

Feltforsøk – mørtel egnet for katodisk beskyttelse

Beskrivelse av laboratorieprøving
FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 851



Tittel

Feltforsøk – mørtel egnet for katodisk beskyttelse

Undertittel

Beskrivelse av laboratorieprøving FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017–2021

Forfatter

Stig Henning Helgestad, Karla Hornbostel, Øyvind Bjøntegaard, Roy Antonsen

Avdeling

Konstruksjoner

Seksjon

Konstruksjonsteknikk

Prosjektnummer

604875

Rapportnummer

851

Prosjektleder

Bård M. Pedersen / Karla Hornbostel

Godkjent av

Bård M. Pedersen

Emneord

Reparasjonsmørtler, katodisk beskyttelse, forsøksfelt, bestandighet

Sammendrag

Statens vegvesen etablerte i 2019 et feltforsøk ved Tjeldsundbrua, for prøving av mørtler brukt til katodisk beskyttelse.

Det blir sett på både reparasjonsmørtler og mørtler anbefalt for innsprøyting av anodesystemer i katodiske anlegg. Sentralt i forsøksprogrammet er måling av elektrisk motstand. Motstandsutvikling og virkningsgrader for katodisk beskyttelse vil følges over flere år som funksjon av aldring og naturlige fuktighets- og temperaturvariasjoner. Parallelt ble alle mørtler prøvet i et eget laboratorieprogram. Rapporten presenterer resultatene fra laboratorieprogrammet.

Title

Field trials – mortars suitable for cathodic protection

Subtitle

Description of laboratory testing R&D program Improved bridge maintenance 2017–2021

Author

Stig Henning Helgestad, Karla Hornbostel, Øyvind Bjøntegaard, Roy Antonsen

Department

Structures

Section

Structural Engineering

Project number

604875

Report number

851

Project manager

Bård M. Pedersen / Karla Hornbostel

Approved by

Bård M. Pedersen

Key words

Repair mortars, cathodic protection, field trials, durability

Summary

In 2019, the NPRA established a field test site at Tjeldsund bridge for testing dry shotcrete mortars used in cathodic protection systems. Both mortars for repairs prior to the installation and mortars used in the installation of anodic systems are evaluated. Development of the key parameter resistivity and the functionality of cathodic protection will be monitored for several years to verify the importance of aging and natural moisture and temperature variations. This report presents results from testing in laboratory, field results are presented in a separate report.



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 ledes av Bård M. Pedersen, Vegdirektoratet.

Denne rapporten er en del av Prosjekt 2: «Armeringskorrosjon i betong» som ledes 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 bruens 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 gir resultater fra et feltforsøk og fra laboratorieprøving på ulike aktuelle tørrsprøytlemørtler.

Sammendrag

Rapporten gir en oversikt over laboratorieresultater fra forsøk utført på mørtler som benyttes i forbindelse med katodisk beskyttelse. Tre leverandører i det norske markedet leverte produkter i forbindelse med etableringen av et feltforsøk. Sprøytede prøver fra etableringen sammen med prøver støpt ut ved laboratorium sørøst hos Statens Vegvesen har blitt undersøkt.

Standarden som omhandler katodisk beskyttelse, er NS-EN ISO 12696 [1]. I standarden oppgis at en mørtel som benyttes til reparasjon før installasjonen av katodisk beskyttelse skal ha en resistivitet (spesifikk elektrisk motstand) som er 50 – 200 % av den opprinnelige betongen. Det samme kravet er også beskrevet i Statens Vegvesen R762 – Prosesskode 2 [2], samt i veilederen til Norsk forening for betongrehabilitering [3]. Når det gjelder innsprøytingsmørtelen som titannettet sprøytes inn med, er det kun i NFB-veilederen at det er gitt en anbefaling – «unngå elektrisk motstand over 50 Ωm ». I standarden NS-EN ISO 12696 angis det at det må gjøres en vurdering.

Resultatene avdekket en overraskende stor spredning i produktenes spesifikke elektriske motstand. Fem av produktene var innenfor krav som stilles i dokumentene beskrevet over, når målingene ble utført etter 28 døgn. Felles for alle produkter er at de har en videre utvikling, og kun tre av produktene tilfredsstilte delvis kravene til resistivitet ved senere målinger. Målingene viste moderat tilvekst etter 90 døgn og krav bør derfor stilles til produktene etter minimum 90 døgn herding.

Resultatene viste også store forskjeller mellom produktene sprøytet i felt og de som ble støpt ut i laboratoriet. Utstøpingen i laboratoriet avviker med et høyere vannforbruk og en større innblanding av luft. Fremtidige vurderinger av tørrsprøytemørtler anbefales derfor kun basert på prøvestykker tildannet av sprøytede mørtler.

I tillegg til resistivitet ble også fasthet, porøsitet og frostbestandighet testet i laboratorieprogrammet. Forsøkene på frostbestandighet viste dårligere resultater enn forventet ut fra hva som er deklart i leverandørenes tekniske datablader. På grunn av dårlig frostbestandighet er bruk av overflatebehandling på tørrsprøytemørtler et relevant tiltak.

Innhold

| | |
|--|-----|
| Forord..... | i |
| Sammendrag | ii |
| Innhold | iii |
| 1 Bakgrunn | 1 |
| 2 Laboratorieprogram og metoder | 3 |
| 2.1 Oversikt laboratorieprogram | 3 |
| 2.2 Prøvestykker produsert i laboratoriet..... | 3 |
| 2.3 Prøvestykker produsert i felt..... | 5 |
| 2.4 Kapillær sugeshastighet og porøsitet etter Håndbok R210:2016, metode 426..... | 6 |
| 2.5 Trykkfasthet etter Håndbok R210:2016, metode 421 | 6 |
| 2.6 Frostbestandighet etter NS-CEN/TS 12390-9..... | 7 |
| 2.7 Resistivitet etter Håndbok R210:2016, metode 443 | 7 |
| 3 Resultater | 9 |
| 3.1 Kapillær sugeshastighet og porøsitet | 9 |
| 3.2 Trykkfasthet | 11 |
| 3.3 Frostmotstand | 11 |
| 3.4 Resistivitet..... | 12 |
| 3.4.1 Brubetong | 12 |
| 3.4.2 Sprøytemørtler | 14 |
| 4 Diskusjon..... | 16 |
| 4.1 Sammenheng mellom porøsitet, fasthet, frost-motstand og elektrisk motstand ... | 16 |
| 4.2 Tildanning av prøvestykker..... | 16 |
| 4.3 Krav til resistivitet for tørrsprøytemørtler brukt for KB | 17 |
| 4.4 Bruk av overflatebehandling | 19 |
| 5 Konklusjon..... | 20 |
| 6 Referanser..... | 21 |
| Vedlegg | 22 |

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 tilstand til bruer og spesifisere hvilke tiltak som skal iverksettes. Bakgrunnen for programmet er at flere 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 er et mulig vedlikeholdstiltak der armeringskorrosjon er påvist. Riktig valg av materialer og løsning er avgjørende både med tanke på kost/nytte og varighet 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. De inneholder stort sett de samme sandgraderinger og største kornstørrelse (D_{max} rundt 1 mm). KB-mørtlene skal ikke ha for høy elektrisk motstand (se lengre ned i avsnittet). Valg av sementtype vil påvirke elektrisk motstand, og bruk av plastmodifisering og/eller pozzolaner (silikastøv og flygeaske) er erfart å gi økt elektrisk motstand. Vannbehovet kan være noe lavere for KB mørtlene, da disse gjerne kan ha noe mindre bindemiddel enn reparasjonsmørtlene. Noen velger å tilsette støvreduserende additiver i mørtler. Dette har en stor positiv verdi for HMS ved håndteringen av produktene. I produktdatablad er det angitt om mørtelen er utviklet for bruk til mekanisk reparasjon forut for installasjon av katodisk beskyttelse (reparasjonsmørtler) eller om mørtelen er tenkt for innsprøyting av anoder (KB-mørtler).

I september 2019 ble det etablert et forsøksfelt der ulike mørtler er utprøvd. Mørtlene er valgt av tre leverandører som opererer i det norske markedet. Leverandørene valgte selv ut hvilke av sine produkter som skulle benyttes. Produkt og leverandør er anonymisert i rapporten da resultatene ikke er ment brukt til markedsføring. Den videre merking er som følger: Leverandør 1 har levert reparasjonsmørtel Rep 1 og innsprøytingsmørtel for anodenett (KB-mørtel) KB 1, Leverandør 2 har levert mørtel Rep 2 og KB 2 osv. SVV rapport 671 [4] beskriver oppbyggingen av selve prøvefeltet. Sentralt i forsøksprogrammet er måling av spesifikk elektrisk motstand (resistivitet) i mørtlene og å følge virkningsgrader for katodisk beskyttelse. Utviklingen følges over flere år for å se på effekten av aldring og naturlige fuktighets- og temperaturvariasjoner. I tillegg er betydningen av diffusjonsåpen overflatebehandling på mørtlene studert.

De mest sentrale egenskapene til mørtlene i denne type installasjoner vil være at de har gode heftegenskaper til underlaget, at de beskytter anoden mot innvirkninger fra ytre miljø, samt at de sikrer god elektrolytisk kontakt mellom anoden og armeringen. For sistnevnte anses det som viktig at den spesifikke elektriske motstanden i mørtelen ikke er for høy. Denne

egenskapen er mangelfullt beskrevet både i krav til målemetode og i krav til grenseverdier for mørtler som skal benyttes ved katodisk beskyttelse. Noe er angitt i ulike veiledere/standarder:

- **Betongrehabilitering, Reparasjonsmetoder, utførelse og kontroll. Lindland, Jan (2016) Norsk forening for betongrehabilitering, Oslo, Norway;**
«... 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 ...»
- **Statens Vegvesen R762 – Prosesskode 2 (2019)**
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.
- **NS-EN 12696:2016**
«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 Typically, these repair materials will have an electrical resistivity within the range of approximately half to twice that of the parent concrete...”

I 2022 kom standarden NS-EN ISO 12696 ut i ny utgave, men uten noen nye krav til verken reparasjonsmørtel eller innsprøytingsmørtelen for anodenett.

Uenighet og mangler på mer spesifikke krav viser at videre undersøkelser er nødvendig for å sikre bruk av riktige materialer i forbindelse med katodiske anlegg.

Elektrisk motstand, trykkfasthet, kapillær absorpsjon og frostbestandighet for de ulike Rep- og KB-mørtlene brukt i feltforsøket er bestemt i et laboratorieprogram parallelt med prøving i felt. Prøvestykkene til laboratorieforsøkene ble produsert samtidig med sprøyting i felt (sprøyting i egne sprøytekasser) og i tillegg ble produktene fra samme materialleveranse blandet og støpt ut ved laboratorium sørøst hos Statens Vegvesen. Grad av samsvar mellom prøver sprøytet i felt og prøver utstøpt i laboratoriet er evaluert.

2 Laborieprogram og metoder

2.1 Oversikt laborieprogram

Det ble produsert prøvestykker i felt (sprøytet) og i laboriet (støpt). Prøvestykkene er beskrevet i avsnitt 2.2 og 2.3. Alle prøvestykker ble enten transportert til/eller tildannet i Statens vegvesens laboratorium sørøst. Laborieprogrammet omfattet prøving av trykkfasthet, kapillær sugehastighet, frostmotstand og resistivitet for de 6 mørtlene som ble benyttet i feltforsøket.

Følgende prøvning ble utført på mørtlene i henhold til angitt standard. Metodene er nærmere kommentert i avsnitt 2.4 til 2.7.

Tabell 2-1 – Laboriemetoder.

| Egenskap | Standard/Metode | Kort beskrivelse |
|-------------------------------------|---|--|
| Trykkfasthet | NS-EN 12390-3 Metode 421 i SVV Håndbok R210 [5] | Utført på både prøver fra felt og prøver utstøpt i laboriet |
| Frostbestandighet | NS-CEN/TS 12390-9 Metode 445 i SVV Håndbok R210 | Kun utført på prøver fra felt |
| Kapillær sugehastighet og porøsitet | Metode 426 i SVV Håndbok R210 | Forenklet prosedyre |
| Resistivitet | Metode 443 i SVV Håndbok R210 | Utført både på vannlagrede og prøvestykker oppbevart i plast |

En oversikt over prøvematrix av prøvestykker for mørtlene blandet i laboriet er gitt i Tabell 2-3, mens en tilsvarende oversikt for mørtlene produsert i felt er gitt i Tabell 2-4.

