+7	B1+4+7	B1+4+7	1+3+4+5+7	Alle bånd	B1+7	B1+7	B1+3+5+7	Alle bånd	4V umiddelbart etter	
Referanseelektrode	nitielt før polarisering	18.mar	19.mar	20.mar	21.mar	22.mar	23.mar	24.mar	25.mar	26.mar	27.mar	28.mar	28.mar
Nr 22	-352	-732	-745	-698	-756	-774	-708	-681	-636	-662	-671	-713	-1509
Nr 21	-332	-737	-747	-698	-776	-785	-726	-692	-613	-679	-692	-730	-1305
Nr 20	-351	-912	-909	-888	-927	-915	-883	-853	-790	-812	-845	-881	-1775
Nr 19 (Mørtel C)	-370	-770	-805	-761	-836	-828	-787	-756	-660	-674	-718	-733	-1193
Nr 18	-282	-845	-837	-827	-861	-833	-786	-753	-685	-709	-761	-804	-1567
Nr 17	-343	-795	-809	-781	-877	-861	-817	-775	-683	-758	-776	-814	-1426
Nr 23 (Mørtel B)	-343	-733	-785	-684	-508	-551	-502	-508	-759	-744	-697	Koblet fra	-1805
Nr 16	-216	-598	-609	-577	-576	-541	-507	-490	-502	-509	-524	-549	-922
Nr 15	-330	-649	-701	-660	-678	-674	-710	-718	-786	-821	-756	-768	-1329
Nr 14	-301	-583	-642	-598	-622	-645	-714	-721	-765	-818	-810	-843	-1237
Nr 13 (Mørtel A)	-408	-577	-654	-614	-663	-648	-696	-693	-713	-710	-754	-788	-950
Nr 12 (Mørtel A)	-365	-465	-548	-513	-544	-530	-577	-575	-610	-596	-624	-643	-787
Nr 11 (Mørtel A)	-422	-505	-587	-550	-569	-566	-600	-610	-648	-647	-677	-712	-868
Nr 10 (Mørtel A)	-395	-472	-563	-531	-553	-536	-566	-569	-620	-607	-640	-660	-984
Nr 9 (Mørtel A)	-363	-446	-547	-524	-546	-520	-544	-542	-640	-621	-654	-661	-1196
Nr 8	-18	-517	-530	-509	-529	-484	-467	-460	-468	-474	-559	-569	-1095
Nr 7	-30	-513	-550	-518	-577	-515	-541	-538	-522	-553	-624	-622	-1004
Nr 6	-172	-510	-560	-524	-611	-567	-631	-616	-581	-612	-658	-689	-951
Nr 5	-43	-476	-543	-524	-618	-554	-615	-589	-567	-581	-670	-684	-869
Nr 4	-27	-431	-554	-528	-592	-535	-598	-585	-558	-558	-664	-672	-889
Nr 3	-78	-442	-605	-574	-601	-556	-608	-627	-608	-609	-641	-699	-1093
Nr 2	-68	-372	-526	-508	-526	-472	-482	-479	-460	-454	-517	-562	-973
Nr 1	-44	-296	-455	-427	-429	-390	-385	-378	-403	-381	-426	-446	-862

