



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2019 30 stp

Fakultet for realfag og teknologi

Resistivitet i mørtel i forbindelse med katodisk beskyttelse av betong

Resistivity of mortar related to cathodic protection of
concrete

Øyvind Fremmergård

Benjamin Udenæs

Byggeteknikk og arkitektur

Forord

Denne rapporten er et avsluttende arbeid for masterstudiet i ingeniørfag (byggeteknikk og arkitektur) ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, våren 2019. Rapporten er skrevet i samarbeid med Mapei AS og Ødegård og Lund AS, som er sentrale aktører innen levering av produkter og konsulenttjenester for betongrehabilitering. De har vært viktige bidragsytere på grunn av deres kompetanse innen fagfeltet. I tillegg har de eksterne veilederne i stor grad bidratt med både materielle og immaterielle ressurser og vi har nærmest hatt fri tilgang til laboratoriene og lokalene deres. Mapei AS har også lånt oss en leilighet i Nord-Odal som vi har disponert de gangene vi har vært der og dette setter vi svært stor pris på.

Gjennom studietiden på både OsloMet og NMBU har vi blitt introdusert for ulike fag hvor betong som byggemateriale har stått sentralt, og disse fagene har ført til egeninteresse innen temaet for begge forfatterne av rapporten. Vi har derfor ønsket å fordype oss i fagfeltet for å øke forståelsen av dette komplekse materialet, som gir uendelige muligheter i byggsammenheng. Arbeidet med rapporten har til tider vært utfordrende, men for det meste har det vært svært lærerikt og spennende. Det har gitt oss mange erfaringer som vi ser frem til å ta med oss inn i arbeidslivet. Vi ønsker å rette en stor takk til våre veiledere for hjelp de har bistått med gjennom arbeidet med denne rapporten.

NMBU:

Themistoklis Tsalkatidis

Mapei AS:

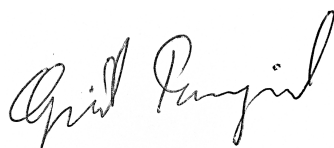
Paul Stavem
Charlotte Fagernæs
Laboranter ved FoU Mørtel

Ødegård og Lund AS:

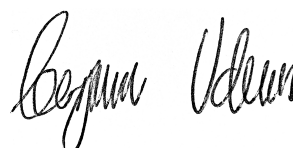
Olav Ødegård
Bjørn Lund

I tillegg ønsker vi å rette en stor takk til Kjell Langsrud i Consolvo for viktig hjelp med feltarbeid, og til Norsk Forening for Betongrehabilitering, som har bistått med et stipend på 15.000 kr.

Oslo 14.05.2019



Øyvind Fremmergård



Benjamin Udenæs

Sammendrag

Armeringskorrosjon er ansett som den nedbrytningsmekanismen som utgjør størst fare for betong og infrastruktur. I senere tid har bruken av elektrokjemiske rehabiliteringsmetoder gradvis økt og katodisk beskyttelse (KB) er av flere ansett som den eneste måten å stoppe kloridinitiert armeringskorrosjon på, uavhengig av kloridkonsentrasjon. Ved KB brukes sementbasert mørtel til reparasjon av skader og innstøping av visse anodesystemer. Gjeldende standardverk påpeker at resistiviteten i mørtlene som brukes ved KB ikke bør avvike for mye fra betongens resistivitet, men også at bruk av produkter som har vist seg å være egnet til KB er viktigere enn vilkårlige resistivitetsgrenser. Det er en mangel på klare, standardiserte retningslinjer for hva som skal ligge til grunn ved valg av mørtel til KB.

I Europa er det ikke krav til materialprodusenter om at resistivitet i sementbaserte materialer skal måles og deklarerer. Likevel utføres dette av noen og vanlig prosedyre er å måle på vannmettede prøvelegemer. Dette er ikke alltid representativt for realistiske bruksbetingelser.

Gjennom laboratorieforsøk har utviklingen av resistivitet i to ulike mørtler blitt undersøkt (to-elektrode-metoden). Prøvelegemer ble lagret ved fire ulike fuktnivåer over en periode på 90 døgn etter utstøping. Til sammenligning ble resistivitet målt på et betongdekke i et garasjeanlegg (Wenner-metoden), og det ble i tillegg skåret ut prøvelegemer fra betongen som ble tatt med til laboratoriet for videre undersøkelser. Ulike faktorer som påvirker resistivitet har blitt undersøkt og identifisert for både mørtel og betong. Laboratorieforskene viser at fukt har svært stor betydning for resistivitet og avdekker at resistivetsforholdet mellom de undersøkte materialene er ulikt ved vannlagring og luftlagring av prøvelegemer. Dette indikerer at resistivitetsmåling på vannlagrede prøvelegemer av mørtel kan gi et feilaktig inntrykk av hvordan strømfordelingen vil være i mørtel og betong ved KB. I verste fall kan dette lede til at det velges et mørtelprodukt som vil føre til et ineffektivt KB-anlegg.

Feltarbeidet viser at det kan være utfordrende å danne seg et presist bilde av betongens resistivitet, ettersom verdier i stor grad kan variere over et lite areal. Det finnes også flere kilder til feilmåling i felt. For å tolke målte verdier kreves det kjennskap til hvilke faktorer som påvirker resistiviteten og hva en bør ta hensyn til ved sammenligning av lab- og feltresultater. Standardisering av målemetoder for resistivitet i felt og på laboratorium anses som svært viktig for at bransjen i større grad skal undersøke resistivitet i mørtel og betong før etablering av katodisk beskyttelse. Ved katodisk beskyttelse av elementer med ett lags armering, kan det være hensiktsmessig å bruke mørtel med høy resistivitet for å sikre at strømmen fordeles til betongen og ikke til reparasjonen.

Abstract

Reinforcement corrosion is considered as the deterioration mechanism that poses the greatest threat to concrete and infrastructure. Over the past few decades the use of electrochemical techniques for corrosion protection has gradually increased and cathodic protection (CP) is by many considered to be the only way to stop corrosion caused by chlorides in concrete, regardless of chloride content.

In CP, cementitious mortar is used for repairing damages in the concrete and to embed certain types of anode systems. The standards point out that the resistivity of mortars used with CP should not deviate much from the concrete's resistivity, but also that the use of products which have been found to be suitable for CP is more important than arbitrary resistivity limits. There is a lack of clear, standardized guidelines for what should be taken into consideration when choosing mortars for CP. In Europe, there are no requirements for material manufacturers to measure and declare the resistivity of cementitious products. Nevertheless, this is done by some and the common procedure is to measure on water saturated specimens. This is not always representative of realistic moisture conditions.