2.2 Prøvestykker produsert i laboriet

For hvert mørtelprodukt ble det valgt å benytte en lav og en høy vanddosering ved utstøpingen i laboriet, dette for å kunne si noe om forventet spredning i produktens materialeegenskaper ved normal bruk. For tørrsprøytetmørtler angis ingen vanddosering på hverken sekk eller datablad. Dette skyldes at vanddosering må tilpasses på stedet når det sprøytes. Dette utføres av sprøyteoperatør for å oppnå en riktig konsistens der mørtelen hverken siger eller støver for mye. Mørtelen vil ha en relativt stiv konsistens, men likevel være noe formbar. Det ble utført manuelle utblandinger for hånd, for vurdering av konsistens og utseende av mørtlene for å fastsette aktuelle vanddoseringer. En oversikt over benyttede vanddoseringer er gitt i tabell 2-2. I en mørtel er sementinnholdet ukjent, dermed vil også vann/semnt-forholdet forbli ukjent. Vanddosering oppgis derfor som prosent av mørtelvekt.

Tabell 2–2 Oversikt over vanddoseringer (% av mørtelvekt) benyttet for de ulike mørtlene.

| Mørtel | Rep 1 | KB 1 | Rep 2 | KB 2 | Rep 3 | KB 3 |
|--------------|-------|------|-------|------|-------|------|
| Vanddosering | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] |
| Høy | 14,0 | 13,6 | 15,2 | 14,0 | 12,8 | 12,8 |
| Lav | 12,8 | 11,6 | 13,6 | 12,0 | 11,2 | 11,6 |

Ved utstøpingen av mørtlene ble det i hvert tilfelle brukt 11 kg mørtel. Den aktuelle vannmengden ble først tilsatt i ei blandebøtte og deretter ble mørtelen tilsatt gradvis mens den ble blandet inn med en spiralvisp og mørtelblander. Etter at all mørtel var tilsatt vannet, ble mørtelen blandet i 60 sekunder, deretter hviletid på 60 sekunder der eventuelt mørtelpulver fra kantene og bunnen av blandebøtten ble blandet inn i mørtelen. Avslutningsvis ble mørtelen blandet i ytterligere 60 sekunder før den var klar til utstøping. Mørtlene ble fylt i formene i fire omganger og komprimert grundig mellom hver fylling med en stampestang. Mørtlene ble avslutningsvis glattet med et stålbrett før de ble tildekket med plast.

For prøving av resistivitet og kapillær sugehastighet ble sylindrene oppdelt i mindre prøvestykker før videre prøving. For måling av resistivitet ble det valgt to lagringsbetingelser for produktene, vannlagring eller innpakking i plast. De to betingelsene ble valgt siden de representerer to ytterligheter, men som likevel er relativt kontrollerbare. Innpakking i plast ble valgt fordi den representerer mørtelen når den selvuttørker og ikke utveksler fuktighet med omgivelsene.

En oversikt over antall prøvestykker og prøvingsopplegg for de forskjellige prøvestykker er gitt i Tabell 2–3.

Tabell 2–3 – Oversikt lagring og prøving av støpte sylindre.

| Merking | Sylinder diameter [mm] | Lagring | Tidspunkt for prøvning | Antall prøver per mørtelvariant (y) | Prøvemethode |
|-------------------|------------------------|-----------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| LAB lav/høy_X_1.y | 100 | Vann | 28 døgn | 3 | Trykkfasthet |
| LAB lav/høy_X_2.y | | | | | |
| LAB lav/høy_X_3.y | | | | | |
| LAB lav/høy_X_4.y | | Vann | 28 døgn, 3, 6 mnd, 1 år | 4 | Elektrisk motstand |
| LAB lav/høy_X_5.y | | | 28 døgn | 4 | Kapillær sugehastighet og porøsitet |
| LAB lav/høy_X_6.y | | Innpakket | 28 døgn, 3, 6 mnd, 1 år | 4 | Elektrisk motstand |

X = Mørteltype KB eller Rep 1–3, y = løpenummer (1, 2, ...)

2.3 Prøvestykker produsert i felt

Etter at hvert prøvelfelt var blitt sprøytet med henholdsvis reparasjons- eller KB- mørtel ble det sprøytet en sprøytekasse per produkt. Kassene ble produsert iht. metode 15.5621 i SVV Håndbok R211 (versjon 1997) [6]. Alle kassene ble tildekket etter sprøyting, og ble etter to uker transportert til Statens Vegvesens laboratorium sørøst i Oslo. Uttak av kjerner fra sprøytekassene ble utført etter metode 461 i Håndbok R210, mens tildanning av prøvestykkene ble utført etter metode 462.

Ved sprøytingen av mørtel under etableringen av feltforsøket ble følgende notert: Den første dagen med sprøyting ble tre felter sprøytet med tre reparasjonsmørtler (produktene Rep 1, Rep 2 og Rep 3). Det ble registrert ujevn sprøyting for alle tre produktene. Det kunne observeres alt fra for bløt mørtel ved påføringen til perioder med stor støvutvikling. Sprøyteoperasjonen tok mer enn dobbelt så lang tid som ved normal sprøyting. Årsaken kom av problemer med pumpe og derav variasjoner i materialstrømmen, enten ved for lav eller for høy mating av pulver. Avvikende kvalitet var derfor forventet, noe vi kommer tilbake til i påfølgende kapitler. Ved dag 2 av sprøytingen var nødvendige deler i pumpen skiftet (lameller), og det ble ikke observert noen utfordringer under sprøytingen (produkt KB 1, KB 2 og KB 3).

En oversikt over antall prøvestykker og prøvingsopplegg med de forskjellige prøvestykker er gitt i Tabell 2-4.

Tabell 2-4 – Oversikt lagring og prøving i laboratoriet av kjerner tatt fra mørtlene sprøytet i felt.

| Merking | Kjerne- diameter | Lagring, sprøytekasse (1-20 døgn) | Lagring (utboring ved 20 døgn – start metode) | Tidspunkt for prøvning | Antall prøver per mørtelvariant | Prøvemetode | |
|-------------|---------------------|---|---|----------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| FELT_X_1.y | 60 | Tildekket | Vann | 28 døgn | 3 | Trykkfasthet | |
| FELT_X_2.y | | | | | | | |
| FELT_X_3.y | | | | | | | |
| FELT_X_4.y | 100 | | Vann/ Klimaskap* | 52 døgn | 6 | Frost | |
| FELT_X_5.y | | | | | | | |
| FELT_X_6.y | | | | | | | |
| FELT_X_7.y | 100 | | Vann | 28 døgn, 3, 6 mnd, 1 år | 4 | Elektrisk motstand | |
| FELT_X_8.y | | | | | | | 28 døgn |
| FELT_X_9.y | | | | Innpakket (20°C) | 28 døgn, 3, 6 mnd, 1 år | 4 | Elektrisk motstand |
| FELT_X_10.y | | | | | | | |

X = Mørteltype KB eller REP 1-3, y = løpenummer (1, 2 ...)

*klimaskap, (20 ± 2) °C og (65 ± 5) % RF

Det ble tatt ut kjerneprøver fra brua for å måle resistivitet iht Metode 443 i SVV Håndbok R210. Tre kjerner fra hver av sidene der forsøksfeltene ble etablert. Kjernene fra bruas sørside ble merket S1, S2 og S3, mens kjernene tatt fra bruas nordside ble merket N1, N2 og N3 (for lokasjoner av kjernene se SVV rapport 671).

2.4 Kapillær sugeshastighet og porøsitet etter Håndbok R210:2016, metode 426

Av sylindrene støpt i laboratoriet, ble det for hver variant av mørtelprodukt og vandosering tildannet 4 stk. skiver med tykkelse rundt 20 mm (diameter 100 mm) (Tabell 2-3). For sylindrene tatt fra sprøytekaske ble det også for hver variant tildannet 4 stk. skiver med tykkelse rundt 20 mm (diameter 100 mm) (Tabell 2-4).

Det ble benyttet begrenset prosedyre for bestemmelse av porøsitet- og densitetsverdier for prøvestykkene fra laboratoriet og fra felt. Alder på mørtelvariantene var ca. 28 dager ved forsøksstart. Fremgangsmåten er i henhold til metodebeskrivelsen og er som følger:

- Tørking i ventilert tørkeskap ved 105°C i 7 døgn, og deretter minimum 2 timer avkjøling i luft ved romtemperatur, tildekket med plastfolie, (veiing (vekt g_1))
- Neddykking i vann i 7 døgn, avtørking med fuktig klut og veiing i luft (vekt g_2), og under vann (vekt g_3)
- 2 døgn neddykking i vann i trykktank ved 50 atm, umiddelbar avtørking med klut og veiing i luft (vekt g_4). Avtørking og veiing må skje umiddelbart etter uttak av trykktank for å unngå at vannet presses ut av prøvestykket.

Fra disse målingene kunne følgende parametere beregnes:

$$\text{Prøvestykkets volum: } V = \frac{g_2 - g_3}{\rho_w} \quad (\text{m}^3)$$

$$\text{Tørrdensitet: } \rho_t = \frac{g_1}{V} \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$\text{Faststoffdensitet: } \rho_{fs} = \frac{g_1}{V - (g_4 - g_1)/\rho_w} \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$\text{Sugmettet densitet: } \rho_s = \frac{g_2}{V} \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$\text{Sugporøsitet: } p_s = \frac{g_2 - g_1}{V \cdot \rho_w}$$

$$\text{Makroporøsitet: } p_m = \frac{g_4 - g_2}{V \cdot \rho_w}$$

$$\text{Totalporøsitet: } p_t = p_s + p_m$$

2.5 Trykkfasthet etter Håndbok R210:2016, metode 421

For mørtlene utstøpt i laboratoriet, ble det støpt ut 3 stk sylindre med dimensjon 100 mm x 200 mm (se Tabell 2-3) for hver mørtelvariant og vannmengde, iht. metode 416 i SVV Håndbok R210. Prøvestykkene ble avformet etter 1 døgn og deretter vannlagret videre i 27 døgn. Trykkfastheten ble bestemt ved 28 døgns alder.

For mørtlene som ble sprøytet i kasse, ble det fra hver av sprøytekassene tatt ut 3 stk sylindre med dimensjon 60 x 160 mm. Sylindrene var da vel 20 dager gamle. Sylindrene ble etter kjerneboringen lagt i vannbad. Sylindrene måtte tildannes ved at hver ende ble kappet slik at total lengde av sylindren ble ~120 mm (for å oppnå 2/1 forhold mellom høyde og diameter). De kappede flatene ble også undersøkt for planhet og eventuelle skjevheter ble korrigert ved sliping. Mørtlene ble vannlagret frem til prøvingen som ble utført ved 28 døgns alder (iht. NS-EN 12390-3).

2.6 Frostbestandighet etter NS-CEN/TS 12390-9

Mørtlenes frostbestandighet ble bestemt ved vekselvis frysing og tining av prøver med et 3 mm sjikt av 3 % NaCl-løsning på overflaten som eksponeres for frost. Frostbestandigheten bedømmes ut fra mengde materiale som skaller av fra den eksponerte flaten. Prøvene ble utsatt for en frostsykel pr. døgn og prøvingen pågikk i 56 døgn.

Prøvestykkene ble kun tildannet av sylindre tatt fra sprøytekassene (se Tabell 2-4). Sylindrene hadde diameter 100 mm. Etter utboring ble sylindrene oppbevart 5 døgn i vannbad før de ble satt inn i klimaskap ved 26 døgns alder. Prøvestykkene ble tildannet etter 14 dager i klimaskap. På grunn av at prøveplatene ankom laboratoriet vel 20 dager etter at de ble sprøytet ut ble hele prøvingsprogrammet av frostbestandighet forskjøvet. Fryse/tine prøvingen ble igangsatt når mørtlene hadde en alder på 52 døgn (standard metode er igangsetting etter 31 døgn).