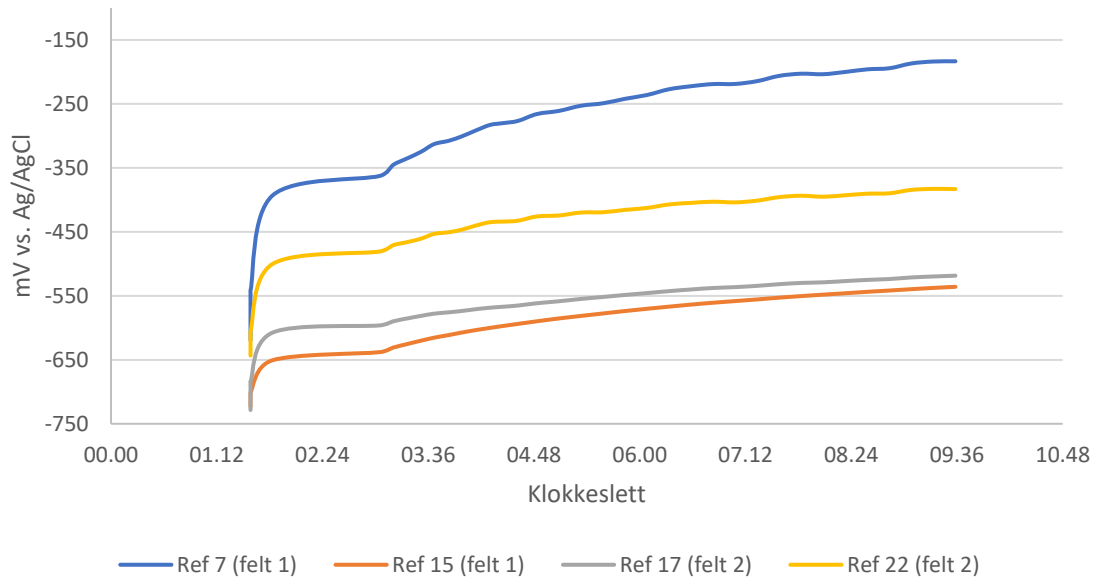


# VEDLEGG D

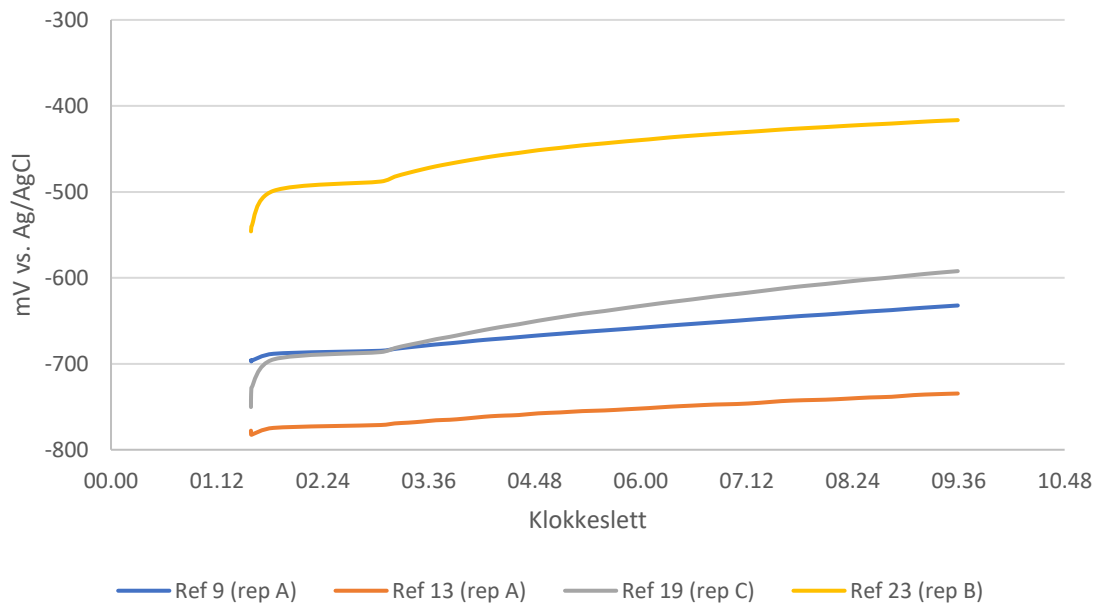
## Depolariseringskurver 21. og 31.mars for utvalgte referanseelektroder



### Depolarisering uten IR-fall. 31 mars, 8 timer



### Depolarisering i reparasjoner uten IR-fall. 31.mars, 8 timer



# VEDLEGG E

## 15-0997- Nerlandsøybrua. 01+ 02.april 2019

### Styreskap, akse 21 (Nerlandsøy-siden):

Anlegget var dødt ved befaringstidspunktet. Sikringen var gått, den ble slått på og det ble liv i anlegget, ut fra stikkontakt ble det målt 245 V (vekselspenning). Sone 1-4 + Prøvefeltet styres fra dette skapet. Det er i tillegg installert 2 stk modem som ikke lenger fungerer (Lys er rødt). Under følger avlesninger i skapet gjort 01 og 02.april 2019. Siste avlesning utført av Corroteam AS ved Knut Einar Riise i 2010 er medtatt som et sammenlikningsgrunnlag.