Through laboratory trials, the development of resistivity in two different mortars has been investigated (two-electrode method). Specimens were stored at four different moisture levels over a period of 90 days after casting. For comparison, resistivity was measured on a concrete slab in a parking garage (Wenner method), and test specimens were also cut out from the concrete and was taken to the laboratory for further investigations. Various factors affecting resistivity have been investigated and identified for the mortar and the concrete. The laboratory trials show that moisture is of great importance for the resistivity and reveals that the resistivity ratio between the examined materials is different for saturated and unsaturated material. This indicates that resistivity measurements on saturated mortar specimens can give a false impression of how the current distribution will be in mortar and concrete in a CP system. The worst case scenario is that this can lead to selection of a mortar that causes inefficient cathodic protection.

The field work shows that it can be challenging to form a precise picture of the concrete's resistivity, since values can vary greatly over small areas. There are also several sources of measurement errors in situ. To interpret measured values, knowledge of which factors that affect the resistivity, and what should be taken into account when comparing laboratory and field results, is required. Standardization of measurement methods for resistivity in both field and laboratory is considered as very important to make the industry, to a greater extent, focus on investigating resistivity in mortar and concrete before establishing cathodic protection. In cathodic protection of elements with just one layer of reinforcement, it may be beneficial to use a mortar with high resistivity to ensure that the current is distributed to the concrete and not to the repair zone.

Figurliste

Figur 1.1: a) Pantheon, Roma b) Colosseum, Roma (Puttock, Udatert; Marcus, Udatert).....	5
Figur 2.1: Ettringittkrystaller i herdet sementpasta (CementLab, Udatert).....	11
Figur 2.2: Delmaterialene i betong og mørtel.....	12
Figur 2.3: Prinsipp for potensialmåling.....	14
Figur 2.4: Prinsipp for rapid chloride permeability test	15
Figur 2.5: Prinsipp for måling av bulk-resistivitet.....	17
Figur 2.6: Prinsipp for måling av overflateresistivitet.....	18
Figur 2.7: To poresystemer med ulik sammenkobling.....	19
Figur 2.8: Ulike typer porer som funksjon av v/c-tall (Kristiansen, Udatert).....	21
Figur 2.9: Fukt i porer ved ulike typer fuktopptak (Inspirert av Bøhlerengen (2018)).....	23
Figur 2.10: Konkav menisk i porehalsen som gir undertrykk i poren.....	23
Figur 2.11: Loggføring av temperatur og RF i betong (Ødegård & Lund AS, Udatert).....	25
Figur 2.12: Meniskens krumningsradius i forhold til RF (Stelmarczyk et al., 2017).....	26
Figur 2.13: Sorpsjonskurve (Prinsipp).....	27
Figur 2.14: Sorpsjonskurve for betong (prinsipp).....	28
Figur 2.15: Sorpsjonskurve med hensyn på fukthistorikk.....	28
Figur 2.16: Nedbrytningsmekanismer (Standard Norge, 2008).....	29
Figur 2.17: Korrosjonsprosessen.....	30
Figur 2.18: Karbonatisering av betong.....	31
Figur 2.19: Pittingkorrosjon (Inspirert av Lindland et al., 2016).....	32
Figur 2.20: Stegvis oppbygging av mekanisk reparasjon (Kristiansen et al., 1998).....	35
Figur 2.21: Prinsipp for kloriduttrekk.....	36
Figur 2.22: Prinsipp for realkalisering.....	37
Figur 2.23: Systemoppbygging av et KB-anlegg med reparasjon og innstøping av anode.....	38
Figur 2.24: Depolariseringskriteriet (Bjøntegaard & Myren, 2007).....	39
Figur 2.25: Titannett (Bjøntegaard & Myren, 2007).....	40
Figur 2.26: Båndanode over reparasjon i bunn av søyle (Privat foto).....	40
Figur 2.27: Stavanode (Bjøntegaard & Myren, 2007).....	41
Figur 2.28: Ledende belegg (Antonsen, 2017).....	41
Figur 3.1: Inndeling av rutenett for undersøkelser av betongdekket.....	46
Figur 3.2: Kontroll av relativ fuktighet over saltløsning.....	48
Figur 3.3: a) Herdekar (prinsipp) b) Herdekar.....	50
Figur 3.4: a) Blanding av mørtel b) Utstøpte prøvelegemer.....	51
Figur 3.5: a) og b) Utskjæring av prizmer c) Ferdig utskårne prizmer.....	52
Figur 3.6: a) Kjerneboring b) Utboret betongkjerne.....	52
Figur 3.7: Resistivitetmåling på laboratorium.....	53
Figur 3.8: a) Provisorisk overgang til 35 mm b) Proceq Resipod med overgang.....	54
Figur 3.9: Karbonatisering i a) betong b) borehull c) mørtel.....	55

<i>Figur 3.10: a) RF-måling i felt. b) Kalibrering av sonder på lab.....</i>	<i>56</i>
<i>Figur 3.11: a) Vannlagring av prøver b) Veiing av prøver c) Tørking av prøver.....</i>	<i>57</i>
<i>Figur 3.12: Kloridanalyse med Quantab-metoden.....</i>	<i>58</i>
<i>Figur 3.13: Ferdig planslipte betongkjerne til trykktesting.....</i>	<i>59</i>
<i>Figur 3.14: Hydraulisk trykkpresse for a) betong og b) mørtel.....</i>	<i>59</i>
<i>Figur 4.1: Karboniseringsdybde hvor betongprismene ble skåret ut.....</i>	<i>66</i>
<i>Figur 4.2: (a-f) Karboniseringsdybde i mørtelprismer.....</i>	<i>66</i>
<i>Figur 4.3: Oversikt over de utvalgte lokalitetene.....</i>	<i>68</i>
<i>Figur 5.1: Ujevn strømfordeling mellom betong og reparasjonsmørtel.....</i>	<i>79</i>
<i>Figur 5.2: Alternativ plassering av referanseelektrode.....</i>	<i>80</i>