Målingene ble utført etter 7, 14, 28, 42 og 56 døgn i fryse/tine-kammeret, og mengde avskallet materiale ble registrert hver gang.

2.7 Resistivitet etter Håndbok R210:2016, metode 443

6 stk. 100x200 mm sylindre ble støpt ut for hver mørtel og vannmengde (Tabell 2-3). Etter avforming ved 1 døgn ble 4 av sylindrene vannlagret, mens de resterende 2 ble pakket inn i plast for videre lagring. Til måling av resistivitet ble det for hver mørtelvariant og vannmengde tildannet 4 prøvestykker fra de vannlagrede prøvene (4 prøver tildannet fra 2 sylindre) og 4 prøvestykker fra prøvene lagret i plast (4 prøver fra en sylinder). Tilsiktet høyde på prøvestykkene var 40 ± 5 mm.

Av mørtlene sprøytet ut i felt ble det tatt ut kjerner med diameter 100 mm (Tabell 2-4). To av disse kjernene ble pakket inn i plast, mens de resterende ble lagt i vannbad. Av disse kjernene ble det tildannet 4 stk. prøvestykker fra kjernene pakket i plast (2 prøver fra to sylindre) og 4 prøvestykker fra kjernene lagret i vannbad (2 prøver fra to sylindre). Tilsiktet høyde på prøvestykkene var 40 ± 5 mm.

Det ble også tatt ut kjerner fra brua for å bestemme den spesifikke elektriske motstanden. Kjernene representerer den 52 år gamle konstruksjonsbetongen og var fri for eventuelle tidligere reparasjoner/mørtel. Kjernene hadde varierende høyde, men en diameter på ca. 100

mm. Kjernene ble etter uttak pakket i plast og sendt til laboratoriet. Prøvestykker ble tildannet rett etter ankomst og høyden av prøvestykkene ble 37 – 82 mm. Første måling ble utført tidligst mulig etter selve tildanningen, for å fange opp «in situ» resistivitet. Deretter ble prøvestykkene lagret i vannbad og videre målinger ble utført hver uke.

Ved hver måling ble alle prøvestykkene tatt opp fra vannbadet eller pakket ut av plasten og plassert mellom to elektrodeplater med fuktig filt imellom, og et lodd ble lagt oppå den øverste platen. Elektrisk motstand ble deretter målt mellom elektrodeplatene med et LCR-meter ved 1 kHz frekvens. Etter måling ble prøvestykkene lagt tilbake i vannbadet eller pakket inn i plast. Målt elektrisk motstand, R , regnes om til resistivitet (spesifikk elektrisk motstand), ρ , som følger:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} \quad (\Omega m)$$

hvor:

- R = målt motstand, (Ω)
- A = arealet av prøvestykkets måleflater (m^2)
- l = avstanden mellom prøvestykkets måleflater (m)

Målinger ble gjort når mørtlene hadde følgende alder:

- 28 døgn
- 3 måneder
- 6 måneder
- 1 år

3 Resultater

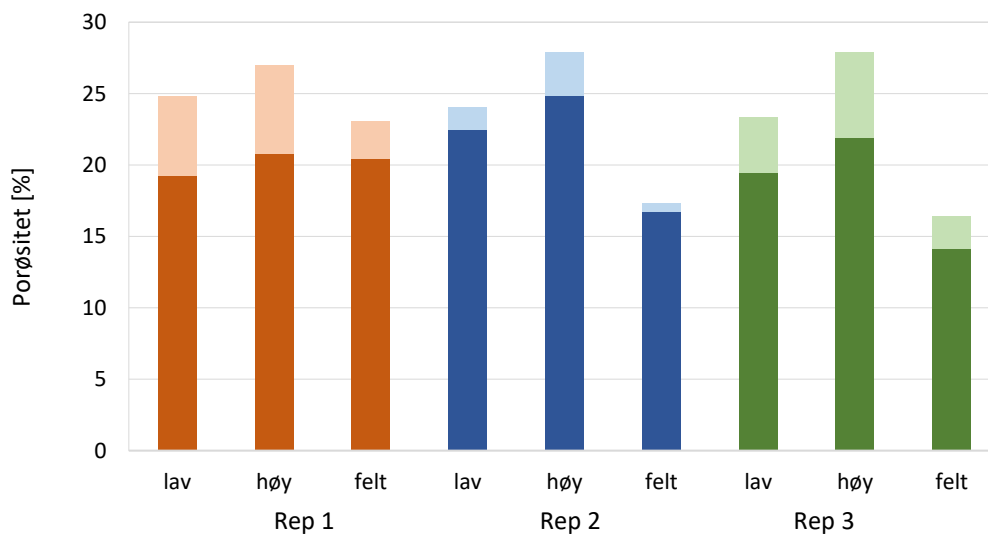
3.1 Kapillær sugehastighet og porøsitet

Kapillær sugehastighet og porøsitet ble tatt med i forsøksprogrammet siden dette kan gi informasjon om frostbestandighet og resistivitet, i tillegg til eventuelt å kunne detektere forskjeller fra sprøyting i felt mot utstøpingen i laboratoriet. Mellom felt og lab kan det forventes å være forskjeller i både vannforbruk og komprimeringsgrad.

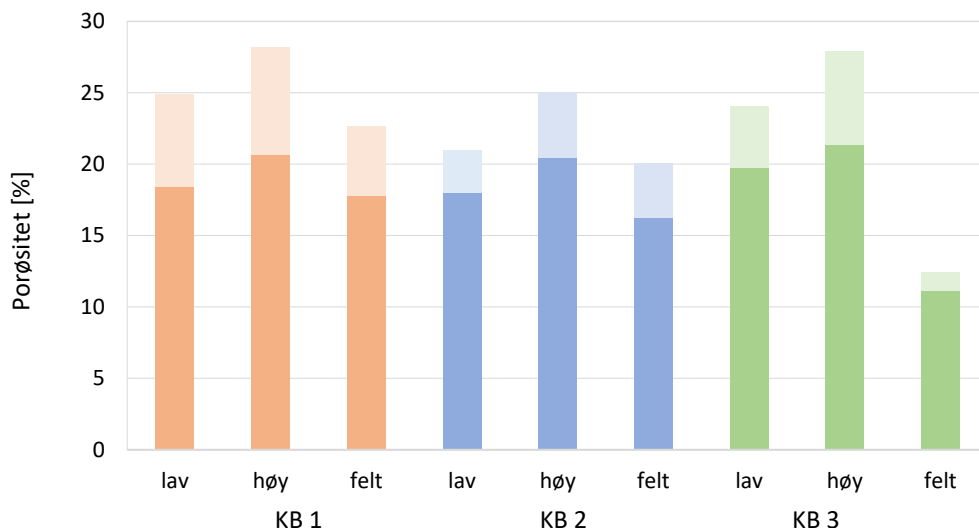
Sugporøsitet er en egenskap til sementbaserte materialer som i utgangspunktet er et resultat av vann/semest- forholdet og av sement-/bindemiddelsammensetningen. For en gitt mørteltype vil sugporøsiteten (kapillærporøsiteten) reduseres med avtagende vanddosering.

Målt makroporøsitet (vannopptak etter trykkmetning) reflekterer mengden luftporer (luft som vispes inn under blandedprosessen), og for feltprøvene vil eventuelle store kompakteringsporer eller hulrom som skyldes inhomogeniteter etter sprøyting også bidra til det som måles som makroporøsitet.

I figurene 3.1 og 3.2 er verdier for sugporøsitet og makroporøsitet vist for alle produktene. De mørke feltene representerer sugporøsiteten og de lyse feltene representerer makroporøsiteten. Summen av disse to verdiene vil gi totalporøsiteten til de ulike produktene.



Figur 3.1: Reparasjonsmørtlene; sugporøsitet (mørke felter) og makroporøsitet (lyse felter) hvor summen av disse to gir totalporøsiteten. Hver verdi er et gjennomsnitt av fire prøvestykker.



Figur 3.2: KB-mørtlene; sugporøsiteter (mørke felter) og makroporøsitet (lyse felter) hvor summen av disse to gir totalporøsiteten. Hver verdi er et gjennomsnitt av fire prøvestykker.

For produkt Rep 1 ligger sugporøsiteten til feltprøven mellom verdiene oppnådd for lav og høy vanddosering for den manuelle utstøpingen. For alle andre produktene ligger resultatene fra feltprøvene under både høy og lav vanddosering. For alle produkter ligger feltprøvens sugporøsitet av KB mørtlene lavere enn for de utstøpte prøvene, noe som i utgangspunktet indikerer at vanddoseringen for feltprøven var mindre enn «lav» dosering for utstøpt prøve fra laboratoriet. Den største forskjellen mellom sprøytede og utstøpte prøver ligger i resultatene for makroporøsitet. Her kan årsaken til forskjellene skyldes sprøyteprosessen, der trykkluft og sprøytedysa skyter mørtelen som en sky utover en flate og innblandet luft kan unnsnippe, i motsetning til ved støping i laboratoriet hvor innblandet luft i større grad vil beholdes.

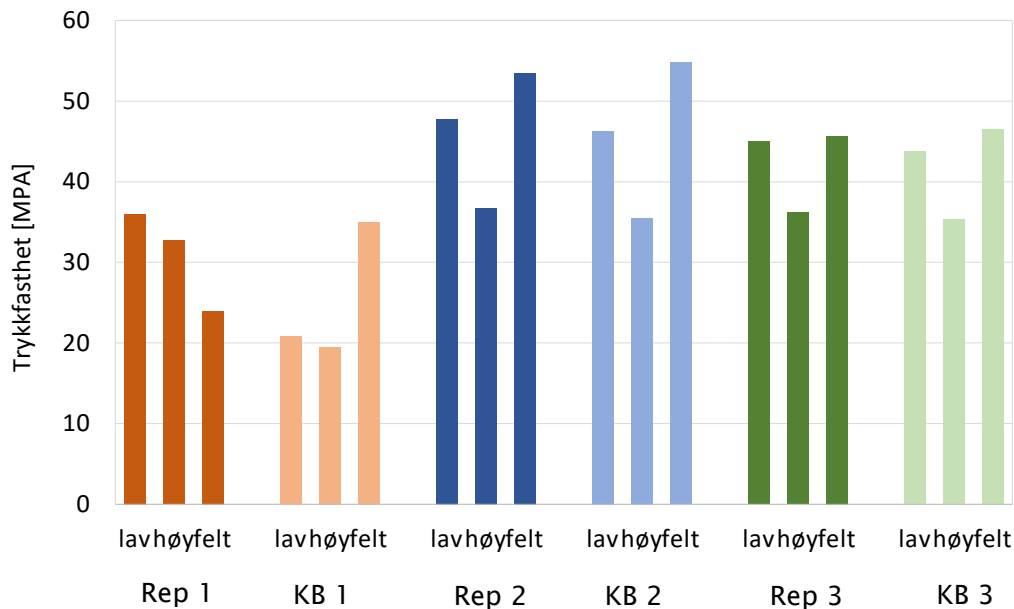
Tabell 3.1 viser porøsitetsverdiene for produktene sprøytet i felt. Den lave sugporøsiteten hos produktene Rep 3 og KB 3 kan ha en sammenheng med at produktene var støvreduserte, dvs tilsatt en olje for å redusere graden av støving under sprøyteprosessen. Varierende sementinnhold/ masseforhold kan også være en medvirkende årsak.

Tabell 3-1 – Porøsitetsverdier for produktene sprøytet i felt.

| | Tørrdensitet | Densitet faststoff | Sugmettet densitet | Sug-porøsitet | Makro-porøsitet | Total-porøsitet |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------|-----------------|-----------------|
| Produkt | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [%] | [%] | [%] |
| Rep 1 | 2089,4 | 2716,0 | 2294,0 | 20,5 | 2,6 | 23,1 |
| KB 1 | 2105,5 | 2720,0 | 2283,0 | 17,8 | 4,9 | 22,6 |
| Rep 2 | 2095,5 | 2537,0 | 2262,6 | 16,7 | 0,6 | 17,3 |
| KB 2 | 2115,8 | 2647,0 | 2278,2 | 16,2 | 3,8 | 20,1 |
| Rep 3 | 2107,5 | 2522,0 | 2248,7 | 14,1 | 2,3 | 16,4 |
| KB 3 | 2147,1 | 2452,0 | 2258,1 | 11,1 | 1,3 | 12,4 |

3.2 Trykkfasthet

Målt trykkfasthet for støpte prøver i lab (høy/lav vanddosering) og for kjerner fra sprøytede mørtler i felt er vist i figur 3-3.



Figur 3.3 Målte trykkfastheter etter 28 døgn for reparasjon- og KB-mørtler. Hver verdi er et gjennomsnitt av tre prøvestykker.

Trykkfasthet er angitt i alle leverandørenes tekniske datablader. Som nevnt tidligere holdes produktnavnene anonyme og derfor oppgis ikke leverandørenes deklarererte verdier. Likevel kan det opplyses at av resultatene fra feltprøvingen oppnådde produktene Rep 1 og Rep 3 en lavere fasthet enn hva produsentene har angitt for sine produkter. Dette kan mest sannsynlig tilskrives problemer under sprøyting på dag 1, som tidligere nevnt. Til dag 2 ble det gjort utbedringer på pumpen og resultatene for trykkfasthet synes å bekrefte mer vellykket sprøyting da verdiene for produktene KB 1, KB 2 og KB 3 ligger over de angitte verdiene fra leverandørene.

3.3 Frostmotstand

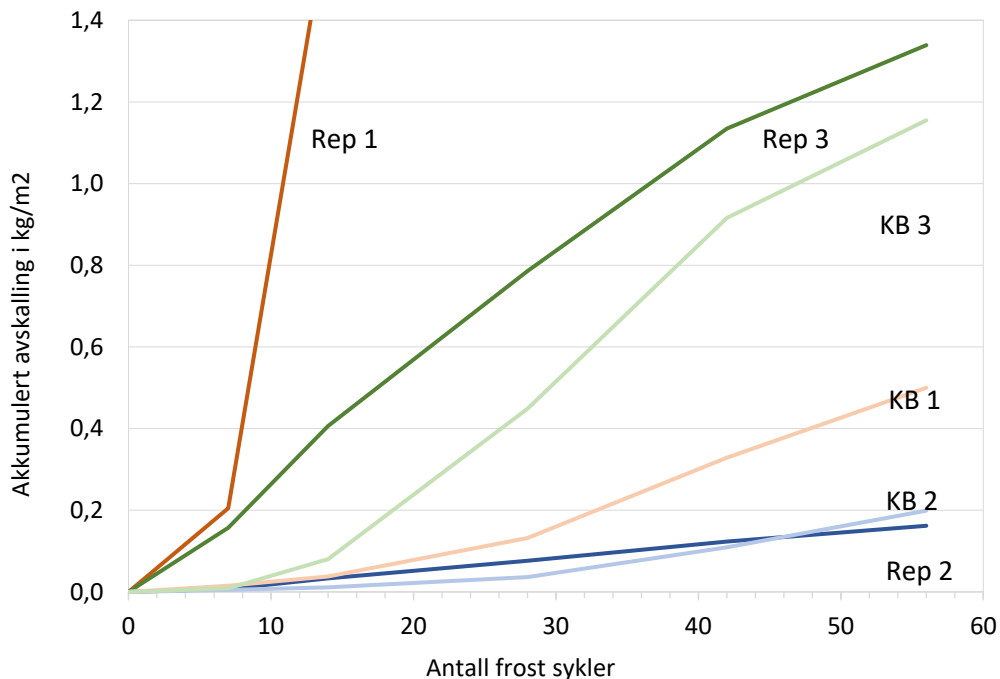
Frostprøving ble utført kun på prøver fra felt. Prøveprosedyren avviker fra normal laboratorieprosedyre ved at oppstart frostprøving var etter 52 døgn, mot normalt 31 døgn som tidligere beskrevet i kapittel 2.6.

Resultatene fra alle frostforsøkene er vist i Figur 3.4 Resultat av frostprøving for alle produkter samlet. Hver verdi er et gjennomsnitt av seks prøvestykker.

Frostbestandighet prøves per i dag i henhold til NS-EN 1504-3 [7] etter metoden NS-EN 13687-1 [8], som i første rekke omhandler termisk kompatibilitet mellom en mørtel og ei betonghelle. I et høringsutkast for ny NS-EN 1504-3 ble det i 2015 fremmet forslag om at

frostbestandighet i tillegg kunne dokumenteres etter NS-CEN/TS 12390-9, hvor to klasser (F1 og F2) skulle beskrive frostbestandigheten til produktene (klasse F1: $\leq 600 \text{ g/m}^2$ og klasse F2: $\leq 1200 \text{ g/m}^2$).

Dagens norske nasjonale tillegg i NS-EN 206+NA [10] krever frostavskalling $\leq 0,5 \text{ kg/m}^2$ for frostbestandig betong etter NS-CEN/TS 12390-9.



Figur 3.4 Resultat av frostprøving for alle produkter samlet. Hver verdi er et gjennomsnitt av seks prøvestykker.

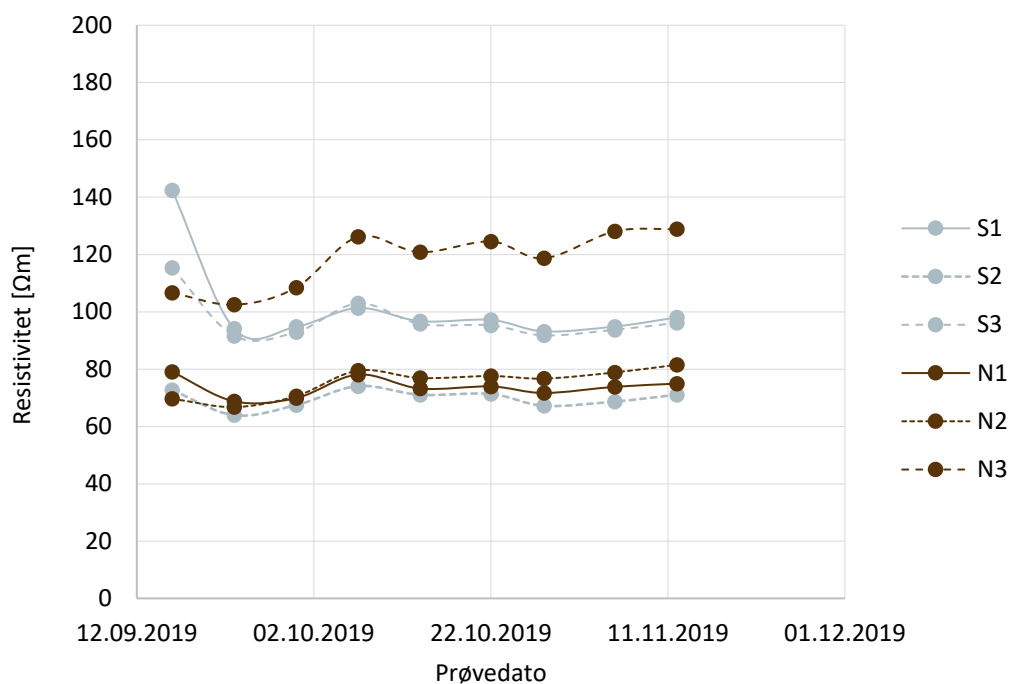
Av figuren ser vi at produktene Rep 1, Rep 3 og KB 3 har høy frostavskalling. Produkt KB 1 ligger på $0,5 \text{ kg/m}^2$ etter 56 sykler, altså på grensen i hht. kriteriet i NS-EN 206+NA, mens produktene Rep 2 og KB 2 ligger godt under.

For tre av produktene har materialprodusentene deklarerert frostmotstand. De deklarererte verdiene gjenspeiles ikke i hva vi har målt i våre forsøk. Igjen, for reparasjonsmørtlene så kan problemene ved sprøytingen dag 1 ha innvirket på måleresultatene.

3.4 Resistivitet

3.4.1 Brubetong

Ved etableringen av feltforsøket, ble resistivitet på overflaten av brubetongen målt med Wenner elektrode (4-elektrode måling), se resultatene i SVV rapport 671. I tillegg ble det tatt ut kjerner fra brubetongen for å kunne gjøre en sammenligning mellom Wenner-målingene på overflaten i felt og på kjerner målt i laboratoriet. Resultatene for kjernene er vist i figur 3.5.



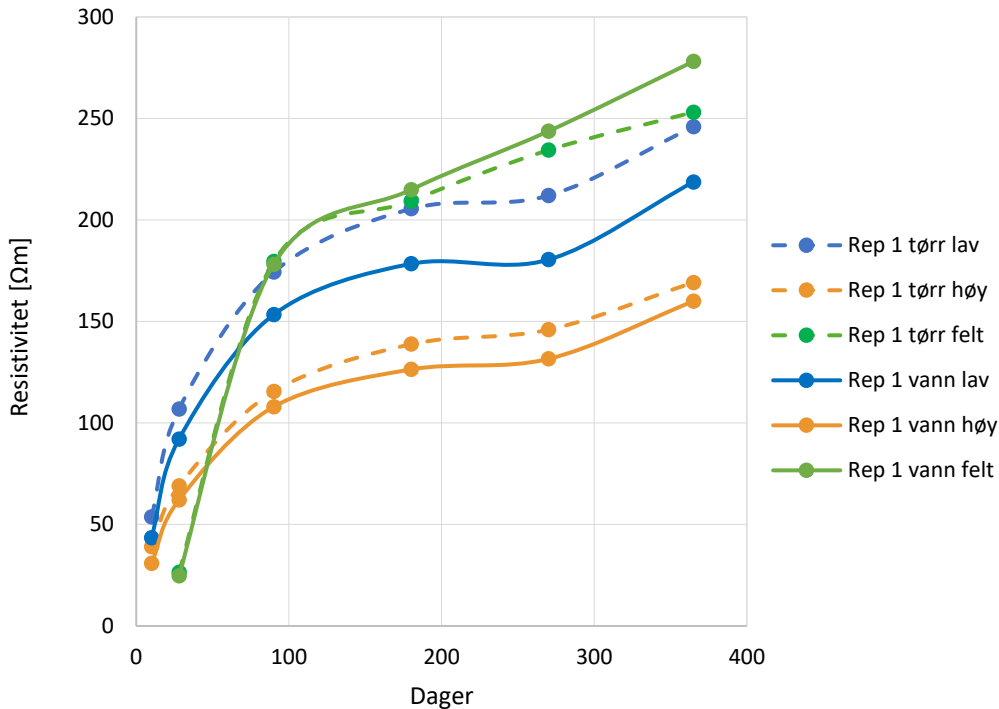
Figur 3.5 Utvikling av resistivitet over 2 måneder for kjerner fra brubetongen ved vannlagring. S=sørsiden (lo-side) og N=nordsiden (le-side). Første målepunkt er før vannlagring.

I figur 3.5 er første målepunkt en initialmåling, dvs. før kjernene ble lagt ned i vannbad. Verdiene er relevante for sammenligning mot feltmålingene utført med Wenner elektrode (SVV rapport 671). Andre målepunkt, og videre, er gjort etter vannlagring. Disse er relativt stabile, noe som er forventet i velherdet betong. Prøvene merket N1, N2 og N3 stammer fra nordsiden av brupilaren som også var le-siden. For disse prøvene er det ingen nevneverdig endring i resistivitet etter at prøvestykkene senkes ned i vann. Dette kan tyde på at prøvene var nær vannmetning i utgangspunktet da de ble tatt ut. Prøvene merket S1, S2 og S3 stammer fra sør-siden av brupilaren, og dette er også lo-siden. Her ble det for to av tre prøvestykker registrert noe reduksjon i den elektriske motstanden etter målepunkt 1 (insitu-tilstand) da prøvestykkene ble senket ned i vann. Årsaken til denne endringen kommer trolig av at S-prøvene var noe mindre vannmettede da de ble tatt fra brua.

Wenner-målingene viste at motstandsmålinger på nordsiden var i snitt 184 Ωm og på sørsiden 136 Ωm (gjennomsnitt for begge sidene samlet var 160 Ωm). Resultatene fra brubetongprøvene sent til laboratoriet viser 109 Ωm for kjerner fra nordsiden og 85 Ωm for kjerner fra sørsiden (målingene før vannlagring, gjennomsnitt for alle kjerner 97 Ωm). Målinger med Wenner utstyret ble utført ved en lavere temperatur enn målingene på kjerneprøvene i laboratoriet, noe som kan forklare forskjellen mellom resultatene. Som en tommelfingerregel kan endringen i resistivitet for prøver med fuktighetsinnhold over 70 % ligge på ca. 3 % per 1°C. Målingene i felt ble utført ved ca. 10°C som tilsvarer ca. 30% endring i motstand sammenlignet med temperaturen i laboratoriet på 20°C. Korreksjon av feltmålinger til 20°C ville dermed gitt en motstand rundt 110 Ωm , noe som svarer godt til gjennomsnittet på 97 Ωm målt i laboratoriet ved 20°C. Feltemålingene anses dermed som verifisert.

3.4.2 Sprøytemørtler

Et eksempel på utvikling av resistivitet over tid for prøvene av reparasjonsmørtelen Rep 1 er vist i figur 3.6. Tilsvarende grafiske fremstillinger for de resterende produktene er gitt i vedlegget.

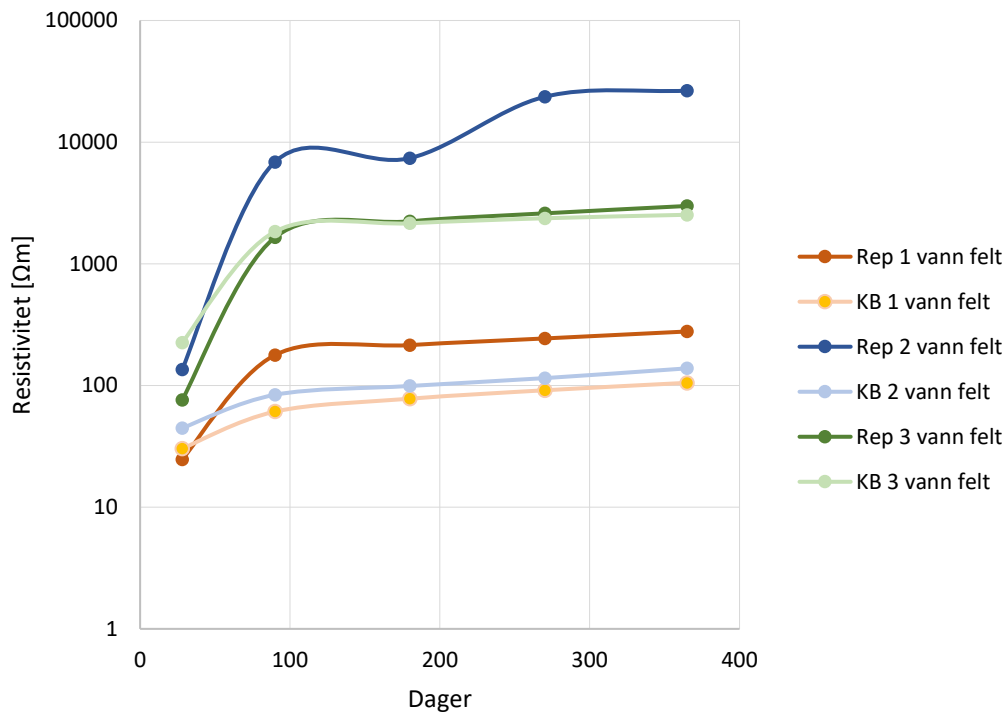


Figur 3.6 Utvikling av resistivitet for produkt Rep 1 under ulike herdebetingelser. Hver verdi er et gjennomsnitt av fire prøvestykker.

De vannlagrede prøvene oppnår lavere resistivitet enn prøvene som var innpakket i plast – og som dermed ikke har tilgang på ekstern fukt. Dette stemmer med det vi forventer. Det stemmer også at mørtlene med lav vanddosering gir høyere resistivitet enn de med høy vanddosering. Prøvestykkene hentet fra sprøyting i felt viser en noe annerledes utvikling av resistivitet. De oppnår i første måling den laveste verdien som måles, men på sikt utvikler de den høyeste spesifikke elektriske motstanden. Det er også noe uventet at den vannlagrede feltprøven oppnådde høyere motstand enn feltprøvene lagret i plast. For feltprøvene kan tilsvarende utvikling registreres for produktene KB 1 og KB 2, der motstanden er høyere i de vannlagrede prøve enn de som lagres tørt. En forklaring på dette kan være at de tørre prøvene har fått for lite vann og har en større grad av uhydratisert materiale. For produktene Rep 2, Rep 3 og KB 3 viser alle høyest resistivitet for feltprøvene som er lagret tørt.

Utviklingen i resistivitet for alle vannlagrede feltprøver er vist i figur 3.7. Merk at diagrammets y-akse er med logaritmisk skala. Sprøyting i felt med påfølgende vannlagring er forventet å gi best reproducerbart resultat og samtidig gode herdebetingelser for produktene. For mørtlene hvor resistivitet ligger rundt 100 Ωm , er det en mindre forskjell (inntil 20%) mellom målingene

vannlagret og tørt (se vedlegg og Figur 3.6). Dette er små avvik sett i forhold til de store forskjellene mellom de ulike mørtlene i figur 3.7.



Figur 3.7 Utvikling av resistivitet for alle feltprøver ved lagring i vann. Hver verdi er et gjennomsnitt av fire prøvestykker.

For alle produktene kan det ses en stor utvikling av resistivitet mellom 28 og 90 døgn, etter 90 døgn er videre økning betydelig mindre.

4 Diskusjon

4.1 Sammenheng mellom porøsitet, fasthet, frost-motstand og elektrisk motstand

Vi har tidligere vist at det er en sammenheng mellom trykkfasthet og forholdet mellom vann og bindemiddel i figur 3.3. Vi kunne også se at den spesifikke elektriske motstanden ble redusert når det til hvert produkt ble tilsatt en høyere vanddosering i figur 3.6 og i tilsvarende figurer i vedlegget. Det ble også undersøkt om vi kunne finne en sammenheng mellom mørtlenes porøsiteter mot fasthet, frostmotstand og elektrisk motstand. Det viste seg at antallet parametere blir for stort til at vi klarer å finne noen sammenheng. Bare for mørtlene alene så inneholder disse ulike sementtyper, sementinnhold, pozzolaner og andre additiver. Når vi i tillegg tar inn prøver produsert i felt, hvor det viser seg at komprimeringsgraden i forhold til utstøping i laboratoriet er meget forskjellig, samt at herdeforholdene til feltprøvene var ugunstige den første tiden, så blir det en matrise som blir for stor til å hente noen sammenhenger ut av.

Når vi undersøkte effekten av høy og lav vanddosering, så fant vi at materialparameterne endrer seg med dette. Likevel er denne effekten liten, sett i forhold til hva valg av mørtel har å si.

4.2 Tildanning av prøvestykker

I laboratorieprøvene hvor den laveste vanddoseringen ble benyttet, oppnådde vi som forventet den laveste sugporøsiteten. Med unntak av produkt Rep 1, var sugporøsiteten lavest i prøvene fra felt. Dette bekreftet at i sprøyteprosessen ble det benyttet mindre vann enn det var mulig å gjenskape i laboratorieforsøkene. Målingene av kapillær sugeshastighet og porøsitet viste en forskjell når prøvene fra felt ble sammenlignet mot de utstøpte prøvene fra laboratoriet. Det var spesielt makro-porøsiteten som var lav for feltprøvene. Med unntak av mørtelen KB 2, hadde alle feltprøvene lavere makroporøsitet enn de tilsvarende støpte prøvene. Dette tyder på en økt grad av komprimering ved sprøyting i felt.

Problemene som oppstod ved sprøytingens første dag, ga en dårligere kvalitet av produktene som ble sprøytet ut. Det ble avslørt i målingen av trykkfasthet, hvor produktene Rep 1 og Rep 3 oppnådde en lavere fasthet enn hva produsentene har deklarerert. Resultatene fra frosttestingen av produktene bekreftet i tillegg at kvaliteten var lavere for enkelte produkter enn forventet. Dette understreker viktigheten av gode og kontrollerte sprøyteforhold for å oppnå ønskede resultater.

Utviklingen av resistivitet for feltprøvene avviker i forhold til prøvene utstøpt i laboratoriet. Frem til første prøving er utviklingen for feltprøvene vesentlig langsommere sett i forhold til prøvene som er tildannet og lagret i laboratoriet. Når feltprøvene er tatt ut og lagringen i vannbadet starter, ser vi en markant økning i utviklingen av resistivitet. Det er to faktorer som

ansees å forårsake dette. For det første har platene blitt oppbevart utendørs i temperaturer ned mot 5°C, noe som reduserer utviklingen. Den andre forskjellen har vært at prøveplatene ikke har hatt tilgang til ekstern fuktighet og har tørket gradvis ut. Selv om platene ble dekket til med plast, hadde noe av plasten revnet under transport og ikke klart å beholde fuktigheten som var der. Prøvene fra felt hadde antageligvis laveste forhold mellom vann og bindemiddel, og det er dermed naturlig at de etter hvert utviklet den høyeste motstanden.

Det kan være en fordel å ha en så kort tid som mulig mellom utsprøyting i felt og levering og videre prøvetildanning i laboratoriet. Dersom dette ikke er mulig, må i hvert fall tiden være klart definert og lik under prøving av forskjellige produkter.

Resultatene indikerer at utstøping av prøvestykker i laboratoriet ikke gjensker vannforbruk og komprimering som oppnås i felt. Dette påvirker porøsiteten, men også utviklingen og størrelsen av resistiviteten. For fremtiden bør dokumentasjon og testing av tørrsprøytemørtler derfor kun være basert på prøver fra sprøyting.

4.3 Krav til resistivitet for tørrsprøytemørtler brukt for KB

Figuren 3.7 viser at det er et stort spenn når det kommer til resistivitet for produktene som benyttes ved installasjon av katodiske anlegg i Norge (flere størrelsesordener forskjell). For alle produktene skjedde størst endring av den spesifikke elektriske motstanden frem til 90 døgn. Alle produkter hadde utvikling også etter 90 døgn, men mer moderat. Siden utviklingen av resistivitet var relativt lik for produktene lagret i plast og produktene lagret i vannbad, er det lite trolig at utvasking av alkalier (utlekking) fra prøvestykkene har særlig innflytelse.

De målte verdiene av resistivitet for vannlaget feltprøver er gitt i tabell 4-1.

Tabell 4-1 Oppsummert resultater for alle produkter, utvikling av resistivitet ved lagring i vann. Hver verdi er et gjennomsnitt av fire prøvestykker. (fargekodene er forklart under i teksten)

| Alle produkter, feltprøver lagret i vann | | | | | | |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Rep 1 | KB 1 | Rep 2 | KB 2 | Rep 3 | KB 3 |
| Døgn | [Ω m] | [Ω m] | [Ω m] | [Ω m] | [Ω m] | [Ω m] |
| 28 | 26 | 30 | 135 | 45 | 76 | 225 |
| 90 | 178 | 61 | 6884 | 84 | 1650 | 1841 |
| 180 | 215 | 78 | 7388 | 99 | 2235 | 2155 |
| 270 | 244 | 91 | 23598 | 115 | 2601 | 2369 |
| 365 | 278 | 105 | 26508 | 138 | 2990 | 2531 |

Standarden som omhandler katodisk beskyttelse er NS-EN ISO 12696, og den angir en rekke ytelseskrav for hvordan beskyttelse av armering kan oppnås. I standarden oppgis det som en merknad at en mørtel som benyttes til reparasjon før installasjonen av katodisk beskyttelse skal ha en resistivitet som er 50 – 200 % av den opprinnelige betongen. Det samme kravet er også beskrevet i Statens Vegvesen R762 – Prosesskode 2 [2], samt i veilederen til Norsk forening for betongrehabilitering [3]. Når det gjelder innsprøytingsmørtelen som titannettet

sprøytes inn med, er det kun i veilederen det er gitt en anbefaling – «unngå elektrisk motstand over 50 Ω m». I standarden NS-EN ISO 12696 angis det at det må gjøres en vurdering.

Den opprinnelige brubetongen i vårt forsøk hadde i gjennomsnitt en verdi på 97 Ω m (lab) og rundt 110 Ω m (felt) ved 20°C. Målingene på kjerner og med NDT-utstyr i felt var sammenlignbare, og det kan vurderes om feltmålinger kan erstatte prøvetaking i framtiden. Brubetongens resistivitet skulle dermed tilsi at reparasjonsproduktene burde hatt en resistivitet i intervallet ca. 50 – 200 Ω m. To av reparasjonsproduktene oppfylte dette kravet etter 28 døgn (grønn i Tabell 4-1), mens mørtel Rep 1 viste en noe lav verdi. Etter 90 døgn prøving var det derimot kun en mørtel som oppfylte kravet (Rep 1), de andre produktene hadde en meget stor økning i motstand og lå langt over kravet til resistivitet for reparasjonsmørtler. Mørtelen Rep 1 utviklet seg noe videre etter 90 døgn, og kravet om 200 Ω m er så vidt ikke oppfylt etter 180 dager og framover.

For KB mørtlene er det anbefalt resistivitet inntil 50 Ω m i NFB veilederen. Dette oppnås for to av produktene etter 28 døgn. Verdiene som oppfyller dette kravet, er merket med en blå bakgrunn i Tabell 4-1. Som for reparasjonsproduktene har også disse mørtlene en videre utvikling der den spesifikke elektriske motstanden øker med tiden. Ingen produkt klarer 50 Ω m kravet etter 90 døgn testing. Det er verdt å legge merke til at to av KB-mørtlene oppfyller kravet som var gitt til reparasjonsmørtlene ved senere tidspunkter (lys blå i tabellen). Disse to produktene viser en forholdsvis lav motstand gjennom hele prøvingsperioden.

I feltforsøket kommer det til å være mulig å vurdere innflytelsen av resistivitet på effekten av katodisk beskyttelse. Hvorvidt kravet om 50 Ω m for KB mørtler er for konservativ kan studeres utfra resultatene fra feltprøvingen. Også krav til reparasjonsmørtlene vil bli vurdert i det videre arbeidet. Effekten av den veldig høye resistiviteten fra noen av produktene på virkningsgrad av KB vil bli interessant å følge i felt.

Resultatene fra laboratorieprogrammet viser at dokumentasjon av spesifikk elektrisk motstand for KB-mørtler og reparasjonsmørtler bør knyttes til en kontrollalder på minimum 90 døgn (modenhet). 28 døgn er for tidlig da det er vesentlig økning i elektrisk motstand i tiden etter. Resultatene fra forsøkene viser at det er liten forskjell i resistivitet for produktene som lagres i vann eller ved lagring i plast (selvuttørket), så lenge den spesifikke elektriske motstanden til produktet er lav/mindre enn 200 Ω m (noe som bør tilstrebes for slike produkter). Ettersom vannlagring er en vel definert eksponering og vanlig i betonglaboratoriet anses derfor en slik type prøvemethode som godt reproducerbar. Som krav for måling av resistivitet for denne type produkter anbefales det derfor at målingene utføres på sprøytete prøvestykker, og ved minimum 90 døgn alder og etter vannlagring i laboratoriet.

I 2022 kom standarden NS-EN ISO 12696 ut i ny utgave, men uten noen nye krav til verken reparasjonsmørtel eller innsprøytingsmørtelen for anodenett.

For noen av forsøkene har det blitt registrert resistivitet med unormalt høye verdier. Det er ingen tvil om at verdiene i seg selv er høye, men det kan stilles spørsmål om målemetoden

brukt i våre forsøk har en begrensning når mostanden i mørtel/betong blir for høy. Det er under arbeid en ny standardisert metode for måling av spesifikk elektrisk mostand. I høringsutgaven til denne standarden er det beskrevet et testoppsett som er annerledes enn vår metode. Det vil være av interesse å utføre parallelle målinger mellom metodene for å verifisere forskjellene og for å kunne stille riktige krav til prøvingsmetoder. Inntil videre anses Metode 443 i SVV Håndbok R210 brukt i prøving som pålitelig.

4.4 Bruk av overflatebehandling

Ved etableringen av forsøksfeltet ble alle prøvefelt delt i to, der den ene halvdelen ble dekket med en sementbasert membran. Tatt i betraktning de sprikende resultatene i frostbestandighet for alle produktene, kan det virke hensiktsmessig å anbefale bruk av membran for å beskytte mørtlene i en fryse/tine eksponering. En ytterligere forventet effekt ved bruk av membran vil være mer stabile fuktforhold i mørtlene og en derav mer stabil leveranse av strøm. Effekten av overflatebehandlingen på ytelsen av katodisk beskyttelse blir studert videre i feltforsøket.

5 Konklusjon

Funnene i rapporten peker på tre områder som er viktige med tanke på krav som stilles til mørtlene som inngår ved katodisk beskyttelse.

- 1) Prøvestykker må tildannes fra sprøytet mørtel:
Resultatene er entydige ved at tørrsprøytemørtler ikke kan tildannes i laboratoriet uten å innføre for store mengder av luft (makroporøsitet). Ved blanding og støping i laboratoriet må det brukes større mengde vann enn det som benyttes ved sprøyting i felt. Dokumentasjon og eventuell fremtidig prøving må derfor kun baseres på at mørtlene er sprøytet i felt.

- 2) Dokumentasjon av elektrisk motstand, minimum etter 90 døgn på vannlagrede prøver:
Resultatene fra måling av resistivitet viser at produktene har en utvikling som pågår over lengre tid. Først etter 90 døgn oppnås verdier som er representative for hva som kan forventes på lengre sikt. Det er en mindre forskjell i målt resistivitet for vannlagrede prøvestykker og prøvestykker som lagres innpakket (selvuttørket), når mørtlene som undersøkes har en lav resistivitet (under 200 Ωm). Vannlagring anses som en mer «veldefinert» lagring enn innpakking (selvuttørking).

- 3) Overflatebehandling er nødvendig med tanke på frost:
Resultatene fra frostprøvingen viser dårlig frostbestandighet for flere av produktene. Over tid vil de flere produkter derfor kunne få utfordringer ved bruk i værhardt kystmiljø. Avhengig av dokumentert frostbestandighet vil det være varierende behov for bruk av sementbasert membran.

6 Referanser

- [1] NS-EN ISO 12696:2012: Katodisk beskyttelse av stål i betong
- [2] Statens vegvesens Håndbok R762:2018
- [3] Lindland. J., Østmoen. T., Røtter. F., Helgedagsrud. T., Stavem. P., Lurfald. S.A (2016) Betongrehabilitering. Reparasjonsmetoder, utførelse og kontroll. Norsk Forening for Betongrehabilitering. 1 utgave
- [4] Hornbostel K., Antonsen R.E., Helgestad S.H. og Rognan O.M. (2020) Feltforsøk – mørtel egnet for katodisk beskyttelse: Beskrivelse av feltforsøket FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017 – 2021. Statens vegvesen rapport nr. 671
- [5] Statens vegvesens Håndbok R210:2016
- [6] Statens vegvesens Håndbok R211: 1997
- [7] NS-EN 1504-3:2005: Produkter og systemer for beskyttelse og reparasjon av betongkonstruksjoner – Definisjoner, krav, kvalitetskontroll og evaluering av samsvar – Del 3: Reparasjoner for bærende og ikke-bærende formål
- [8] NS-EN 13687-1:2002: Produkter og systemer for beskyttelse og reparasjon av betongkonstruksjoner – Prøvningsmetoder – Bestemmelse av termisk kompatibilitet – Del 1: Fryse-tine prøving med av-isnings salt
- [9] NS-EN 206:2013 + A2:2021 + NA:2022: Betong – Spesifikasjon, egenskaper, fremstilling og samsvar

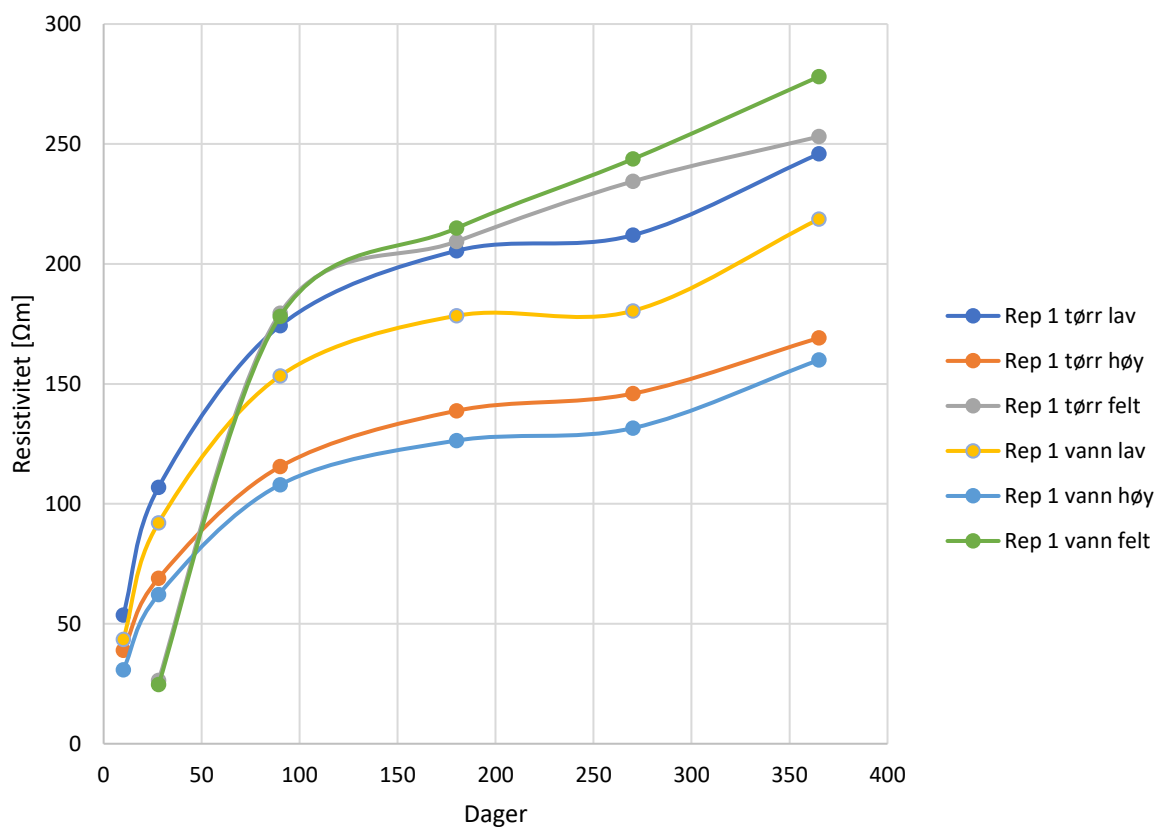
Vedlegg

Tabell V-1 Porøsitetmålinger for alle produktene i forsøket. Hver verdi er et gjennomsnitt av fire prøvestykker.

| Produktene | vann dosering | [%] | Densitet | | Sugmettet densitet | Sug- porøsitet | Makro- porøsitet | Total- porøsitet |
|------------|---------------|------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
| | | | Tørrdensitet | faststoff | | | | |
| | | | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [%] | [%] | [%] |
| Rep 1 | lav | 12,8 | 2040,0 | 2712,0 | 2232,1 | 19,22 | 5,56 | 24,78 |
| | høy | 14,0 | 1931,9 | 2645,9 | 2139,8 | 20,79 | 6,19 | 26,98 |
| | feltprøve | | 2089,4 | 2716,0 | 2294,0 | 20,45 | 2,60 | 23,10 |
| KB 1 | lav | 11,6 | 2035,6 | 2711,1 | 2220,2 | 18,46 | 6,46 | 24,92 |
| | høy | 13,6 | 1937,5 | 2699,3 | 2144,3 | 20,67 | 7,55 | 28,22 |
| | feltprøve | | 2105,5 | 2720,0 | 2283,0 | 17,75 | 4,90 | 22,60 |
| Rep 2 | lav | 13,6 | 1975,3 | 2600,9 | 2199,8 | 22,45 | 1,60 | 24,05 |
| | høy | 15,2 | 1878,9 | 2604,6 | 2127,3 | 24,84 | 3,03 | 27,86 |
| | feltprøve | | 2095,5 | 2537,0 | 2262,6 | 16,71 | 0,60 | 17,30 |
| KB 2 | lav | 12,0 | 2094,0 | 2650,0 | 2274,2 | 18,02 | 2,96 | 20,98 |
| | høy | 14,0 | 1961,9 | 2617,5 | 2166,5 | 20,46 | 4,58 | 25,04 |
| | feltprøve | | 2115,8 | 2647,0 | 2278,2 | 16,24 | 3,80 | 20,10 |
| Rep 3 | lav | 11,2 | 2032,8 | 2651,2 | 2227,5 | 19,47 | 3,86 | 23,32 |
| | høy | 12,8 | 1921,8 | 2665,1 | 2140,8 | 21,90 | 5,97 | 27,88 |
| | feltprøve | | 2107,5 | 2522,0 | 2248,7 | 14,12 | 2,30 | 16,40 |
| KB 3 | lav | 11,6 | 2018,1 | 2657,2 | 2215,5 | 19,74 | 4,31 | 24,05 |
| | høy | 12,8 | 1936,3 | 2686,5 | 2149,9 | 21,36 | 6,57 | 27,92 |
| | feltprøve | | 2147,1 | 2452,0 | 2258,1 | 11,11 | 1,30 | 12,40 |

Tabell V-2 - Akkumulert antall kg materiale pr. m² som løsner fra prøvene. Hver verdi er et gjennomsnitt av seks prøvestykker.

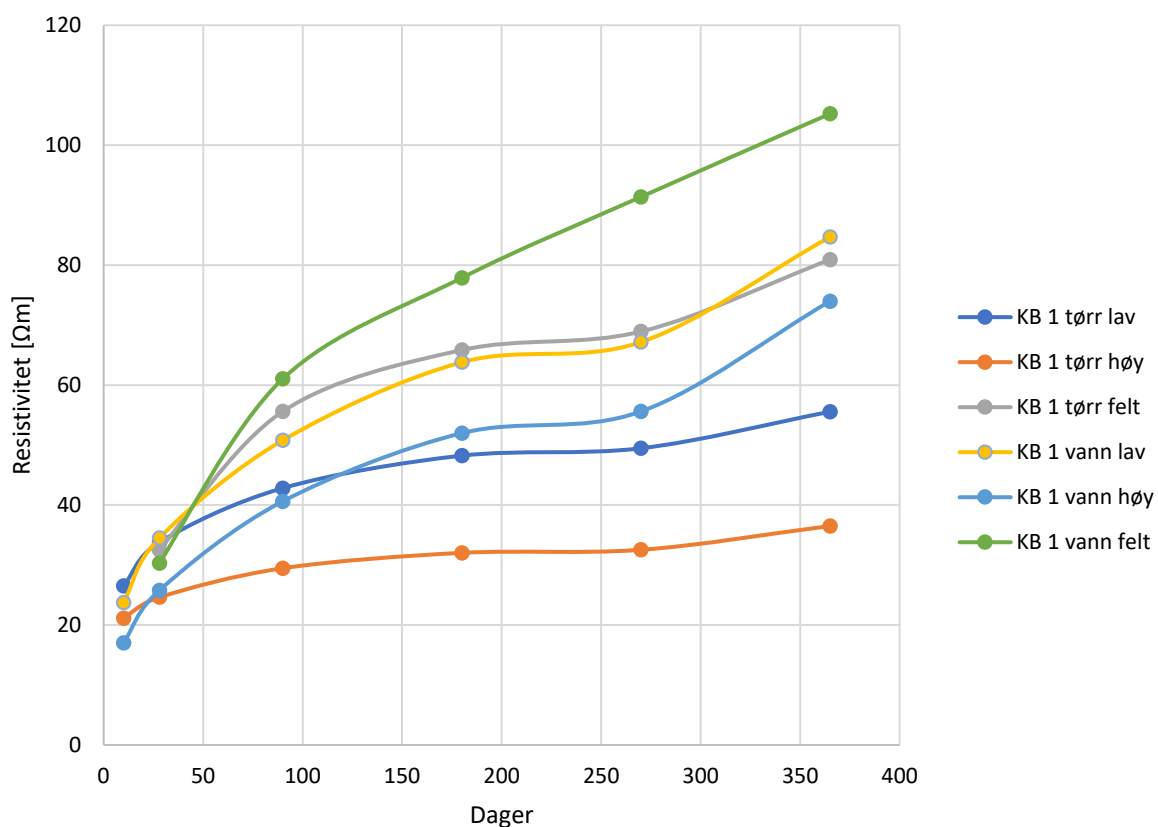
| | Avskalling [kg/m ²] | | | | |
|------------|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | 7 døgn | 14 døgn | 28 døgn | 42 døgn | 56 døgn |
| Meget god | | | | | 0,1 |
| God | | | | | 0,2 |
| Akseptabel | | | | | 1,0 |
| Rep 1 | 0,21 | 1,65 | 3,43 | 5,20 | 6,25 |
| KB 1 | 0,02 | 0,04 | 0,13 | 0,33 | 0,50 |
| Rep 2 | 0,01 | 0,03 | 0,08 | 0,12 | 0,16 |
| KB 2 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,11 | 0,20 |
| Rep 3 | 0,16 | 0,41 | 0,79 | 1,14 | 1,34 |
| KB 3 | 0,01 | 0,08 | 0,45 | 0,92 | 1,16 |



Figur V.1 Utvikling av resistivitet for produkt Rep 1 under ulike herdebetingelser. Hver verdi er et gjennomsnitt av fire prøvestykker.

Tabell V-3 – Oppsummert resultater for produkt Rep 1, resistivitet under ulike herdebetingelser.

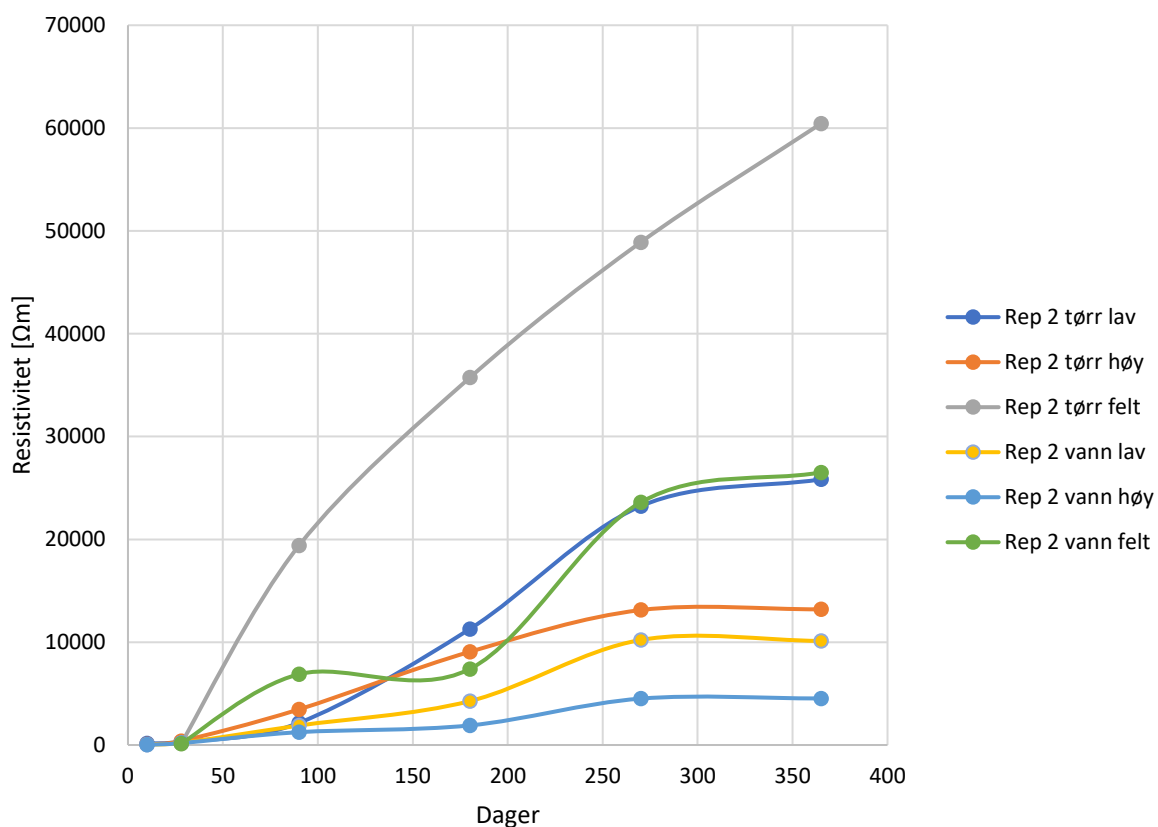
| Døgn | Lagret tørt | | | Vannlagret | | |
|------|-------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | Lav | Høy | Felt | Lav | Høy | Felt |
| | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] |
| 10 | 53,6 | 39,0 | | 43,5 | 30,8 | |
| 28 | 106,9 | 69,0 | 26,4 | 92,1 | 62,1 | 24,6 |
| 90 | 174,3 | 115,5 | 179,4 | 153,3 | 108,0 | 178,1 |
| 180 | 205,5 | 138,8 | 209,3 | 178,4 | 126,4 | 214,9 |
| 270 | 212,0 | 145,9 | 234,4 | 180,4 | 131,6 | 243,7 |
| 365 | 245,9 | 169,2 | 253,0 | 218,7 | 159,9 | 278,1 |



Figur V.2 Utvikling av resistivitet for produkt KB 1 under ulike herdebetingelser. Hver verdi er et gjennomsnitt av fire prøvestykker.

Tabell V-4 – Oppsummert resultater for produkt KB 1, resistivitet under ulike herdebetingelser.

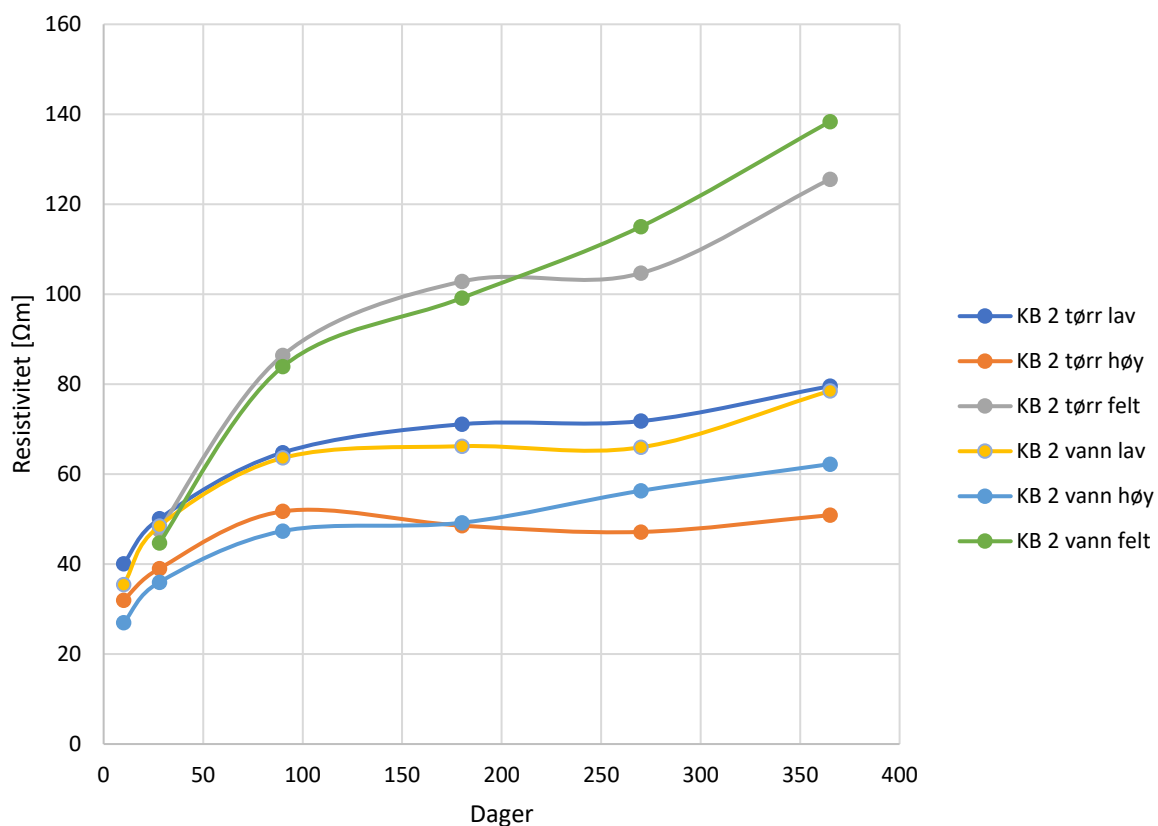
| Døgn | Lagret tørt | | | Vannlagret | | |
|------|-------------|------|------|------------|------|-------|
| | Lav | Høy | Felt | Lav | Høy | Felt |
| | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] |
| 10 | 26,5 | 21,2 | | 23,8 | 17,0 | |
| 28 | 33,8 | 24,6 | 32,5 | 34,5 | 25,8 | 30,3 |
| 90 | 42,8 | 29,5 | 55,6 | 50,8 | 40,6 | 61,0 |
| 180 | 48,2 | 32,0 | 65,9 | 63,8 | 52,0 | 77,9 |
| 270 | 49,5 | 32,5 | 68,9 | 67,2 | 55,6 | 91,4 |
| 365 | 55,6 | 36,5 | 80,9 | 84,7 | 74,0 | 105,2 |



Figur V.3 Utvikling av resistivitet for produkt Rep 2 under ulike herdebetingelser. Hver verdi er et gjennomsnitt av fire prøvestykker.

Tabell V-5 – Oppsummert resultater for produkt Rep 2, resistivitet under ulike herdebetingelser.

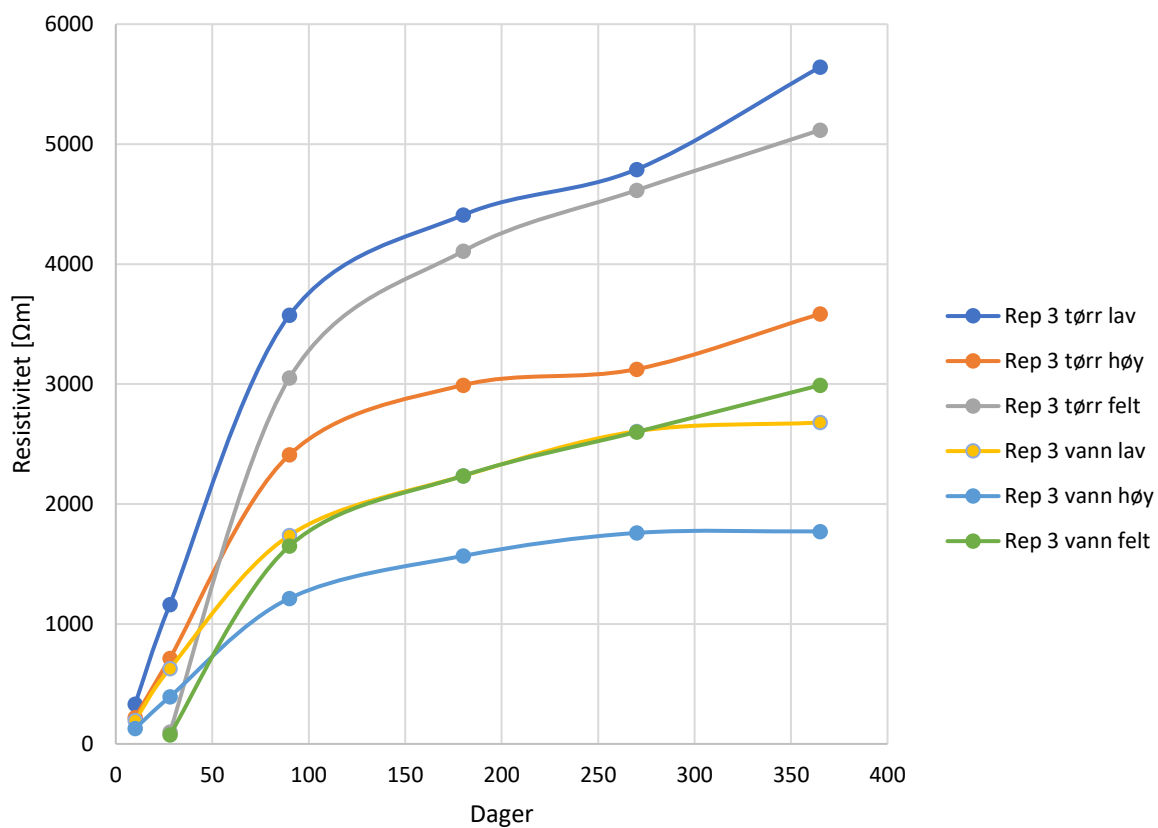
| Døgn | Lagret tørt | | | Vannlagret | | |
|------|-------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | Lav | Høy | Felt | Lav | Høy | Felt |
| | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] |
| 10 | 145,8 | 57,9 | | 42,6 | 20,4 | |
| 28 | 317,2 | 385,0 | 140,5 | 199,4 | 182,5 | 135,3 |
| 90 | 2150 | 3462 | 19383 | 1892 | 1247 | 6884 |
| 180 | 11276 | 9063 | 35725 | 4264 | 1904 | 7388 |
| 270 | 23225 | 13124 | 48890 | 10213 | 4513 | 23598 |
| 365 | 25837 | 13195 | 60441 | 10122 | 4527 | 26508 |



Figur V.4 Utvikling av resistivitet for produkt KB 2 under ulike herdebetingelser. Hver verdi er et gjennomsnitt av fire prøvestykker.

Tabell V-6 – Oppsummert resultater for produkt KB 2, resistivitet under ulike herdebetingelser.

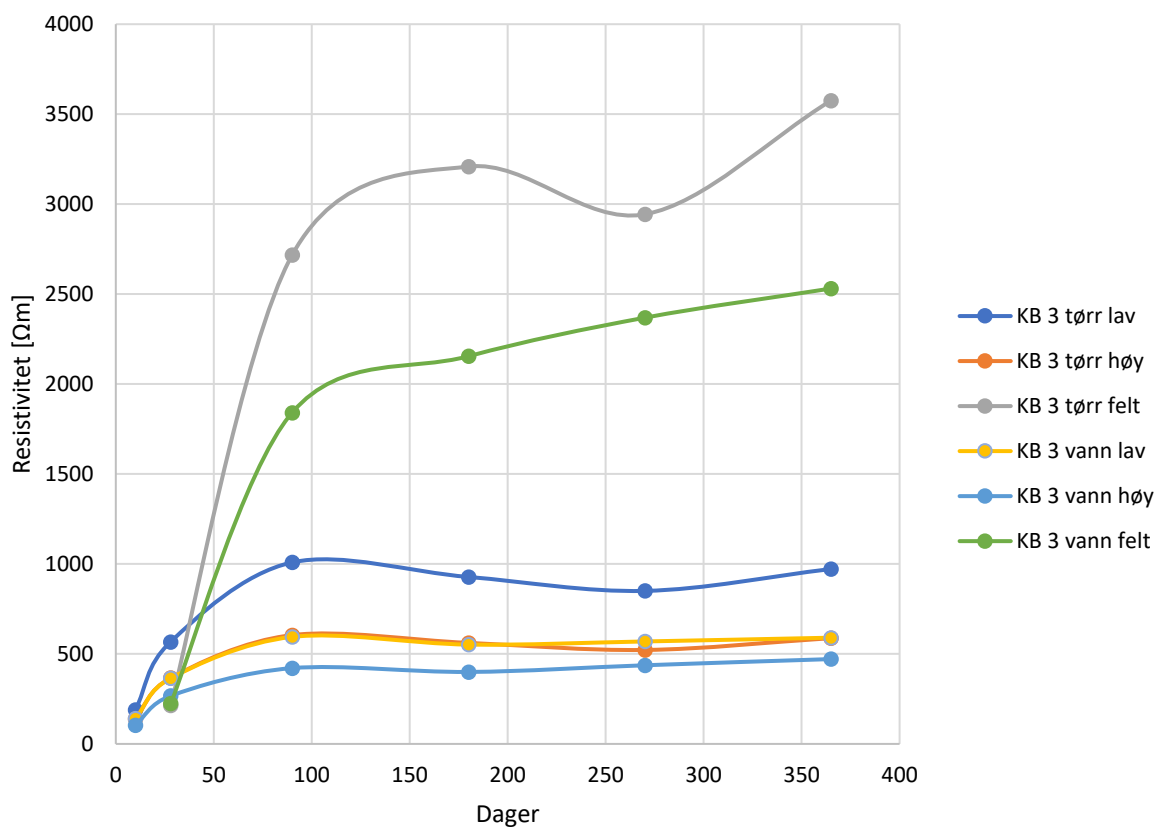
| Døgn | Lagret tørt | | | Vannlagret | | |
|------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| | Lav [Ωm] | Høy [Ωm] | Felt [Ωm] | Lav [Ωm] | Høy [Ωm] | Felt [Ωm] |
| 10 | 40,1 | 32,0 | | 35,4 | 26,9 | |
| 28 | 50,1 | 39,0 | 47,6 | 48,5 | 36,0 | 44,7 |
| 90 | 64,8 | 51,7 | 86,4 | 63,6 | 47,3 | 83,9 |
| 180 | 71,1 | 48,6 | 102,8 | 66,2 | 49,2 | 99,2 |
| 270 | 71,8 | 47,2 | 104,7 | 66,0 | 56,3 | 115,0 |
| 365 | 79,5 | 50,9 | 125,5 | 78,5 | 62,2 | 138,4 |



Figur V.5 Utvikling av resistivitet for produkt Rep 3 under ulike herdebetingelser. Hver verdi er et gjennomsnitt av fire prøvestykker.

Tabell V-7 – Oppsummert resultater for produkt Rep 3, resistivitet under ulike herdebetingelser.

| Døgn | Lagret tørt | | | Vannlagret | | |
|------|-------------|-------|------|------------|-------|------|
| | Lav | Høy | Felt | Lav | Høy | Felt |
| | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] |
| 10 | 331,8 | 219,8 | | 195,3 | 128 | |
| 28 | 1162 | 714,3 | 98,7 | 628,1 | 393,1 | 76 |
| 90 | 3574 | 2411 | 3051 | 1738 | 1214 | 1650 |
| 180 | 4409 | 2991 | 4108 | 2234 | 1567 | 2235 |
| 270 | 4790 | 3124 | 4616 | 2607 | 1759 | 2601 |
| 365 | 5641 | 3584 | 5117 | 2679 | 1772 | 2990 |



Figur V.6 Utvikling av resistivitet for produkt KB 3 under ulike herdebetingelser. Hver verdi er et gjennomsnitt av fire prøvestykker.

Tabell V-8 – Oppsummert resultater for produkt KB 3, resistivitet under ulike herdebetingelser.

| Døgn | Lagret tørt | | | Vannlagret | | |
|------|-------------|-------|-------|------------|-------|-------|
| | Lav | Høy | Felt | Lav | Høy | Felt |
| | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] | [Ωm] |
| 10 | 189,8 | 139,4 | | 140,7 | 104,8 | |
| 28 | 567,4 | 366,7 | 215,1 | 365,2 | 267,1 | 225,1 |
| 90 | 1009 | 604,7 | 2718 | 594,9 | 421,3 | 1841 |
| 180 | 927,8 | 561,4 | 3209 | 552,0 | 400,0 | 2155 |
| 270 | 850,5 | 522,2 | 2943 | 569,5 | 437,1 | 2369 |
| 365 | 972,1 | 587,8 | 3575 | 590,4 | 471,6 | 2531 |



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