01.april 2019:

Strømforsyning	Spenning	Strøm	Areal	Strømtetthet(betongoverflate)
1	2,03 V	0,44 A	665	0,66 mA/m <sup>2</sup>
2	1,94 V	0,65 A	650	1,00 mA/m <sup>2</sup>
3	--	0,09 A	375	0,24 mA/m <sup>2</sup>
4	2,10 V	0,10 A	360	0,28 mA/m <sup>2</sup>
Prøvefelt	--	--	118	--

Da strømmen i prinsipp blir å regne som oppstartstrøm ble avlesning også gjort påfølgende dag, 02.april 2019:

Strømforsyning	Spenning	Strøm	Areal	Strømtetthet(betongoverflate)
1	2,00 V	0,30 A	665	0,45 mA/m <sup>2</sup>
2	2,00 V	0,59 A	650	0,91 mA/m <sup>2</sup>
3	0,433 V	-0,03 A	375	0 mA/m <sup>2</sup>
4	2,10 V	0,07 A	360	0,19 mA/m <sup>2</sup>
Prøvefelt	0,256 V	0,03 A	118	0,25 mA/m <sup>2</sup>

Spenning avlest på FixVolt 1-4 kontrollert med multimeter (HIOKI) på rekkeklemmene mellom armering og anode. For Strømforsyning (FixVolt 3 og «prøvefelt») lot spenningen seg ikke avlese. Rødt tall oppgitt i tabell er målt med Multimeter på rekkeklemme, målingene bekrefter at sone 3 og «prøvefelt» er uten strøm da spenningen målt i realiteten er egenpotensial mellom armering og anode uten påtrykt spenning.

September 2010, kopiert fra Riise sin rapport:

Strømforsyning	Spenning	Strøm	Antall referanser	Areal	Strøm mA/m <sup>2</sup> betong
1	2,01	300mA	10	665	0,45
2	Fungerer ikke		8	650	1,88
3	2,17	390mA	8	375	1,04
4	2,08V	170mA	10	360	0,47
Prøvefelt	2,8V	10mA		118	0,08



### Referanseelektroder, Camur I.

Channel	Potensial (ON)	Channel	Potensial (ON)
1	2,002 V	14	0,057 V
2	-0,037 V	15	0,182 V
3	0,042 V	16	0,026 V
4	0,008 V	17	-0,119 V
5	-0,047 V	18	0,034 V
6	-0,051 V	19	0,031 V
7	-0,151 V	20	-0,033 V
8	-0,010 V	21	-0,007 V
9	-0,162 V	22	0,003 V
10	0,059 V	23	-0,015 V
11	0,071 V	24	0,033 V
12	-0,188 V	31	0 DI
13	1,971 V	32	0 DU

### Referanseelektroder avlest på Camur II:

Channel	Potensial (ON)	Kanal	Potensial (ON)
1	0,321 V	14	0,070 V
2	-0,014 V	15	-0,019 V
3	-0,139 V	16	-0,064 V
4	-0,186 V	17	-0,200 V
5	-0,061 V	18	-0,095 V
6	0,106 V	19	-0,007 V
7	0,114 V	20	-0,036 V
8	0,014 V	21	-0,237 V
9	-0,064 V	22	-0,127 V
10	0,018 V	23	-0,193 V
11	1,764 V	24	-0,014 V
12	0,565 V	31	0 DI
13	2,104 V	32	0 DU

Referanseelektroden er ROVER grafittelektroder.

### Styreskap akse 1 (Fosnavåg-siden):

Skapet er helt dødt. Det er strømforsyning til sone 5, 6 og 7 fra denne siden. Spenning ble målt manuelt på rekkeklemma med Multimeter:

Strømforsyning	Spenning
5	0,557 V
6	0,255 V
7	0,250 V

I prinsipp egenspenning

# VEDLEGG F

## 15-0788 Remøybrua. Befaring 02.april 2019

### Styreskap, akse 21 (Remøy-siden):

Det er liv i anlegget. Lys og varmeelement i skapet fungerer. I skapet er det installert 2 stk modem som er døde. Under følger avlesninger i skapet gjort 02.april 2019. Siste avlesning utført av Corroteam AS ved Knut Einar Riise i 2010 er medtatt som et sammenlikningsgrunnlag.

02.april 2019:

Strømforsyning	Spenning	Strøm	Areal	Strømtetthet(betongoverflate)
1	2 V	0,11 A	486	0,23 mA/m <sup>2</sup>
2	0,12 V	0 A	737	0 mA/m <sup>2</sup>
3	1,43 V	0,08 A	390	0,21 mA/m <sup>2</sup>
4	0,0043 V	0,03 A	629	0,05 mA/m <sup>2</sup>

Spenning avlest på FixVolt 1-4 kontrollert med Multimeter (HIOKI) på rekkeklemmene mellom armering og anode.

September 2010, kopiert fra Riise sin rapport:

Strøm-forsyning	Spenning	Strøm oppstart	Strøm 2/12-10	Antall referanser	Areal	Strøm mA/m <sup>2</sup> oppstart	Strøm mA/m <sup>2</sup> betong 2/12-10
1	2V	1,11A	340mA	10	486	2,28	0,70
2	2V	1,86A	460mA	10	737	2,52	0,62
3	2V	1,41A	220mA	7	390	3,62	0,56
4	2V	1,51A	380mA	10	629	2,40	0,60

### Potensial avlest mot referanseelektroder, Camur I:

Channel	Potensial (ON)	Kanal	Potensial (ON)
1	2,007 V	14	0,000 V
2	0,015 V	15	-0,035 V
3	-0,176 V	16	-0,053 V
4	-0,109 V	17	-0,037 V
5	-0,117 V	18	0,053 V
6	-0,111 V	19	-0,105 V
7	-0,119 V	20	-0,112 V
8	-0,026 V	21	-0,089 V
9	-0,039 V	22	-0,101 V
10	-0,035 V	23	-0,094 V
11	-0,131 V	24	-0,090 V
12	0,147 V	31	0 DI
13	0,121 V	32	0 DU

### Potensial avlest mot referanseelektroder, Camur II:

Channel	Potensial (ON)	Kanal	Potensial (ON)
1	2,000 V	14	0,016 V
2	0,015 V	15	-0,214 V
3	-0,259 V	16	-0,078 V
4	-0,162 V	17	-0,156 V
5	-0,137 V	18	-0,159 V
6	-0,351 V	19	-0,197 V
7	-0,289 V	20	-0,327 V

<b>8</b>	-0,101 V	<b>21</b>	-0,141 V
<b>9</b>	-0,140 V	<b>22</b>	-0,133 V
<b>10</b>	-0,071 V	<b>23</b>	-0,249 V
<b>11</b>	-0,072 V	<b>24</b>	-0,163 V
<b>12</b>	0,714 V	<b>31</b>	0 DI
<b>13</b>	1,991 V	<b>32</b>	0 DU

Referanseelektrodene er ROVER grafittelektroder.

### Styreskap akse 1:

Anlegget påslått ved ankomst. Lys og varmeelement fungerer. FixVolt virker og på den ene Camuren som er installert kan det avleses potensial på armering mot referanseelektrodene. Det er installert 1 stk modem i skapet som er dødt. Under følger avlesninger i skap gjort 02.april 2019. Siste avlesning før denne befaringen ble utført av Corroteam ved Knut Einar Riise i september 2010, disse dataene er tatt med som et sammenlikningsgrunnlag

02.april 2019:

Strømforsyning	Spenning	Strøm	Areal	Strømtetthet(betongoverflate)
5	2,00 V	0,17 A	374	0,45 mA/m <sup>2</sup>
6	2,03 V	0,16 A	376	0,43 mA/m <sup>2</sup>

Spenning avlest på FixVolt 1-4 kontrollert med Multimeter (HIOKI) på rekkeklemmene mellom armering og anode.

September 2010, kopiert fra Riise sin rapport:

Strømforsyning	Spenning	Strøm	Antall referanser	Areal	Strøm mA/m <sup>2</sup> betong
5	2V	200mA	9	374	0,53
6	2V	170mA	10	376	0,45

### Potensial avlest mot referanseelektroder, Camur III:

Channel	Potensial	Kanal	Potensial
<b>1</b>	2,000 V	<b>14</b>	0,016 V
<b>2</b>	0,015 V	<b>15</b>	-0,214 V
<b>3</b>	-0,259 V	<b>16</b>	-0,078 V
<b>4</b>	-0,162 V	<b>17</b>	-0,156 V
<b>5</b>	-0,137 V	<b>18</b>	-0,159 V
<b>6</b>	-0,351 V	<b>19</b>	-0,197 V
<b>7</b>	-0,289 V	<b>20</b>	-0,327 V
<b>8</b>	-0,101 V	<b>21</b>	-0,141 V
<b>9</b>	-0,140 V	<b>22</b>	-0,133 V
<b>10</b>	-0,071 V	<b>23</b>	-0,249 V
<b>11</b>	-0,072 V	<b>24</b>	-0,163 V
<b>12</b>	0,714 V	<b>31</b>	0 DI
<b>13</b>	1,991 V	<b>32</b>	0 DU

Referanseelektrodene er ROVER grafittelektroder. I utgangspunktet ment for depolariseringsmålinger.