Tabelliste

<i>Tabell 2.1: Potensial og sannsynlighet for korrosjon (ASTM, 2015).....</i>	<i>14</i>
<i>Tabell 2.2: Resistivitet og sannsynlighet for armeringskorrosjon (Polder et al., 2000).....</i>	<i>16</i>
<i>Tabell 2.3: Hovedmineralene i portlandsement (Gjerp et al., 2004).....</i>	<i>22</i>
<i>Tabell 2.4: RF ved forskjellige saltløsninger (Broudy, 1933; Choudhury et al., 2011).....</i>	<i>26</i>
<i>Tabell 2.5: Grenseverdier for korrosjonsrisiko (Lindland et al., 2016).....</i>	<i>33</i>
<i>Tabell 2.6: Analysemetoder for bestemmelse av kloridinnhold i betong (Østnor, 2015).....</i>	<i>34</i>
<i>Tabell 3.1: Betongkvaliteter med tilhørende data (Kompen, 2014).....</i>	<i>48</i>
<i>Tabell 3.2: Salter til laboratorieforsøk.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabell 3.3: Forventet RF for utblandet saltløsning.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabell 4.1: Sammenligning mellom teoretisk og målt RF over saltløsning.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabell 4.2: Oppnådd RF med blandede saltløsninger i herdekar.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabell 4.3: Utvikling av bulkresistivitet i mørtelprismer over tid.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabell 4.4: Utvikling av trykkfasthet i mørtelprismer over tid.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabell 4.5: Bulkresistivitet i betong målt over tid.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabell 4.6: Sammenligning mellom resistivitet målt etter 90 døgn og fuktmålinger.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabell 4.7: Måleresultater for ulike lokaliteter i felt.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabell 4.8: Trykkfasthet i betongkjerne.....</i>	<i>69</i>

Diagrammer

<i>Diagram 4.1: Resistivitet etter 7 døgn. Støpemørtel B20 og Confix.....</i>	<i>63</i>
<i>Diagram 4.2: Resistivitet etter 28 døgn. Støpemørtel B20, Confix og betong.....</i>	<i>64</i>
<i>Diagram 4.3: Resistivitet etter 56 døgn. Støpemørtel B20, Confix og betong.....</i>	<i>64</i>
<i>Diagram 4.4: Resistivitet etter 90 døgn. Støpemørtel B20, Confix og betong.....</i>	<i>65</i>
<i>Diagram 4.5: Kloridanalyser fra felt.....</i>	<i>67</i>

Innholdsfortegnelse

1 Innledning	3
1.1 Bakgrunn	3
1.2 Historie	5
1.3 Litteraturstudie	6
1.4 Formål	8
1.5 Presisering av problemstilling	8
1.6 Avgrensninger	10
2 Teori	11
2.1 Betong og mørtel	11
2.2 Elektriske egenskaper i betong og mørtel	13
2.3 Elektrisk resistivitet i betong	15
2.3.1 Ulike målemetoder	16
2.3.1.1 To-elektrode-metoden	16
2.3.1.2 Wenner-metoden	17
2.3.1.3 Korrelasjon mellom målemetoder	19
2.3.2 Faktorer som påvirker resistivitet	19
2.3.2.1 Fuktinnhold og ionekonsentrasjon	19
2.3.2.2 V/C-tall	20
2.3.2.3 Klorider	21
2.3.2.4 Temperatur	21
2.3.2.5 Sementtype	22
2.3.2.6 Karbonatisering	22
2.4 Fukt i betong	23
2.4.1 Absolutt fuktinnhold og vannmetningsgrad	24
2.4.2 Relativ fuktighet	25
2.4.2.1 Måling av relativ fuktighet i betong	26
2.4.3 Sammenheng mellom absolutt og relativ fuktighet	27
2.5 Armeringskorrosjon	29
2.5.1 Armeringskorrosjon forårsaket av karbonatisering	31
2.5.1.1 Måling av karbonatiseringsdybde	32
2.5.2 Kloridinitiert armeringskorrosjon	32
2.5.2.1 Kloridanalyse	34
2.6 Betongrehabilitering	34
2.6.1 Mekanisk reparasjon	34
2.6.2 Elektrokjemisk kloriduttrekk	36
2.6.3 Elektrokjemisk realkalisering	36
2.6.4 Katodisk beskyttelse	37
2.6.4.1 Overvåkning av katodisk beskyttelse	38

2.6.5 Anodematerialer	39
2.6.5.1 Titannett	39
2.6.5.2 Båndanode	40
2.6.5.3 Stavanode	40
2.6.5.4 Ledende belegg og maling	41
2.6.6 Mørtel til bruk i KB-anlegg	41
2.6.7 utfordringer med katodisk beskyttelse	42
3 Metode	44
3.1 Bakgrunn for laboratoriearbeid	44
3.1.1 Utstøping av mørtelprismer	44
3.1.2 Ulike fuktbetingelser på laboratoriet	45
3.1.3 Resistivitetsmåling på laboratorium	45
3.2 Bakgrunn for feltarbeid	46
3.2.1 Resistivitetsmåling i felt	47
3.2.2 Måling av RF, absolutt fuktinnhold og poremetning	47
3.2.3 Kloridanalyse	48
3.2.4 Bestemmelse av betongens trykkfasthet	48
3.3 Gjennomføring av eksperimentelt arbeid	49
3.3.1 Bruk av mettede saltløsninger for å oppnå ønsket RF	49
3.3.2 Utstøping av mørtelprismer på lab	51
3.3.3 Uttak av betongprøver i felt	52
3.3.4 Måling av resistivitet på lab	54
3.3.5 Måling av resistivitet i felt	55
3.3.6 Måling av karbonatiseringsdybde	56
3.3.7 RF-måling i felt og kalibrering av RF-prober	56
3.3.8 Poremetning, absolutt fuktinnhold og porevolum	58
3.3.9 Kloridanalyse	58
3.3.10 Bestemmelse av trykkfasthet	60
4 Resultater	62
4.1 Resultater fra laboratorium	62
4.2 Resultater fra felt	69
5 Diskusjon	71
6 Konklusjon	82
7 Videre arbeid	83
8 Kilder	84
Vedlegg	93

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Mange er av oppfatningen om at betong er et evigvarende materiale og det finnes betongkonstruksjoner som ble oppført for flere tusen år siden, som fremdeles står i dag. En av de viktigste egenskapene til betong er den høye trykkfastheten, men til gjengjeld er strekkfastheten svært lav. Derfor inkluderer moderne bruk av betong stålarmering, som i samvirke med betongen gir god strekkapasitet og tillater lange, slanke konstruksjoner med høy lastkapasitet. Armering har blitt et uunnværlig element i betong, men det er blant annet armeringens tilstedeværelse som utgjør fare for at skader oppstår. Ulike nedbrytningsmekanismer forårsaker armeringskorrosjon som kan føre til en rekke negative konsekvenser. Den viktigste konsekvensen er at armeringen brytes ned og at bæreevnen reduseres, og om korrosjonsprosessen pågår over lang nok tid kan bæreevnen bli så lav at konstruksjonen kollapser. Dette kan medføre store økonomiske konsekvenser og i verste fall tap av menneskeliv.

Det anslås at sementproduksjon på verdensbasis står for ca. 5-6% av det totale CO₂-utslippet (Multiconsult, 2018) og er med dette en av de største kildene til CO₂-utslipp. I et samfunn hvor klimaproblematikk er et viktig tema er det essensielt å vurdere hvordan utslippene kan reduseres. Forskning viser at betong tar opp betydelige mengder CO₂ ved karbonatisering og dette er positivt for klimaregnskapet (Kjellsen et al., 2005), men likevel er det viktig å redusere CO₂-utslipp ytterligere. I følge Imbabi et al. (2012) kan det forventes at prisen på sement vil dobles innen år 2030, som et resultat av økte energikostnader og klimaavgifter. En kan redusere behovet for nybygg ved å ta vare på eksisterende bygningsmasse og med dette reduseres også behovet for produksjon av sement. Dette kan blant annet gjøres ved å gjennomføre jevnlig tilstandsanalyse av konstruksjoner, identifisere skadeårsaker og iverksette passende rehabiliteringstiltak før skadeomfanget blir for stort. Det er viktig at rehabiliteringen er effektiv over tid, slik at at konstruksjoners levetid kan maksimeres.

Betongrehabilitering kan være både kostbart og tidkrevende, og det er nødvendig med grundige vurderinger av skadeomfang for å velge riktig rehabiliteringsmetode. Det vil i mange tilfeller være hensiktsmessig å rehabilitere fremfor å rive og bygge nytt, da en vellykket betongrehabilitering kan utvide levetiden til et bygg betraktelig.

Nedbrytning av armering i betong kan forhindres eller reduseres på ulike måter, og de siste 40 årene har bruken av elektrokjemiske behandlingsmetoder gradvis økt. Om dette prosjekteres, utføres og oppfølges riktig kan en oppnå effektiv beskyttelse av armeringen som kan forlenge en konstruksjons levetid med flere tiår (EBAB, 2017). Metodene muliggjør

også beskyttelse ved kloridinitiert korrosjon, hvilket er vanskelig å oppnå ved ren mekanisk reparasjon (Østvik, 2011).

Elektrokjemisk behandling baserer seg i prinsipp på at det tilføres en beskyttelsesstrøm til konstruksjonen som skal bevege seg fra en anode, gjennom betongen og til armeringen. Derfor er betongens elektriske motstand en av faktorene som må tas hensyn til ved prosjektering av anlegg for elektrokjemisk beskyttelse. For å sikre enhetlig strømfordeling er det en forutsetning at skader som har oppstått i betongen repareres. Til slike reparasjoner benyttes ulike typer mørtel og det er derfor også viktig å kjenne til mørtelens elektriske egenskaper ved prosjektering.

Det er flere faktorer som påvirker den elektriske motstanden i mørtel og betong, og en av de viktigste faktorene er fuktinnhold. Når elektrisk motstand måles på laboratorier er det vanlig at dette utføres på utstøpte prøvelegemer av mørtel. For å sikre reproducerbarhet og stabile målinger blir prøvelegemene lagret i vann. Dette er imidlertid ikke en god sammenligning med fuktforholdene i felt, hvor betongen i svært mange tilfeller ikke er vannmettet. Derfor kan det være vanskelig å velge en mørtel med elektrisk motstand som passer i forhold til den opprinnelige betongens elektriske motstand.

Denne rapporten vil i hovedsak dreie seg om hvordan usikkerhet rundt elektrisk motstand i mørtel og betong kan skape utfordringer knyttet til den elektrokjemiske behandlingsmetoden *katodisk beskyttelse* (KB). Praktiske erfaringer og forskning viser at feil eller mangler ved prosjektering av KB-anlegg kan føre til lite effektiv beskyttelse.

1.2 Historie

Betong er det mest brukte byggematerialet i verden (Li et al., 2009; SINTEF, Udatert). En av grunnene til dette er at råmaterialene som benyttes i fremstilling av betong er tilgjengelig i store deler av verden. Bruken av betong som byggemateriale strekker seg langt tilbake i tid og de eldste sporene av betong dateres tilbake til 5600 år f. Kr. hvor forskere har funnet ruiner av betong med sandholdig tilslag, bundet sammen med kalkholdig bindemiddel (Gjerp et al., 2004).



Figur 1.1: a) Pantheon, Roma b) Colosseum, Roma (Puttock, udatert; Marcus, udatert)

Det finnes betongkonstruksjoner som ble oppført under antikkens tid som fremdeles står i dag. Dette sier mye om betongens bestandighet, men det må presiseres at dette er uarmerte konstruksjoner. Colosseum og Pantheon i Roma (figur 1.1) er eksempler på slike betongkonstruksjoner og disse byggverkene vitner om at romernes kompetanse innen konstruksjon var forut for sin tid. Med kjennskap til betongens høye trykkapasitet og lave strekkapasitet prøvde romerne å armere betongen med bronse. Dette viste seg å være mislykket da betong og bronse har ulik temperaturutvidelse (Lindland et al., 2016). Først på midten av 1800-tallet tok den franske gartneren, Joseph Monier (1823-1906), i bruk stål som armering i sine leirkrukker og han patenterte teknikken i 1867. På 1900-tallet ble beregningsteorien utviklet og med dette fikk betong sitt gjennombrudd som moderne byggemateriale, ved bruk av stålstenger i betongkonstruksjoner (Gjerp et al., 2004).

I nyere tid har det vært nødvendig med rehabilitering av armerte betongkonstruksjoner da skader har oppstått som følge av blant annet armeringskorrosjon. Elektrokjemiske metoder har vist seg å være effektivt for å forhindre armeringskorrosjon, og siden 1970-tallet har dette stadig blitt mer utbredt (Consolvo, Udatert).

1.3 Litteraturstudie

I tidligere forskning har det vært lagt stor vekt på å undersøke i hvilken grad ulike faktorer påvirker den elektriske resistiviteten i sementbaserte materialer. På laboratorium har en ofte kontroll på faktorer som temperatur, fuktighet og materialsammensetning. I felt vil forholdene i større grad være usikre og man kjenner sjeldent til alle påvirkende parametere uten å gjennomføre undersøkelser. Det har vært nødvendig å utføre tester av betongen i felt for å bli kjent med forholdene som kan påvirke resistiviteten. Tidligere forskning har vært nødvendig for å belyse hva som må undersøkes, hvilke utfordringer en bør være oppmerksom på og ikke minst hva som ikke er godt dekket opp av litteraturen. I dette kapitlet presenteres utdrag fra litteraturstudien som anses som særlig relevante for problemstillingen.

Resistivitet og katodisk beskyttelse

Det finnes mye informasjon om at elektrisk resistivitet har stor betydning for bestandighetsegenskapene til betong og flere presiserer at armering i betong med høy resistivitet vil være godt beskyttet mot korrosjon (Polder et al., 2009; Osterminski et al., 2012; Hou et al., 2017). Utfordringer kan oppstå ved elektrokjemisk behandling av eldre betong hvor armering korroderer. I NS-EN ISO 12696 - *“Katodisk beskyttelse av stål i betong”* anbefales det at reparasjonsproduktene som benyttes skal ha en resistivitet på 50-200% av den opprinnelige betongen (Standard Norge, 2016). Denne verdien dukker også opp i Polder (2009) sin forskning. Likevel finnes en merknad i NS-EN ISO 12696 som forteller at reparasjoner utført med et materiale som er kjent for å være kompatibelt med katodisk beskyttelse er viktigere enn vilkårlige resistivitetsgrenser (Norsk Standard, 2016).

Forskningen antyder at det er en mangel på standardiserte metoder for resistivitetmåling (Hornbostel, 2015; Layssi et al., 2015; Spragg et al., 2013). ASTM (American Society for Testing and Materials) har utviklet en standard for måling av bulk-resistivitet og en standard for måling av overflateresistivitet, men begge disse er tilbaketrasket (ASTM Standard, 2016; ASTM Standard, 2012a). ASTM C1760-12 er en annen standard for måling av bulk-resistivitet og denne er tilgjengelig, men omfatter bare måling på vannmettede prøver (ASTM Standard, 2012b). Det er ikke funnet noen europeisk standard for måling av overflateresistivitet.

Påvirkende faktorer

Tidligere forskning viser at fukt er essensielt for at sementbaserte materialer skal kunne lede strøm og at en økning i vannmetningsgrad av poresystemet vil gi en økning i ledningsevne (Polder et al., 2000; Andrade et al., 2011; Osterminski et al., 2012; Saleem et al., 1996; Enevoldsen et al., 1994). Det finnes i tillegg en del forskning som vurderer hvordan relativ fuktighet i betong kan relateres til poremetning og ledningsevne (Jiang & Yuan, 2013; Andrade et al., 2011).

Rupnow og Icenogle (2011) forklarer hvordan porevolumet i sementbaserte materialer øker med økende v/c-tall og at dette avgjør hvor mye vann materialet kan inneholde. Dette vil også påvirke porestrukturen, som beskriver hvordan porene er koblet sammen. Porevannets kjemiske sammensetning er også en viktig parameter, da mengden og typer ioner i materialet avgjør hvor ledende porevannet er (Hornbostel, 2015; Saleem et al., 1996; Elkey & Sellevold, 1995).

I følge Elkey og Sellevold (1995) vil temperatur påvirke resistiviteten i betong. De påpeker at temperatur er en komplisert faktor, ettersom temperaturfølsomheten også avhenger av vannmetningsgrad. Espelid et al. (1998) støtter at temperatur i stor grad påvirker resistivitet, men forteller imidlertid ikke hvordan eller i hvilken grad. Spragg et al. (2013) foreslår en korrigering av temperatur som bygger på Arrhenius lov.

Bruk av pozzolane tilsetningsmaterialer kan ifølge Osterminski et al. (2012) gi opptil fire ganger så høy resistivitet som vanlig portlandsement. Chen et al. (2014) beskriver hvordan reaksjonprodukter fra pozzolanreaksjonen fyller porer og gir en mindre sammenhengende porestruktur.

Litteraturen preges av laboratorieundersøkelser og ofte er eksperimenter utført på vannmettede prøvelegemer (Spragg et al., 2012; Ghosh & Tran, 2015; Liu & Presuel-Moreno, 2014). Det finnes imidlertid mindre forskning på sementbaserte materialers egenskaper i felt, hvor klimatiske påkjenninger vil påvirke ledningsevnen over tid. Det er også vanskelig å finne informasjon om i hvilken grad måling av ledningsevne brukes som et verktøy i forbindelse med katodisk beskyttelse (KB). Polder (2009) presiserer at dette er en vesentlig del av grunnarbeidet når et KB-anlegg skal dimensjoneres.

Målemetoder

Forskningen legger også vekt på egnethet av ulike målemetoder i felt og på laboratorium (Polder et al., 2000; Layssi et al., 2015). Måling av overflatemotstand med bruk av Wennermetoden, er en ikke-destruktiv metode som anbefales av flere forskere (Gowers & Millard, 1999; Ghosh & Tran, 2015; Silva et al., 2011). Det har blitt publisert flere artikler som påpeker utfordringer med denne målemetoden og hvordan en kan korrigere avlesninger for eventuelle feil (Sengul & Gjørsv, 2008; Morris et al., 1996).

1.4 Formål

Et viktig mål med denne rapporten er å gjøre forskning som byggebransjen kan dra nytte av. Ideelt sett bør forskningen kunne bidra til forbedring av enkelte metoder for betongrehabilitering.

Delmål kan tematisk deles inn i fire punkter:

1. Undersøke om resistivitet målt på vannlagrede prøvelegemer på laboratorium er overførbart til hvordan produktets resistivitet vil være i felt.
2. Undersøke hvordan ulike faktorer påvirker ledningsevnen i mørtel og betong. Gjennom ulike felt- og laboratorieforsøk skal det forsøkes å identifisere slike faktorer.
3. Undersøke om måling av overflatemotstand i felt (Wenner-metoden) danner et tilstrekkelig grunnlag for valg av "riktige" reparasjonsprodukter til katodisk beskyttelse, samt belyse eventuelle utfordringer med denne metoden.
4. Vurdere om relativ fuktighet er et godt mål på fuktinnholdet i betong, samt undersøke om "borehullsmetoden" er bedre egnet for feltarbeid enn andre metoder.

1.5 Presisering av problemstilling

Armeringskorrosjon i betong anses som en av de største utfordringene knyttet til infrastruktur i industriland (Hornbostel, 2015) og ifølge Angst (2018) er det et stort gap mellom utfordringene vi står overfor og innsatsen som legges i forskning og utvikling i forbindelse med armeringskorrosjon. Korrosjon er en elektrokjemisk prosess og de elektrokjemiske egenskapene i betongen som omslutter armeringen har stor betydning for om korrosjonsprosessen initieres og i hvilken hastighet korrosjonen foregår.

Det er bred enighet om at de elektriske egenskapene til en betong har stor betydning for betongens bestandighet, men selv om det gjøres forskning på området ser det ut til at industrien utnytter seg lite av denne sammenhengen. Personlig kommunikasjon med eksterne veiledere for denne oppgaven har også gitt inntrykk om at resistivitetsmåling i liten grad brukes i feltundersøkelser, i kommersiell sammenheng:

"Det opplyses i mange tilfeller at elektrisk motstand i reparasjonsmørtel skal være 50% til 200% av eksisterende betong ved aktuelle bruksbetingelser, men Mapei AS har så langt ingen erfaring med at elektrisk motstand dokumenteres for eksisterende betong eller at

bruksbetingelsene oppgis ved tilbudsforespørsler på katodiske anlegg.” (Paul Stavem, teknisk sjef i Mapei AS, personlig kommunikasjon, 27. mars 2019)

Litteraturstudien indikerer at det tilsynelatende ikke finnes noen europeiske, standardiserte metoder for måling av resistivitet i sementbaserte materialer. På grunn av dette kan usikkerhet, knyttet til utførelse eller tolkning av resistivetsmålinger, trolig være en årsak til at det benyttes lite i praksis. Det er heller ingen krav til måling av resistivitet på reparasjonsmørtel på laboratorium. Likevel har deler av industrien sett at dette kan være nyttig informasjon og Mapei AS forteller at de utfører slike målinger på mørtel som er utviklet med hensyn på katodisk beskyttelse (Paul Stavem, teknisk sjef i Mapei AS, personlig kommunikasjon, 7. desember 2019).

Det er usikkert hvordan andre leverandører praktiserer dette. Mapei forteller også at de utfører resistivetsmålinger på vannmettede, overflatetørre prøvelegemer. I NS-EN 12190, som blant annet omhandler trykktesting av mørtler, spesifiseres det at prøvelegemer av sementbaserte mørtler skal lagres i vann fra avforming til trykktesting (Standard Norge, 1998). På laboratorium utføres målinger av bulk-resistivitet gjerne på de samme prøvelegemene. Dette er praktisk og det gir stabile og reproducerbare måleverdier, hvilket sannsynligvis er årsaken til at det gjøres på nettopp denne måten. Usikkerheten oppstår når produktene skal brukes i felt, hvor man ikke har kontroll på fukt og andre faktorer som påvirker resistivitet.

Måling av overflateresistivitet i felt er en ikke-ødeleggende metode og resultater kan avleses umiddelbart. Hvis man vet hvilke faktorer som påvirker målingene kan resultatene sammenlignes med resultater fra laboratorium. Videre kan dette brukes til å velge et reparasjonsprodukt som er “elektrokjemisk egnet” til den aktuelle betongen for hvert prosjekt.

Litteraturstudien avdekker at det er gjort mye forskning på elektrisk ledningsevne i sementbaserte materialer, men det er åpenbart mangel på forskning som fokuserer på hvordan ledningsevnen er i felt og hvordan en kan overføre kunnskap fra laboratorium til faktiske rehabiliteringsprosjekter.

1.6 Avgrensninger

Nedbrytning av betong og betongrehabilitering er store, omfattende temaer. Grunnet tidsbegrensning har det vært nødvendig å sette noen rammer for hva som skal undersøkes. Enkelte temaer som anses som viktige ved betongrehabilitering kan være mindre viktige for denne rapportens spesifikke problemstilling. Andre avgrensninger skyldes at vurdering av enkelte aspekter krever kompetanse innen fag som ikke er inkludert i fagplanen for studiene ved OsloMet og NMBU.

Når elektrokjemiske behandlingsmetoder diskuteres er det vanskelig å omgå temaene elektro og kjemi. Likevel er dette fagfelt som i liten grad inngår i fagplanen. Rapporten går ikke mer i detalj på elektrokjemi enn hva som er nødvendig for å besvare problemstillingen.

Ved rehabilitering av betong, som er skadet på grunn av armeringskorrosjon, kan for eksempel det å forhindre inntrengning av vann være svært viktig, men slike ting vil ikke dekkes i denne rapporten, hvor hovedfokuset ligger på resistivitet i mørtel og betong i forbindelse med katodisk beskyttelse.

Selv om økonomi er et viktig tema for betongrehabilitering og valg av behandlingsmetoder er det ikke ansett som relevant for problemstillingen og diskuteres ikke i denne rapporten.

Det finnes flere måter å måle resistivitet på. I denne rapporten vil det fokuseres på to av metodene:

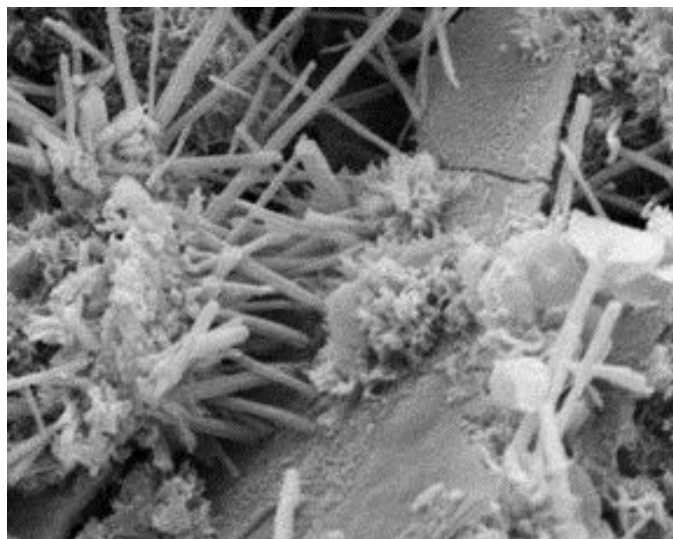
- a. Overflatemåling med fire prober (Wenner-metoden).
- b. Bulk-måling på prøvelegemer med bestemt geometri (to-elektrode-metoden).

2 Teori

2.1 Betong og mørtel

Betong består i hovedsak av vann, sement og tilslagsmaterialer i form av sand og stein. I dag inneholder de fleste betongresepter tilsetningsstoffer av ulike typer, som modifierer betongens egenskaper i fersk og herdet fase. Det finnes også tilsetningsmaterialer som kan blandes med sementen, som flygeaske, silikastøv og slag, som gir en tettere betong.

Sement er et hydraulisk bindemiddel som betyr at det reagerer kjemisk med vann. Blandingen mellom sement og vann kalles sementpasta og danner grunnlaget for fastheten i sementbaserte materialer. Den kjemiske reaksjonen i sementpastaen kalles hydratisering og gjør at det dannes et gel-lag på overflaten av sementpartiklene. Videre i herdeprosessen dannes det ettringittkrystaller på gel-laget og disse blir gradvis lengre i løpet av herdefasen.

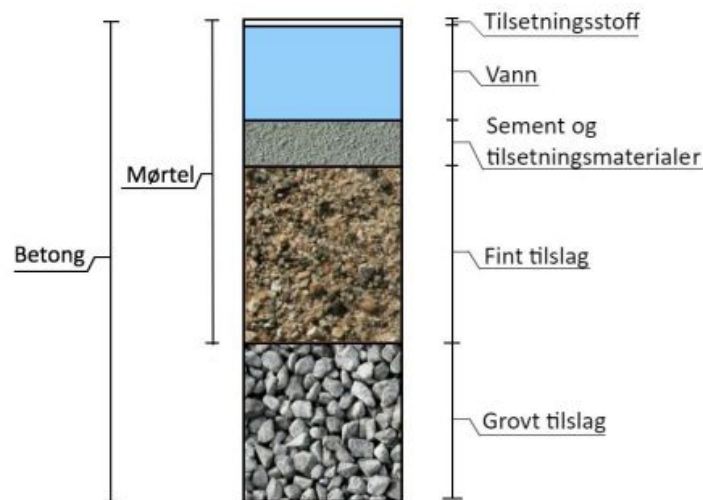


Figur 2.1: Ettringittkrystaller i herdet sementpasta (CementLab, Udatert)

Fasthetsutviklingen skjer ved at krystallene fra flere sementpartikler møtes og vokser inn i hverandre. Betongen oppnår det meste av sin fasthet i løpet av de første dagene etter blanding og fasthetsutviklingen flater deretter ut, men kan fortsette i lang tid.

Betongens kvalitet vil i stor grad styres av vann/ment-forholdet (v/c -tall). I vanlig betong uten tilsetningsstoffer vil et v/c -tall på ca. 0.4 i teorien være nødvendig for å oppnå 100% hydratisering. I praksis kreves det noe mer vann, og særlig i felt, hvor ukontrollert uttørking også forekommer. Om det brukes mer vann enn det som er nødvendig for at all sementen skal hydratisere vil dette resultere i et økt porevolum i betongen, som vil ha negativ innvirkning på betongens bestandighetsegenskaper. Et økt v/c -tall vil også i stor grad påvirke fastheten ved at avstanden blir større mellom sementpartiklene og ettringittkrystallene.

Dagens betongresepter består som oftest av 7-8 delmaterialer. Ca. 70% av betongvolumet består av tilslag. Vann, sement, tilsetningsstoff og tilsetningsmaterialer utgjør de resterende 30%. Tilslaget bør som regel være en gradert blanding med både fine og grove partikler og normalt har tilslagsmaterialene i betong en størrelse på 0-22 mm (Maage, 2015). Krav til betong er angitt i NS-EN 206 "Betong - Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar". Standarden setter blant annet krav til betongens sammensetning (masseforhold) ut fra definerte eksponeringsklasser og bestandighetsklasser (Standard Norge, 2017).



Figur 2.2: Delmaterialene i betong og mørtel

I boken "Civil Engineering Materials" fra 2015 forklarer Claisse (kap. 28) at det finnes mange typer mørtel som er basert på ulike bindemidler, men at det ved reparasjon av betong er vanlig å bruke sementbaserte mørtler, ettersom disse har lik temperaturutvidelse som betong. Forutenom grovt tilslag består denne typen mørtel i prinsipp av de samme materialkomponentene som betong, vist i figur 2.2. Mangelen på grovt tilslag utgjør en forskjell i struktur, sammensetning og funksjon. Det finnes mange bruksområder for mørtel, som for eksempel overflatearbeid, murverk, liming og reparasjon av betong, og mørtelens sammensetning avhenger av hva den skal brukes til. Det er vanlig at tørrmørtel leveres i sekker og blandes "in situ", men mørtel kan også leveres våt (ferdig blandet) og kan påføres ved sprøyting.

De første sementbaserte mørtlene inneholdt kun vanlig sement, men ettersom dette satte begrensninger for blant annet fasthetsutvikling og heftstyrke har det i dag blitt vanlig å bruke blandede sementer med innslag av pozzolane materialer og ulike polymerer som polyuretan, epoxy, akryl og termoherdende vinyl (Ducman et al., 2018). Slike tilsetninger som modifierer mørtelens egenskaper er svært viktig for sementbaserte spesialmørtler som skal brukes til konstruktive reparasjoner av betong og disse mørtlene inneholder ofte mer sement enn andre mørtler.

Krav til reparasjonsmørtel spesifiseres i NS-EN 1504 - *“Produkter og systemer for beskyttelse og reparasjon av betong- konstruksjoner”*. Standarden består av 10 deler og omfatter krav til prosjektering og utførelse, samt krav til materialprodusenter (Standard Norge, 2005). Standarden setter imidlertid ikke krav til mørtelens sammensetning, som NS-EN 206 gjør for betong. I NS-EN 1504 er det derimot satt funksjonskrav til mørtler, som minimum heftstyrke, trykk- og strekkfasthet. Dette tillater produsenter å holde informasjon om sementinnhold, tilsetningsmaterialer og tilsetningsstoffer konfidensielt.

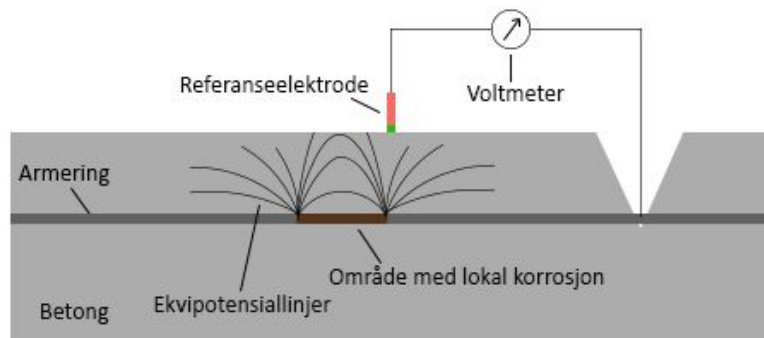
Normal tilslagsstørrelse i mørtel er ca. 0-4 mm. En mørtel med finkornet sand krever en høyere vannmengde for å få samme konsistens som en mørtel med grovkornet sand. Dette kan forklares ved at finkornet sand har et større overflateareal som vann kan binde seg til. Ved å tilsette mer vann vil også v/c-tallet øke, hvilket resulterer i høyere porevolum. (Haach et al., 2011). Dette kan direkte knyttes til betong, hvor tilslaget er mye større enn i mørtel. I grove trekk betyr dette at en må tilsette mer vann i mørtel enn i betong for å oppnå samme støpelighet og mørtel vil derfor ha høyere v/c-tall enn betongen, som igjen gir et større porevolum.

2.2 Elektriske egenskaper i betong og mørtel

Det eksisterer metoder for vurdering av bestandighetsegenskaper til betong, som bygger på de elektriske egenskapene til materialet. Flere av disse metodene er utviklet for å undersøke eller overvåke korrosjonsaktivitet, enten i felt eller på laboratorium. Forskningen viser til blant annet EIS (impedansspektroskopi), måling av polariseringsmotstand og EKP (potensialmålinger) som mulige ikke-destruktive metoder (Sassolini et al., 2019).

Korrosjon er en elektrokjemisk prosess og når armering korroderer oppstår det anodiske og katodiske områder på armeringsoverflaten. Mellom disse områdene beveger det seg strøm via ioner i porevannet i betongen og potensialforskjeller (spenningfall) kan måles fra betongoverflaten (Elsener, 2002).

Måling av elektrokjemisk potensiale (EKP) er en undersøkelsesmetode som kan fortelle noe om sannsynligheten for armeringskorrosjon. Metoden baserer seg på at en måler potensialforskjeller mellom anode og katode på armeringsoverflaten. Korrosjon vil skape elektriske felter i betongen som kan måles ved å trykke en referanseelektrode, med et kjent potensial, mot oppfuktede områder på betongoverflaten (Sassolini et al., 2019). Referanseelektroden er koblet til et voltmeter, som videre er koblet til armering og i de fleste tilfeller må en hugge opp betongen for å komme til armering. På denne måten kan en raskt undersøke sannsynligheten for korrosjon over større områder.



Figur 2.3: Prinsipp for potensialmåling

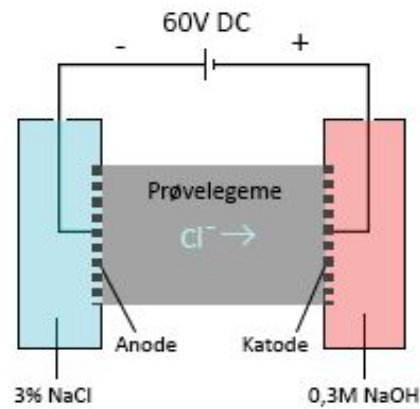
Det er laget tabeller med empiriske verdier som sier noe om sannsynligheten for korrosjon (tabell 2.1). Slike tall er helt avhengig av hvilken type referanseelektrode som brukes og dette er informasjon som må oppgis. Verdiene i tabellen gjelder for referanseelektrode av kobber/kobbersulfat (CSE).

E_{corr} (mV CSE)	Sannsynlighet for korrosjon
> -200	Mindre enn 10% sannsynlighet
-200 til -350	Usikkert
< -350	Mer enn 90% sannsynlighet

Tabell 2.1: Potensial og sannsynlighet for korrosjon (ASTM Standard, 2015)

En utfordring med potensialmålinger er at det kan være vanskelig å tolke resultatene og ofte er det gradienter som er interessante og ikke nødvendigvis forhåndsbestemte verdier (Elsener, 2002). Dette er den eneste metoden for å anslå sannsynlighet for korrosjon som er standardisert av ASTM (Sassolini et al., 2019). I Europa finnes ingen standard for denne metoden.

En annen testmetode som baserer seg på betongens elektriske egenskaper er RCPT (rapid chloride permeability test). I testen måles mengden av elektrisk ladning (columb) som beveger seg gjennom et prøvelegeme på 6 timer. Strømmen beveger seg via ioner når en ekstern strømkilde kobles til. På hver ende av prøvelegemet monteres en metallplate og et reservoar. Det ene reservoaret inneholder en løsning av natriumklorid, og det andre en løsning av natriumhydroksid (Suprenant, 1991). Prinsippet er at mengden ladning som passerer gjennom prøvelegemet vil avhenge av mengden kloridioner som trenger inn i materialet.



Figur 2.4: Prinsipp for rapid chloride permeability test (RCPT)

Navnet er noe villedende da en faktisk ikke undersøker motstanden mot kloridinntrengning (permeabilitet), men derimot ledningsevne/resistivitet. Dessuten er det ikke bare kloridionene som vil påvirke resultatet, men også ionene i porevannet fra sement/vann-reaksjonen. Metoden har også blitt kritisert for at spenningen er for høy og at dette vil resultere i at prøven varmes opp, hvilket påvirker ledningsevnen (Stanish et al., 2001). Testen begrenser seg hovedsakelig til nyere betong som ikke allerede er kloridinfisert. Felles for de overnevnte testmetodene er at måleresultater vil avhenge av materialets elektriske resistivitet.

2.3 Elektrisk resistivitet i betong

Elektrisk motstand kan uttrykkes på følgende måte ved Ohms lov:

$$R = \frac{U}{I} \quad (2.1)$$

Hvor R er motstanden (Ohm), U er spenningen (Volt) og I er strøm (Ampere). Den målte motstanden i et prøvelegeme vil imidlertid kun være overførbart til prøvelegemer med tilsvarende geometri. