

Feltforsøk - mørtel egnet for katodisk beskyttelse

Resultater etter 3 års feltprøving
FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 850



Tittel

Feltforsøk - mørtel egnet for katodisk beskyttelse

Undertittel

Resultater etter 3 års feltprøving, FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021

Forfattere

Karla Hornbostel, Eva Rodum, Roy E. Antonsen, Stig Henning Helgestad

Avdeling

Konstruksjoner

Seksjon

Konstruksjonsteknikk

Prosjektnummer

L10114

Rapportnummer

850

Prosjektleder

Bård M. Pedersen

Godkjent av

Bård M. Pedersen

Emneord

Betong, armeringskorrosjon, reparasjonsmørtler, katodisk beskyttelse, feltforsøk, bestandighet

Sammendrag

Statens vegvesen etablerte i 2019 et feltforsøk på Tjeldsundbrua i Harstad kommune, for prøving av mørtler brukt til katodisk beskyttelse av armering i betong. I feltforsøket prøves både reparasjonsmørtler og mørtler anbefalt for innsprøyting av anodesystemer i katodiske anlegg. Sentralt i forsøksprogrammet er måling av mørtlenes elektriske motstand og mørtlenes innvirkning på den katodiske beskyttelsen. Motstandsutvikling og virkningsgrader for katodisk beskyttelse vil følges over flere år som funksjon av aldring, og naturlige fuktighets- og temperaturvariasjoner. Rapporten beskriver resultater etter 3 års feltprøving.

Title

Field testing - mortar suitable for cathodic protection

Subtitle

Results after 3 years of field testing, R&D program Improved bridge maintenance 2017–2021

Authors

Karla Hornbostel, Eva Rodum, Roy E. Antonsen, Stig Henning Helgestad

Department

Structures

Section

Structural Engineering

Project number

L10114

Report number

850

Project manager

Bård M. Pedersen

Approved by

Bård M. Pedersen

Key words

Concrete, reinforcement corrosion, repair mortars, cathodic protection, field testing, durability

Summary

In 2019, the Norwegian Public Roads Administration established a field test program at Tjeldsund bridge in Harstad municipality, for testing of mortars used for cathodic protection of steel in concrete. Both repair mortars and mortars recommended for embedment of surface net anodes are considered. A main part of the experimental program is measuring the resistivity of the mortars and the related effect on the cathodic protection. The development of the resistivity of the mortars and the efficiency of the cathodic protection will be monitored over several years. The report describes the results after 3 years of field testing.



Forord

Rapporten er utarbeidet som en del av FoU-programmet Bedre bruvedlikehold (2017–2021). Bedre bruvedlikehold skal gjennom ny kunnskap bidra til at Statens vegvesen kan optimalisere ressursbruken knyttet til inspeksjon, vedlikehold og forvaltning av bruer.

Bedre bruvedlikehold består av fire prosjekter:

Prosjekt 1: Forvaltningsverktøy for bruer

Prosjekt 2: Armeringskorrosjon i betong

Prosjekt 3: Alkalireaksjoner i betong

Prosjekt 4: Vedlikehold av stålbruer

Bedre bruvedlikehold blir ledet av Bård M. Pedersen, Vegdirektoratet.

Denne rapporten tilhører Prosjekt 2: «Armeringskorrosjon i betong» som blir ledet av Karla Hornbostel. Prosjekt 2 er rettet mot drift og vedlikehold av betongbruer med armeringskorrosjon. Mål for prosjektet er å utarbeide anbefalinger for inspeksjonsmetoder for å utrede omfang av skader på grunn av armeringskorrosjon, samt å utvikle verktøy for å kunne bedømme konsekvenser av armeringskorrosjon for bruas levetid. Prosjektet skal også utarbeide et beslutningsgrunnlag for valg av reparasjonstiltak og anbefalinger for gjennomføring av tekniske gode og økonomisk effektive reparasjonstiltak.

Rapporten tilhører delprosjekt 2.2 «Betongrehabilitering ved katodisk beskyttelse», og presenterer resultater fra et feltforsøk etter 3 års prøveperiode.

Sammendrag

Statens vegvesen etablerte i 2019 et feltforsøk på Tjeldsundbrua i Harstad kommune, for prøving av mørtler brukt til katodisk beskyttelse av armering i betong. I feltforsøket inngår både reparasjonsmørtler og mørtler for innsprøyting av anodenett, levert av tre ulike leverandører. Det er etablert totalt 12 felt med katodisk beskyttelse utført med anoder av innstøpte titannett (3 leverandører x 2 sider (nord/sør) x 2 flater (med/uten overflatebehandling)). Parallelt med feltforsøket, er ulike egenskaper undersøkt ved laboratorieprøving.

Ved bruk av ulike metoder er mørtlenes spesifikke elektriske motstand målt over tid og ved ulike temperaturer. Det er også undersøkt i hvilken grad mørtlenes elektriske motstand påvirker ytelsen av det katodiske beskyttelsessystemet. Hovedformålet med undersøkelsen var å se på prøvingsmetoder og hensiktsmessige grenseverdier for spesifikk elektrisk motstand av mørtler brukt i katodiske anlegg, både for reparasjonsmørtler brukt i mekanisk reparasjon forut for installasjon av KB og selve mørtlene brukt for omslutning av anoder (KB-mørtel).

Basert på resultater fra laboratorieprøving og feltresultater etter tre års drift er det funnet at:

- Reparasjonsmørtlers spesifikke elektrisk motstand bør være tilnærmet lik originalbetongens. De ofte benyttede grenseverdiene på 50 – 200 % av brubetongens spesifikke elektriske motstand ligger i et fornuftig område, men bør hensynta forventede variasjonskoeffisienter (på minimum 10–20 %) både for resultater og grenseverdier, og benyttes med skjønn.
- KB-mørtlenes spesifikke motstand bør ikke overskride reparasjonsmørtelens/ betongens motstand, men det er ikke nødvendigvis behov for en motstand $< 50 \Omega m$.
- Dokumentasjon av mørtlers spesifikke elektriske motstand i laboratorium bør utføres ved 90 døgns alder (ikke tidligere). Prøvingen bør utføres på vannmettede prøver uttatt fra sprøytede plater.
- Originalbetongens spesifikke elektriske motstand skal bestemmes i laboratorium på vannlagrede prøvestykker tildannet fra utborede kjerner. Verdiene bør kalibreres mot overflatemålinger i felt, hvoretter feltmålinger kan benyttes til å kartlegge variasjoner i motstand over konstruksjonsdeler.
- Det er viktig å ha referanseelektroder plassert både i reparerte og ikke-reparerte områder for å sikre at man har god oversikt over beskyttelsesgrad.

Det er foreløpig ikke funnet effekter av de påførte overflatebehandlinger eller av lokale variasjoner i eksponering (sør/nord), hverken når det gjelder spesifikk elektrisk motstand eller ytelse av KB-systemene.

Feltforsøket vil bli fulgt opp videre de kommende årene. I tillegg til registreringer av spesifikk elektrisk motstand og KB-systemenes ytelsesgrad vil det være aktuelt å undersøke mørtlenes/overflatebehandlingenes mekaniske og bestandighetsmessige egenskaper over tid (f.eks. heftfasthet, klorid- og frostmotstand).

Innhold

Forord	I
Sammendrag	II
Innhold	1
1 Bakgrunn og målsetting	3
1.1 Bakgrunn	3
1.2 Målsetning	5
2 Beskrivelse av feltforsøket	6
2.1 Beskrivelse prøvefeltene	6
2.2 Beskrivelse datainnsamling	9
2.2.1 Automatiserte motstandsmålinger	11
2.2.2 Automatiserte temperaturmålinger	12
2.2.3 Manuelle motstandsmålinger	12
2.2.4 Automatiserte målinger katodisk beskyttelse	12
3 Resultater	15
3.1 Automatiserte motstandsmålinger av reparasjons- og KB-mørtler	15
3.2 Manuelle motstandsmålinger av KB-mørtler	16
3.3 Katodiske anlegg	17
3.3.1 Potensialmålinger før påbegynt katodisk beskyttelse	17
3.3.2 Driftsdata katodisk beskyttelse	18
3.4 Temperaturer målt i mørtlene	20
4 Diskusjon	22
4.1 Elektrisk motstand av sprøytemørtler for bruk i katodisk beskyttelse	22
4.1.1 Motstandsmålinger av sprøytemørtel i felt, sammenligning av målemetoder	22
4.1.2 Utvikling av elektrisk motstand i felt avhengig av mørtelalder, temperatur, eksponering og overflatebehandling	24
4.1.3 Sammenhengen mellom feltmålinger og laboratoriemålinger av mørtlers spesifikke elektrisk motstand	32
4.2 Ytelse av katodisk beskyttelse avhengig av elektrisk motstand av mørtel	36
4.3 Ytelse av katodisk beskyttelse avhengig av temperatur og overflatebehandling	39
4.4 Armeringens korrosjonstilstand i områder med forenklet mekanisk reparasjon	41
5 Oppsummering og konklusjon	43

6	Referanser	45
A	Vedlegg – Motstandsmålinger for alle motstandssensorer	46
A.1	Felt Sør 1	46
A.2	Felt Nord 1	47
A.3	Felt Sør 2	51
A.4	Felt Nord 2	52
A.5	Felt Sør 3	55
A.6	Felt Nord 3	56
B	Vedlegg – Måledata katodisk beskyttelse for alle felt	58
B.1	Felt Sør 1	58
B.2	Felt Sør 2	59
B.3	Felt Sør 3	60
B.4	Felt Nord 1	61
B.5	Felt Nord 2	62
B.6	Felt Nord 3	63
C	Vedlegg – Strømtetthet vs. temperatur og overflatebehandling.....	64

1 Bakgrunn og målsetting

1.1 Bakgrunn

Betongrehabilitering er et viktig fokusområde for Statens vegvesen. I 2017 ble det etablert et FoU-program, «Bedre bruvedlikehold», som har som mål å utvikle verktøy for å kunne kartlegge og vurdere tilstanden til bruer og spesifisere hvilke tiltak som skal iverksettes. Bakgrunnen for programmet er at en stor del av bruene i riks- og fylkesvegnettet har nådd en alder hvor det er behov for tyngre vedlikehold.

Armeringskorrosjon er den skadetypen som registreres oftest på norske betongbruer. Katodisk beskyttelse (KB) er et mulig vedlikeholdstiltak der armeringskorrosjon er påvist. Metoden er spesielt egnet der armeringskorrosjon pågår over store arealer uten at dette har ført til omfattende skader i form av opprissing og avskalling av betong. Riktig valg av materialer er avgjørende for å oppnå god og langvarig effekt av tiltaket.

Ved installasjon av katodisk beskyttelse blir både reparasjonsmørtler (Rep-mørtler) og mørtler spesifisert for bruk i katodiske anlegg (KB-mørtler) som oftest sprøytet på konstruksjonen ved tørrsprøyting. De to mørteltypene Rep- og KB-mørtler har mange fellestrekk. I produkt-datablad er det angitt om mørtelen er utviklet for bruk i mekanisk reparasjon (reparasjonsmørtler) eller om mørtelen er tenkt for innsprøyting av anoder (KB-mørtler). De mest sentrale egenskapene til mørtlene i KB- installasjoner vil være at de har gode heftegenskaper til underlaget, at de beskytter anoden mot påvirkninger fra ytre miljø, samt at de sikrer god elektrolytisk kontakt mellom anoden og armeringen. Den sistnevnte egenskapen beskrives av den spesifikke elektriske motstanden. Denne egenskapen er mangelfullt beskrevet både når det gjelder krav til målemetode og krav til grenseverdier for mørtler som skal benyttes ved katodisk beskyttelse. Noe er angitt i ulike veiledere/standarder:

NS-EN 1504-10:2017+NA:2019, informativt tillegg A, pkt. A.5.4.14 (NS-EN 1504-10:2017+NA:2019 2019)

«Resistiviteten i underlaget og i reparasjonsmaterialet er aktuelle parametere når det anvendes elektrokjemiske teknikker etter at reparasjonen er utført, f.eks. i metode 7.3, 7.5 og 10.1. Ettersom motstanden i sementbaserte materialer er sterkt avhengig av vanninnhold og temperatur, og feltmetodene (f.eks. Wenner-metoden med 4 sonder) er følsom for innstøpt armering i betongen, bør det utføres sammenlignende prøving på utborede/støpte prøvelegemer. Motstanden, R , måles på vannmettede prøvestykker av lik størrelse, mellom to fastholdte elektroder – for eksempel stålplater med ledende gel i kontaktflaten – på motstående parallelle endeflater på prøvestykket, ved gitte temperaturer. Den elektriske motstanden, ρ , beregnes som $\rho = R \cdot A/l$, der R er målt motstand (Ω), A er tverrsnittsarealet på prøvestykket (m^2) og l er avstanden mellom elektrodene, altså lengden av prøvestykket (m).

Den elektriske motstanden til reparasjonsmaterialet skal være så nær den til underlaget som mulig, og skal ikke være større enn verdiene gitt i NS-EN ISO 12696.»

NS-EN 12696:2022 (NS-EN 12696:2022 2022)

«The impact of variations in concrete resistivity on the cathodic protection system shall be considered. There is no firm guidance on limits of electrical resistivity with respect to cathodic protection, but the designer shall consider whether full protection can be achieved where required for the range and absolute values of concrete resistivity found on the structure.»

Note to concrete reinstatement: “Typically, these repair materials have an electrical resistivity within the range approximately half to twice that of the parent concrete when measured under the same conditions as the parent concrete. However, the electrical resistivity of the parent concrete is that of an aged material (age > 20 years), whereas the electrical resistivity of the repair material reflects the properties at a relatively young age; it is anticipated that there is a significant ageing effect over time. Also, measurements made in the laboratory on prisms do not represent the conditions of the structure. A good quality repair made with materials known to be compatible with cathodic protection installations has been found to be more important than arbitrary resistivity limits.”

Statens vegvesen R762 – Prosesskode 2 (2018) (Statens vegvesen 2018)

Krav til egenskaper for mørtler, utover minimumskrav i NS-EN 1504-3 (Tabell 88.22-1), Spesifikk elektrisk motstand: 50 % < opprinnelig betong < 200 %, kravet gjelder kun ved mekanisk reparasjon forut for elektrokjemisk behandling.

Målingene utføres iht. Håndbok R210, målingene utføres på vannmettede prøvestykker (støpte/utborede) ved lik temperatur for alle prøvestykker. Videre peker den på NS-EN 12696 når det gjelder krav til selve KB-mørtelen.

Betongrehabilitering, Reparasjonsmetoder, utførelse og kontroll. Lindland, Jan (2016) Norsk forening for betongrehabilitering, Oslo, Norway; (Lindland 2016)

«... reparasjonsmaterialer bør ha en elektrisk motstand mest mulig lik den opprinnelige betongen. Dette er viktig for å sikre en lik og jevn strømfordeling til armering. Anbefalte verdier for elektrisk motstand er i området 50 – 200 % av den opprinnelige betongen ...»

«... det påføres sprøytemørtel med minimum 20 mm tykkelse. Sprøytemørtelen må ikke inneholde silikastøv eller polymerer. Det er for å unngå elektrisk motstand over 50 Ω m ...»

Mangler på mer spesifikke krav og liten oversikt over de ulike mørtlenes elektrokjemiske egenskaper viser at videre undersøkelser er nødvendig for å sikre bruk av riktige materialer i forbindelse med katodiske anlegg.

I september 2019 ble det derfor etablert et forsøksfelt der et utvalg aktuelle mørtler er utprøvd. Sentralt i forsøksprogrammet er måling av elektrisk motstand og virkningsgraden av katodisk beskyttelse. Motstandsutvikling følges over flere år som funksjon av aldring og naturlige fuktighets- og temperaturvariasjoner. I tillegg studeres betydningen av en sementbasert, elastisk slemmemasse på sprøytet mørtel mht. motstandsutvikling. Spesifikk elektrisk motstand, trykkfasthet, kapillær absorpsjon og frostbestandighet for de ulike reparasjons- og KB-mørtlene ble også prøvd parallelt i laboratoriet.

Oppbyggingen av prøvefeltene og generelle aspekter rundt forsøket er beskrevet i Statens vegvesen rapport nr. 671 (Hornbostel, et al. 2020). Resultatene fra et utvalg laboratorietestmetoder er beskrevet i Statens vegvesen rapport nr. 851 (Helgestad, et al. 2023).

Denne rapporten gir en oversikt over langtidsmålinger fra sensorer installert ved feltstasjonen på Tjeldsundbrua for årene 2019 til 2022. Motstandsutvikling over flere år som funksjon av aldring og naturlige fuktighets- og temperaturvariasjoner er diskutert. Påvirkning av mørtelegenskaper på ytelse av katodisk beskyttelse er også beskrevet og diskutert.

1.2 Målsetning

Hovedformålet med undersøkelsen er å se på prøvingsmetoder og hensiktsmessige grenseverdier for spesifikk elektrisk motstand av mørtler brukt i katodiske anlegg, både for reparasjonsmørtler brukt i mekanisk reparasjon forut for installasjon av KB og selve mørtlene brukt for omslutning av anoder (KB-mørtel).

Rapporten evaluerer sammenhengen mellom spesifikk elektrisk motstand målt hhv. i felt og i laboratorium. I tillegg undersøkes virkningsgraden for katodisk beskyttelse med titan-nett omsluttet av KB-mørtler med varierende elektrisk ledningsevne.

Følgende tema er undersøkt og diskutert i rapporten:

- I. Sammenheng mellom ulike målemetoder for elektrisk motstand i felt ved bruk av manuelt måleutstyr og innstøpte sensorer for automatisk logging
- II. Reparasjons- og KB-mørtlers spesifikke elektriske motstand i felt, over tid, avhengig av temperatur, eksponeringsbetingelser og overflatebehandling
- III. Sammenhengen mellom langtids feltmålinger og laboratoriemålinger av mørtlers spesifikke elektriske motstand
- IV. Effekten av reparasjons- og KB-mørtlenes spesifikke elektriske motstand på den katodiske beskyttelsen av armeringen
- V. Effekten av overflatebehandling på den katodiske beskyttelsen av armeringen
- VI. Effekten av forenklet mekanisk reparasjon på pågående korrosjon av armeringen

2 Beskrivelse av feltforsøket

2.1 Beskrivelse prøvefeltene

Detaljert informasjon om bakgrunn og oppbygging av feltforsøket finnes i Statens vegvesen rapport 671 (Hornbostel, et al. 2020). I det følgende gis det en kort oppsummering av rapporten.

Ved feltprøvingen var det ønsket å prøve to varianter for installasjoner av katodisk beskyttelse (KB). En variant skal representere tilfeller der skadet betong i områder med bom og avskallinger meisles bort, og repareres med en egnet reparasjonsmørtel i forkant av KB-installasjonen. Den andre varianten skal representere installasjon av katodisk beskyttelse på den opprinnelige brubetongen i området der korrosjon har startet, men ikke har ført til opprissing/bom. Som lokasjon for feltforsøket ble det valgt forankringspilaren ved Tjeldsundbrua i Harstad kommune (Troms og Finnmark fylke). Pilaren har en del synlige korrosjonsskader på nordsiden, mens det på sørsiden var få tegn til synlig korrosjon. Dette gjorde det mulig å prøve begge varianter for utførelse på samme objekt. På nordsiden ble det foretatt en variant av *forenklet mekanisk reparasjon* i forkant av installasjon av katodisk beskyttelse. Det var tydelig at armeringen var i en aktiv korrosjonstilstand da reparasjonen ble utført (Figur 1 (a)). Betong ble fjernet ved meiselmaskin noen cm bak første armeringslag, men det ble ellers ikke gjort noen spesielle tiltak for å stoppe pågående korrosjon på armeringen. På sørsiden ble det ikke foretatt en mekanisk reparasjon, men det ble lokalt meislet fram armering for å opprette armeringskontakter, både for måling av elektrokjemiske potensialer mot referanseelektroder og for tilkobling av strøm til KB-anlegget. Det ble i denne sammenhengen observert korrosjon på armeringen også på sørsiden av forankringspilaren (Figur 1 (b)). Korrosjon hadde på sørsiden enda ikke ført til delaminering eller avskallinger.

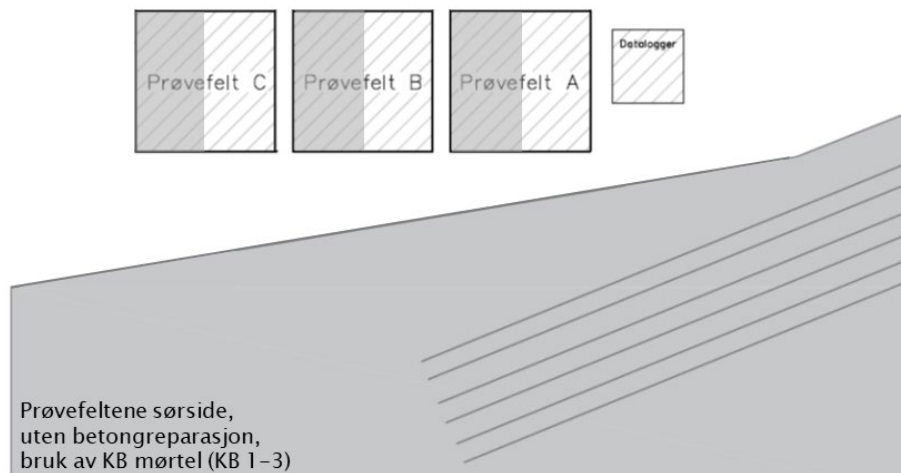


a) Armeringsjern på nordsiden av forankringspillaren i området da det ble utført mekanisk reasprasjon.

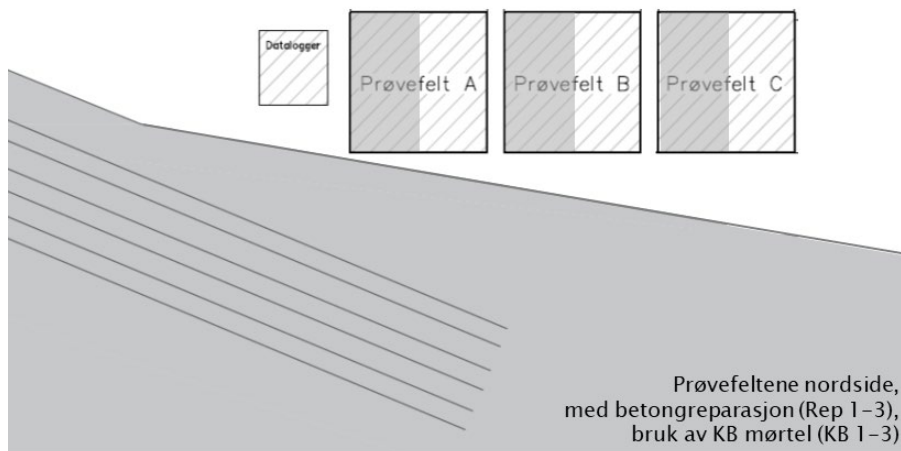
b) Armeringsjern på sørsiden av forankringspillaren i området da det ble etablert armeringskontakt.

Figur 1 – Korrosjonstilstand til armeringen på nord- og sørsiden før installasjon av katodisk beskyttelse.

Det ble etablert tre prøvelfelt på hver av den nordlige og den sørlige siden av forankringspilaren. I prøvelfeltene på nordsiden av forankringspilaren ble all betong fjernet ved håndmeisling til 20–40 mm bak første armeringslag. På sørsiden av forankringspilaren ble det ikke fjernet betong, men betongoverflaten ble nøye sandblåst for å sikre god heft mellom KB-mørtlene og underlaget. For å studere effekten av overflatebehandling, ble det påført overflatebehandling på KB-mørtler på venstre side av alle prøvelfeltene mens den høyre siden ikke ble påført noen form for overflatebehandling.



Figur 2 - Oversikt prøvelfeltene sørside.



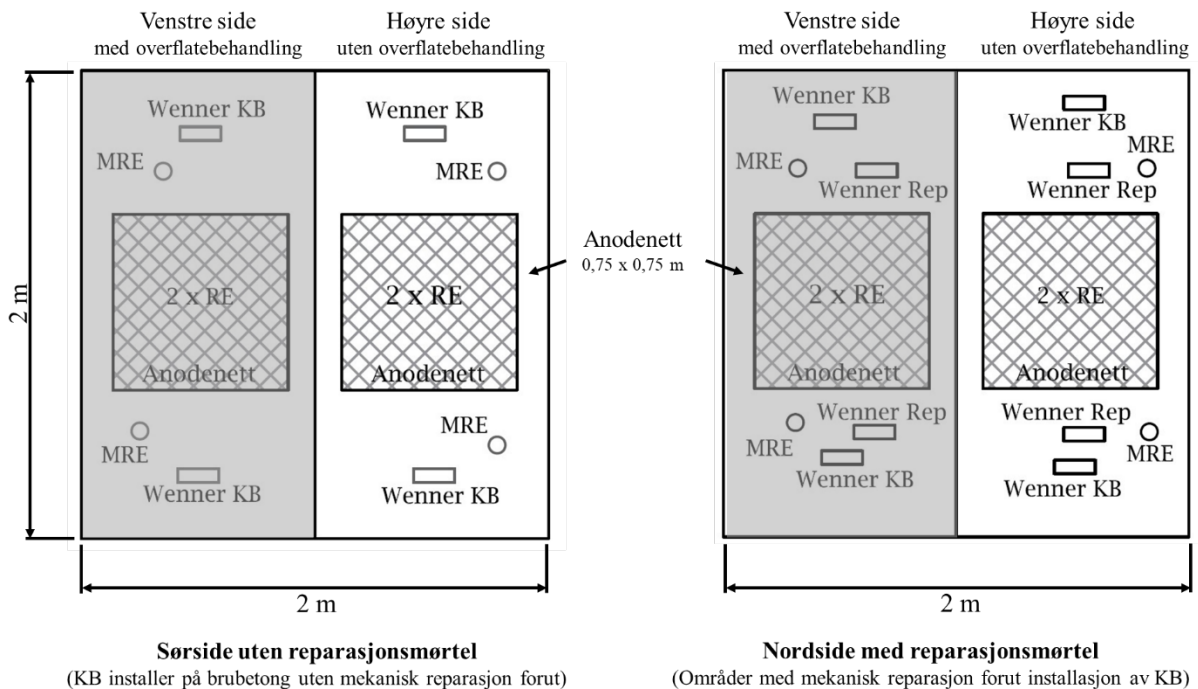
Figur 3 - Oversikt prøvelfeltene nordside.

For hvert prøvelfelt har det blitt brukt mørtler og overflatebehandling fra én og samme leverandør.

Det ble valgt tre norske leverandører som kunne tilby produkter som de mente egnet seg for installasjon av katodisk beskyttelse, dvs. både reparasjons- og KB-mørtler, samt overflatebehandling (slemmemasse). Leverandørene valgte selv hvilke av sine produkter som skulle benyttes. Produkt- og leverandørnavn er anonymisert i rapporten da resultatene ikke er ment brukt til markedsføring. I den videre rapporteringen er leverandørene benevnt med nummer 1–3, det samme er mørtel- og overflateproduktene (dvs. leverandør 1 har levert

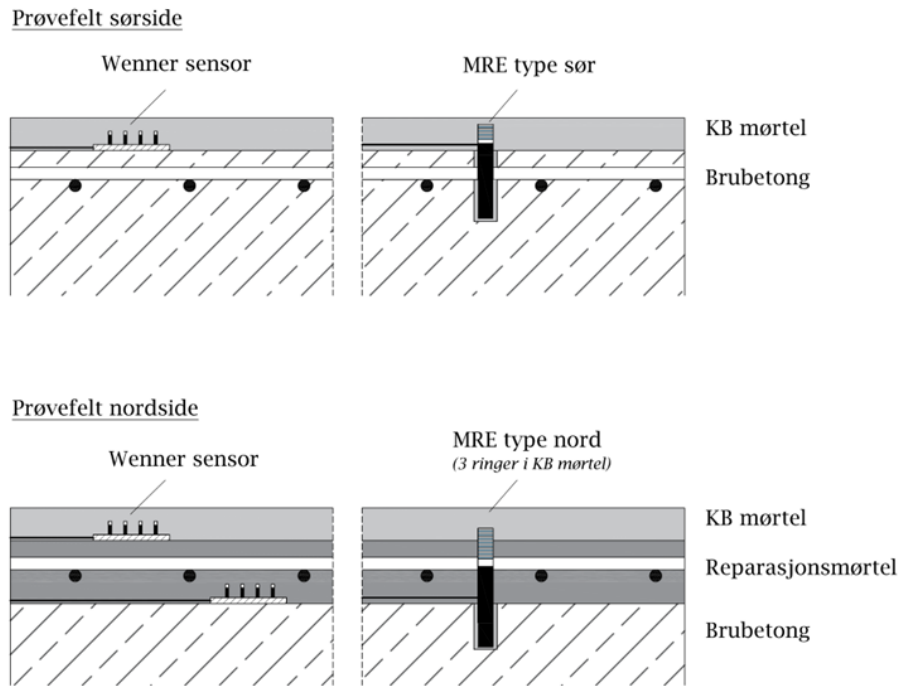
reparasjonsmørtel «Rep 1», KB-mørtel «KB 1», videre er produktene fra leverandør 1 brukt på prøvefelt Nord 1 og Sør 1 osv.). I Statens vegvesen rapport nr.671 er prøvefeltene beskrevet med bokstavnotering fra A-C, den noteringen ble pga. anonymisering ikke videreført i denne rapporten.

Oppbygging av prøvefeltene, med anodenett og ulike sensorer, er vist i Figur 4.



Figur 4 - Eksempel for instrumentering prøvefeltene på sør- og nordside av forankringspilaren på Tjeldsundbrua.

Hvert prøvefelt har dimensjoner 2 x 2 m², og avstanden mellom feltene er 0,25 m. Prøvefeltene er delt vertikalt i en venstre- og en høyreside, og med unntak av at venstresiden har blitt påført en overflatebehandling mens høyresiden ikke har blitt påført noen form for overflatebehandling, er begge sidene av prøvefeltene like med tanke på instrumentering og utførelse. Hvilke sensorer som inngår i prøvefeltene, er vist i Figur 4. «Wenner KB» og «Wenner Rep» står for Wenner-elektroder montert henholdsvis i KB- eller reparasjonsmørtel. MRE står for multiringelektrode. På nordsiden er MRE-elektrodene montert delvis i rep-mørtelen og delvis i KB-mørtelen, på sørsiden kun i KB-mørtelen. En prinsippskisse som viser plasseringen av MRE- og WEN-sensorene i de ulike mørtelsjiktene er vist i Figur 5.



Figur 5 – Plassering av WEN- og MRE-sensorer i ulike mørtelag.

En detaljert forklaring av sensorteknikken og mer detaljerte beskrivelser av monteringen av de ulike sensorene er gitt i Statens vegvesen rapport 671 (Hornbostel, et al. 2020). Hvert felt er instrumentert med sensorer som måler elektrisk motstand både på øvre og nedre del av feltet, dette for å ha to parallelle målinger pr type sensor, samt ha en sikkerhet i tilfelle noen av sensorene faller ut. Det er installert titannett ($0,75 \text{ m} \times 0,75 \text{ m} = 0,56 \text{ m}^2$) både på venstre og høyre side av hvert prøvefelt for etablering av katodisk beskyttelse. Hvert felt med katodisk beskyttelse (titannett) er utstyrt med 2 referanseelektroder (ERE 20) og 3 armeringskontakter (én til hver av referanseelektrodene og én for tilkobling av strøm til KB-feltet). Feltene kan styres separat for å studere strømleveranse til armeringen. Referanseelektrodene på nordsiden er montert i reparert området, med avstand ca. 20–30 mm fra armering. Mens de på sørsiden er montert i slisser i opprinnelig betong, nært armering, som ble gjenstøpt med KB-mørtel.

Samtidig med sprøyting av Rep- og KB-mørtler på prøvefeltene ble det sprøytet kasser for utboring av kjerner til prøving i laboratoriet. Det ble også tatt ut seks borekjerner av den opprinnelige brubetongen (tre fra hver av sør- og nordsiden) som ble sendt til laboratoriet for analyse. Prøveprogram og resultatene fra laboratorieprøvingen er oppsummert i Statens vegvesen rapport 851 (Helgestad, et al. 2023).

2.2 Beskrivelse datainnsamling

Det er installert totalt 84 sensorer på feltstasjonen. De fleste sensorene måler elektrisk motstand. Til dette er det brukt to type sensorer: Multiringelektroder (MRE) og Wenner-sensorer (WEN). I tillegg måles temperatur med Pt1000 sensorer som er en integrert del av enkelte MRE. Det måles også elektrokjemiske potensialer (med referanseelektroder av typen ERE20), strøm og spenning for KB-feltene.

I Tabell 1 gis en oversikt over sensorene som er installert per prøvefelt per side av forankringspilaren (se også Figur 4), samt antall og type målinger som gjøres kontinuerlig med sensorene.

Tabell 1 – Sensorer og målinger per prøvefelt, hhv. tre prøvefelt på sørside og nordside.

	Sørside		Nordside	
	Venstre side (med overflatebe.)	Høyre side (uten overflatebe.)	Venstre side (med overflatebe.)	Høyre side (uten overflatebe.)
Multiringelektroder	MRE 1 = 4 ringer MRE 2 = 4 ringer	MRE 3 = 4 ringer MRE 4 = 4 ringer	MRE 1 = 8 ringer MRE 2 = 8 ringer	MRE 3 = 8 ringer MRE 4 = 8 ringer
	2 motstandsmålinger per MRE		7 motstandsmålinger per MRE	
	Motstandsmålinger i KB-mørtel: Måling mellom ringene 1-3 (1. og 2. måling)		Motstandsmålinger i KB-mørtel: Måling mellom ringene 1-3 (1. og 2. måling) Overgangssone: Måling mellom ringene 3-5 (3. og 4. måling) Motstandsmålinger i Rep-mørtel: Måling mellom ringene 5-8 (5., 6. og 7. måling)	
Wennersensorer	WEN 1 WEN 2	WEN 3 WEN 4	WEN 1 WEN 2 WEN 5 WEN 6	WEN 3 WEN 4 WEN 7 WEN 8
	1 motstandsmåling per WEN		1 motstandsmåling per WEN	
	Motstandsmålinger i KB-mørtel Målinger av WEN ₁ – WEN ₄		Motstandsmålinger i Rep-mørtel: Målinger av WEN ₁ – WEN ₄ Motstandsmålinger i KB-mørtel: Målinger av WEN ₅ – WEN ₈	
Temperatur*		MRE 4 – Felt Sør 1 MRE 4 – Felt Sør 2		MRE 4 – Felt Nord 1 MRE 4 – Felt Nord 3
	1 temperaturmåling per MRE		1 temperaturmåling per MRE	
Potensial	RE₁ RE₂	RE₃ RE₄	RE₁ RE₂	RE₃ RE₄
	1 elektrokjemisk potensialmåling per RE		1 elektrokjemisk potensialmåling per RE	
Strøm og spenning	I-V U-V	I-H U-H	I-V U-V	I-H U-H
	1 strøm- og 1 spenningsmåling per I/U		1 strøm- og 1 spenningsmåling per I/U	

**temperatur måles kun på to av de tre feltene per side*

Data fra dataloggerne har blitt samlet inn kontinuerlig fra få uker etter etableringen av feltforsøket. Målingene startet i slutten av oktober 2019. Data logges hvert andre døgn. Det var noen mindre og et større avbrudd (våren 2020) i målingene på grunn av problemer med oppstart av logging etter en strømstans.

2.2.1 Automatiserte motstandsmålinger

Sensorene som er brukt i feltforsøket for å måle motstand (MRE og WEN) ble utviklet for innstøping i betong og har ikke tidligere vært testet i sprøytemørtel. Det var derfor forventet at noen av sensorene kunne svikte som følge av luftlommer dannet rundt sensoren eller mekaniske skader på sensoren påført under sprøytingen. Basert på målinger utført de første 3 årene er det foretatt en vurdering av funksjonaliteten av hver enkelt motstandssensor. Motstandssensorer som ikke gir verdier, viser veldige sprikende, negative og/eller høye måleverdier er helt eller delvis utelatt fra vurderingene. Vurdering av sensorene funksjonalitet er oppsummert i Tabell 2. I denne rapporten er det kun data fra sensorer merket med grønt i Tabell 2 som er tatt med i vurderingene.

Tabell 2 – Funksjonalitet av WEN- og MRE-sensorer (grønn = fungerer, gul = fungerer periodevis, rød = fungerer ikke).

		Sørside		Nordside	
		Venstre side (med overflatebe.)	Høyre side (uten overflatebe.)	Venstre side (med overflatebe.)	Høyre side (uten overflatebe.)
Produkttype 1	MRE	MRE ₁	MRE ₃	MRE ₁	MRE ₃
		MRE ₂	MRE ₄	MRE ₂	MRE ₄
	WEN			WEN ₁	WEN ₃
				WEN ₂	WEN ₄
		WEN ₁	WEN ₃	WEN ₅	WEN ₇
		WEN ₂	WEN ₄	WEN ₆	WEN ₈
Produkttype 2	MRE	MRE ₁	MRE ₃	MRE ₁	MRE ₃
		MRE ₂	MRE ₄	MRE ₂	MRE ₄
	WEN			WEN ₁	WEN ₃
				WEN ₂	WEN ₄
		WEN ₁	WEN ₃	WEN ₅	WEN ₇
		WEN ₂	WEN ₄	WEN ₆	WEN ₈
Produkttype 3	MRE	MRE ₁	MRE ₃	MRE ₁	MRE ₃
		MRE ₂	MRE ₄	MRE ₂	MRE ₄
	WEN			WEN ₁	WEN ₃
				WEN ₂	WEN ₄
		WEN ₁	WEN ₃	WEN ₅	WEN ₇
		WEN ₂	WEN ₄	WEN ₆	WEN ₈

Selv om et stort antall sensorer falt helt eller delvis ut fra måleprogrammet, så er det nok data tilgjengelig fra forsøket for å studere hver mørteltypes motstand som funksjon av aldring og naturlige fuktighets- og temperaturvariasjoner. I tillegg kan effekten av påført overflatebehandling på KB-mørtlenes motstandsutvikling studeres for noen av mørtlene.

2.2.2 Automatiserte temperaturmålinger

I tillegg til stålringene er det også installert en Pt1000 temperatursensor i noen av MRE-elektrodenes som kontinuerlig måler temperatur. Temperatur ble logget for to av tre feltene. Det ble logget på sørsiden for felt 1 og 2 og på nordsiden på felt 1 og 3. Alle målingene ble foretatt med MRE 4 i det respektive feltene. Logging skjer på samme tidspunkt som motstandsmålingene.

2.2.3 Manuelle motstandsmålinger

I juni 2020 og oktober 2021 ble det gjort manuelle motstandsmålinger for å skape et sammenligningsgrunnlag fra sensormålingene. Det ble målt motstand på mørteloverflater uten overflatebehandling (høyre side av hvert prøvefelt), i områder der det ikke var installert titannett eller sensorer. Målingene ble gjort med et Wenner-NDT-utstyr (type PROCEQ resipod). Målingen ble gjort med fuktige svamper iht. manualen til PROCEQ.

2.2.4 Automatiserte målinger katodisk beskyttelse

Før igangkjøring, ble det målt elektrokjemiske potensialer (frie potensialer) med alle referanseelektroder kontinuerlig i fra oktober 2019 og fram til juni 2020. Målingene av frie potensialer gir indikasjon på korrosjonstilstand til armeringen. Som beskrevet tidligere ble det observert korrosjon på armeringen både på nord- og sørside i forkant av mekanisk reparasjon og installasjon av katodisk beskyttelse (Figur 1). Det katodiske anlegget ble satt i drift i august 2020.

Det skal i denne rapporten ikke gis en detaljert beskrivelse av virkningsmåten av katodisk beskyttelse, det henvises til faglitteraturen for mer detaljerte informasjon som for eksempel (Lindland 2016) og (Bertolini, et al. 2013). Men noen prinsipper og parametere forklares i det etterfølgende.

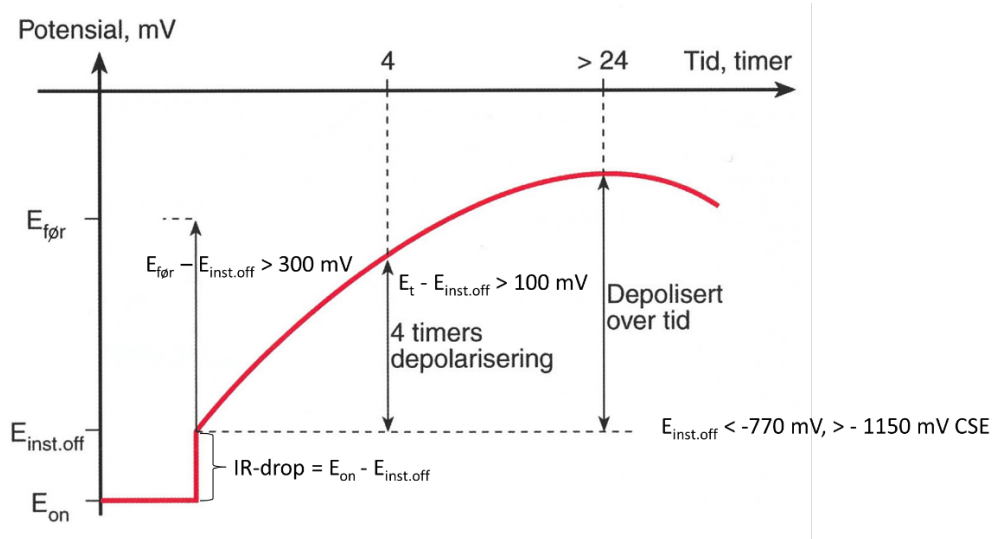
Følgende parametre ble målt eller beregnet i forsøket for å vurdere effekten/ytelse av katodisk beskyttelse i tillegg til strøm og spenning, se også Figur 6 for en skissert forklaring:

- $E_{\text{før}}$ (her også kalt «fri potensial» eller utgangspotensial): elektrokjemisk potensial til armering målt før strømmen tilkobles
- E_{on} : elektrokjemisk potensial til armering mens strømmen er tilkoblet (kretsen er lukket)
- $E_{\text{instant.off}}$: elektrokjemisk potensial til armering målt umiddelbart etter frakobling av strømmen
- E_{24} : elektrokjemisk potensial til armering målt 24 timer etter frakobling av strømmen
- $IR\text{-drop} = E_{\text{on}} - E_{\text{instant.off}}$
- DP (depolarisering etter 24 timer) = $E_{24} - E_{\text{instant.off}}$

Det mest brukte beskyttelseskriteriet for å vurdere ytelse av katodisk beskyttelse er 100 mV depolarisering i løpet av 24 timer. Andre kriterier kan være 300 mV potensialsenkning fra

utgangspotensialet $E_{\text{før}}$ eller potensialsenkning til $E_{\text{instant.off}} \leq -770$ mV CSE. Normalt kombineres beskyttelseskriteriet med et overbeskyttelseskriterium, primært for å unngå hydrogensprøhet på armeringen, for slakkarmering ofte satt til $E_{\text{instant.off}} > -1150$ mV CSE (-950 mV CSE for spennarmering).

For prøvefeltene våre ble beskyttelseskriteriet satt til: Depolarisering > 100 mV etter 24-timer (som i Statens vegvesens KB-anlegg er spesifisert å gjelde i sommermånedene).



Figur 6 – Illustrasjon av beskyttelseskriterier, basert på figur fra (Lindland 2016).

Hvert anodefelt kan i utgangspunktet styres separat, men den høyre og venstre siden av prøvefeltene har fram til nå blitt styrt likt. KB-innstillingene for de forskjellige prøvefeltene ble periodisk endret for å se på effekten av ulike spenningsnivå/strømstyrker. I Tabell 3 er innstillingene for prøvefeltene over de første tre årene oppsummert. I løpet av de første månedene ble spenningen gradvis økt fra 0,5 V til 1,5 V, likt for alle prøvefeltene. Deretter fulgte en lengre periode der prøvefeltene ble strømstyrt med en konstant strømstyrke på 5 mA. Deretter følger en lang periode da det ble innstilt en individuell spenning per prøvefelt. Formålet var i løpet av de første månedene å bestemme en «optimal driftsspenning». Spenning skulle være akkurat høy nok til at 100 mV depolarisering etter 24 timer ble oppnådd så korrekt som mulig for hvert prøvefelt. Høsten 2021 var denne spenningen bestemt på alle prøvefeltene, og feltene ble deretter driftet på en individuell, konstant spenning benevnt som U_{optimal} over en periode på mer enn ett år. I desember 2022 ble alle prøvefeltene igjen satt på en driftsspenning på 1,5 V.

I denne rapporten er kun perioden før katodisk beskyttelse ble startet opp og perioden med potensialstyring på U_{optimal} og 1,5 V i slutten av treårsperioden, presentert og diskutert.

Tabell 3 – Påtrykt spenning/strøm på KB prøvefeltene.

Ingen KB	/	oktober 2019 – august 2020
Spenningsstyrt*	0,5 V – alle felt	august – september 2020
Spenningsstyrt*	0,8 V* – alle felt	september – oktober 2020

Spenningsstyrt*	1,5 V – alle felt	oktober – november 2020
Strømstyrt*	5 mA** – alle felt	november 2020 – mars 2021
Potensial-/spenningsstyrt*	Individuell styring i hvert felt	mars 2021 – september 2021
Potensial-/spenningsstyrt	Individuell styring med U_{optimal}	september 2021 – desember 2022
Spenningsstyrt	1,5 V – alle felt	desember 2022 – status
* Data ikke presentert i rapporten		

Det ble målt potensial for alle referanseelektrodekontinuerlig over hele prøvingsperioden. Det ble også målt spenning (U) og strømstyrke (I) kontinuerlig over prøvingsperioden. Depolariseringsmålinger ble utført omtrent hver måned. Alle referanseelektroder og dataloggere har fungert etter hensikten. Strømmålingene på felt Sør 2, fungerte bra første perioden, men sviktet etter hvert. Det skyldes mest sannsynlig en feil med selve strømmålingen, det er ingen mistanke om at strømforsyningen ikke fungerte, ettersom feltet polariseres normalt. Som for motstandsmålingene var det et lengre avbrekk i målingene våren 2020 (perioden da det ikke var påsatt spenning) pga. feil med dataloggeranlegget.

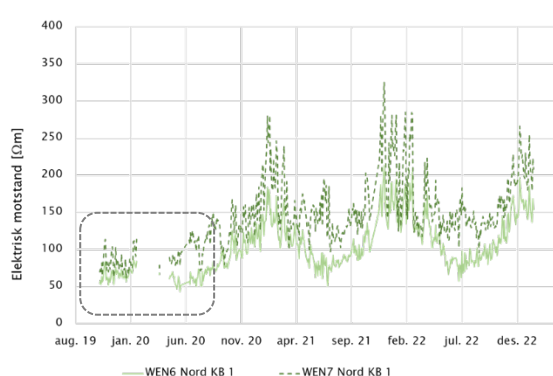
3 Resultater

3.1 Automatiserte motstandsmålinger av reparasjons- og KB-mørtler

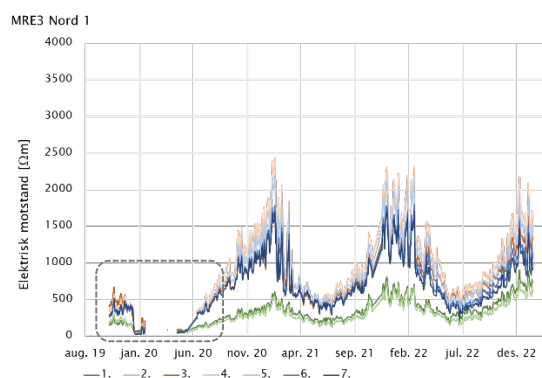
I vedlegg A er det vist loggdata for de forskjellige mørtelproduktene fra prøvefeltene på sør- og nordside for både WEN- og MRE-sensorene. Det vises kun resultater fra sensorer som på forhånd ble vurdert å fungere over hele måleperioden, dvs sensorer merket grønt i Tabell 2.

Eksempler på resultater, fra prøvefelt Nord 1, er vist i Figur 7. Det vises målinger over tid (Figur 7 (a) og (b)) og motstandsmålinger i forhold til temperatur (Figur 7 (c) og (d)). Det er valgt disse to måtene å vise data på, ettersom elektrisk motstand i stor grad er avhengig av temperatur. Resultater fra målinger i KB-mørtel er generelt vist med grønn, mens målinger i reparasjonsmørtler er vist i blå. Målinger for alle WEN-sensorer er vist i samme figur (se Figur 7 (a)). Resultatene for målinger med MRE-sensorene er vist for hver enkel sensor i separate figurer (se Figur 7 (b), her for sensor MRE 3). Med MRE-sensorene utføres det målinger mellom tilgrensede ringer i forskjellige dybder. 1. og 2. måling (mellom ring 1–2 (1.måling) og ring 2 og 3 (2. måling)) er utført i KB-mørtel (grønn). Så følger 3. måling (mellom ring 3 og 4) og 4. måling (mellom ring 4 og 5) som er tatt i overgangssonen mellom KB- og reparasjonsmørtelen (oransje), disse målinger er ikke kommentert videre i rapporten. Mens 5. til 7. måling (blå, henholdsvis mellom ring 5 og 6, 6 og 7, og 7 og 8) presenterer målinger i reparasjonsmørtler. Det er påfallende at det er noen data som faller utafør den generelle trenden (merket i stiplet område i Figur 7). Dette er målinger tatt i hovedsak gjennom det første året etter etablering (mens mørtlene er under modning), dette er kommentert og diskutert i seinere avsnitt.

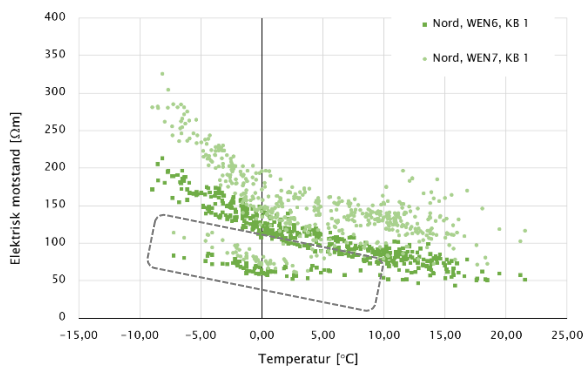
Dessverre mangler det en måleperiode i vår 2020, og det er noe usikkert hvordan motstandsutviklingen var i denne perioden. Ikke desto mindre kan det sees for alle produktene at motstanden ligger forholdsvis lavt i begynnelsen av prøveperioden rett etter utsprøyting (vinter 2019 – 2020, merket som stiplede områder i Figur 7). I løpet av 2020 øker motstanden kontinuerlig og er høsten/vinter 2020 – 2021 høyere enn på samme tidspunkt året før. Etter sommer/høst 2020 er det tilsynelatende ingen aldringseffekt på motstanden, men den svinger betydelig med årstidene (temperatur).



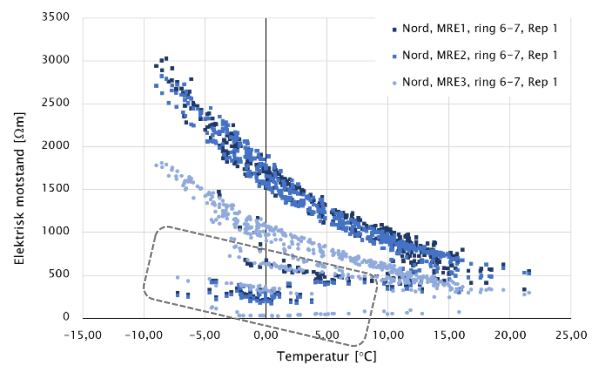
(a) Elektrisk motstand over tid målt med forskjellige WEN-sensorer.



(b) Elektrisk motstand over tid målt med en MRE-sensor. 1. og 2. måling i KB mørtel, 5.–7. måling i reparasjonsmørtel.



(c) Elektrisk motstand i avhenging av temperatur for hele prøvingsperioden målt med WEN-sensor.



(d) Elektrisk motstand i avhenging av temperatur for hele prøvingsperioden målt med MRE-sensor.

Figur 7 – Eksempel for resultater for motstands målinger prøvefelt Nord 1. Stiplede området er målinger tatt i det første året etter etablering.

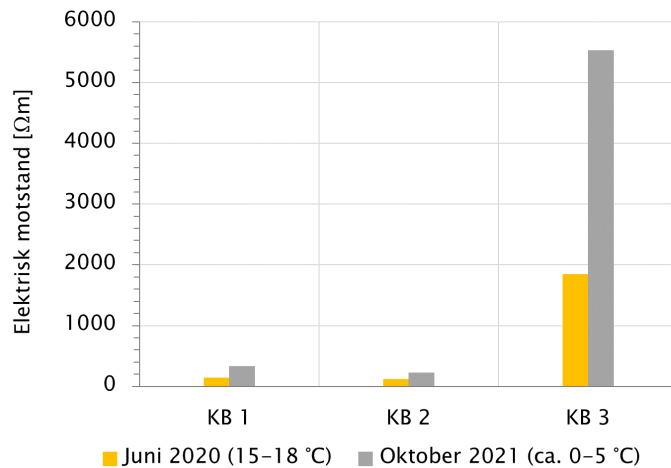
3.2 Manuelle motstandsmålinger av KB-mørtler

Det ble målt motstand med et håndholdt Wenner-utstyr (type PROCEQ resipod) på overflaten av sprøytemørtelen der det ikke var påført overflatebehandling. Målingene ble utført på tørr overflate og med fuktige svamper. Resultatene antas å representere motstanden til KB-mørtelen.

Tabell 4 – Manuelle målinger med Wenner-utstyr på overflaten av KB-mørtelen uten overflatebehandling (høyre side).

Mørteltype, Motstand i Ωm		Sørside			Nordside			Middel
		OPP	NED	Middel	OPP	NED	Middel	
KB 1	Juni 2020 (15–18 °C)	130	130	130	160	160	160	145
	Oktober 2021 (ca. 0–5 °C)	/	210	210	/	450	450	330
KB 2	Juni 2020 (15–18 °C)	110	110	110	120	130	125	118
	Oktober 2021 (ca. 0–5 °C)	/	190	190	/	270	270	230
KB 3	Juni 2020 (15–18 °C)	1710	1980	1845	2170	1520	1845	1845
	Oktober 2021 (ca. 0–5 °C)	7170	1800	4485	7990	5170	6580	5533

Resultatene er vist i Tabell 4. «Opp» betegner målinger som er tatt over titannettet. «Ned» betegner målinger som er tatt på nedre del av prøvefeltene, under titannettet. Målingene ble tatt henholdsvis i juni 2020 (ca. 10 måneder etter sprøyting) og oktober 2021. Middeler verdier av alle målinger utført per mørteltype, per måletidspunkt, er også gitt i Figur 8.



Figur 8 – Spesifikk elektrisk motstand av KB-mørtler, målt manuelt med Wenner-utstyr på overflaten i juni 2020 og oktober 2021 – middelverdier av målinger per mørteltype per måletidspunkt. Lufttemperaturen ved måling er angitt.

3.3 Katodiske anlegg

3.3.1 Potensialmålinger før påbegynt katodisk beskyttelse

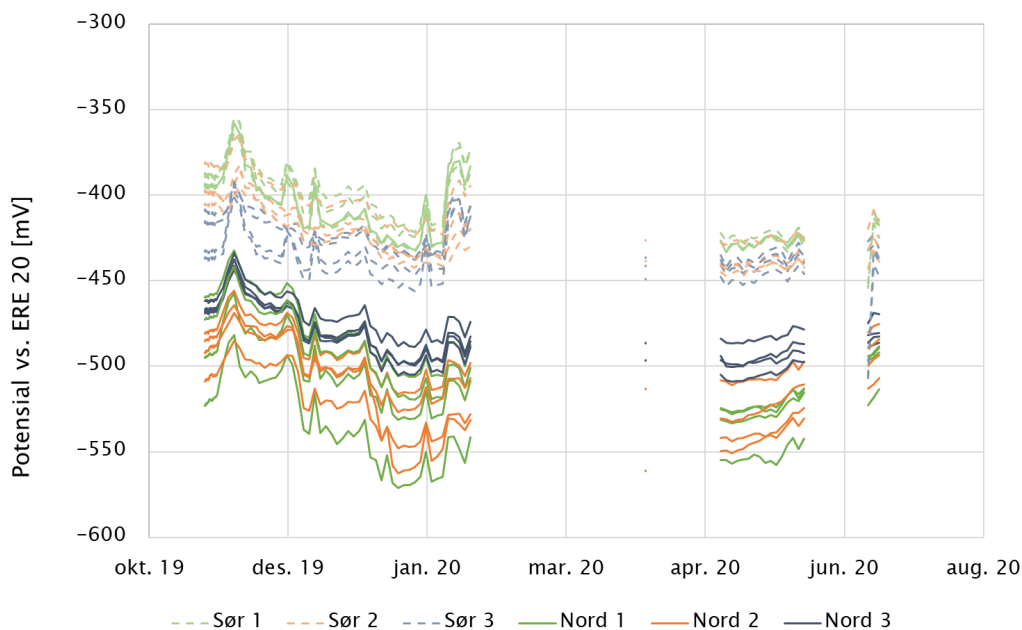
I Figur 9 vises potensialmålingene med alle referanseelektrodeene før katodisk beskyttelse ble slått på. I figuren er ikke de spesifikke referanseelektrodeene i feltene navngitt, allikevel vises verdier for alle fire referanseelektrodeene per prøvefelt for å synliggjøre spredning av verdier per prøvefelt.

Målingene viser stabile, negative potensialer:

- på sørsiden ca. -350 til -450 mV vs. ERE 20, noe som tilsvarer ca. -180 til -280 mV mot SCE (-254 til -354 mV mot CSE)
- på nordsiden ca. -450 til -550 mV vs. ERE 20, noe som tilsvarer ca. -280 til -380 mV mot SCE (-354 til -454 mV mot CSE)

Potensialene tilsvarer en middels til høy korrosjonssannsynlighet¹ (ASTM 2022). Prøvefeltene på nordsiden viser lavere potensialer enn feltene på sørsiden, dette til tross for at referanseelektrodeene på nordsiden ligger i områder som ble (forenklet) mekanisk reparert. Dette viser at den begrensede mekaniske reparasjonen som ble foretatt ikke har klart å stoppe aktiv korrosjon.

¹ ASTM C876, potensialer mellom -128 til -278 mV vs. SCE tilsvarer middels korrosjonssannsynlighet, potensialer lavere enn -278 mV vs. SCE tilsvarer høy korrosjonssannsynlighet



Figur 9 – Elektrokjemisk potensial av armering på sør- og nordside før katodisk beskyttelse ble påsatt, men etter reparasjon (på nordsiden) og installasjon av KB-anlegget.

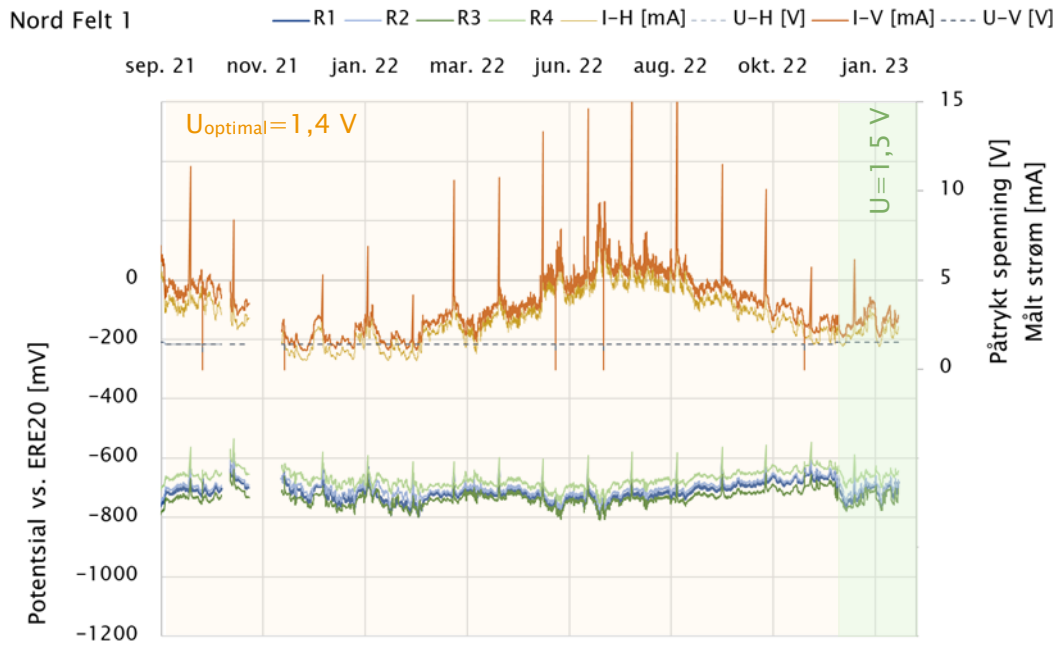
3.3.2 Driftsdata katodisk beskyttelse

KB-anleggene ble igangsatt i august 2020, hvoretter det ble styrt ved konstant spenning (ulike nivåer fra 0,5–1,5 V) fram til november 2020 og konstant strøm fram til mars 2021, før det ble innført individuell styring for å oppnå 100 mV depolarisering etter 24 timer. I vedlegg B presenteres utvalgte driftsdata for KB-prøvefeltene, nærmere bestemt data fra september 2021, hvor anleggene ble styrt som følger (se avsnitt 2.2.4):

- September 2021 – desember 2022: Periode med individuell styring av hvert prøvefelt på det som betegnes som «optimal driftsspenning» (U_{optimal})
- Desember 2022 – februar 2023: Periode da alle prøvefeltene ble spenningsstyrt med en konstant spenning på 1,5 V.

For hvert prøvefelt er driftsspenning, resulterende strømstyrke og on-potensialer presentert i én figur og depolariseringsdata i en annen figur, se eksempler for prøvefelt Nord 1 i Figur 10.

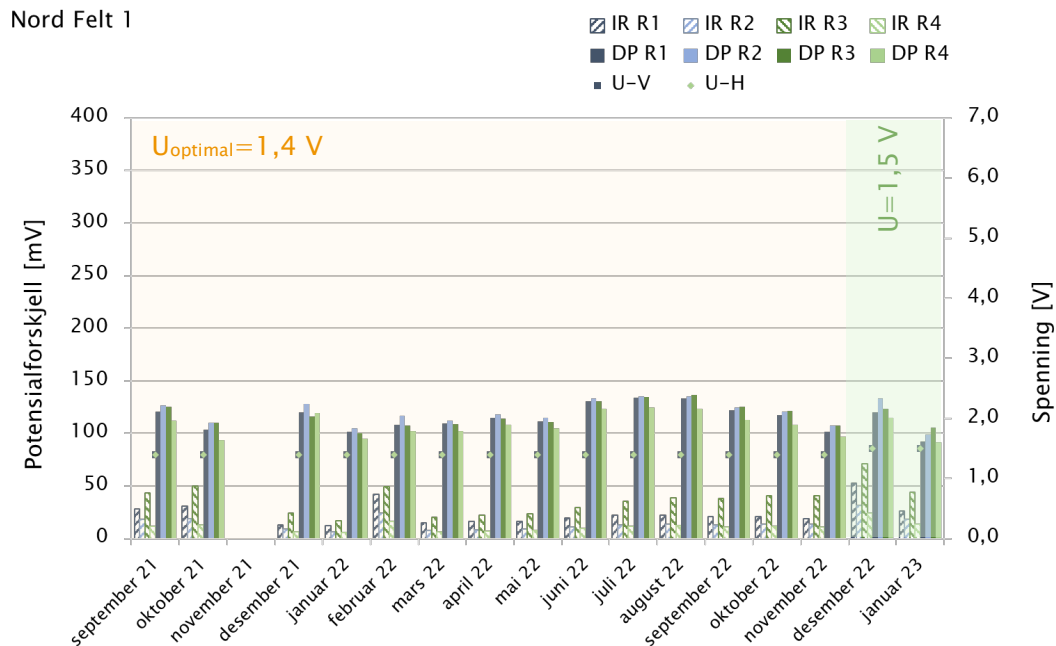
Det ble tilstrebet å oppfylle en 24-timers depolarisering på 100 mV så nøyaktig som mulig under perioden med styring etter U_{optimal} . Likevel er depolariseringen både avhengig av årstid (temperatur) og plassering av referanseelektroden. Kravet ble like fullt oppfylt for alle prøvefeltene, bortsett fra prøvefelt Nord 2, som selv med 6 V driftsspenning ikke klarte å polarisere armeringen nok til å skape en depolarisering av 100 mV (bortsett fra for referanseelektrode R1).



(a) Driftsdata.

Øverst, med vertikal akse til høyre, vises påtrykt spenning (grå stiplet linje) og resulterende strømtilførsel (oransje/gule linjer).

Nederst, med vertikal akse til venstre, vises on-potensialer målt på fire ulike referanseelektroder (grønne/blå linjer).



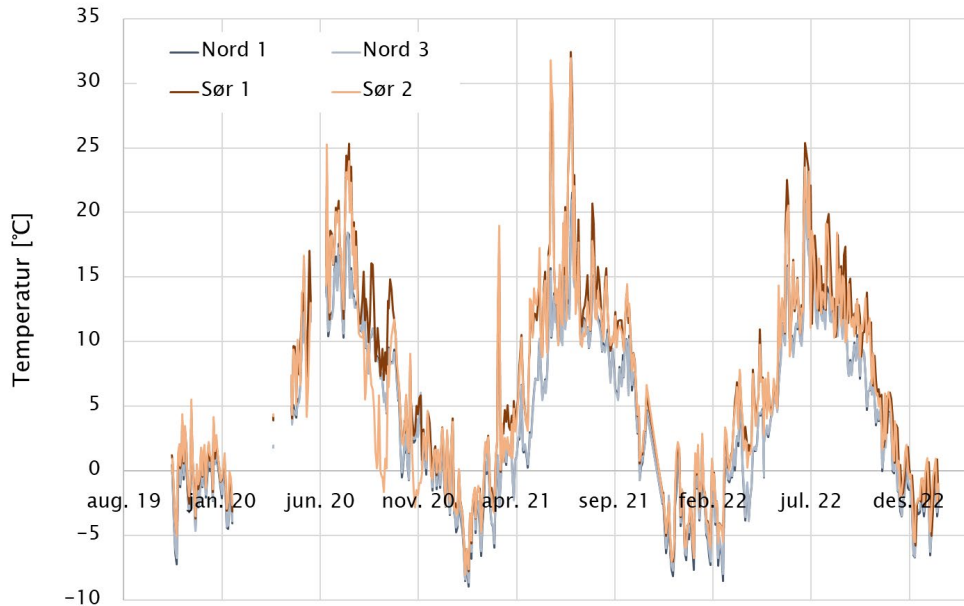
(b) Depolariseringsresultater.

Fylte stolper viser depolariseringsverdier etter 24 timer (fire ulike referanseelektroder) og skraverte stolper viser tilhørende IR-drop. Driftspenningen er angitt i figuren som målepunkt med tilhørende akse på høyre side.

Figur 10 – Eksempel for driftsresultater for katodisk beskyttelse for prøvelfelt Nord 1.

3.4 Temperaturer målt i mørtlene

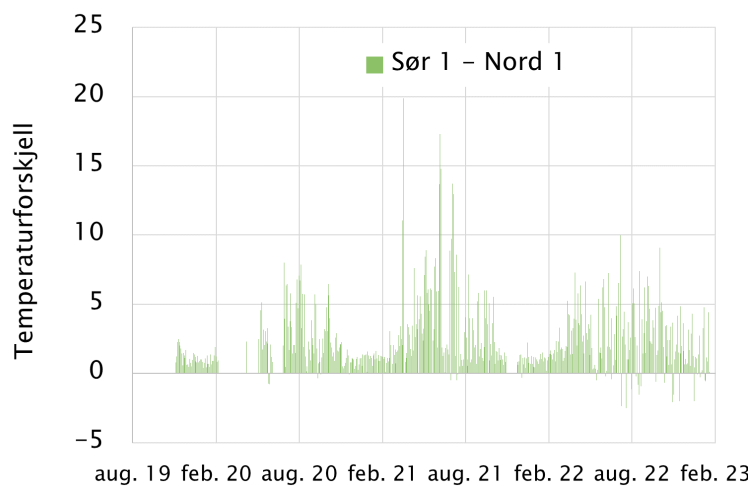
Temperatur i mørtelen ble kontinuerlig målt i prøveperioden. Det ble målt temperatur i to av prøvefeltene på hver av sør- og nordsiden (Figur 11).



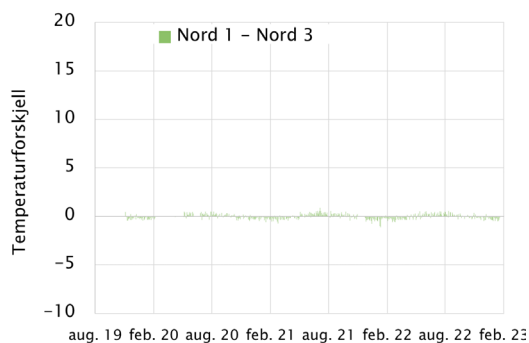
Figur 11 – Temperaturmålinger med MRE-sensorene over hele prøvingsperioden.

En sammenligning mellom temperaturene på nord- og sørsiden viser at temperaturen oftest ligger høyere på sørsiden enn på nordsiden (Figur 12 (a)). Spesielt om sommeren kan forskjellen være så stor som 5–15 °C, noe som kan forklares med direkte og indirekte solinnstråling. Det er veldig liten forskjell i temperatur mellom prøvefeltene på nordsiden (Figur 12 (b)). På sørsiden er det imidlertid større forskjeller mellom prøvefeltene, her kan temperaturforskjellen være så stor som 5–10 °C for enkelte målinger, også dette kan mest sannsynlig forklares med solinnstråling.

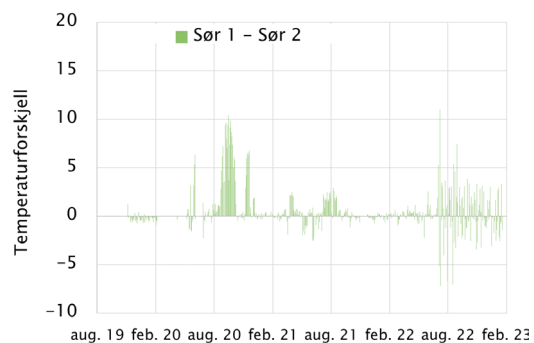
Ved senere sammenstillinger av spesifikk elektrisk motstand og depolarisasjonsverdier mot temperatur, samt ved omregning av mørtlenes motstand til gitt temperatur, er det benyttet temperaturmålingene for det respektive feltet der det var mulig (altså for Nord 1 og Nord 3 og Sør 1 og Sør 2). For feltene Nord 2 og Sør 3, hvor det ikke ble tatt temperaturmålinger, ble det benyttet målinger fra nærmeste nabofeltet.



(a) Temperaturforskjell mellom sør- og nordside for prøvefeltene 1.



(b) Temperaturforskjell mellom felt Nord 1 og 3.



(c) Temperaturforskjell mellom felt Sør 1 og 2.

Figur 12 – Temperaturforskjell mellom a) sør- og nordside av prøvefelt 1, b) prøvefelt 1 og 3 på nordsiden og c) prøvefelt 1 og 2 på sørsiden.

4 Diskusjon

4.1 Elektrisk motstand av sprøytemørtler for bruk i katodisk beskyttelse

Hovedformålet med undersøkelsen er å se på prøvingsmetoder og hensiktsmessige grenseverdier for elektrisk motstand av mørtler brukt i katodiske anlegg, se også avsnitt 1.2. I de etterfølgende avsnitt er følgende temaer diskutert:

- I. Sammenhengen mellom ulike målemetoder for elektrisk motstand i felt ved bruk av manuelt måleutstyr og innstøpte sensorer for automatisk logging
- II. Reparasjons- og KB-mørtlers spesifikke elektriske motstand i felt, over tid, i avhengighet av temperatur, eksponeringsbetingelser og overflatebehandling
- III. Sammenhengen mellom langtids feltmålinger og laboratoriemålinger av mørtlers spesifikke elektrisk motstand

Fra litteraturen (Polder 2001) er det kjent at det generelt blir observert en betydelig spredning i resistivitetmålinger av betong. Selv for målinger i laboratoriet med den ansett mest pålitelige målemetode (2-elektrode metode), på prøvestykker støpt fra samme blanding og eksponert for samme miljø, må det forventes en variasjonskoeffisient på 10 – 20 %. I felt er en variasjonskoeffisient på 30 % å anse som normal. For betong hvor det forventes en spesiell høy elektrisk motstand ($> 1\ 000\ \Omega\text{m}$) må det forventes en enda større usikkerhet i målingene. Den generelle spredningen av resistivitetmålinger må tas i betraktning når resultatene evalueres.

Det må også bemerkes at det ved sprøyting av reparasjonsmørtlene i felt var problemer med sprøyteutstyret (Helgestad, et al. 2023), hvilket kan ha ført til inhomogeniteter i reparasjonsmørtlene. Dette er kommentert og må tas hensyn til i evalueringen av resultatene.

4.1.1 Motstandsmålinger av sprøytemørtel i felt, sammenligning av målemetoder

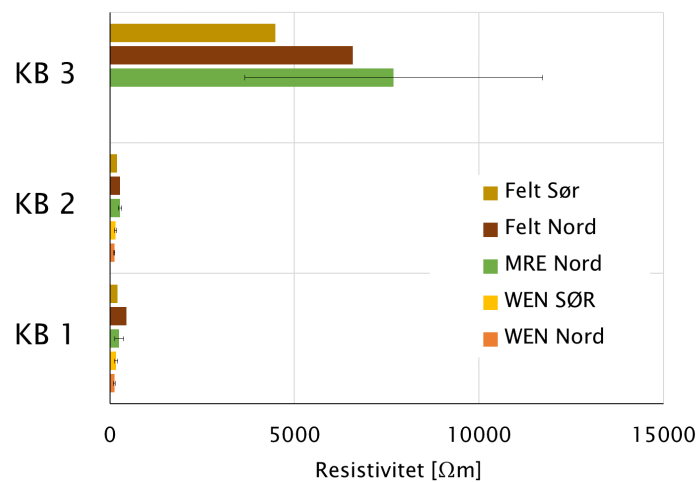
I dette avsnittet skal de tre metodene brukt i forsøket for å måle motstand av sprøytemørtel i felt diskuteres og evalueres. Dette gjelder målinger utført:

- Automatisert med WEN (Wenner) – sensorer
- Automatisert med MRE (Multiringelektrode) – sensorer
- Manuelt i felt (4-elektrode Wenner)

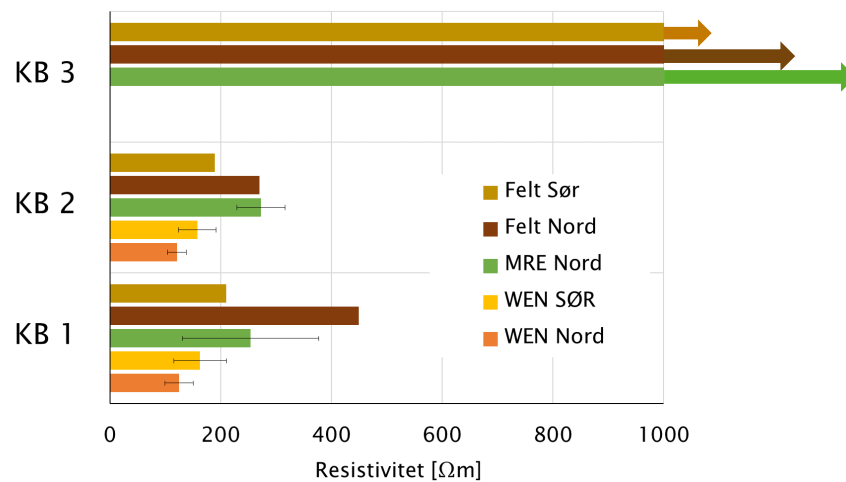
En evaluering av metodene er basert på måledata fra KB-mørtlene fra begge sider (Sør og Nord). Dette delvis på grunn av at den manuelle metoden bare kunne benyttes på KB-mørtlene (øverste mørtellaget fra overflaten) og delvis fordi KB-mørtler hadde mest datagrunnlag. Det er en stor forskjell i datamengdene mellom de manuelle og de automatiserte målingene. I tillegg er de automatiserte målingene tatt ved forskjellige temperaturer (og fuktinnhold), og i forskjellige alder, noe som påvirker den elektriske motstanden.

Det ble tatt utgangspunkt i de manuelle feltmålingene fra oktober 2021 (Tabell 4). Mørtlene var på dette tidspunkt ca. 2 år gamle, målingene ble gjort ved ca. 0 °C (lufttemperatur). Ikke desto mindre var det delvis solskinn direkte på de sørlige prøvefeltene på dagen målingene ble tatt, og det kan derfor ikke utelukkes at mørteltemperaturen var noe høyere på sørsiden. For de automatiserte feltmålingene ble det beregnet et gjennomsnitt av alle motstandsmålinger logget ved temperaturer mellom +1 til -1 °C, fra mørtlene var 1 år gamle fram til januar 2023 (1-3 års resultater). I sammenligningen er det angitt gjennomsnittsverdier og standardavvik for sensormålingene.

Resultatene fra de forskjellige målemetodene er sammenstilt i Figur 13. Ettersom det er en store forskjeller i elektrisk motstand mellom mørtlene, er det vist detaljer for KB1 og KB 2 i Figur 14.



Figur 13 – Resistivitet for alle KB-mørtler under prøving bestemt med forskjellige målemetoder, for temperatur 0 °C. Måledata for motstandssensorer MRE og WEN er vist som gjennomsnitt måledata mellom -1 og 1 °C for perioden 1 – 3 år. Manuelle motstandsmålinger fra felt er tatt 2 år etter eksponering (oktober 2021, ved ca. 0 °C med Wenner probe NDT-utstyr).



Figur 14 – Detaljert framstilling av Figur 13 (KB 1 og KB 2), med varierende x-akser.

Det er kun for produktene KB 1 og KB 2 (nordside) mulig å sammenligne målingene med WEN- og MRE-sensorene (Figur 14, grønne og oransje stolper). Fra resultatene kan det sees at WEN-sensorene måler lavere motstand enn MRE-sensorene for begge produktene. Det er allikevel for lite datagrunnlag til å gjøre en vurdering om de to typene sensorer måler generelt forskjellig, og om WEN-sensorene konsekvent måler lavere motstandsverdier enn MRE-sensoren.

En sammenligning mellom de automatiserte målingene med WEN-sensorer og de manuelle feltmålingene viser en god overenstemmelse på sørsiden for KB 1 og KB 2 (lys brune og gule stolper i Figur 14), WEN-verdiene marginalt lavere. For nordsiden er derimot WEN-verdiene betydelig lavere enn verdiene målt med manuellmåleutsyr (oransjee og brune stolper i Figur 14). Målinger med MRE-sensorene kan sammenlignes med manuelle feltmålinger på nordsiden for alle tre KB-mørtler (grønne og brune stolper i Figur 13 og Figur 14). Her er det ingen klar trend, i og med at forskjellene går i begge retninger.

Generelt kan det observeres at alle metodene rangerer de ulike KB-mørtelproduktene likt. De absolutte verdiene avviker imidlertid noe. Dette er naturlig ettersom måleprinsippene er veldig forskjellig (f.eks. måling på svært små mørtelvolum kontra større volum). Det er også usikkerheter knyttet til fuktinnholdet i felt, mulige overflateeffekter for sensorer plassert nær overflata og mulige avvik mellom faktisk temperatur og målt temperatur i felt. I tillegg er det store forskjeller i datamengder mellom de automatiserte og manuelle metodene.

Dersom en ønsker å studere effekten av parametere som overflatebehandling, temperatur, KB-ytelse osv., bør man sammenligne motstandsverdier som er gjort med samme type målemetode.

4.1.2 Utvikling av elektrisk motstand i felt avhengig av mørtelalder, temperatur, eksponering og overflatebehandling

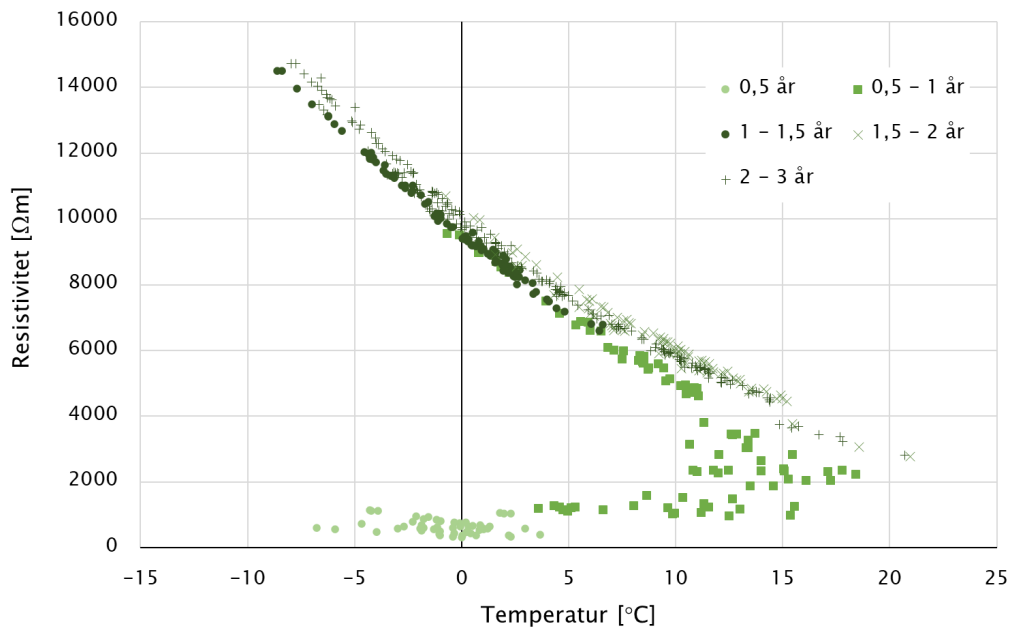
Utvikling over tid

I laboratorieprøvingen av mørtelproduktene viste det seg at alle produktene hadde en utvikling i elektrisk motstand over flere måneder (Statens vegvesen rapport nr. 851), utviklingen var relativt stabil etter ca. 90 døgn. Også i felt må vi forvente en utvikling i de elektriske egenskapene over tid, endatil over noe lengre tid enn i laboratoriet pga. lavere gjennomsnittstemperatur og mer langsom modning. Analyser av utviklingen i felt er derimot ikke like enkelt som i laboratoriet, da elektrisk motstand i tillegg til modning også blir påvirket av temperatur og fuktinnhold. For å skille disse effektene fra hverandre blir motstandsverdiene plottet mot temperatur, se tidligere eksempler i Figur 7 og etterfølgende Figur 15 (figurene for andre mørtelprodukter er vist i vedlegg A). I Figur 15 er det vist måldata for mørtel KB 3. Det er differensiert mellom forskjellige tidsperioder etter sprøyting.

For en velherdet (modnet) betong med samme fuktinnhold vil det være en gitt sammenheng mellom temperatur og motstand. Den kan som regel beskrives med «Arrhenius ligning» (se

neste avsnitt). Fra feltmålingen ser vi at det etablerer seg en bestemt sammenheng mellom motstand og temperatur ca. 1 år etter sprøyting (Figur 15), hvor motstanden systematisk øker ved synkende temperatur. Før denne perioden ser vi et tydelig avvik fra den seinere etablerte sammenhengen.

I laboratorieprøvingen flater utviklingen av mørtelmotstand ut etter ca. 90 døgn (3 måneder), mens i felt foregår utviklingen av mørtelmotstand over ett år. I vårt forsøk ble mørtelen sprøytet på høsten, dermed var det først en kald periode før det kom en varmere periode. Det er sannsynlig at mørtelegenskapene ville ha utviklet seg forttere om det kom en varm periode direkte etter sprøytingen.



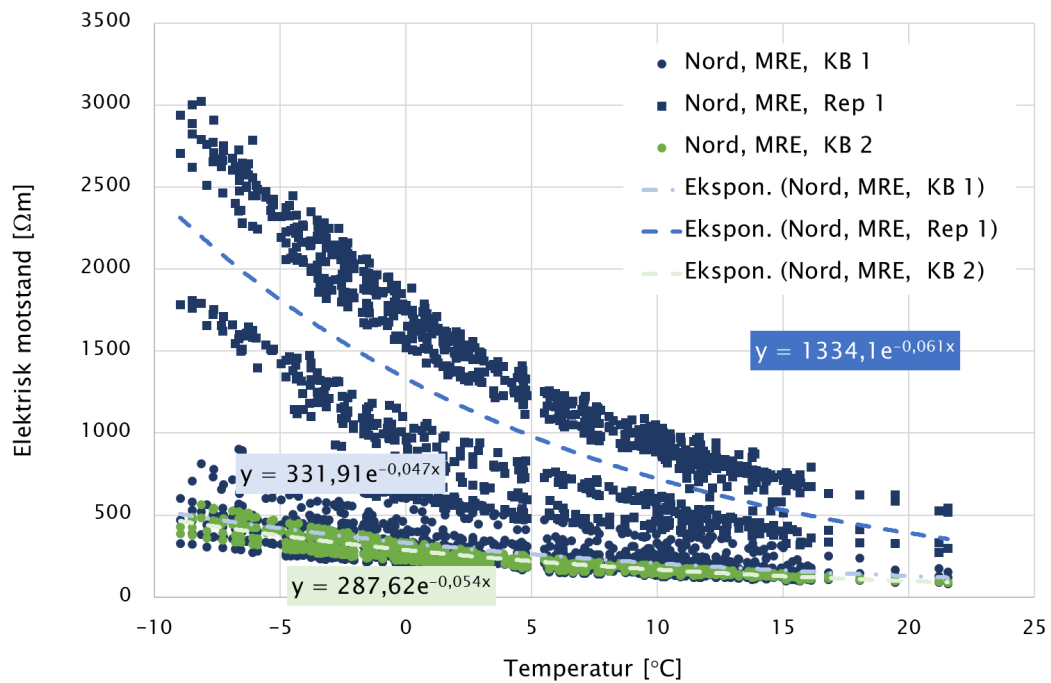
Figur 15 - Mørtel KB 3, nordside, MRE 1, ring 1-2.

Effekt av temperatur

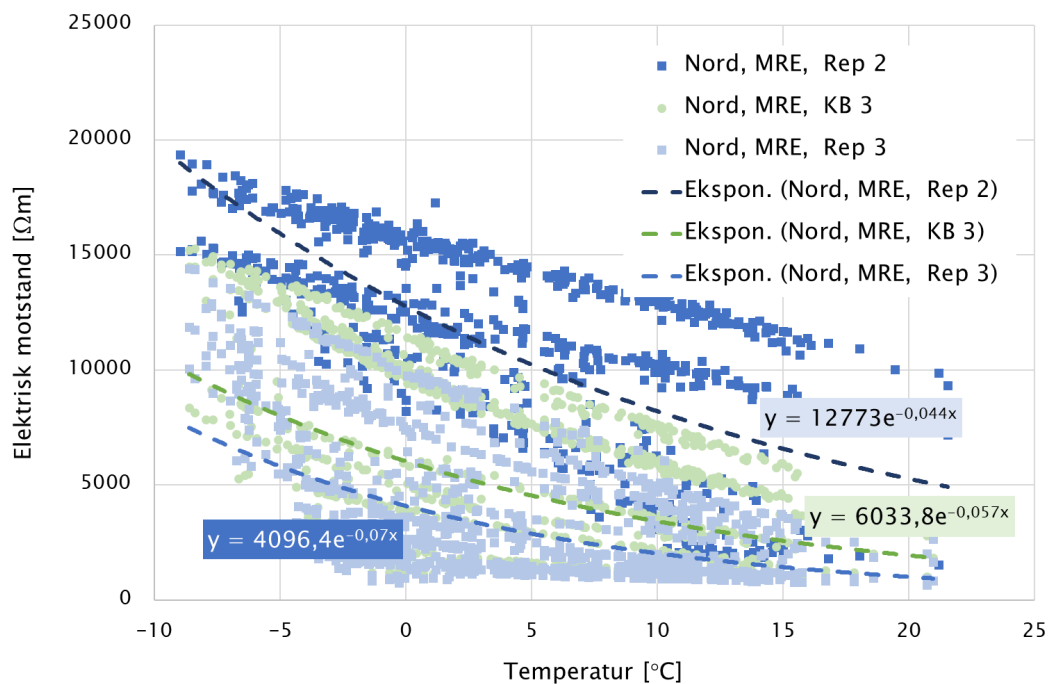
Fra studier av betong er det, som nevnt over, vel kjent at betongens elektriske motstand varierer med temperaturen. I dette avsnittet skal denne sammenhengen for hver enkelt mørtel beskrives og eventuelle forskjeller mellom mørtlene diskuteres. For dette blir det brukt data fra MRE-sensorene fra nordsiden av feltforsøket, ettersom nordsiden er mindre påvirket av solskinn. Dette vil gi en større robusthet i målingene. Det ble brukt data fra ett til tre år etter sprøyting, dette for å unngå data fra perioden da mørtelegenskapene fortsatt var under utvikling. Data fra forskjellige MRE-sensorer i samme mørtel ble ansett som ett datasett, selv om det registreres til dels store forskjeller mellom parallelle MRE-sensorer. Det er også for enkelte mørtler ekstremt stor spredning i resultatene, se f.eks. Rep 3 i Figur 17. For alle datasett ble det like fullt bestemt en trendlinje. Som trendlinje ble det valgt en naturlig eksponential funksjon (iht. litteraturen er Arrhenius ligning, som er en naturlig eksponential funksjon, den beste funksjonen til å beskrive avhengigheten av temperatur og elektrisk motstand).

$$y = b \cdot e^{a \cdot x} \tag{1}$$

I Figur 16 og Figur 17 er datasettene og trendlinjene vist. Det ble brukt to forskjellige skalaer for y-aksen for å kunne vise data, ettersom forskjellene mellom mørtlene er såpass store.



Figur 16 – Sammenheng mellom temperatur og elektrisk motstand, data fra MRE-sensorer, nordside, data for KB 1, Rep 1 og KB 2 (målt med flere sensorer pr mørteltype).



Figur 17 – Sammenheng mellom temperatur og elektrisk motstand, data fra MRE-sensorer, nordside, data for Rep 2, KB 3 og Rep 3.

Data fra trendlinjene er sammenstilt i Tabell 5. Fra sammenstillingen ser vi at konstanten «b» er forskjellig for alle mørtelproduktene og viser motstandsverdien ved 0 °C (etter $e^{a \times 0} = 1$). Basistallet «a» beskriver stigning av temperatur-motstandsrelasjonen. Det er for alle produktene forholdsvis likt mellom -0,047 og -0,070. Det betyr at relasjonen mellom temperatur og spesifikk elektrisk motstand er relativt likt for alle produktene uansett størrelsen på motstanden.

For å illustrere dette vises i Tabell 5 beregnede verdier for spesifikk elektrisk motstand ved forskjellige temperaturer iht. formel (1) og bruk av konstantene a og b fra tabellen. Bak absolutt-verdiene er den %-vise endringen i motstand i forhold til motstanden ved 0 °C angitt. Fra resultatene er det tydelig at for alle produktene er endringen i elektrisk motstand i forhold til referanseverdien ved 0 °C (i %) nokså lik. Vi ser at ved -5 °C er den elektriske motstanden ca. 26–42 % høyere enn ved 0 °C, mens motstanden ved 20 °C er ca. 25–41 % av motstanden ved 0 °C.

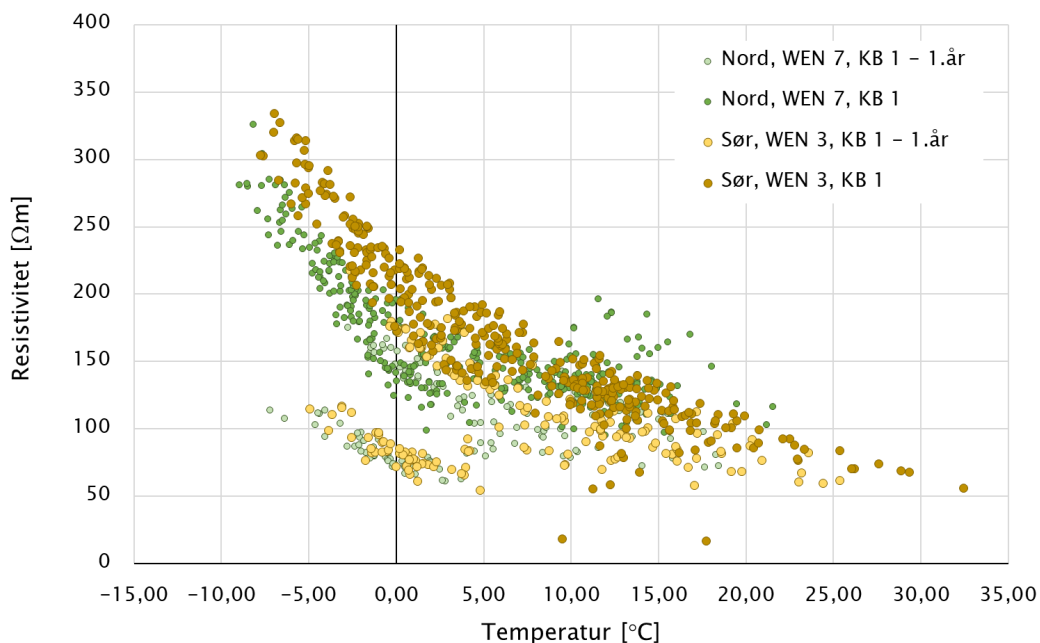
Tabell 5 – Trendlinje data for temperatur- og motstandsrelasjon.

Produkt	b	a	0 °C	-5 °C		10 °C		20 °C	
	<i>Fra Figur 16 og Figur 17</i>		Beregnet motstand ved gitt temperatur						
			<i>Forskjell i motstand til referanse 0°C</i>						
KB 1	331,91	-0,047	332	420	126 %	207	63 %	130	39 %
Rep 1	1334	-0,061	1334	1810	136 %	725	54 %	394	30 %
KB 2	287,62	-0,054	288	377	131 %	168	58 %	98	34 %
Rep 2	12773	-0,044	12773	15916	125 %	8226	64 %	5298	41 %
KB 3	6033,8	-0,057	6034	8024	133 %	3412	57 %	1930	32 %
Rep 3	4096,4	-0,070	4096	5813	142 %	2034	50 %	1010	25 %

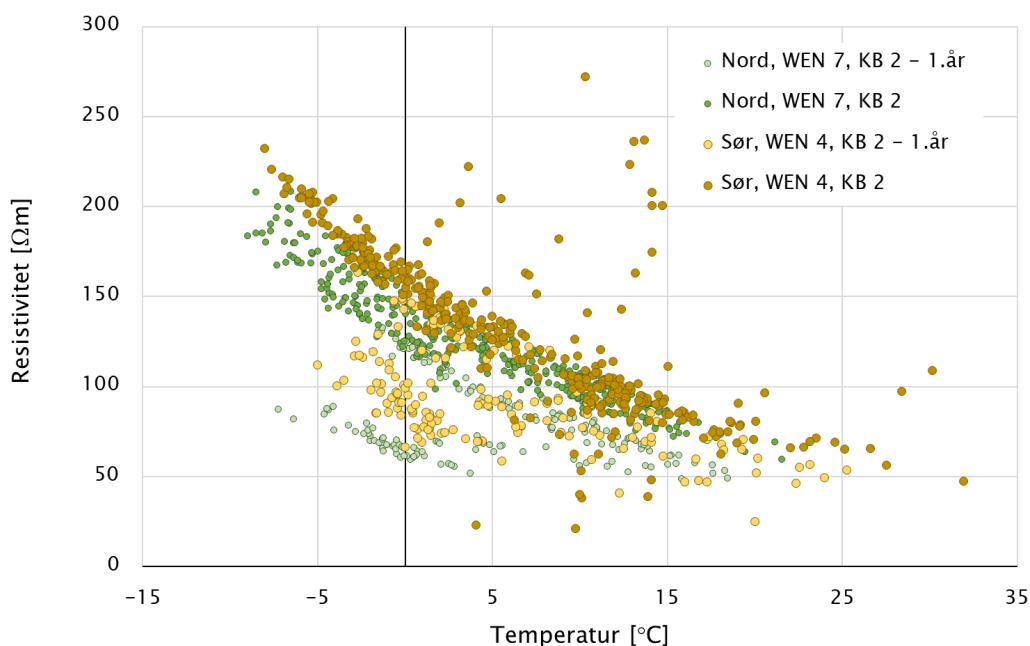
Effekt av eksponeringsbetingelser

Det ble brukt samme mørteltype på de respektive feltene på nord- og sørsiden for å sprøyte inn titannettene. Den elektriske motstanden skulle dermed i utgangspunktet være lik på de respektive feltene, men forskjeller vil oppstå på grunn av forskjellig eksponering fra sol, regn og vind. Sørsiden er mye sterkere eksponert for regn og vind (loside), mens nordsiden ligger i le, hvilket i praksis vil gi forskjeller i fuktinnhold ved ellers lik temperatur.

For å undersøke hvorvidt eksponeringen påvirker mørtelmotstanden kan vi sammenligne målinger av ikke overflatebehandlet KB-mørtel på nord- og sørsiden, utført med samme type sensorer og/eller metode. En slik sammenligning er kun mulig for mørtelprodukt KB 1 og KB 2, med data fra WEN-sensorene (se Figur 18 og Figur 19) og håndholdt manuelt Wennerfeltutstyr (se Figur 20).



Figur 18 – Sammenligning sør- og nordside for mørtel KB 1, WEN-sensor fra høyre side av prøvefeltene (uten overflatebehandling).

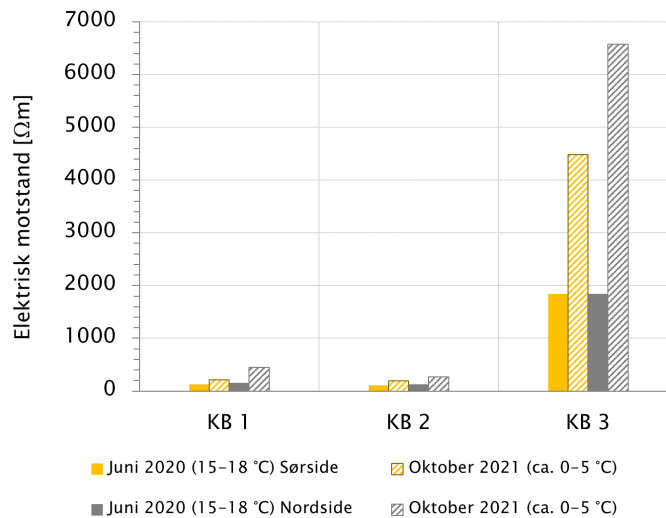


Figur 19 – Sammenligning sør- og nordside for mørtel KB 2, WEN-sensor fra høyre side av prøvefeltene (uten overflatebehandling).

Fra Figur 18 og Figur 19 ser vi en tendens til at den elektriske motstanden er noe høyere for sørsiden enn for nordsiden, spesielt ved temperaturer under 5°C.

Resultater fra manuelle feltmålinger viser motsatt tendens enn WEN-resultatene. Det er minimale forskjeller mellom nord og sør når målingene er gjort på sommeren (dog ca. 20 %

høyere på nordsiden for KB1 og KB2), men når målingene er gjort på høsten er forskjellene større (ca. 50–100 % høyere på nordsiden). Se Tabell 4 og Figur 20.



Figur 20 – Spesifikk elektrisk motstand målt manuelt i felt, alle KB-mørtler. Midlere verdier for hhv. sørsiden (gule stolper) og nordsiden (gråe stolper) av pilaren.

Andre studier, blant annet undersøkelser av brusøyler utsatt for alkalireaksjoner, viser generelt større skadeomfang på flater mot sør/vest enn i flater mot nord/øst, dette er forklart med (og stedvis dokumentert ved fuktmålinger) en kombinasjon av høyere fuktinnhold og gjennomsnittlig høyere temperaturer på grunn av solpåvirkning på sør-/vestsiden (Rodum og Pedersen 2022). De manuelt målte motstandsverdiene underbygger at fuktinnholdet er høyere på sørsiden (økt fuktinnhold gir redusert spesifikk elektrisk motstand). Det at forskjellene er større ved måling i oktober enn i juni kan være et resultat av større nedbørmengder på høsten enn på sommeren.

WEN-sensorene måler motstanden nært overflaten og på et lite mørtelvolum. Hvorfor disse sensorene indikerer lavere spesifikk elektrisk motstand på sørsiden enn på nordsiden kan muligens forklares med overflateeffekter (f.eks. kjemiske endringer), men dette er ikke undersøkt videre her.

Forskjellene mellom nord- og sørsiden er uansett små og anses å være av begrenset betydning. Det gjenstår å se om forskjellene vil bli mer markante med tiden.

Effekt av overflatebehandling

De påførte overflatebehandlingene er alle klassifisert som «sementbaserte, diffusjonsåpne elastiske slemmemasser». En slik overflatebehandling vil kunne påvirke fuktinnholdet (og dermed den spesifikke elektriske motstanden) i underliggende mørtler over (lang) tid. Hvor stor påvirkning det aktuelle produktet vil ha, vil være sterkt avhengig av produktets grad av vanntetthet og diffusjonsåpenhet (to egenskaper som ofte henger sammen), samt underlagets fuktinnhold ved påføring av belegget. Dersom belegget er helt tett begge veger (intet vann

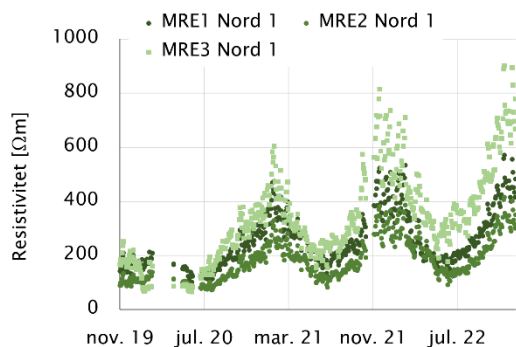
inn, ingen damp ut), så vil fuktinnholdet ved påføring av belegget konserveres på det nivået det var ved påføring. Dersom belegget er helt åpent begge veier, så vil fuktinnholdet i underlaget være upåvirket av belegget, og dermed variere med værforholdene. En overflatebehandling vil, i tillegg til å påvirke fuktinnholdet, også kunne ha en innvirkning på det ytterste mørtelsjiktets kjemiske interaksjon med omgivelsene (f.eks. utluting, karbonatisering).

For å se på effekten av overflatebehandling på mørtlenes motstand, er det spesielt interessant å se på resultatene fra KB-mørtlene ettersom disse er nærmest overflaten. Om det er en endring i elektrisk motstand på grunn av overflatebehandling, bør dette kunne sees som en forskjell mellom høyre og venstre side (med og uten overflatebehandling). I Figur 21 er det vist resultater fra målinger på nordsiden med MRE-elektroder (for KB 1, KB 2 og KB 3), og på sørsiden med WEN-sensorer (for KB 1 og KB 2). Data fra WEN-sensorene er benyttet fordi det ikke finnes pålitelig MRE-målinger på sørsiden.

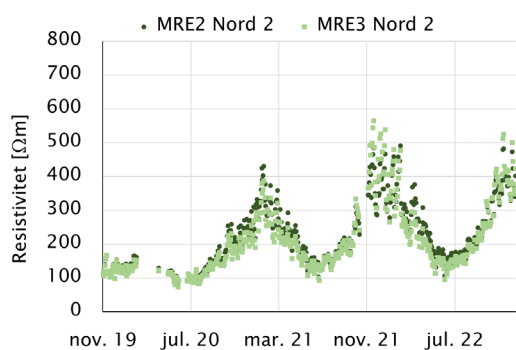
Resultatene (Figur 21) tillater ingen entydig konklusjon. Tvert imot ser det ut som om det er forskjeller mellom hvert enkelt prøvelfelt. Det må huskes på at det ble brukt forskjellige typer overflatebehandling, og produktenes ulike permeabilitetsegenskaper vil ha en påvirkning på resultatene. For prøvelfelt 2 kan det ikke ses noen tydelig effekt av overflatebehandling. For prøvelfelt 1 kan det observeres en tendens til noe høyere elektrisk motstand på feltene uten overflatebehandling, spesielt over tid (nordsiden) og om vinteren. Derimot er trenden omvendt for prøvelfelt KB 3 på nordside, hvor det er en tydelig høyere elektrisk motstand for feltet med overflatebehandling.

Resultatene (Figur 21) tillater ingen entydig konklusjon. Tvert imot ser det ut som om det er forskjeller mellom hvert enkelt prøvelfelt. Det må huskes på at det ble brukt forskjellige typer overflatebehandling, og produktenes ulike permeabilitetsegenskaper vil ha en påvirkning på resultatene. For prøvelfelt 2 kan det ikke ses noen tydelig effekt av overflatebehandling. For prøvelfelt 1 kan det observeres en tendens til noe høyere elektrisk motstand på feltene uten overflatebehandling, spesielt over tid (nordsiden) og om vinteren. Derimot er trenden omvendt for prøvelfelt KB 3 på nordside, hvor det er en tydelig høyere elektrisk motstand for feltet med overflatebehandling.

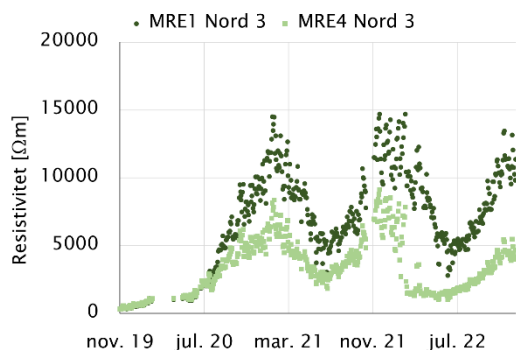
Forskjellene mellom med og uten overflatebehandling er uansett forholdsvis små og basert på et lite datagrunnlag. Det må forventes at det tar noen år før en eventuell effekt av overflatebehandling vil vises på motstandsmålingene, og det gjenstår å se om forskjellene vil bli mer markante med tiden.



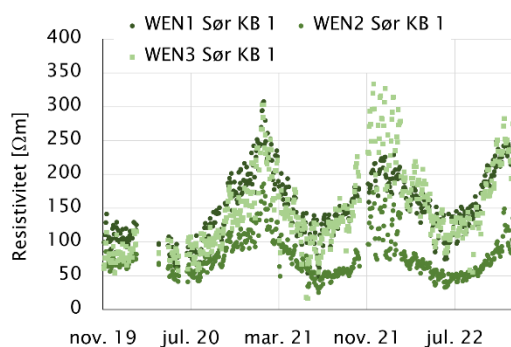
Nord, KB 1 (MRE-sensor 1. måling)



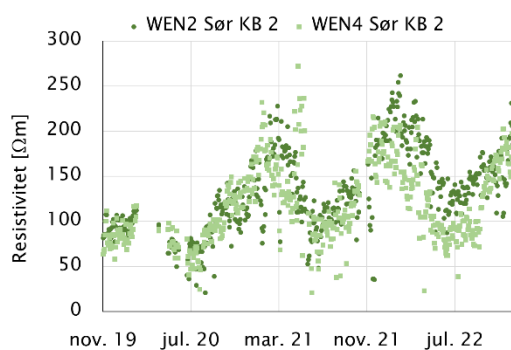
Nord, KB 2 (MRE-sensor 1. måling)



Nord, KB 3 (MRE-sensor 1. måling)



Sør, KB 1 (WEN-sensor)



Sør, KB 2 (WEN-sensor)

Forklaring:

Mørke grønne, runde indikatorer = venstre side med overflatebehandling (MRE 1 og 2, og WEN 1 og 2)

Lys grønn, firkantet indikator = høyre side uten overflatebehandling (MRE 3 og 4, og WEN 3 og 4)

Se Figur 2 og Figur 3

OBS: Målingene fra nordside og sørside kan ikke direkte sammenlignes, ettersom dem er tatt med forskjellige sensorer.

Figur 21 – Målinger på hhv. høyre side (uten overflatebehandling, lys grønn indikator) og venstre side (med overflatebehandling, mørkere grønne indikatorer) av feltene. MRE-sensorer til venstre i figuren (1. måling, mellom ring 1 og 2), WEN-sensorer til høyre i figuren.

4.1.3 Sammenhengen mellom feltmålinger og laboratoriemålinger av mørtlers spesifikke elektrisk motstand

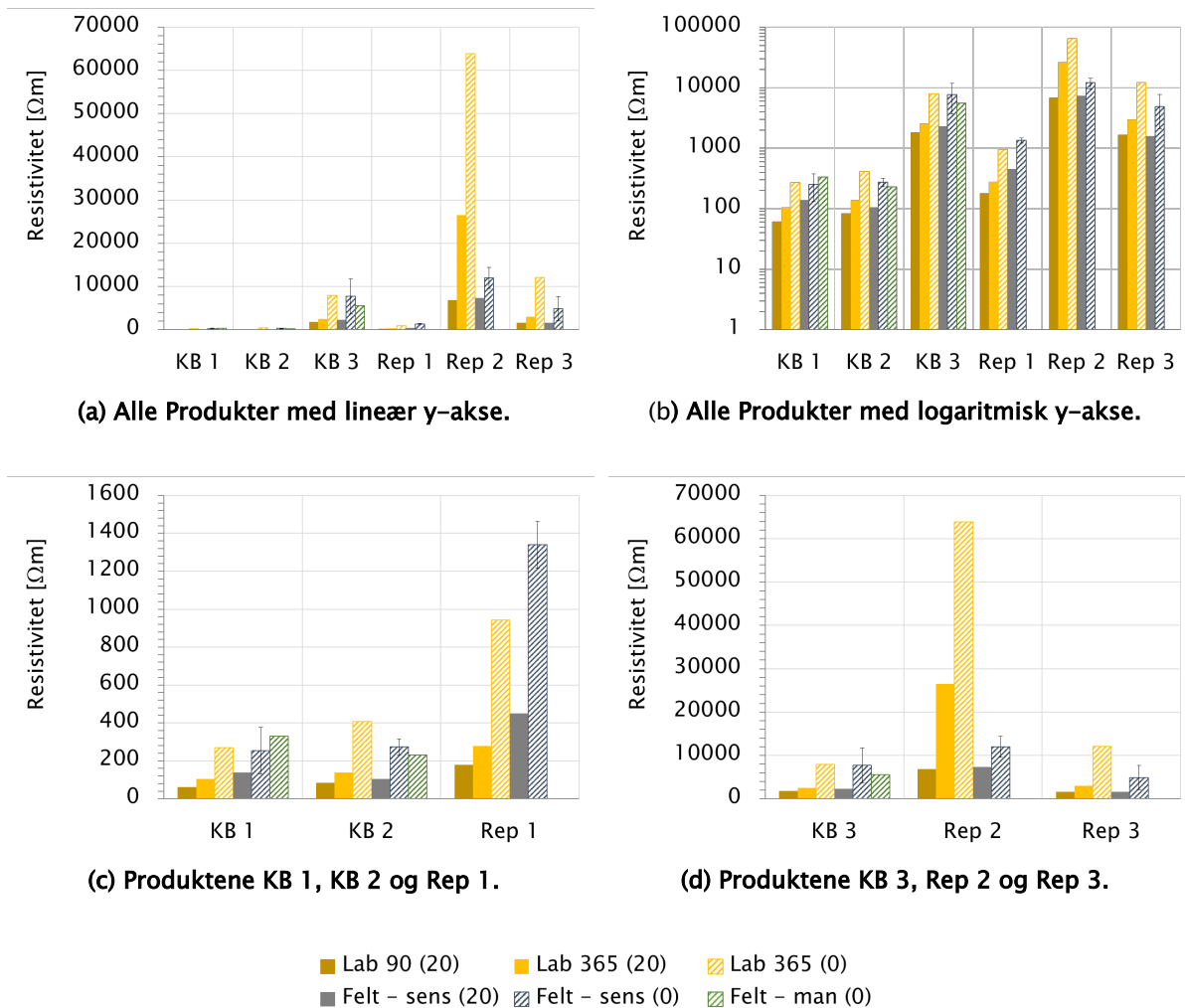
Spesifikk elektrisk motstand er en materialegenskap som må dokumenteres og deklarerer med bakgrunn i laboratorieprøving. For å kunne sammenligne ulike betongers og mørtlers elektriske motstand må de prøves ved samme fuktinnhold og i velherdet/modnet tilstand. Laboratorieundersøkelser (Helgestad, et al. 2023) har vist at reparasjonsmørtler (av den typen som dette forsøket omhandler) bør vannlagres fram til prøving ved minimum 90 døgns alder. Generell anbefaling til reparasjonsmørtler brukt forut for katodisk beskyttelse er at den spesifikke elektriske motstanden bør være så lik som mulig som den opprinnelige betongens motstand (se også kommentarer til valg av mørtler i (NS-EN 12696:2022 2022)²). Selv om en mørtel og en betong har samme spesifikke elektriske motstand ved samme fuktinnhold, kan ulikheter i materialenes alder og permeabilitetsegenskaper (f.eks. kapillærabsorpsjon) medføre at fuktinnholdet i felt blir forskjellig i de to materialene, selv om de eksponeres i samme miljø. I dette avsnittet er det sett nærmere på sammenhengen mellom målinger av spesifikk elektrisk motstand i laboratorium og faktisk målt motstand i felt (se Figur 22 og Tabell 6).

Tabell 6 – Spesifikk elektrisk motstand av alle mørtler bestemt i felt og i laboratoriet, ved ulike temperaturer og alder. Alle verdier i [Ω m]. Forskjell i elektrisk motstand i forhold til 90 døgns alder i lab ved 20 °C er angitt i %.

	Laboratorieresultater				Feltresultater				
	20°C		<i>korrigeret til 0°C*</i>	20±2°C		0±1°C		0–5 °C	
Produkt	90 døgn	365 døgn		356 døgn	MRE-sensorer, Nordside, gjennomsnitt mellom 1 – 3 år (<i>Std.</i>)				
KB 1	61	105	172 %	269	138	226 %	254	(123)	330
KB 2	84	138	164 %	408	104	124 %	273	(43)	230
KB 3	1841	2531	137 %	7914	2297	125 %	7686	(4033)	5533
Rep 1	178	278	156 %	942	451	253 %	1340	(123)	
Rep 2	6884	26508	385 %	63908	7312	106 %	11980	(2430)	
Rep 3	1650	2990	181 %	12125	1571	95 %	4875	(2786)	
Brubetong, ca. 50 års alder	97		<i>Vannmettet i laboratoriet, se (Helgestad, et al. 2023)</i>						
	160		<i>Manuell feltmålinger 10–15°C, se (Helgestad, et al. 2023)</i>						

* Beregnet basert på trendlinjer vist i Tabell 5.

² *Note to concrete reinstatement:* “Typically, these repair materials have an electrical resistivity within the range approximately half to twice that of the parent concrete when measured under the same conditions as the parent concrete. However, the electrical resistivity of the parent concrete is that of an aged material (age > 20 years), whereas the electrical resistivity of the repair material reflects the properties at a relatively young age; it is anticipated that there is a significant ageing effect over time. Also, measurements made in the laboratory on prisms do not represent the conditions of the structure. A good quality repair made with materials known to be compatible with cathodic protection installations has been found to be more important than arbitrary resistivity limits.”



Figur 22 – Sammenstilling av spesifikk elektrisk motstand for alle mørtler bestemt i felt og laboratoriet.

Feltresultatene er fra nordsiden av pilaren (lite påvirket av sol), hentet fra MRE-sensorer (kun denne sensoren har data fra alle felt) ved temperatur ca. 20 ± 2 °C og 0 ± 1 °C, og de manuelle målingene ble utført ved lufttemperaturer i området 0–5 °C. Data fra høyre og venstre side (med og uten overflatebehandling) ble ansett som ett datasett. Ettersom det var forholdsvis lite data for temperaturer rundt 20°C er det kun vist gjennomsnittet. Derimot fantes det en forholdsvis stor datamengde for målinger rundt 0 °C, det er derfor angitt standardavviket i Figur 22 og Tabell 6 for disse målingene.

I laboratoriet ble den elektriske motstanden målt på både sprøytete og utstøpte prøver, lagret hhv. i vann og innpakket i plast. Prøving ble utført ved forskjellig alder (Helgestad, et al. 2023). Det ble konkludert med at motstanden bør måles på vannlagrede prøvestykker tildannet fra sprøytete plater, ved alder minimum 90 døgn. Alle målinger i laboratoriet ble utført på prøver som hadde en temperatur på ca. 20 °C. Ved sammenligning av feltmålinger og laboratoriemålinger er det valgt å benytte resultatene for sprøytete prøver, vannlagret fram til alder 90 og 365 døgn. Resultatene fra 365 døgn ble i tillegg omregnet til motstand som tilsvarer 0 °C basert på trendlinjene presentert i avsnitt 4.1.2.

Det presiseres at denne sammenstillingen av resultater, som er fremkommet ved bruk av flere ulike målemetoder (og også matematiske estimeringer), utført ved ulike temperaturer og ved ulike fuktbetingelser, samt på mørtler med ulik modenhet, må evalueres med største forsiktighet. I tillegg er det for flere av mørtlene (Rep 2, Rep 3 og KB 3) stor spredning i resultatene, noe som kan skyldes en høy spesifikk elektrisk motstand og/eller problemer under utsprøyting. Det er uansett ansett som verdifullt å se på de samlede dataene under ett.

For de fleste produktene er laboratoriemotstand målt ved 90 døgn og 20°C noe lavere enn feltmotstand i samme temperaturområdet etter 1–3 år (Tabell 6). Dette kan skyldes både mørtelalder og at det er benyttet ulike målemetoder/–prinsipp, i tillegg til at fuktinnholdet i felt er lavere enn i lab. Også for brubetongen er det målt lavere spesifikk elektrisk motstand i lab enn i felt (100 vs. 160 Ωm), men her er også temperaturene i felt noe lavere enn i lab (10–15 vs. 20°C).

Basert på resultatene (Figur 22 og Tabell 6) kan en fastslå at KB 1 og KB 2 har den desidert laveste spesifikke elektriske motstanden, ved alle temperaturer og prøvingsmetoder. Den spesifikke elektriske motstanden ligger <150 Ωm ved 20°C og < 300 – 400 Ωm ved 0°C. Deretter følger Rep 1 med verdier i området 200 – 500 Ωm ved 20°C og 1 000 – 1 300 Ωm ved 0°C. Det er videre grunnlag for å si at KB 3 og Rep 3 har en nokså lik spesifikk elektrisk motstand, hhv. i området 1 500 – 3 000 Ωm ved 20°C og 5 000 – 12 000 Ωm ved 0°C. Rep 2 er den mørtelen som har den desidert høyeste motstanden, med verdier i området 7 000 –25 000 ved 20°C og 12 000 – 64 000 Ωm ved 0°C.

Verdiene basert på laboratoriet–målinger omregnet til 0°C iht. trendlinjer er angitt i kursiv og grå. Disse verdiene er beheftet med stor usikkerhet. I ettertid ser en klart at det burde vært gjort direkte målinger av spesifikk elektrisk motstand ved flere temperaturer i laboratoriet, f.eks. 5 °C og 10 °C.

Mørtlene som ble brukt i våre forsøk kan dermed deles inn i tre grupper, som vist i Tabell 7.

Tabell 7 – Gruppering av mørtler etter spesifikk elektrisk motstand bestemt i lab ved 90 døgns alder og 20 °C, sammenstilt med tilhørende MRE-verdier målt i felt ved 1–3 års alder og hhv. 20 °C og 0 °C.

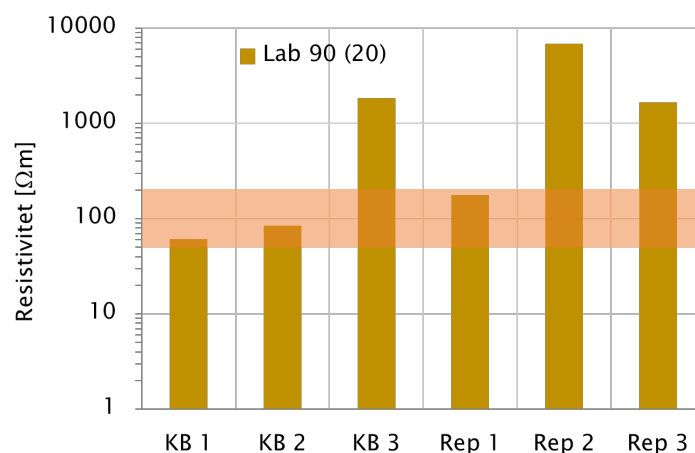
Produkt	Spesifikk elektrisk motstand, Ωm		
	Lab ved 20°C 90 døgn	Felt (MRE) ved 20±2°C 1–3 år	Felt (MRE) ved 0±1°C 1–3 år
KB1, KB2, Rep 1	< 200	<500	< 1250
KB3, Rep 3	1500–2000	1500–2300	5000–7500
Rep 2	>5000	>7000	>10000

Det er tydelig fra resultatene at laboratorieprøving etter 90 døgn gir en veldig god indikasjon av mørtelmotstanden i felt. Både størrelsesorden av verdier og rangering er veldig godt sammenlignbare.

For alle mørtler øker elektrisk motstand i laboratoriet mellom 90 og 365 døgn. Dette spesielt for Rep 2, hvor motstanden øker med 385 % (Tabell 6). Hvorvidt dette kan skyldes en målefeil eller spesielle forhold ved mørtelen er umulig å si. Fra forsøk på betong er det kjent at vannlagring av prøver i store kar over lengre tid kan føre til utlutning av alkalier fra betongen som påvirker den elektriske motstanden (den blir urealistisk høy). Ved lagring av prøvestykker over lengre tid bør derfor mengden vann minimeres for å hindre ugunstig kjemisk interaksjon mellom vann og mørtel/betong. Uansett gir resultatene etter 365 døgn ingen endring i rangingen av produktene, det gir heller intet generelt bedre samsvar med langtidsfelldata. Ettersom testing for dokumentasjon og kvalitetskontroll etter 365 døgn sammenlignet med 90 døgn er betydelig mere tidskrevende og muligens også mer utsatt for feilkilder, anses 90 døgn resultater som best egnet for dokumentasjon av produktenes spesifikke elektriske motstand. Ved utarbeidelse av prosjektbeskrivelser er det hensiktsmessig spesifisere krav til mørtlers spesifikke motstand med utgangspunkt i denne prøvingsprosedyren.

Ofte oppgis det som en merknad i standarder og veiledere at en mørtel som benyttes til reparasjon før installasjonen av katodisk beskyttelse skal ha en resistivitet som er 50 – 200 % av den opprinnelige betongen. Når det gjelder innsprøytingsmørtelen som titannettet sprøytes inn med, er det kun i veilederen (Lindland 2016) gitt en anbefaling – «unngå elektrisk motstand over 50 Ωm ». I standarden NS-EN ISO 12696 angis det at det må gjøres en vurdering (se avsnitt 1.1).

Den opprinnelige brubetongen i vårt forsøk hadde i gjennomsnitt en verdi på 97 Ωm (laboratorietestet ved 20°C). Brubetongens resistivitet skulle dermed tilsi at reparasjonsproduktene burde hatt en resistivitet, målt på tilsvarende måte, i intervallet mellom ca. 50 – 200 Ωm . Reparasjonsmørtlenes spesifikke elektriske motstand er sammenstilt med dette kravet (vist som oransje området) i Figur 23. Det bemerkes at det ved en reell vurdering i et prosjekt bør vurderes å ta hensyn til en forventet variasjonskoeffisient på minimum 10–20 % (Polder 2001), både for brubetongen (og dermed grenseverdiene) og reparasjonsmaterialene.



Figur 23 – Spesifikk elektrisk motstand for alle mørtler bestemt i laboratoriet ved 90 døgn alder og 20°C. Grenseverdiene på 50–200 % av brubetongens resistivitet er angitt i oransje ramme.

Av reparasjonsmørtlene kan vi se at det kun er reparasjonsmørtel Rep 1 som oppfyller kravet. Ingen av KB-mørtlene ligger under den anbefalte maks-grensen på 50 Ω m iht. (Lindland 2016), men både KB 1 og KB 2 ligger innenfor reparasjonsmørtel-kravet om 50–200 % motstand av brubetongen.

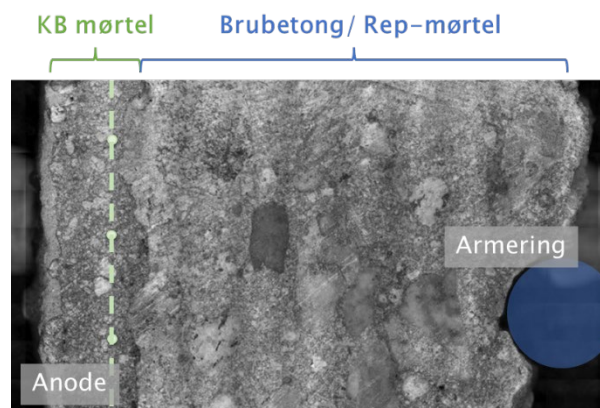
I avsnitt 4.2 vurderes innflytelsen av elektrisk motstand på effekten av katodisk beskyttelse. Hvorvidt kravene som stilles i dagens regelverk er relevant, evalueres ut fra resultatene.

4.2 Ytelse av katodisk beskyttelse avhengig av elektrisk motstand av mørtel

I dette avsnittet diskuteres effekten av reparasjons- og KB-mørtlenes spesifikke elektriske motstand på den katodiske beskyttelsen av armeringen (tema IV i avsnitt 1.2).

IV. Effekten av reparasjons- og KB-mørtlenes spesifikke elektriske motstand på den katodiske beskyttelsen av armeringen

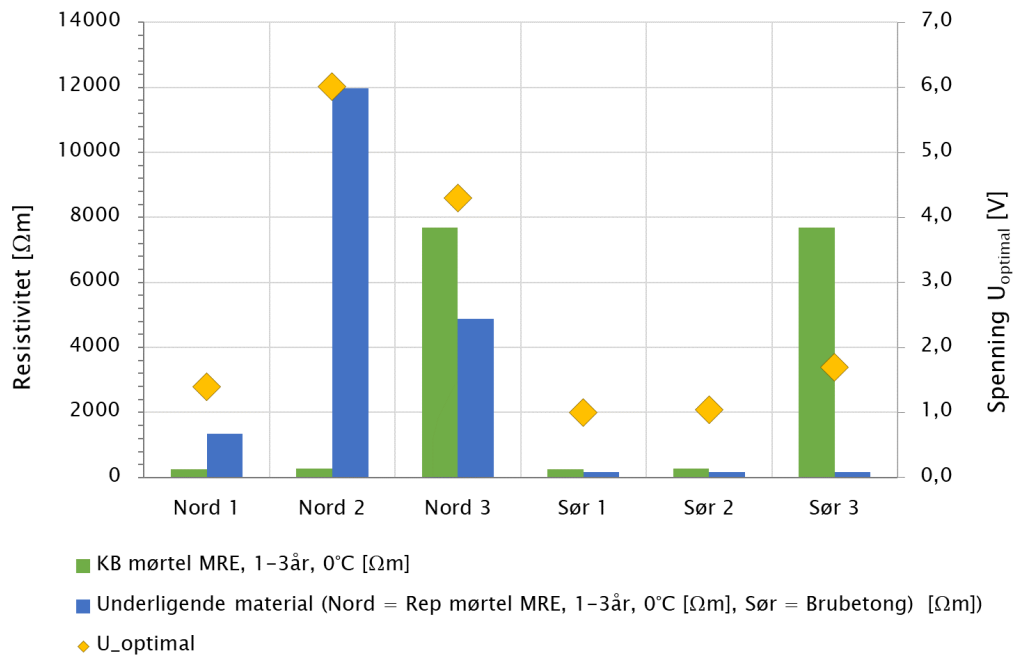
På et anlegg for katodisk beskyttelse går det en strøm mellom anodenettet og armeringen. På veien spres strømmen ut i et lag med KB-mørtel og gjennom et lag med enten opprinnelig brubetong eller reparasjonsmørtel (Figur 24). Ettersom anodenettet er plassert på betongoverflaten og deretter sprøytes inn med et forholdsvis tynt lag med KB-mørtel (ca. 20 – 25 mm) er tykkelsen av KB-mørtelen som gjennomstrømmes forholdsvis liten sammenlignet med tykkelsen av brubetongen eller reparasjonsmørtel (Figur 24). Det er derfor rimelig å anta at den elektriske motstanden av reparasjonsmørtelen eller brubetongen kommer til å ha en større betydning for ytelsen av katodisk beskyttelse enn det som KB-mørtelen har. Dette vises tydelig i våre resultater.



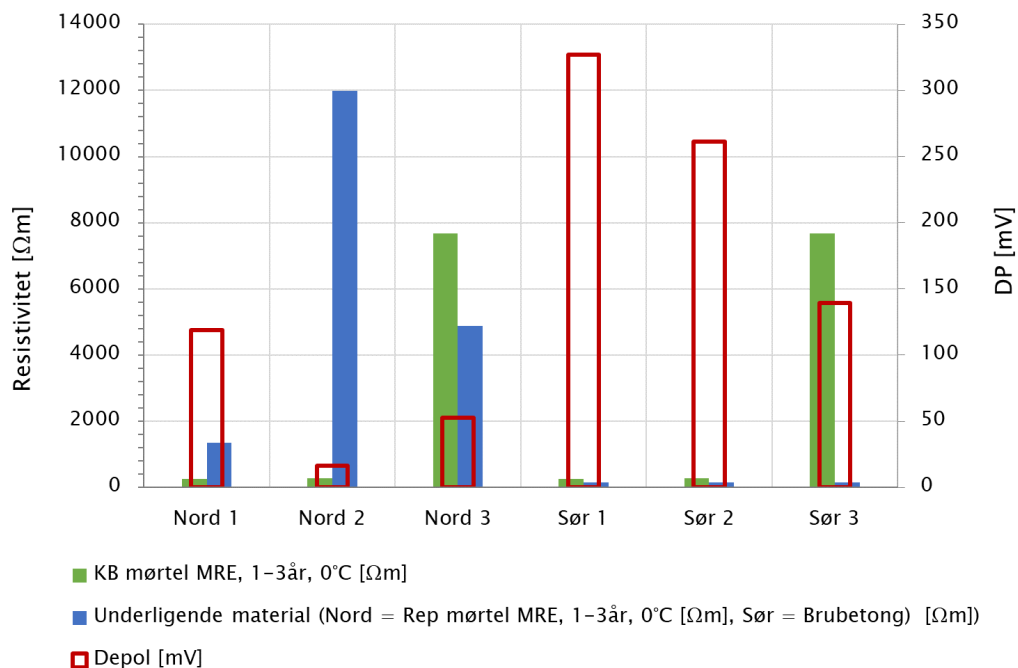
Figur 24 – Tverrsnitt av en KB-sone, med KB-mørtel og brubetong, μ XRF skann fra Sortlandsbru.

I Figur 25 er den spesifikke elektriske motstanden til mørtlene i de ulike prøvefeldene sammenstilt med den fastsatte spenningen hvor feltene driftes optimalt iht. 100 mV depolariseringskravet (U_{optimal}). (Merk at det i denne driftsperioden ble oppnådd 100 mV depolarisering i alle felt, unntatt i felt Nord 2, Vedlegg B). For hvert prøvefeld er det vist en gjennomsnittsverdi for den spesifikke elektriske motstanden målt med MRE-sensorene (ved

temperatur $0 \pm 1^\circ\text{C}$ og mørtelalder 1–3 år). Samme motstandsdata er også vist i Figur 26, der sammenstilt med oppnådd depolarisering (DP) ved en konstant driftsspenning på 1,5 V. DP-verdiene er angitt som gjennomsnitt av fire referanseelektroder for hvert prøvefelt.



Figur 25 – Spesifikk elektrisk motstand for alle materialer (fylte stolper: data fra felt, skraverte stolper: resultater fra lab) og påtrykt spenning U_{optimal} , for de forskjellige prøvefeltene (gule markører).



Figur 26 – Spesifikk elektrisk motstand for alle materialer (hele stolper: data fra felt, skraverte stolper: resultater fra lab). Oppnådd depolarisering (etter 24 timer), ved konstant påtrykt spenning av 1,5 V er vist ved de røde stolpene.

Effekten av den spesifikke elektriske motstanden i underlaget kan evalueres ved å studere resultatene for prøvelfelt med samme lave motstand i KB-mørtelen (dvs. prøvelfelt Nord 1, Nord 2, Sør 1 og Sør 2). Figur 25 viser tydelig at det er behov for økende påtrykt spenning (fra 1V til 6V) med økende elektrisk motstand i underlaget (betong/reparasjonsmørtel), for å oppnå en depolarisering på 100 mV. Ut fra dette skulle en forvente at en konstant påtrykt spenning på 1,5 V vil generere for mye strøm til felt Sør 1/Sør 2 og for lite strøm til felt Nord 2, hvilket bekreftes av depolarisasjonsverdiene i Figur 26.

For å vurdere effekten av den spesifikke elektriske motstanden av KB-mørtlene ser vi på resultatene for prøvelfelt med den samme lave motstanden i underlaget (dvs. felt Sør 1, Sør 2 og Sør 3). Figur 25 viser at økt elektrisk motstand i KB-mørtelen, ved ellers lik motstand i underlaget, gir økt spenningsbehov (fra 1 V til 1,7 V). En konstant påtrykt spenning på 1,5 V vil da gi for mye strøm til felt Sør 1/Sør 2 og litt for lite strøm til felt Sør 3, hvilket til en viss grad reflekteres i depolarisasjonsverdiene i Figur 26 (prøvelfelt Sør 3 ser imidlertid ut til å være godt beskyttet også av 1,5 V spenning).

Fra resultatene våre ser vi at for å beskytte armeringen mot videre korrosjon trenger vi en høyere påtrykt spenning for feltene med utført reparasjon enn for feltene uten reparasjon. Det ser ut til at dette i hovedsak skyldes den spesifikke elektriske motstanden av reparasjonsmørtelen, selv om også de lavere utgangspotensialene (E_{for} , Figur 6) på sørsiden kan ha hatt en viss innvirkning (se Figur 9).

Innenfor store anodesonder på KB-anlegg på bruer finnes det som oftest både områder med forutgående forenklet mekanisk reparasjon og et større areal uten mekanisk reparasjon. Resultatene fra våre forsøk viser at områder som er reparert trenger et høyere spenningsnivå for å oppnå beskyttelse dersom mørtelen som brukes for reparasjon har en høyere motstand enn brubetongen. I disse situasjonene risikere man en veldig ujevn strømtilførsel, med fare for over- eller underbeskyttelse av armeringen i noen områder av anodesonen. Resultatene viser tydelig at reparasjonsmørtler brukt forut for katodisk beskyttelse må være så lik som mulig som opprinnelig brubetong for å oppnå jevn beskyttelse. I vårt tilfelle var reparasjonsmørtel Rep 1 nærmest brubetongen. Likevel har feltet med den mørtelen behov for en noe høyere påtrykt spenning for å oppnå 100 mV depolarisering enn de ikke reparerte feltene. Resultatene viser at de ofte benyttede grenseverdiene for reparasjonsmørtel mellom 50 – 200 % av brubetongens motstand ligger i et fornuftig område, med tanke på å sikre en jevn og god beskyttelse av armeringen. Ved høye påtrykte spenninger som er nødvendig ved høy motstand av reparasjonsmørtel, som for eksempel for prøvelfelt Nord 2 og Nord 3, kan man risikere at potensialet for armering i ikke-reparerte områder, spesielt for brubetong med lav elektrisk motstand, blir veldig lavt og man risikerer i så fall armeringspotensialer under anbefalte grenseverdier for hydrogensprøhet.

Den elektriske motstanden av brubetong må derfor kartlegges forut for planlegging av katodisk beskyttelse. I feltforsøket kunne vi se en god sammenheng mellom motstandsmålinger på kjerneprøver og bruk av NDT-utstyr, sistnevnte er en enkel og rask

metode for å kartlegge større områder. Avhengig av motstandsforskjeller og korrosjonstilstand må det planlegges soneinndeling og design.

For KB-mørtelen viser forsøk at en grenseverdi på 50 Ωm ikke er nødvendig for å sikre at KB-anlegget skal fungere. Også KB 3, med en motstand på ca. 1800 Ωm ved 20 °C, gir god ytelse av beskyttelsen, da forutsatt at underlaget (reparasjonsmørtel/betong) har lav motstand (se Nord 3 vs. Sør 3 i Figur 26). KB-mørtelen bør uansett ikke ha høyere elektrisk motstand enn reparasjonsmørtel og/eller brubetong, dette for å forhindre at det kommer til lokal forsuring rundt anoden.

Resultatene viser at det er viktig å ha fokus på kontroll og testing av motstand både av brubetongen og reparasjonsmørtelen for å sikre god funksjonalitet av KB-anlegg. Resultatene viser i tillegg at det er viktig å ha referanseelektroder plassert både i reparerte og ikke-reparerte områder for å sikre at man har god oversikt over beskyttelsesgrad.

4.3 Ytelse av katodisk beskyttelse avhengig av temperatur og overflatebehandling

Resultatene fra forsøket gjør det mulig å diskutere hvorvidt temperatur og overflatebehandling påvirker ytelsen av den katodiske beskyttelsen.

V. Effekten av overflatebehandling på den katodiske beskyttelsen av armeringen

For å vurdere resultatene ble det beregnet strømtetthet på armeringen for hvert prøvefelt i perioden med konstant påtrykt spenning U_{optimal} . I henhold til armeringstegningene fra brua er armeringstetthet på forankringspilaren for hvert prøvefelt ca. 0,32 m^2 armeringsoverflate³.

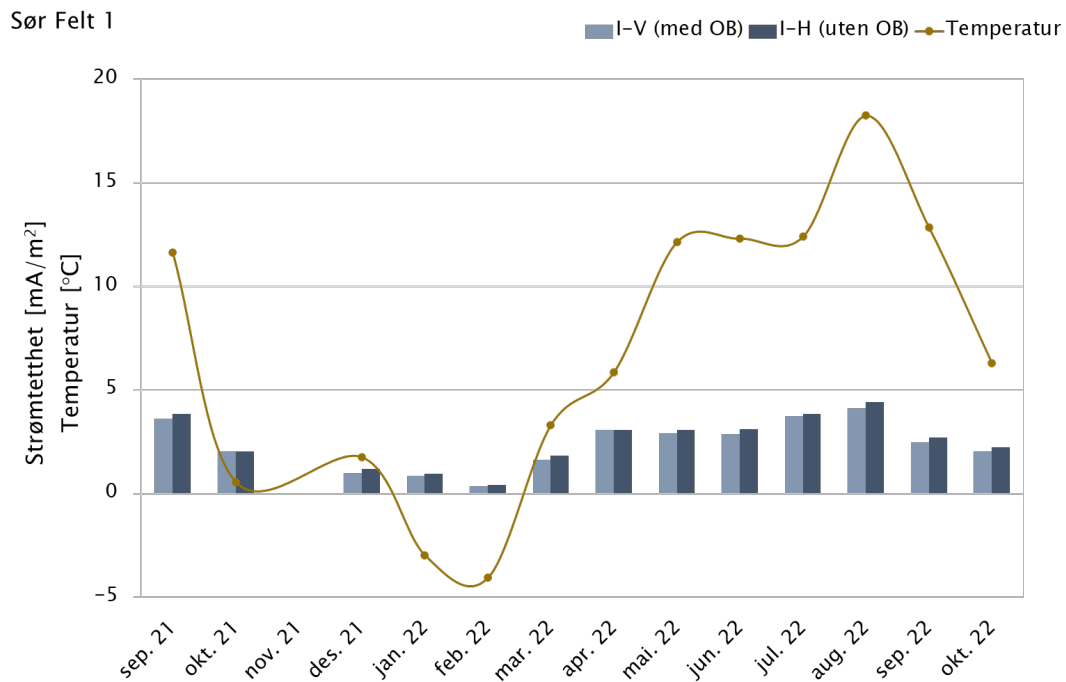
$$i_{\text{armering}} = \frac{I_{KB}}{A_{\text{armering}}} \quad (2)$$

I_{KB} = ser data i avsnitt 3.3.2.

Spenningen U_{optimal} er forskjellig for hvert prøvefelt, den er bestemt som den spenningen som gir optimal depolarisering (100 mV), se avsnitt 2.2.4. Den konstante spenningen U_{optimal} har stått på i ca. ett år og det var dermed mulig å se på forandringen av strømtettheten i forhold til temperatur-endringen over dette året. Det ble også studert forskjeller i strømtettheten mellom venstre og høyre side av prøvefeltene (henholdsvis med og uten overflatebehandling). For hvert prøvefelt står samme spenning på høyre og venstre side. Ettersom både mørteltype og geometri ellers er identisk, kan eventuelle forskjeller tyde på en påvirkning av overflatebehandlingen på ytelse av KB.

³ Armeringsmengde: \varnothing 20 mm c 220 mm vertikal armering og \varnothing 12 mm c 300 mm horisontal armering, samme utvending som innvendig, tykkelse av forankringspilar 250 mm. Størrelse av prøvefeltene (0,75 m x 0,75 m = 0,56 m^2). Armeringsoverflate for ett armeringslag med 10% omfar = 0,25 m^2 . Påslag for strømleveranse til andre armeringslag 25%. Armeringsoverflate som beskyttes = 1,25 * 0,25 m^2 = 0,32 m^2 .

Månedlige gjennomsnittsverdier for prøvefelt Sør 1 er vist i Figur 27, for de andre feltene er resultatene vist i Vedlegg C. Det vises strømtetthet på venstre side med overflatebehandling (i figuren forkortet med «OB»), og høyre side uten overflatebehandling («uten OB»). Det vises også temperaturforløpet i figurene, målt med MRE-sensorene. Det bemerkes at temperaturen som vises er målt ca. 24 timer før strømmålingene. Dette på grunn av at loggetidspunktene for KB-delen og motstandssensorene er forskjellige.



Figur 27 – Strømtetthet på felt Sør 1 i tidsrom med konstant spenning (U_{optimal} , 1,0 V).

Det er kjent fra litteraturen at temperaturen påvirker korrosjonsprosessen til stål i betong, spesielt at den katodiske reaksjonshastigheten avtar ved lave temperaturer (Østvik 2005). I Figur 27 (og Vedlegg C) er denne effekten synlig i form av at strømbehovet for beskyttelse av armeringen avtar med synkende temperatur. Selv om det må påpekes at også depolarisering ved konstant påtrykt spenning over hele året varierer noe med årstidene og er noe lavere om vinteren, hvorfor kriterier vanligvis settes til 100 mV depolarisering målt med fukt og temperaturforhold tilsvarende godt sommervær. Det betyr at det er et større strømbehov for katodisk beskyttelse om sommeren enn om vinteren. Det er tydelig at særlig feltene som driftes med en lav spenning (her feltene på sørsiden) har et meget lite strømbehov om vinteren (delvis ned til 1 mA/m²). Om sommeren driftes disse feltene med en armeringsstrømtetthet på mellom 5–7 mA/m², noe som i henhold til NS-EN 12696 tilsvarer et vanlig strømbehov for katodisk beskyttelse⁴ (NS-EN 12696:2022 2022). For feltene på nordsiden er strømbehovet noe høyere. Strømbehovet på nordsiden er også tydelig påvirket av årstidene, det ligger om sommeren på mellom 15–25 mA/m² og om vinteren på mellom 2,5 – 5 mA/m².

⁴ iht. NS-EN 12696 kan det forventes en strømtetthet for katodisk beskyttelse på mellom 2 – 20 mA/m² armeringsoverflate.

Som for motstandsmålingene, er det ingen tydelig effekt av overflatebehandlingen på strømbehovet. For feltene på sørsiden kan det observeres en svak tendens til noe høyere strømtetthet på det høyre feltet (uten overflatebehandling) enn for det venstre feltet (med overflatebehandling), dette spesielt for felt Sør 3. Også på nordsiden viser prøvelfeltet Nord 3 en høyere strømtetthet for høyre feltet (uten overflatebehandling). Mens det for de andre to feltene Nord 1 og 2 som oftest er høyere strømtetthet på venstre side (med overflatebehandling). Uansett er forskjellen mellom prøvelfeltene, installert med forskjellige produkter, betydelig større enn effekten av overflatebehandling på de individuelle feltene. Generelt er forskjellen mellom felter med og uten overflatebehandling såpass liten at det kan konkluderes med at overflatebehandling foreløpig har hatt liten påvirkning på ytelse av katodisk beskyttelse. Hvorvidt dette også er tilfelle over en lengre periode, etter mange år med regnpåkjening, temperaturvariasjon, solinnstråling, kloridpåvirkning etc. må videre undersøkes. Både utviklingen over tid og destruktiv prøvetaking i slutten av prøveperioden kan gi mer detaljerte opplysninger.

4.4 Armeringens korrosjonstilstand i områder med forenklet mekanisk reparasjon

Det siste temaet som skal diskuteres er effekten av forenklet mekanisk reparasjon det katodiske beskyttelsesbehovet.

VI. Effekten av forenklet mekanisk reparasjon på pågående korrosjon av armeringen

I våre forsøk ble halvparten av forsøksfeltene reparert ved en forenklet mekanisk reparasjon (nordside). All betong ble fjernet ved håndmeisling bak det første armeringslaget. Stålet ble ikke rengjort annet enn med en enkel vask med vann. Denne typen forenklet mekanisk reparasjon, som er vanlig forut for installasjon av katodisk beskyttelse, forventes ikke å stoppe korrosjon på armeringsstålet. Målingene med referanselektroden før KB ble satt på, viser tydelig at denne typen mekanisk reparasjon ikke stanser videre korrosjon (Figur 9). Potensialene på nordsiden (den reparerte siden) var til og med lavere enn på sørsiden (ikke reparerte siden), noe som indikerer en større korrosjonsrisiko. I våre forsøk kunne vi ikke se tegn på at stålet re-passiverte etter at det ble sprøytet på en «frisk» mørtel uten klorider. Det underbygger viktigheten av at også armeringsstål i reparerte områder beskyttes mot videre korrosjon ved tilførsel av nok katodestrøm. Ytelse og funksjonalitet av katodisk beskyttelse må derfor også overvåkes i områder som er reparerte, i tillegg til øvrige områder med påvist korrosjon før installasjon av katodisk beskyttelse (NS-EN 12696:2022 2022). Dette står ikke spesifikt i anbefalingene i NS-EN ISO 12696⁵ (NS-EN 12696:2022 2022), tvert imot henvises det der til at det ikke skal plasseres referanselektroder i reparerte områder, med mindre det ikke finnes alternativer. Våre resultater viser imidlertid at det kan være nødvendig at det

⁵ NS-EN ISO 12696: "Reference electrodes and other sensors shall not be placed in, or close to, concrete repairs unless there are no alternative locations. In the vicinity of the sensor, concrete surrounding the steel shall remain undisturbed. Typically reference electrodes should, if possible, be placed a minimum of 500 mm from concrete repairs which incorporate steel."

plasseres referanseelektroder både i områder med forutgående forenklet mekanisk reparasjon og i områder uten reparasjoner, eventuelt også i overgangssoner.

5 Oppsummering og konklusjon

Armeringskorrosjon er den skadetyper som registreres oftest på norske betongbruer. Katodisk beskyttelse er et mulig vedlikeholdstiltak ved armeringskorrosjon og metoden er spesielt egnet der armeringskorrosjon pågår over store arealer uten at dette har ført til omfattende skader i form av opprissing og avskalling av betong. Ved installasjon av KB-anlegg er riktig valg av materialer, herunder reparasjons- og KB-mørtler, avgjørende for å oppnå god og langvarig effekt av tiltaket.

Det er gjennomført felt- og laboratorieforsøk med ulike reparasjons- og KB-mørtler brukt i forsøksfelt med katodisk beskyttelse, utført med anoder av innstøpte titannett. Tre ulike leverandører av denne typen mørtler har anbefalt konkrete produkter til bruk i forsøket. Ved bruk av ulike metoder er mørtlenes spesifikke elektriske motstand målt over tid og ved ulike temperaturer – og det er undersøkt i hvilken grad mørtlenes elektriske motstand påvirker ytelsen av det katodiske beskyttelsessystemet. Hovedformålet med undersøkelsen var å se på prøvingsmetoder og hensiktsmessige grenseverdier for spesifikk elektrisk motstand av mørtler brukt i katodiske anlegg, både for reparasjonsmørtler brukt i mekanisk reparasjon forut for installasjon av KB og selve mørtlene brukt for omslutning av anoder (KB-mørtel).

Med bakgrunn i foreliggende resultater kan følgende konklusjoner trekkes:

- Alle metodene for måling av elektrisk motstand, både de benyttet i felt og i laboratorium, rangerer grovt sett de ulike mørtlene likt – når en sammenligner resultater oppnådd ved samme temperatur og modenhet. De absolutte verdiene er imidlertid noe forskjellig, men dette er å forvente ettersom måleprinsippene er forskjellig (måling på små kontra store mørtelvolum) og fuktinnholdet i mørtlene vil kunne variere. Det er også usikkerheter knyttet til mulige overflateeffekter for sensorer plassert nær overflata.
- Mørtlenes spesifikke elektriske motstand øker med økende alder. I felt skjer det en utvikling i den elektriske motstanden over ca. ett år. I laboratoriet, ved herding i vann av 20 °C, flater motstanden noe ut etter ca. 90 døgn. Utviklingen fortsetter likevel, i varierende grad, til 365 døgn. Ved vannlagring av prøvestykker over så lang tid kan det ikke utelukkes at motstanden påvirkes av en kjemisk interaksjon mellom vann og mørtel (f.eks. utluting, som er kjent fra prøving av betong). Både av praktiske hensyn og mulige feilkilder ved langvarig vannlagring er det anbefalt å gjennomføre dokumentasjon av mørtlers spesifikke elektriske motstand i laboratorium ved 90 døgns alder.
- I felt er det funnet en sammenheng mellom spesifikk elektrisk motstand og temperatur, som sammenfaller med Arrhenius ligning. Relasjonen mellom temperatur og spesifikk elektrisk motstand er relativt lik for alle mørtlene uansett om motstanden er høy eller lav.
- Det er å forvente at fuktinnholdet i mørtlene i felt vil kunne utvikles forskjellig:

- På sør- vs. nordsiden, pga. ulike eksponering for regn og vind
- I felt med vs. uten overflatebehandling, avhengig av overflateproduktenes vann- og vanndamppermeabilitet.

Foreløpig, etter ca. tre års drift, er det ikke mulig å se en tydelig effekt verken av eksponeringsforhold eller overflatebehandling på mørtlenes spesifikke elektriske motstand. Dette vil bli fulgt opp videre.

- De undersøkte mørtlene kan grupperes etter spesifikk målt motstand som følger (verdier målt i lab ved 90 døgns alder er angitt i parentes):
 - KB 1, KB 2 og Rep 1 (< 200 Ω m)
 - KB 3 og Rep 3 (1500–2000 Ω m)
 - Rep 2 (>5000 Ω m)
- Driftsdata fra de katodiske testfeltene viser at økende spesifikk elektrisk motstand i reparasjonsmørtlene øker behovet for påtrykt spenning mellom anode og armering, for å oppnå beskyttelseskriteriet på 24 timers depolarisering på 100 mV. På samme måte øker spenningsbehovet dersom motstanden i KB-mørtelen er mye høyere enn i underlaget (betong/reparasjonsmørtel).
- Behovet for beskyttelsesstrøm avtar med temperaturen, det er dermed behov for mindre strøm i vinterhalvåret enn i sommerhalvåret.
- Det er ingen indikasjoner på at de forenklete mekaniske reparasjoner som ble utført på nordsiden av pilarene har hatt nevneverdig innvirkning på armeringens korrosjonsaktivitet.

Innenfor én og samme anodesonde i et KB-anlegg er det ofte både reparerte og ikke-reparert områder (forenklet mekanisk reparasjon). Resultatene fra våre forsøk viser at områder som er reparert bør ha en mest mulig lik spesifikk elektrisk motstand som originalbetongen, for å sikre en jevn strømtilførsel til armeringen – og redusere risikoen for over- eller underbeskyttelse. De ofte benyttede grenseverdiene på 50 – 200 % av brubetongens spesifikke elektriske motstand ligger i et fornuftig område, men må benyttes med skjønn. Det er ikke funnet nødvendig at KB-mørtlenes spesifikke motstand er < 50 Ω m, men det vil være en god regel at KB-mørtelens elektriske motstand er mindre eller lik enn reparasjonsmørtelens/betongens motstand. Dette for å hindre syredannelse rundt anoden. Resultatene viser i tillegg at det er viktig å ha referanseelektroder plassert både i reparerte og ikke-reparerte områder for å sikre at man har god oversikt over beskyttelsesgrad.

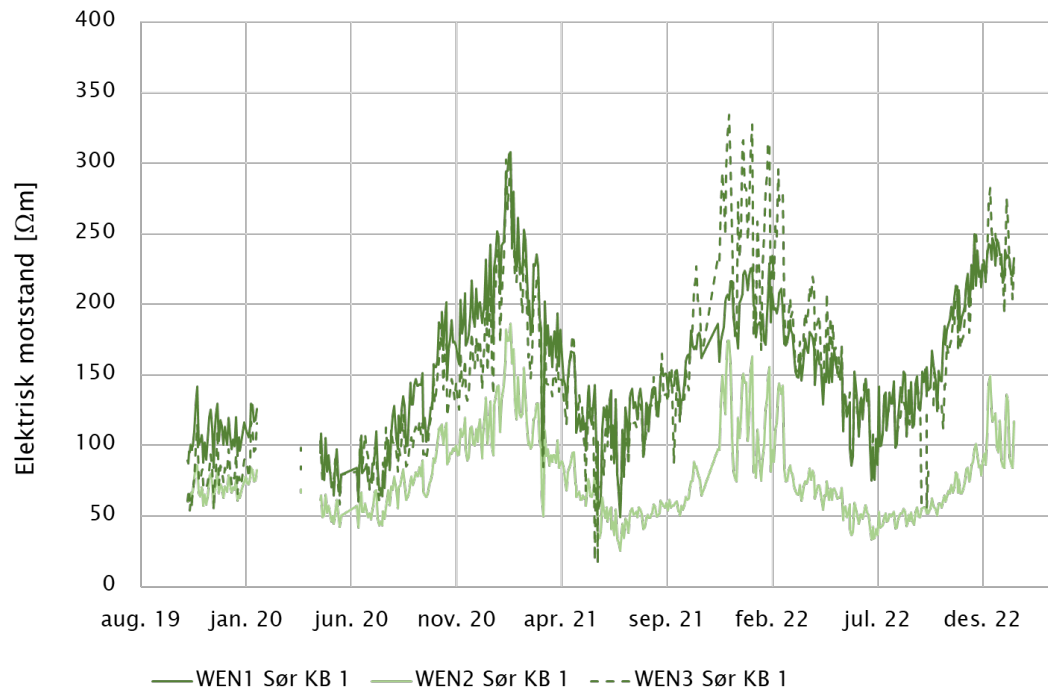
For å kunne stille krav til reparasjons-/KB-mørtlenes spesifikke elektriske motstand må også originalbetongens motstand bestemmes. Dette kan gjøres ved en kombinasjon av mapping med håndholdt utstyr i felt og utboring av kjerner for laboratorietesting. Kravene til mørtlenes spesifikke elektriske motstand, bestemt ved 90 døgns alder, må relateres til betongens motstand bestemt ved laboratorieprøving, dvs. etter vannlagring ved 20 °C.

6 Referanser

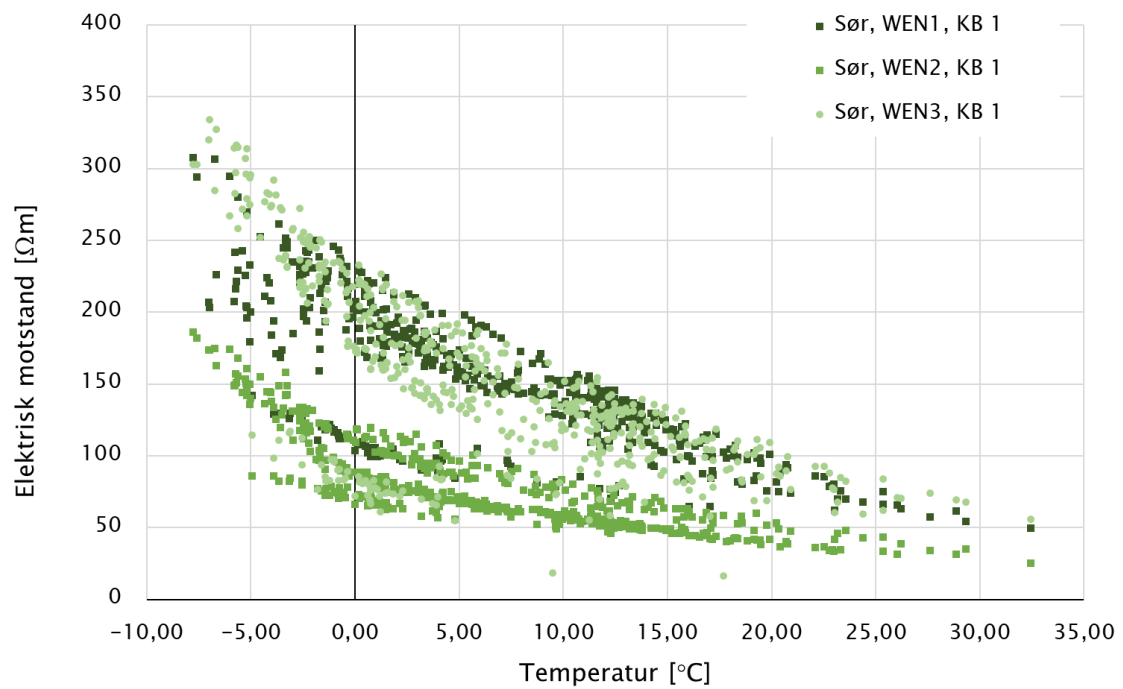
- ASTM. «ASTM C876–22b Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.» 2022.
- Bertolini, Luca, Bernhard Elsener, Pietro Pedferri, Elena Redaelli, og Rob B. Polder. *Corrosion of Steel in Concrete, Prevention, Diagnosis, Repair*. Blackwell Verlag GmbH, 2013.
- Helgestad, Stig H., Karla Hornbostel, Øyvind Bjøntegaard, og Roy E. Antonsen. «Feltforsøk – mørtel egnet for katodisk beskyttelse, Beskrivelse av laboratorieprøving.» *Statens vegvesen rapport 851*. Oslo, Norway: Statens vegvesen, 2023.
- Hornbostel, Karla, Roy E. Antonsen, Stig H. Helgestad, og Odd–Magne Rognan. «Feltforsøk – mørtel egnet for katodisk beskyttelse: Beskrivelse av feltforsøket.» *Statens vegvesen Rapport 671*. Oslo, Norway: Statens vegvesen, 2020.
- Lindland, Jan. *Betongrehabilitering, Reparasjonsmetoder, utførelse og kontroll*. Oslo, Norway: Norsk forening for betongrehabilitering, 2016.
- «NS–EN 12696:2022.» 2022.
- «NS–EN 1504–10:2017+NA:2019.» 2019.
- Polder, Rob B. «Test methods for on site measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC–154 technical recommendation.» *Construction and Building Materials 15(2)*, 2001.
- Rodum, Eva, og Bård M. Pedersen. «Inspeksjon av bruer med alkalireaksjoner. Felt- og laboratoriemetoder.» *Statens vegvesen rapport 852*. Oslo, Norway: Statens vegvesen, 2022.
- Statens vegvesen. «Prosesskode 2, Standard beskrivelse for bruer og kaier, Hovedprosess 8.» 2018.
- Østvik, Jan Magnus. «Thermal Aspects of Corrosion of Steel in Concrete: effect of low temperature on the resistivity and the cathodic reaction rate.» *Doctoral Thesis. Department of Structural Engineering. Trondheim, Norwegian University of Science and Technology*. Trondheim, Norway, 2005.

A Vedlegg – Motstandsmålinger for alle motstandssensorer

A.1 Felt Sør 1

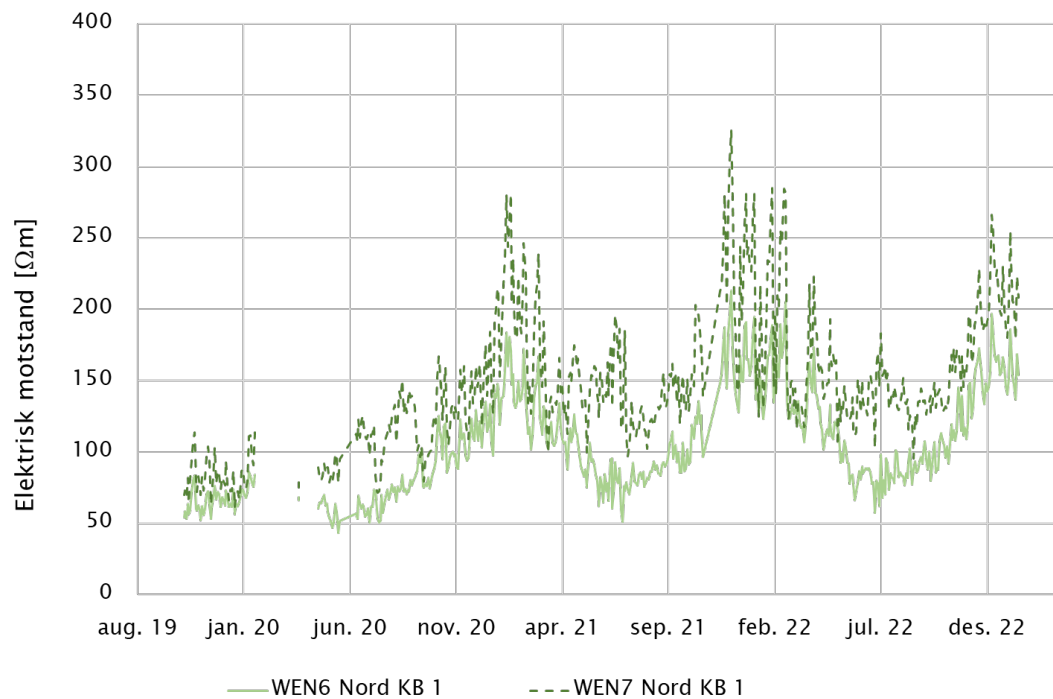


Figur 28 – Motstandsmålinger (WEN) vs. tid, målinger sørside, KB-mørtel KB 1.

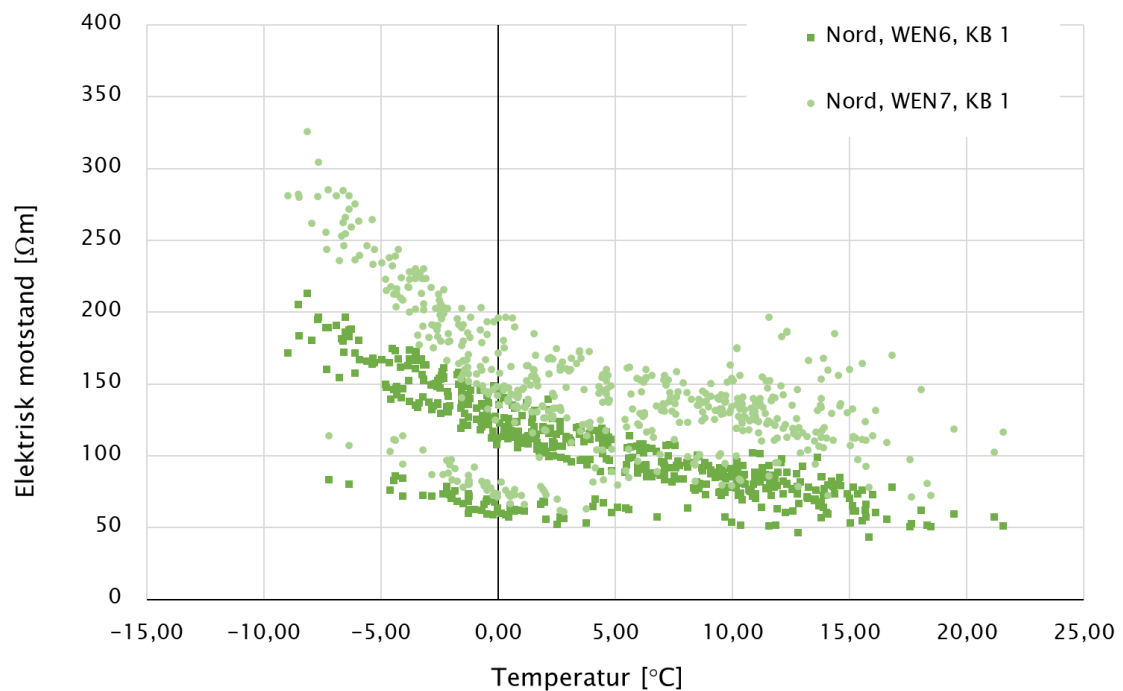


Figur 29 – Motstandsmålinger (WEN) vs. temperatur, målinger sørside, KB-mørtel KB 1.

A.2 Felt Nord 1

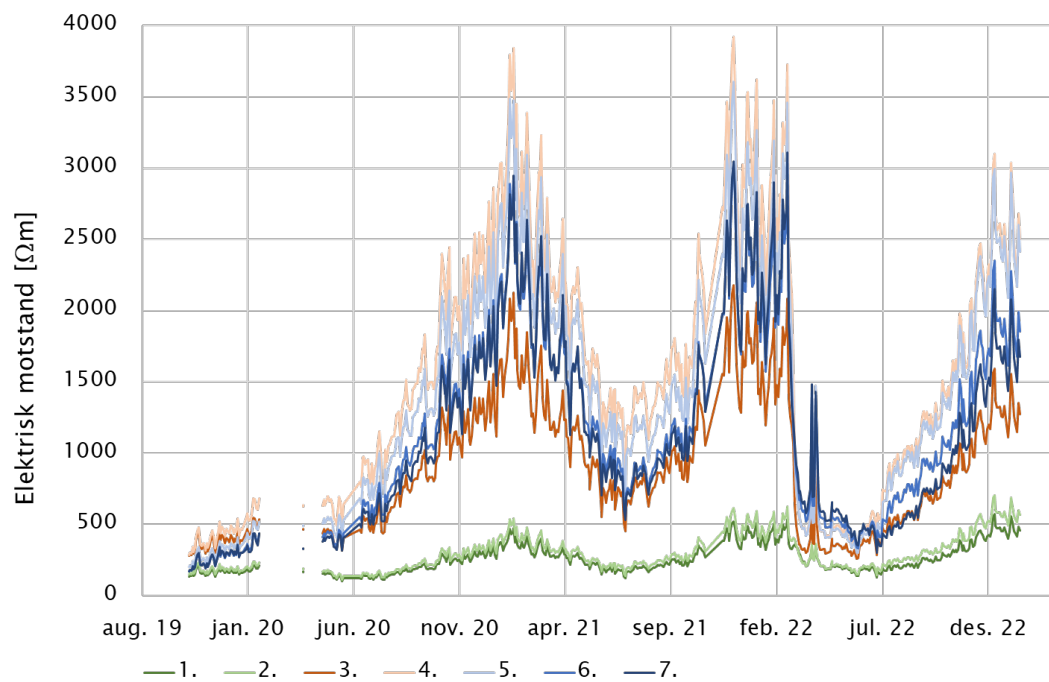


Figur 30 – Motstandsmålinger (WEN) vs. tid, målinger nordside, KB-mørtel KB 1.



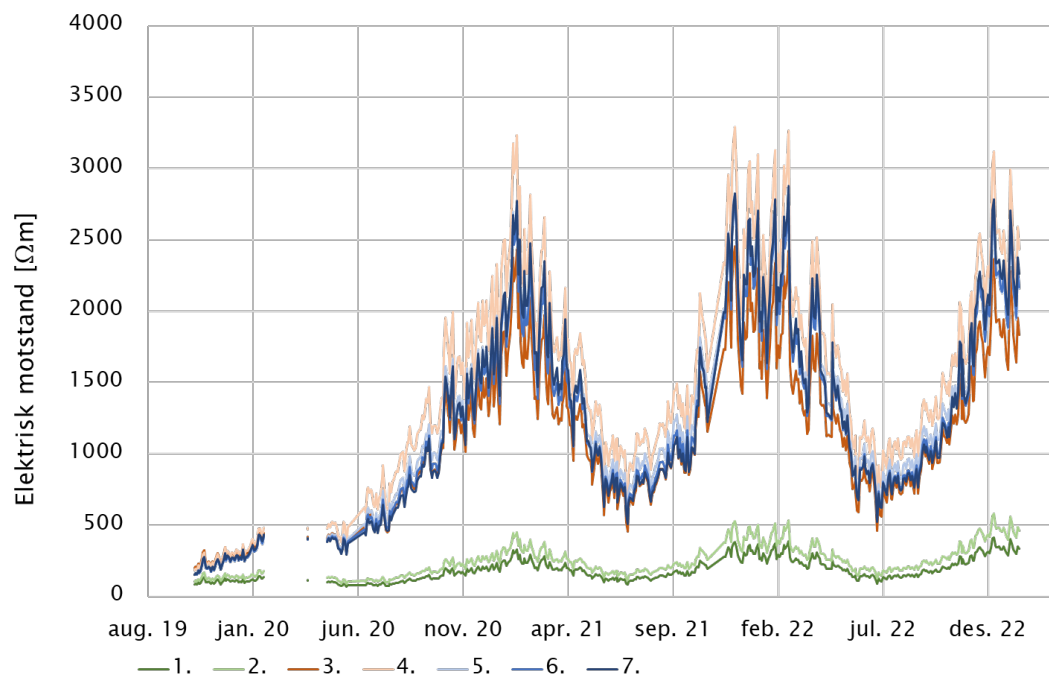
Figur 31 – Motstandsmålinger (WEN) vs. temperatur, målinger nordside, KB-mørtel KB 1.

MRE1 Nord 1

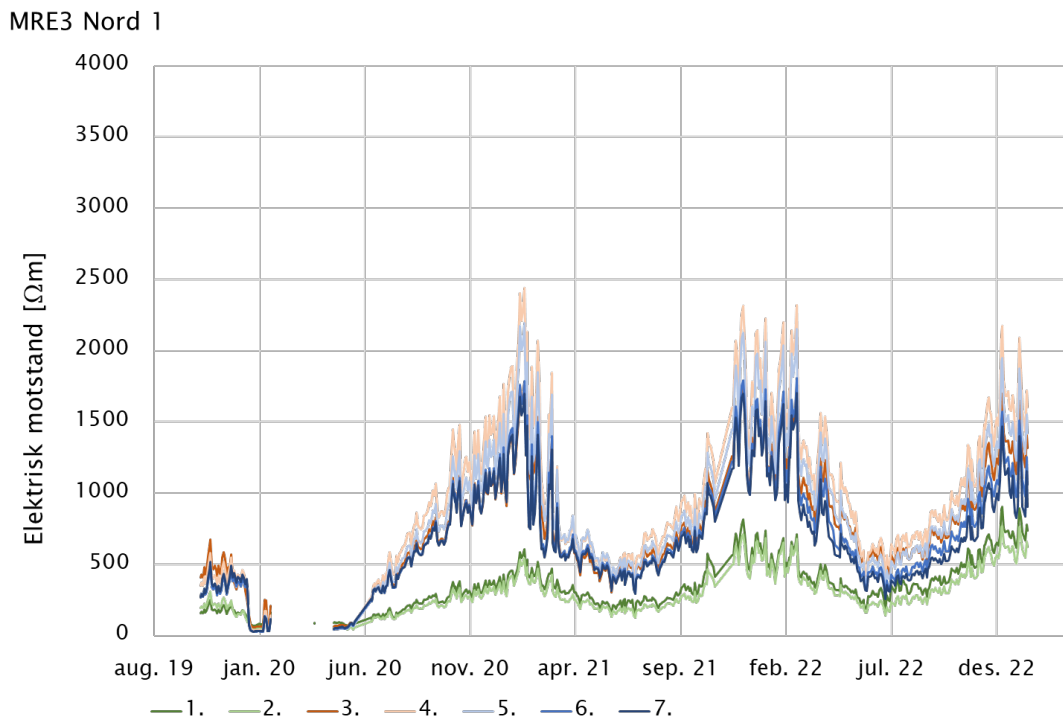


Figur 32 – Motstandsmålinger (MRE) vs. tid, målinger nordside MRE1, KB-mørtel KB 1 (1. og 2. måling), Rep-mørtel Rep 1 (5.-7. måling).

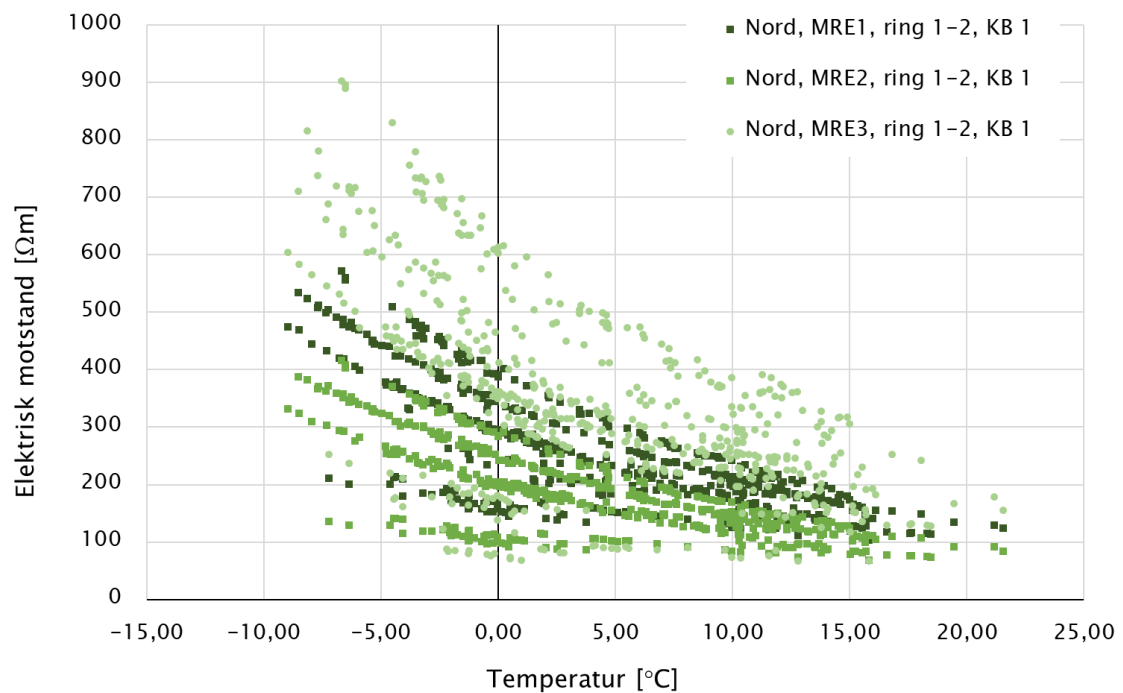
MRE2 Nord 1



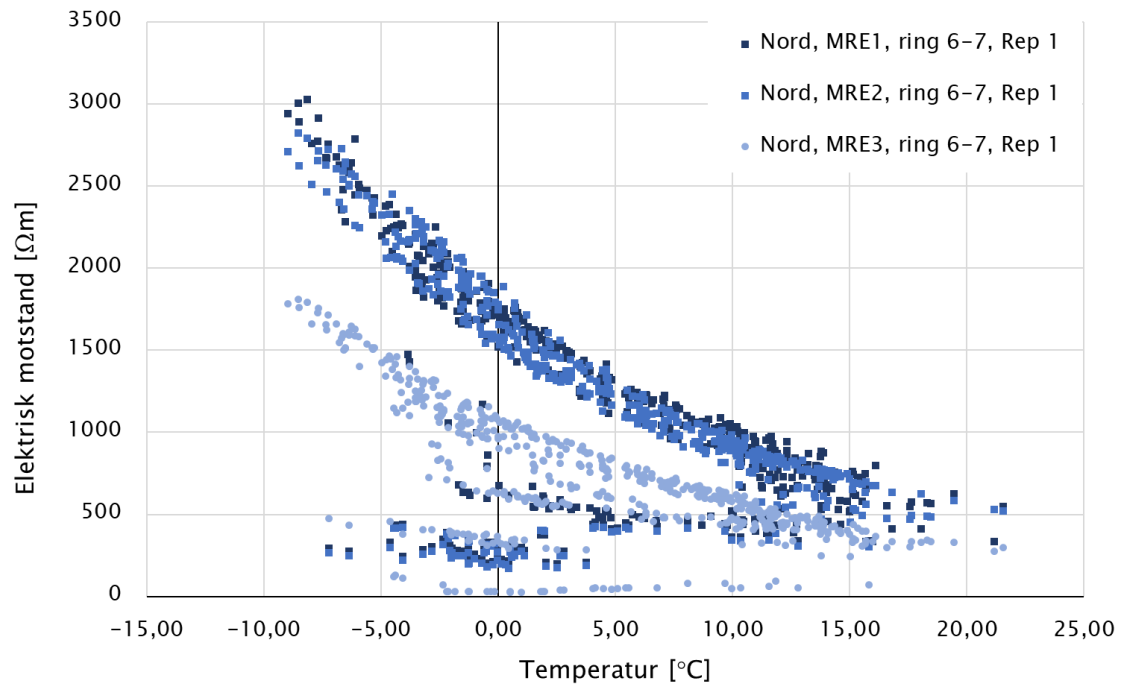
Figur 33 – Motstandsmålinger (MRE) vs. tid, målinger nordside MRE2, KB-mørtel KB 1 (1. og 2. måling), Rep-mørtel Rep 1 (5.-7. måling).



Figur 34 – Motstandsmålinger (MRE) vs. tid, målinger nordside MRE3, KB-mørtel KB 1 (1. og 2. måling), Rep-mørtel Rep 1 (5.-7. måling).

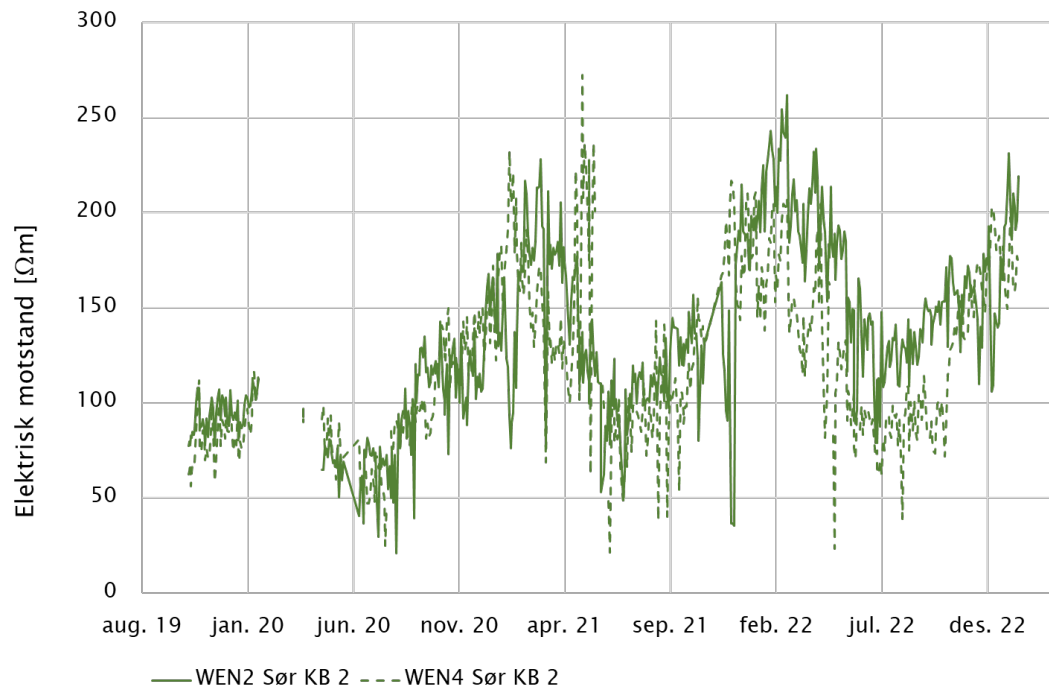


Figur 35 – Motstandsmålinger (MRE, 1. måling mellom ring 1-2) vs. temperatur, målinger nordside, KB-mørtel KB 1.

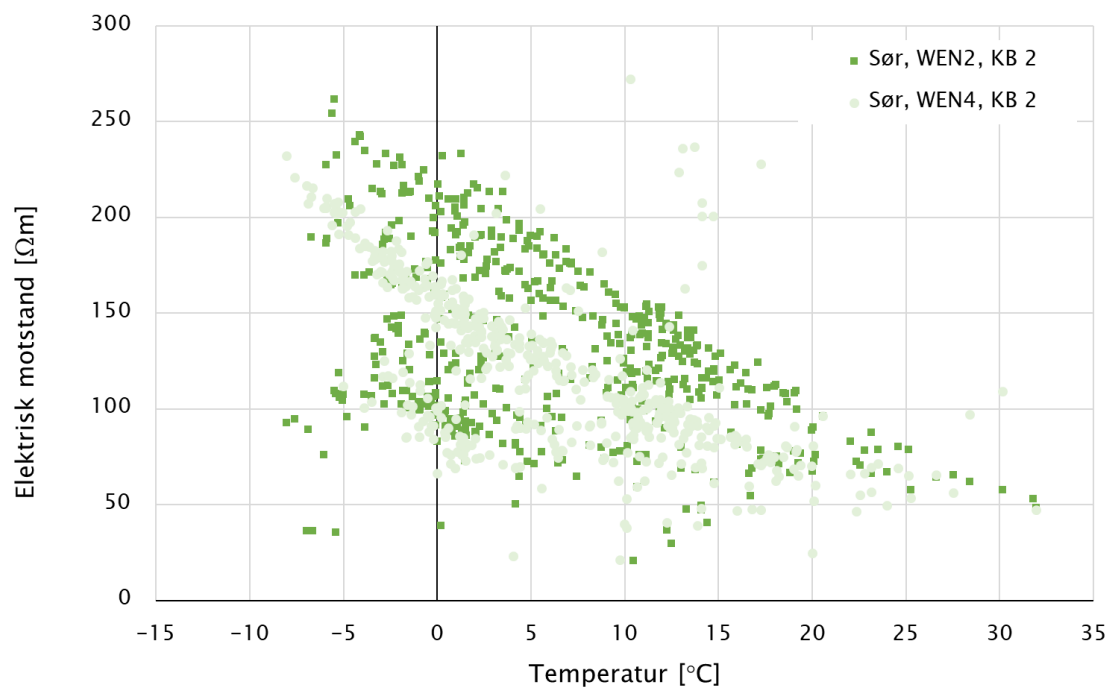


Figur 36 – Motstandsmålinger (MRE, 6. måling mellom ring 6-7) vs. temperatur, målinger nordside, Rep-mørtel Rep 1.

A.3 Felt Sør 2

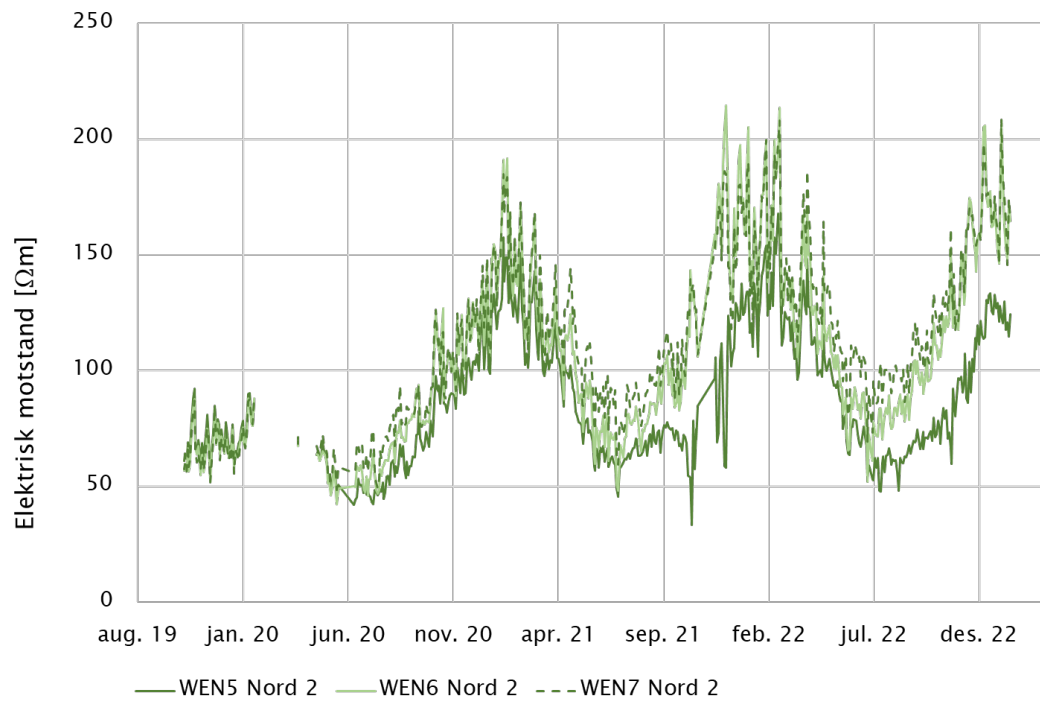


Figur 37 – Motstandsmålinger (WEN) vs. tid, målinger sørside, KB-mørtel KB 2.

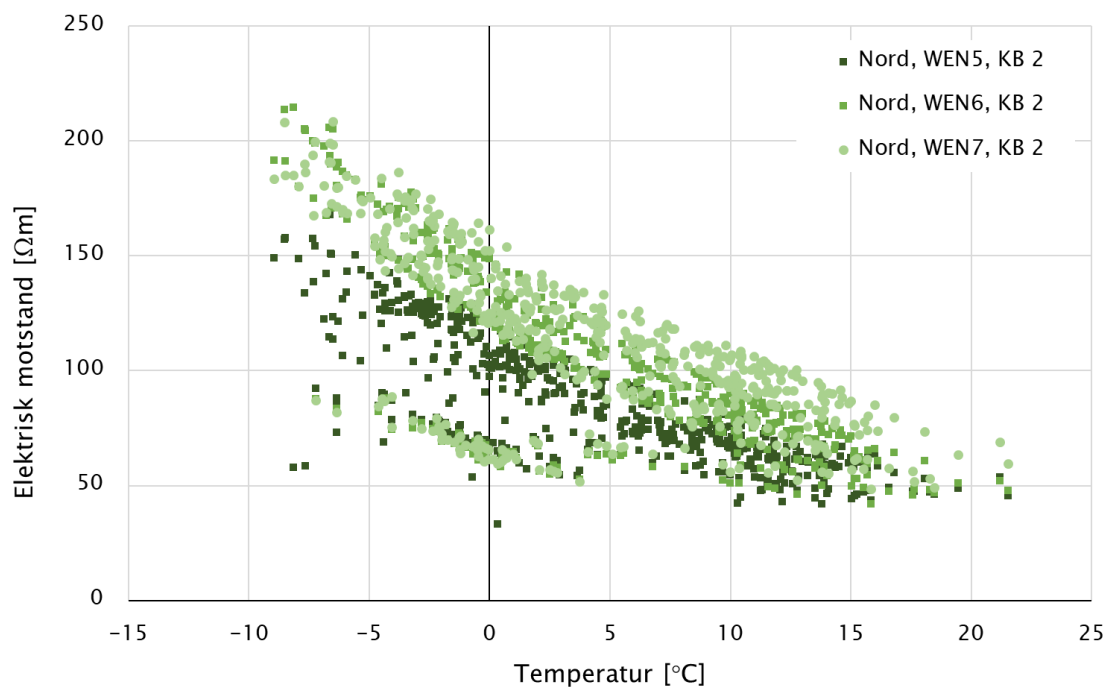


Figur 38 – Motstandsmålinger (WEN) vs. temperatur, målinger sørside, KB-mørtel KB 2.

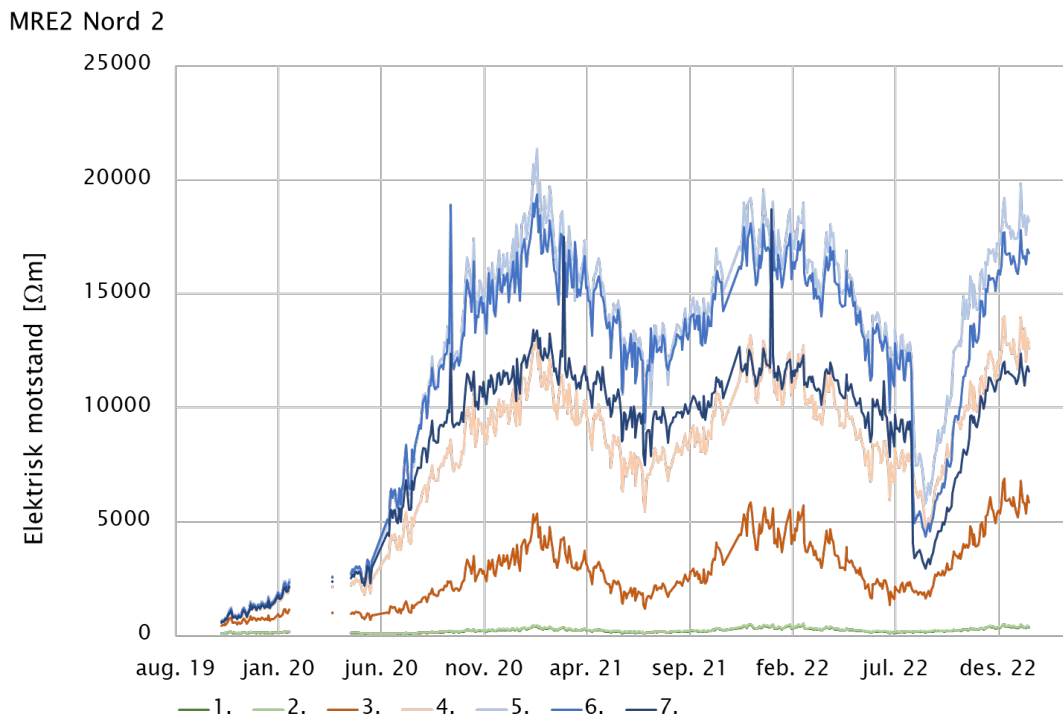
A.4 Felt Nord 2



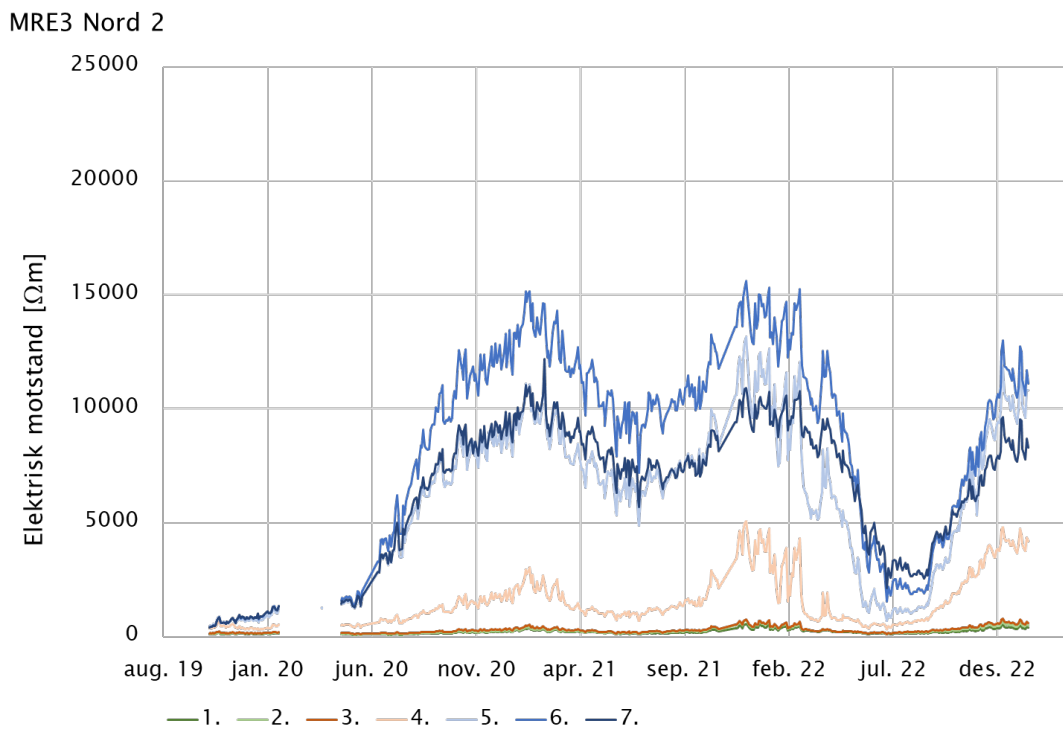
Figur 39 – Motstandsmålinger (WEN) vs. tid, målinger nordside, KB-mørtel KB 2.



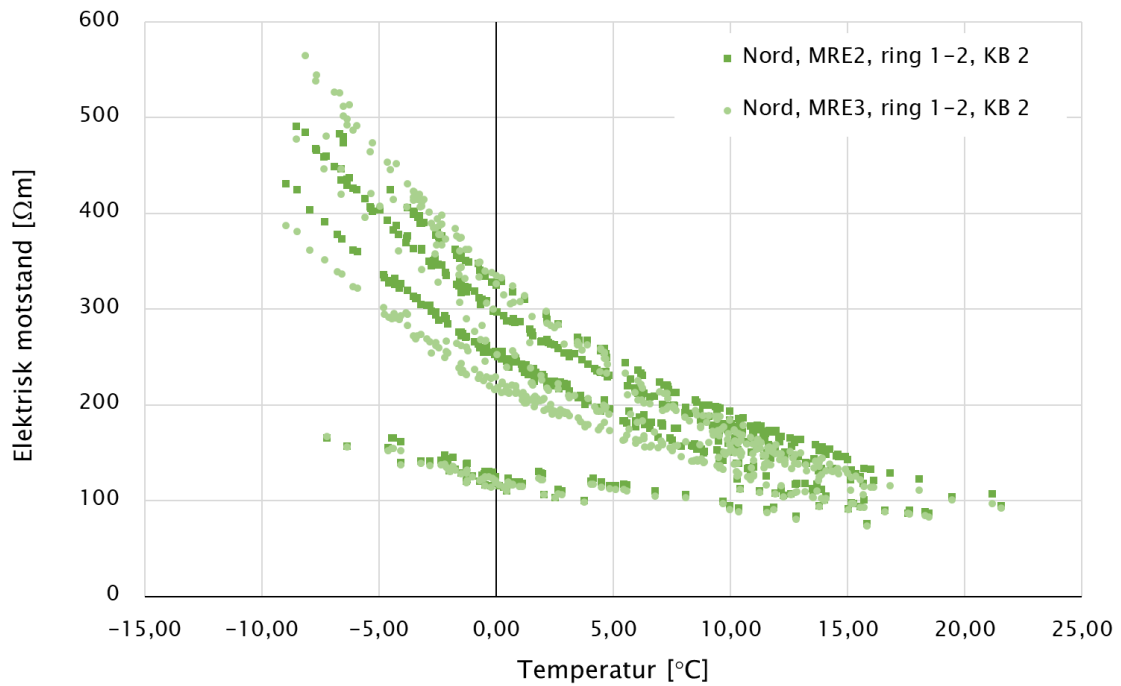
Figur 40 – Motstandsmålinger (WEN) vs. temperatur, målinger nordside, KB-mørtel KB 2.



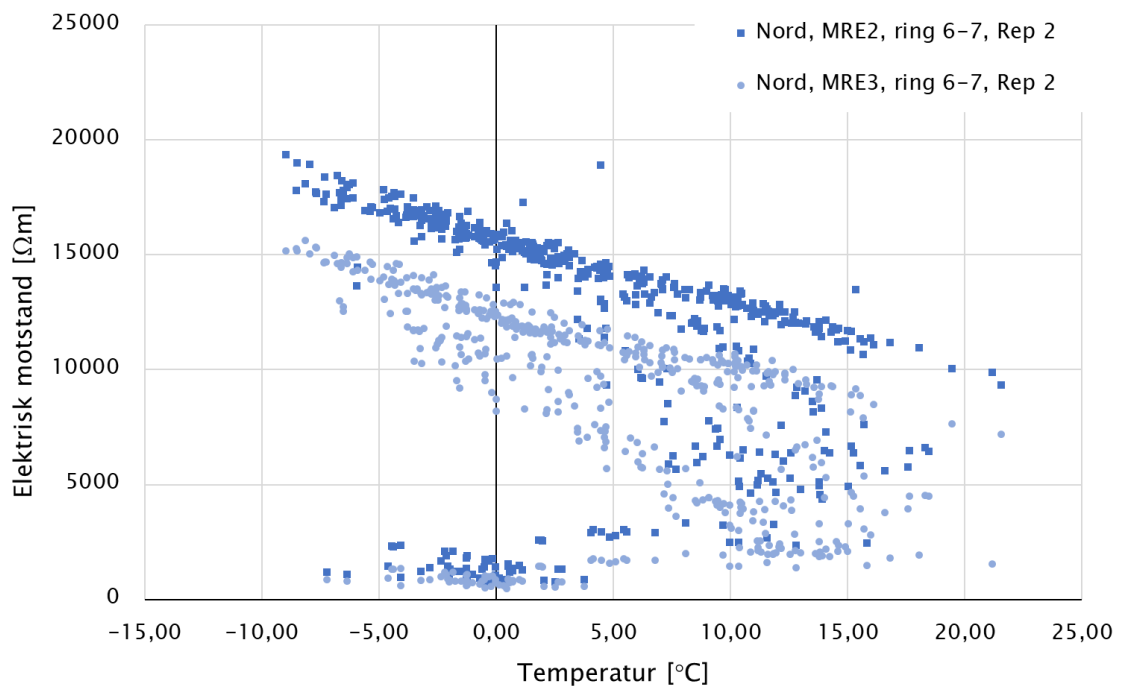
Figur 41 – Motstandsmålinger (MRE) vs. tid, målinger nordside MRE2, KB-mørtel KB 2 (1. og 2. måling), Rep-mørtel Rep 2 (5.-7. måling).



Figur 42 – Motstandsmålinger (MRE) vs. tid, målinger nordside MRE3, KB-mørtel KB 2 (1. og 2. måling), Rep-mørtel Rep 2 (5.-7. måling).



Figur 43 – Motstandsmålinger (MRE, 1. måling mellom ring 1-2) vs. temperatur, målinger nordside, KB-mørtel KB 2.

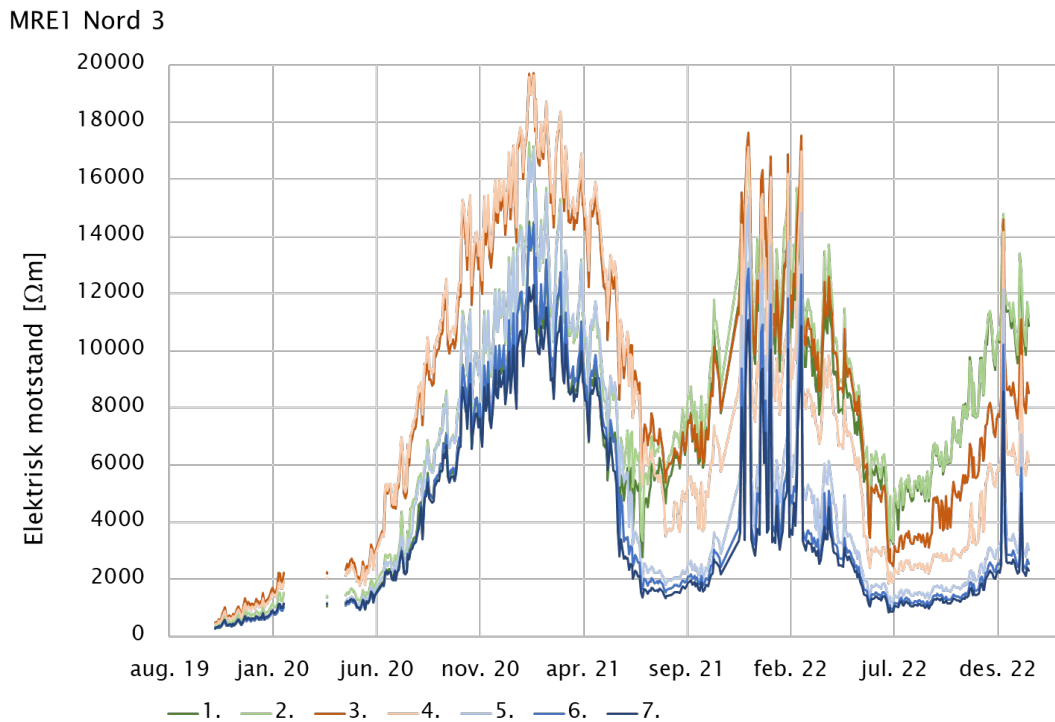


Figur 44 – Motstandsmålinger (MRE, 6. måling mellom ring 6-7) vs. temperatur, målinger nordside, Rep-mørtel Rep 2.

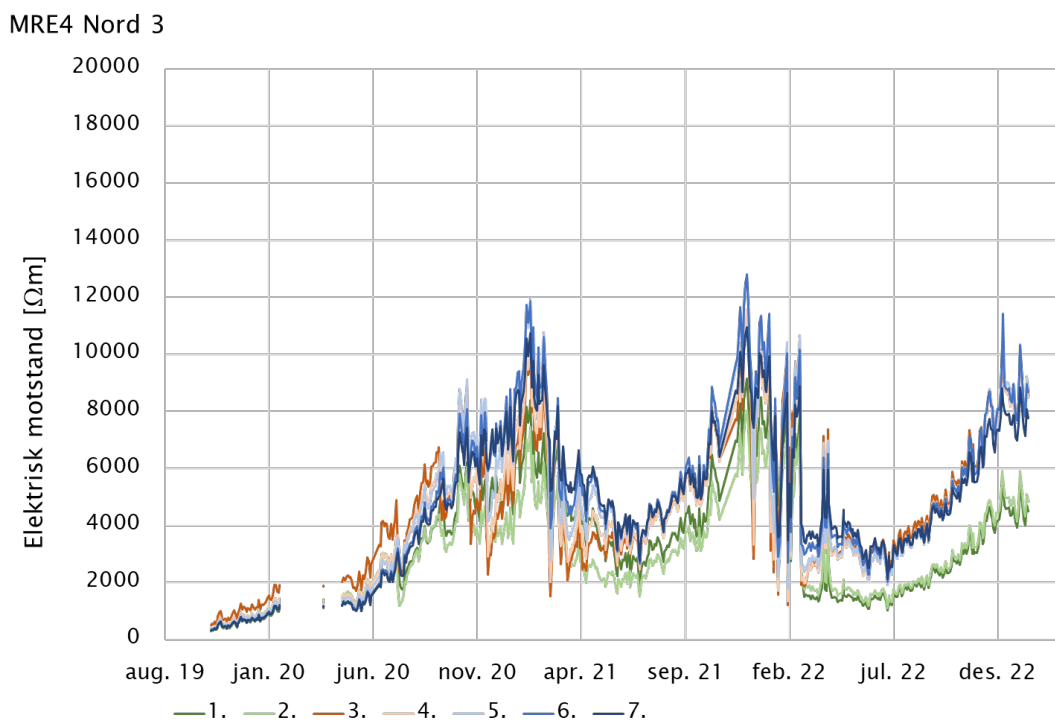
A.5 Felt Sør 3

Ingen målinger

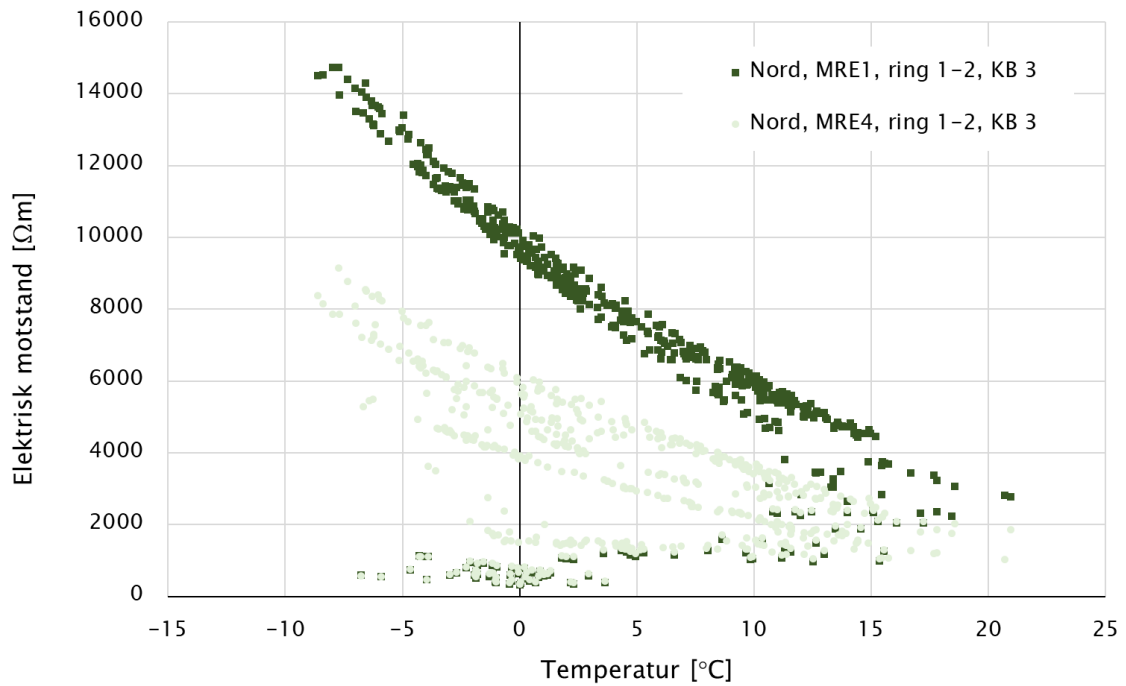
A.6 Felt Nord 3



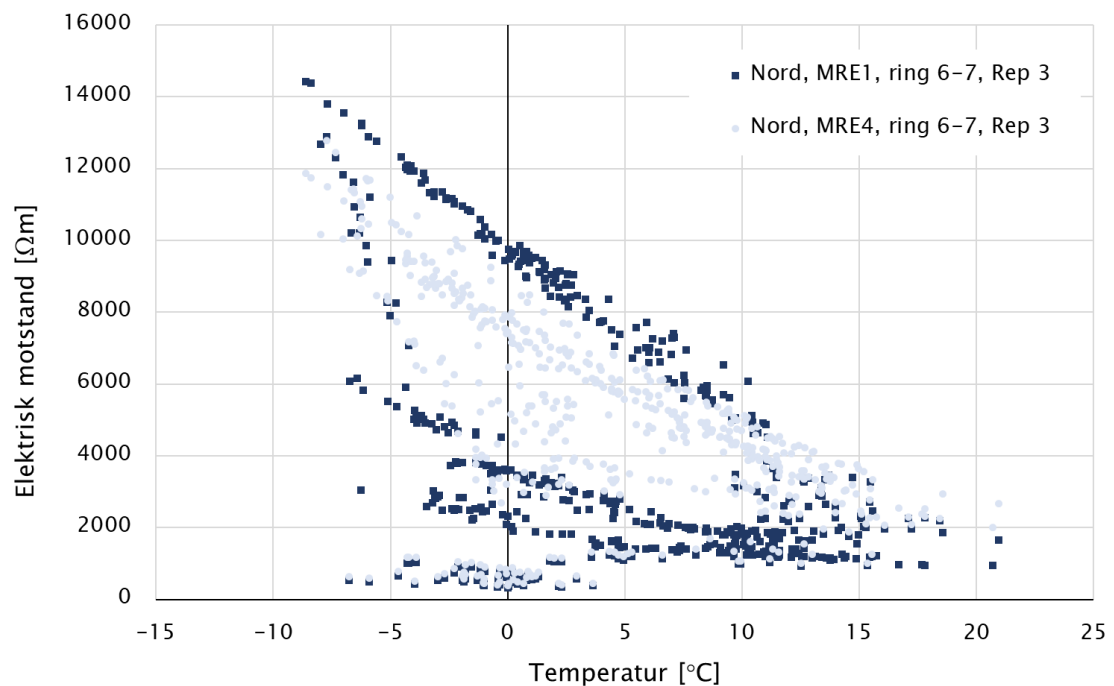
Figur 45 – Motstandsmålinger (MRE) vs. tid, målinger nordside MRE1, KB-mørtel KB 3 (1. og 2. måling), Rep-mørtel Rep 3 (5.-7. måling).



Figur 46 – Motstandsmålinger (MRE) vs. tid, målinger nordside MRE4, KB-mørtel KB 3 (1. og 2. måling), Rep-mørtel Rep 3 (5.-7. måling).



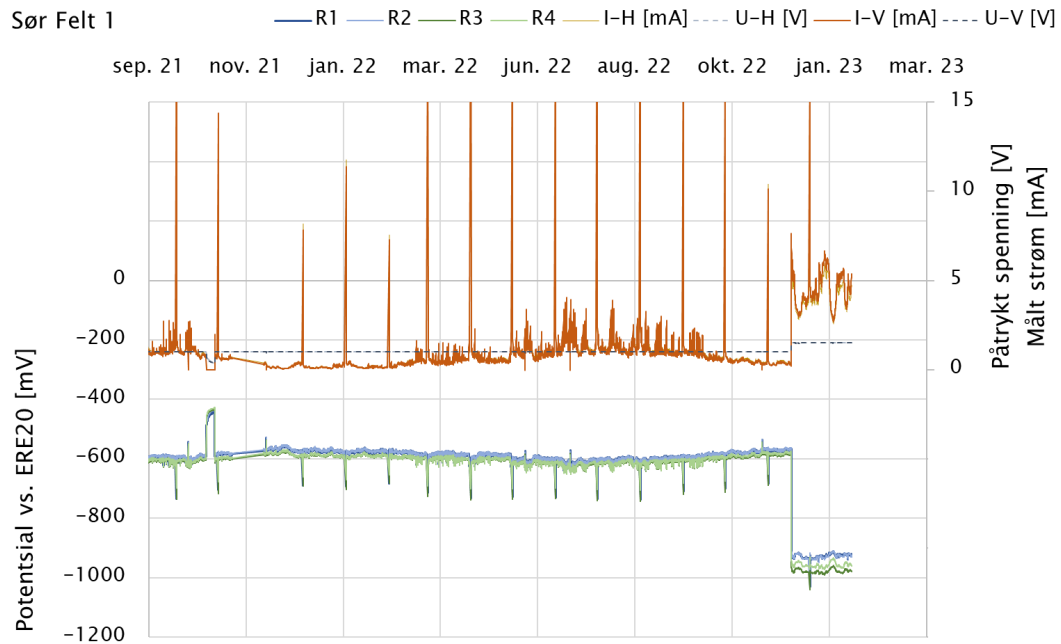
Figur 47 – Motstandsmålinger (MRE, 1. måling mellom ring 1-2) vs. temperatur, målinger nordside, KB-mørtel KB 3.



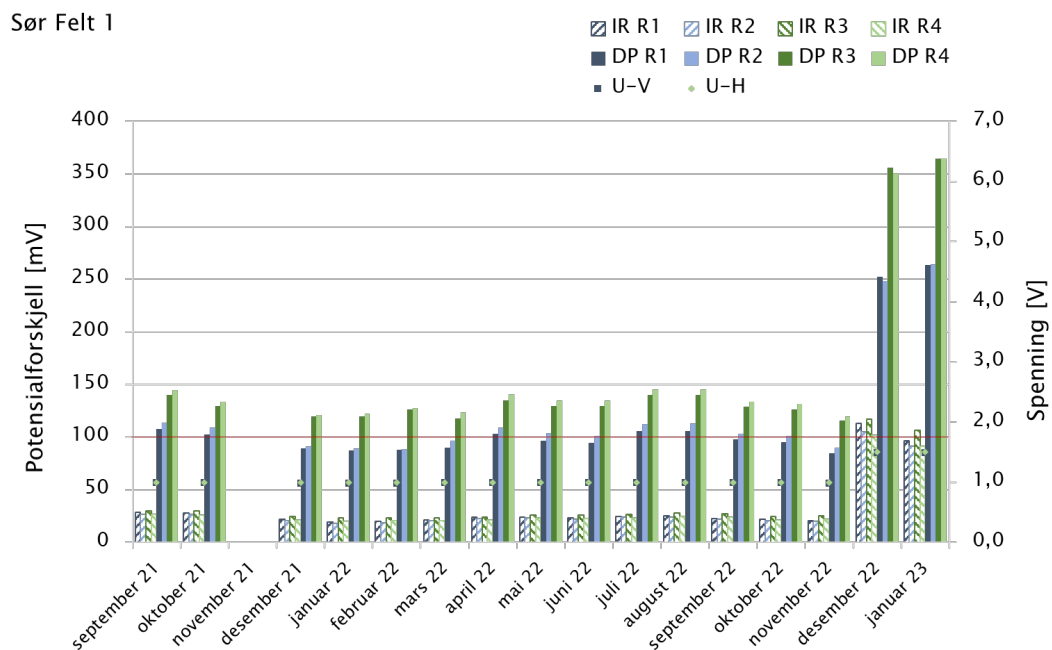
Figur 48 – Motstandsmålinger (MRE, 6. måling mellom ring 6-7) vs. temperatur, målinger nordside, Rep-mørtel Rep 3.

B Vedlegg – Måledata katodisk beskyttelse for alle felt

B.1 Felt Sør 1

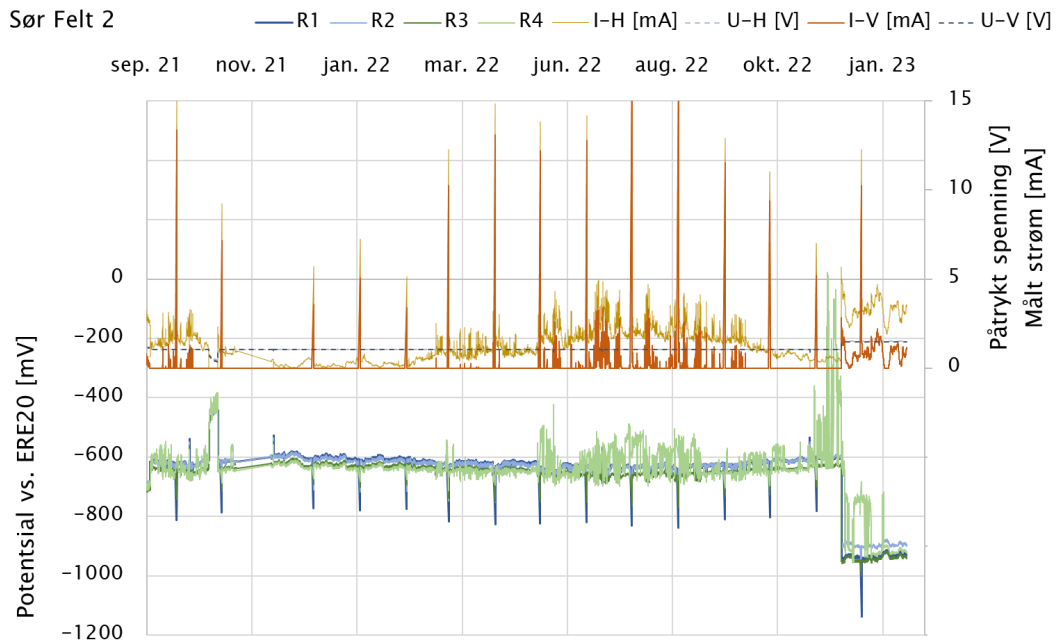


Figur 49 – Loggdata fra KB felt Sør 1.

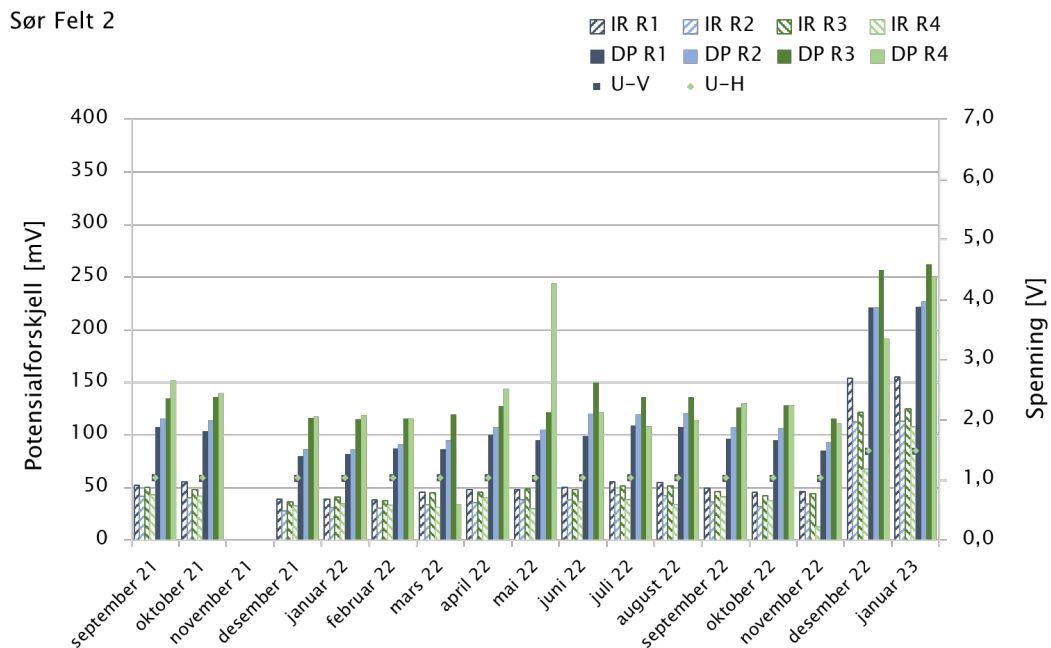


Figur 50 – Felt Sør 1, depolarisasjonsdata.

B.2 Felt Sør 2

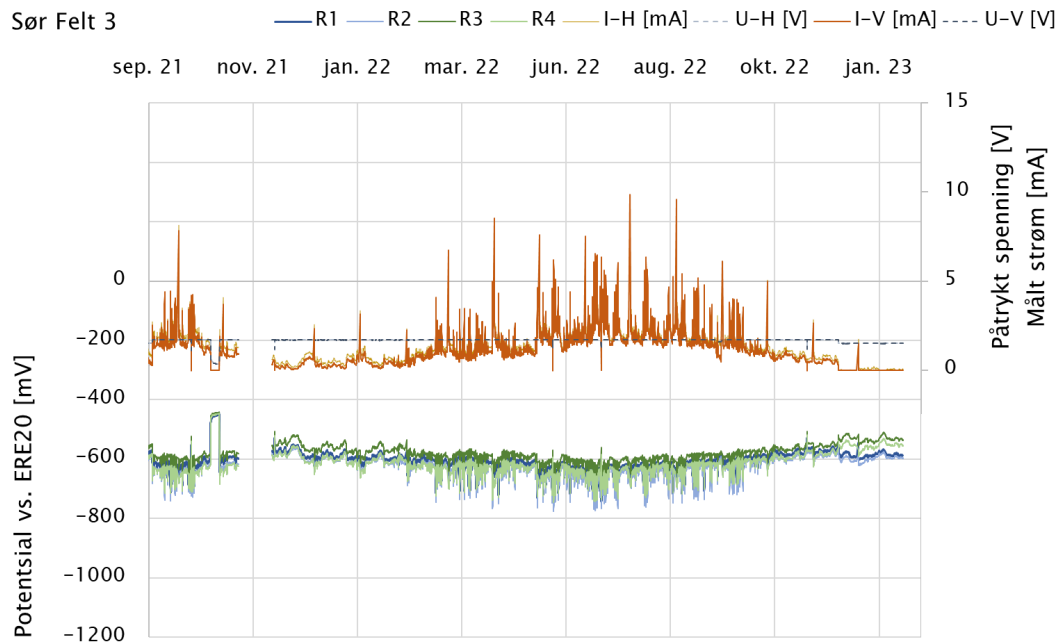


Figur 51 – Loggdata fra KB felt Sør 2, målinger med sensoren I-V anses som upålitelig.

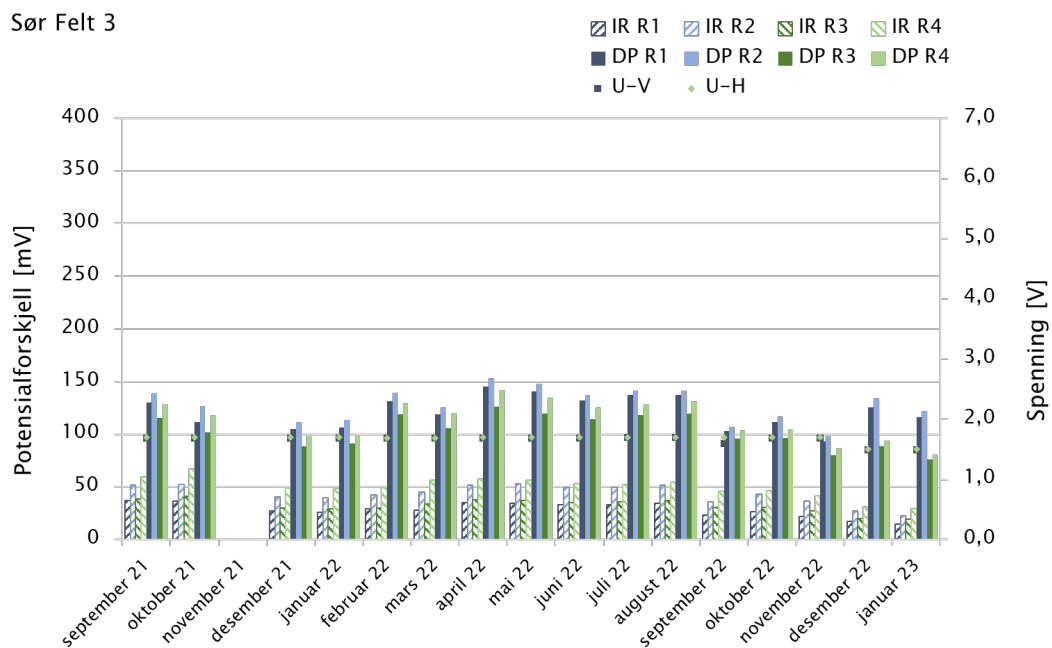


Figur 52 –Felt Sør 2, depolarisasjonsdata.

B.3 Felt Sør 3

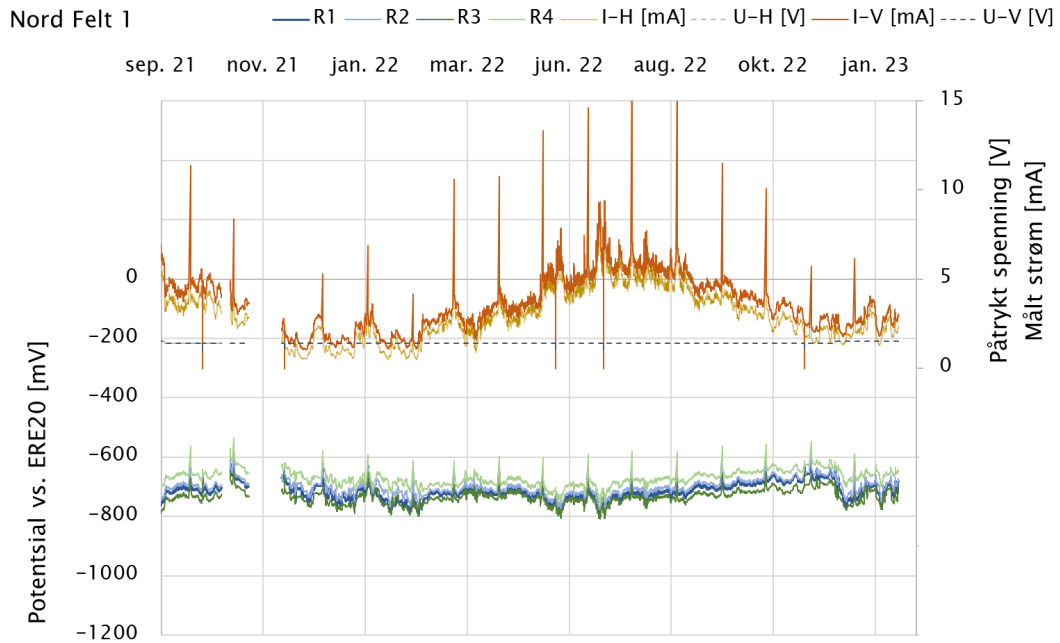


Figur 53 – Loggdata fra KB felt Sør 3.

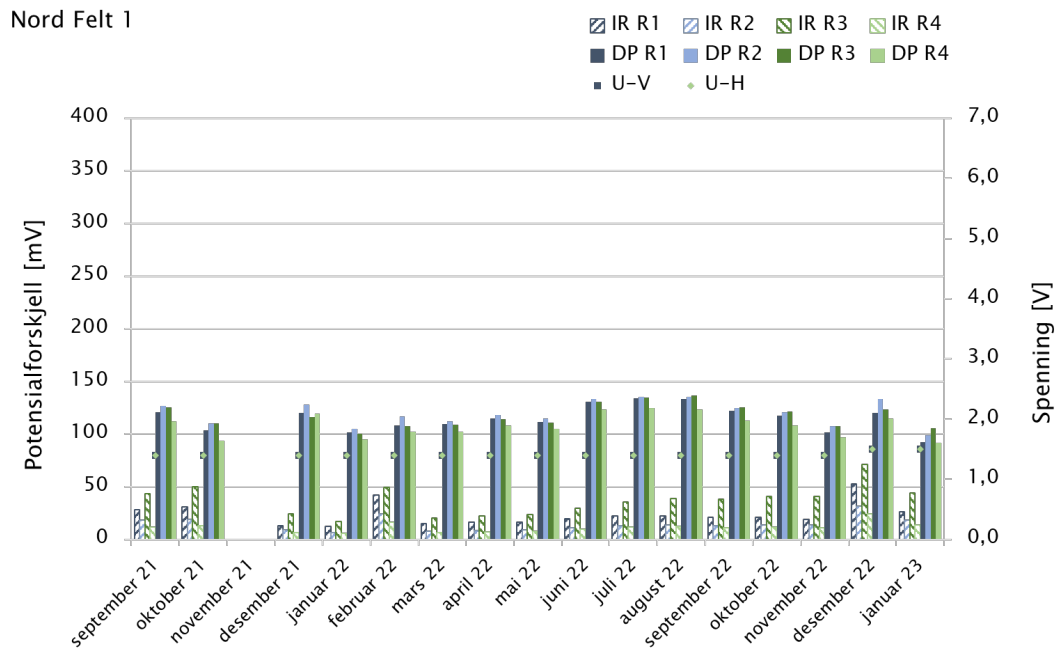


Figur 54 – Felt Sør 3, depolarisasjonsdata.

B.4 Felt Nord 1

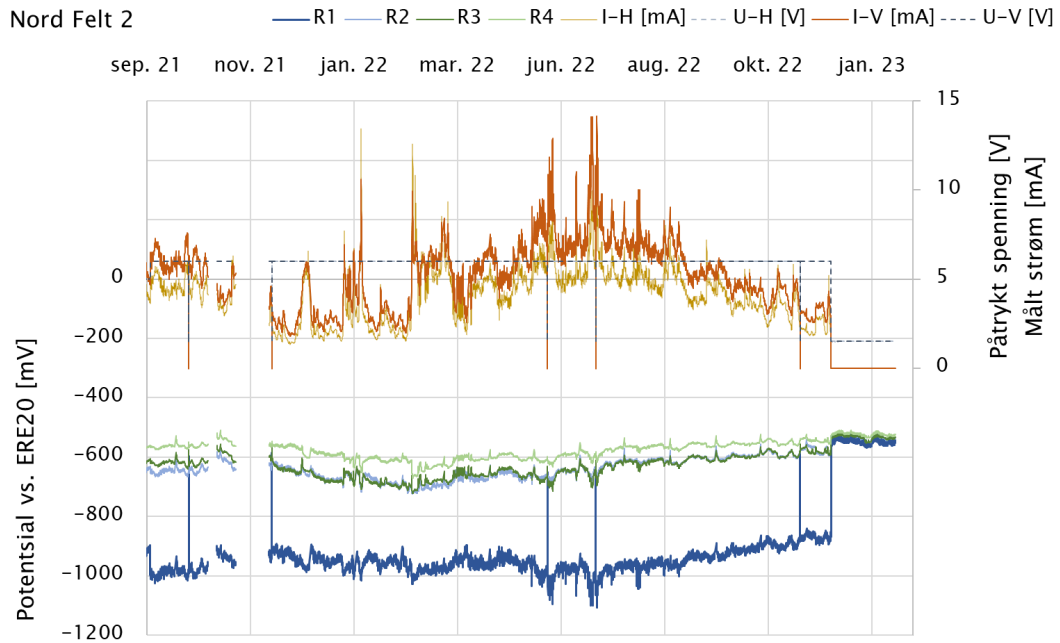


Figur 55 – Loggdata fra KB felt Nord 1.

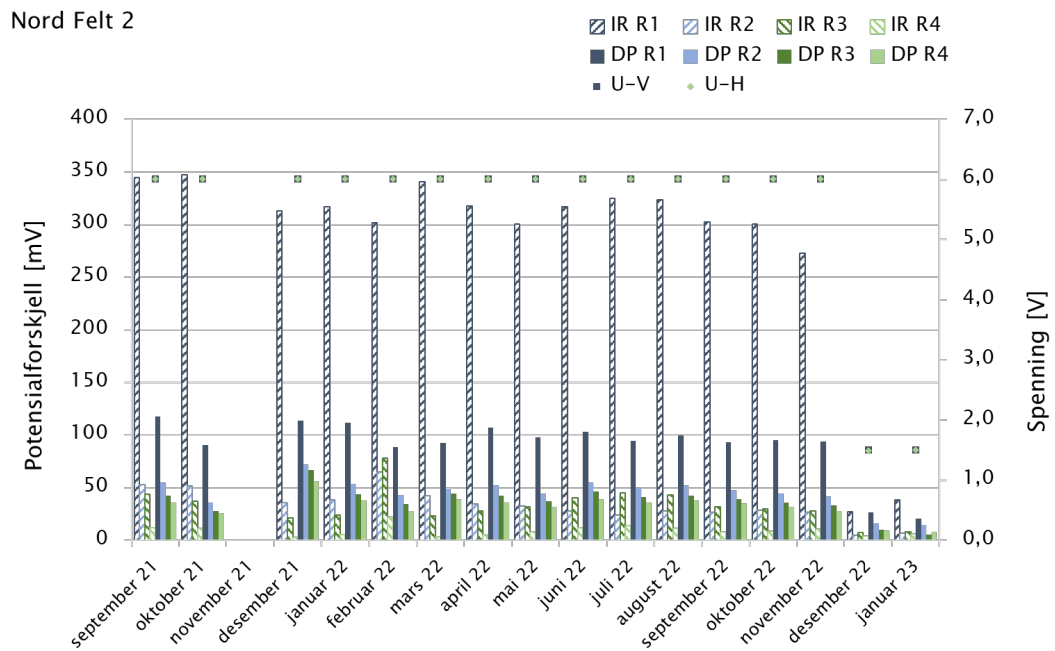


Figur 56 – Felt Nord 1, depolarisasjonsdata.

B.5 Felt Nord 2

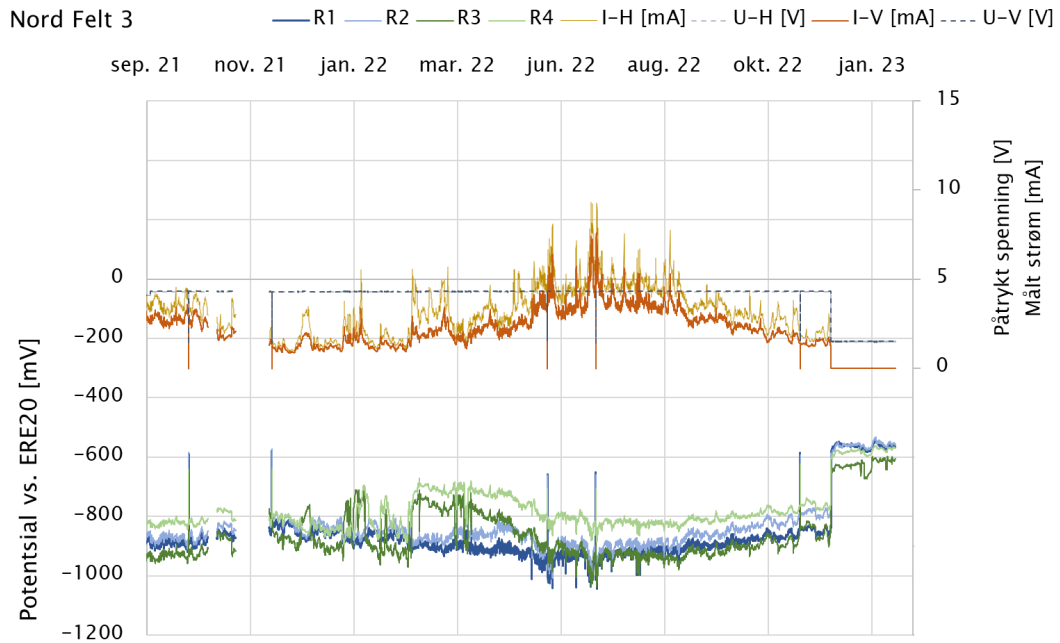


Figur 57 – Loggdata fra KB felt Nord 2.

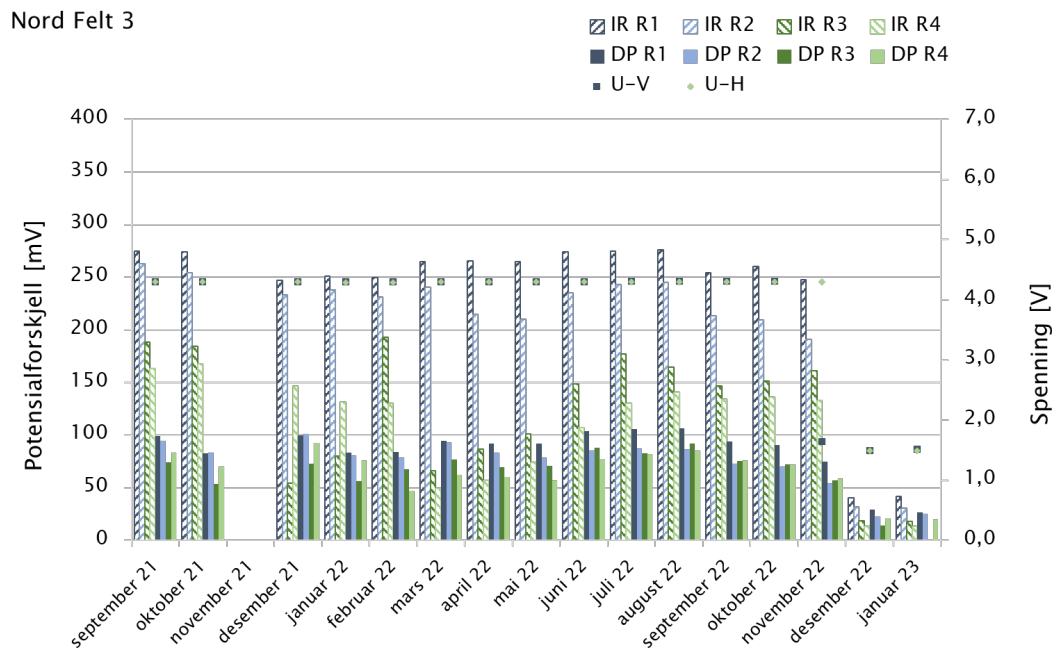


Figur 58 – Felt Nord 2, depolarisasjonsdata.

B.6 Felt Nord 3

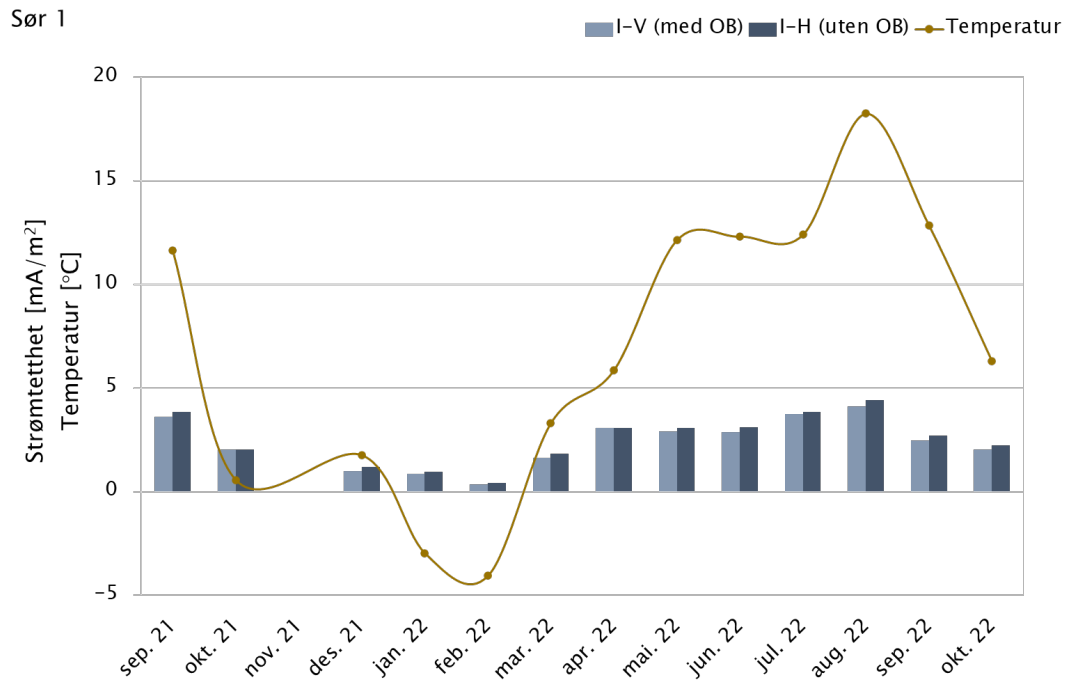


Figur 59 – Loggdata fra KB felt Nord 3.

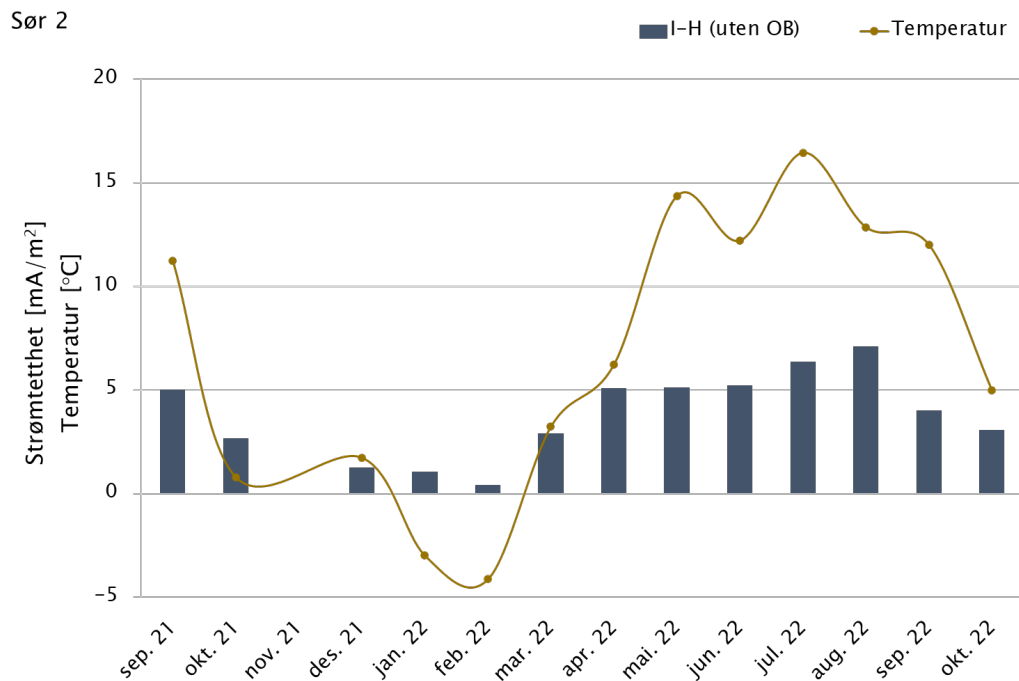


Figur 60 – Felt Nord 3, depolarisasjonsdata.

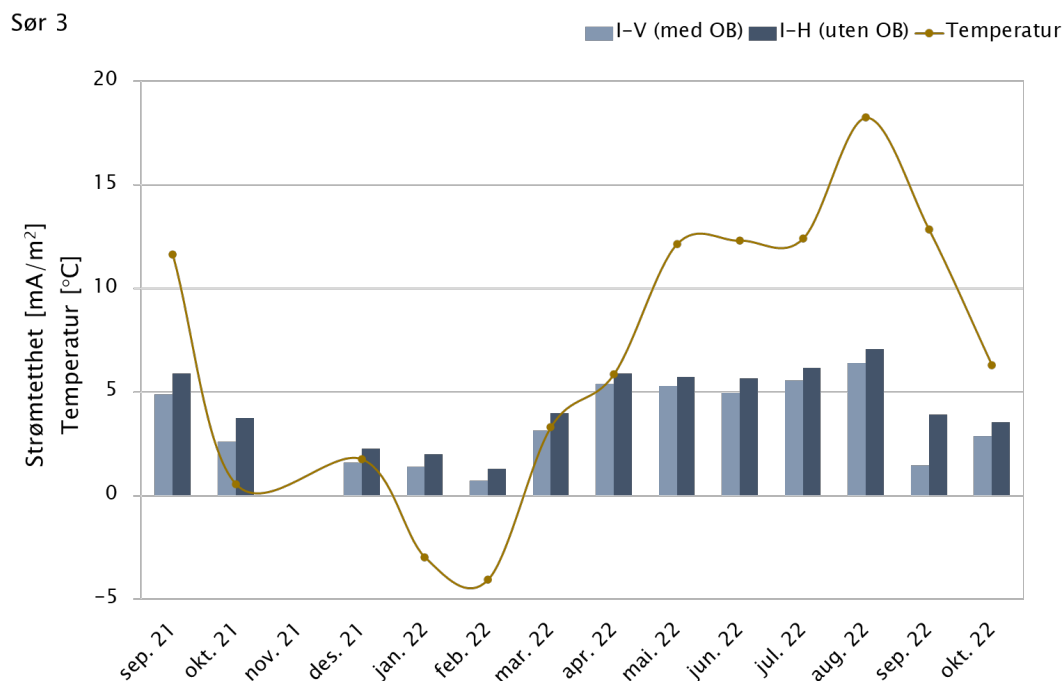
C Vedlegg – Strømtetthet vs. temperatur og overflatebehandling



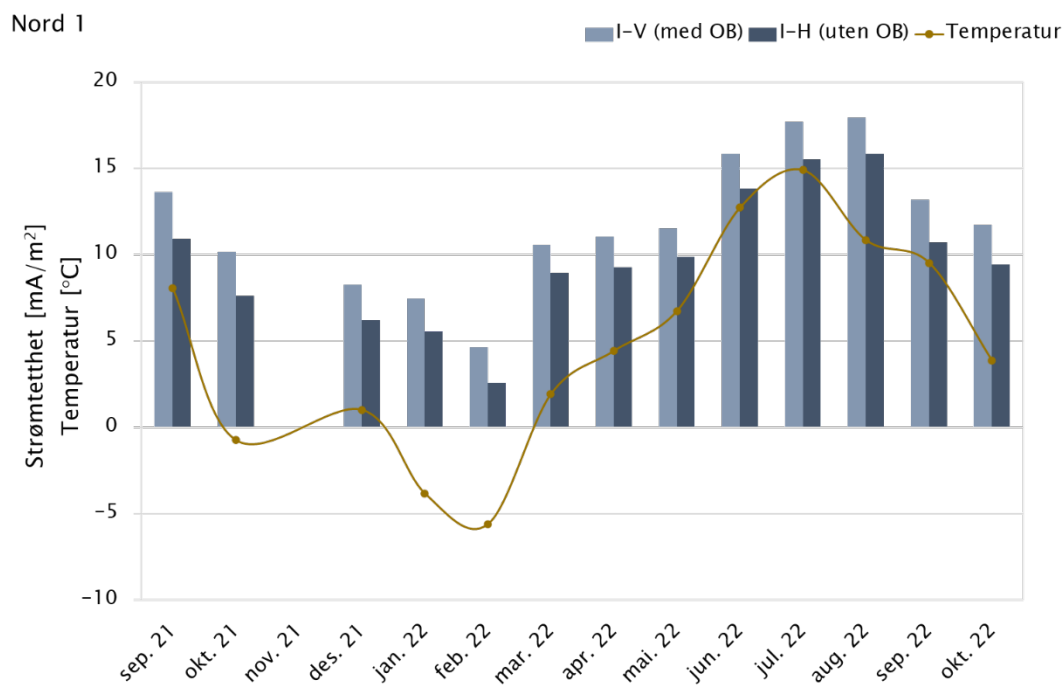
Figur 61 – Strømtetthet på felt Sør 1 i tidsrom med konstant spenning (U_{optimal} , 1,0 V).



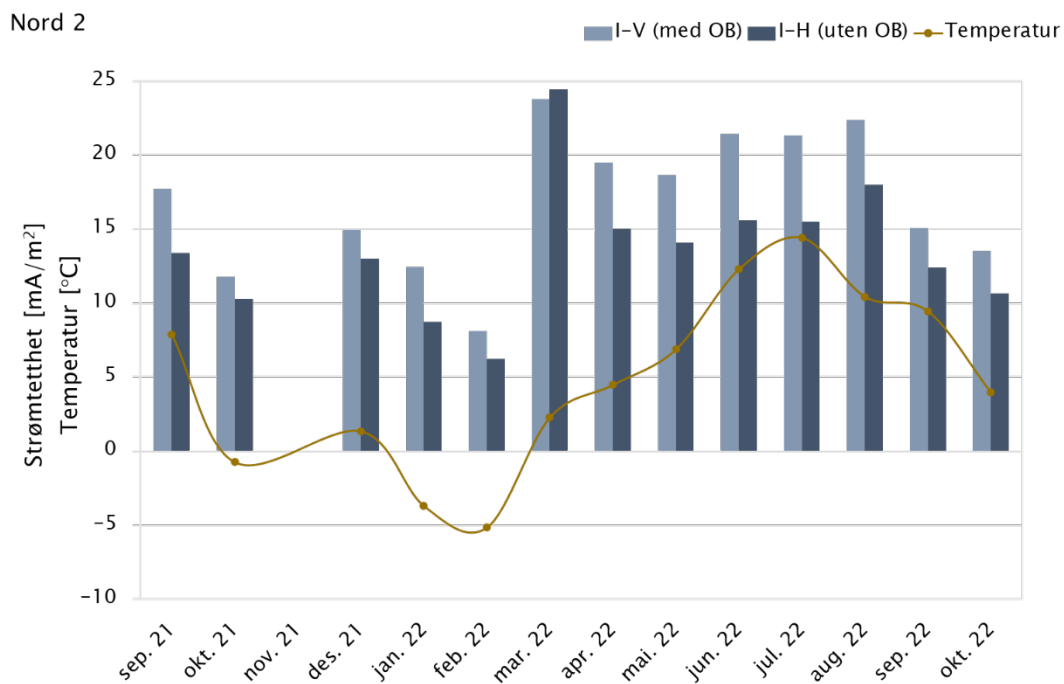
Figur 62 – Strømtetthet på felt Sør 2 i tidsrom med konstant spenning (U_{optimal} , 1,0 V).



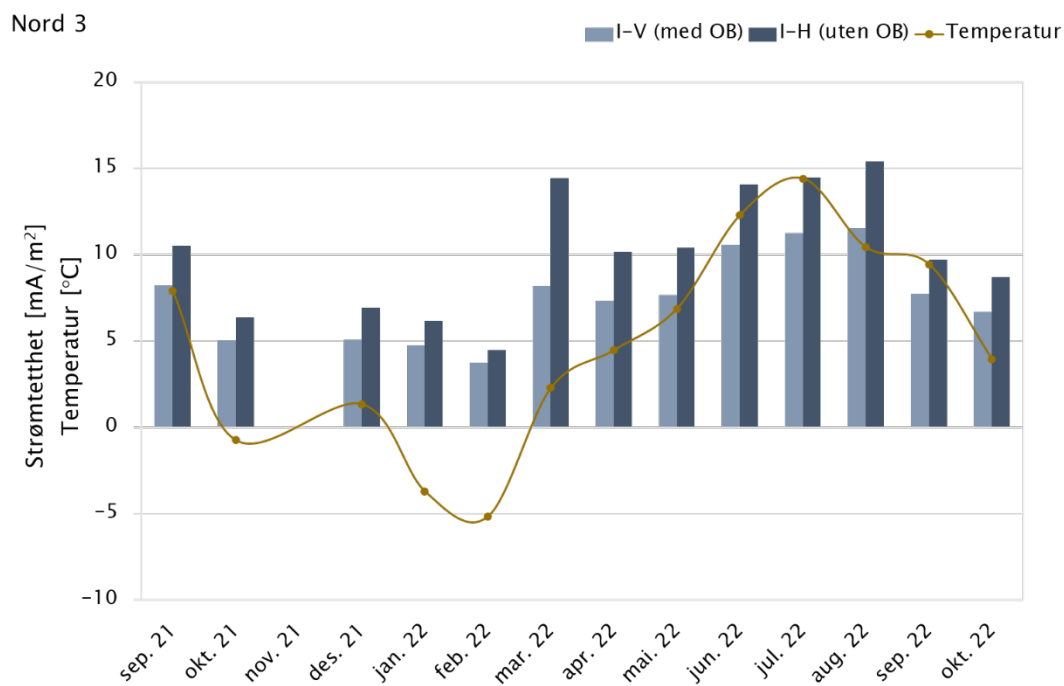
Figur 63 – Strømtetthet på felt Sør 3 i tidsrom med konstant spenning (U_{optimal} , 1,7 V).



Figur 64 – Strømtetthet på felt Nord 1 i tidsrom med konstant spenning (U_{optimal} , 1,4 V).



Figur 65 – Strømtetthet på felt Nord 2 i tidsrom med konstant spenning (U_{optimal} , 6,0 V).



Figur 66 – Strømtetthet på felt Nord 3 i tidsrom med konstant spenning (U_{optimal} , 4,3 V).



Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf: (+47) 22 07 30 00

firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag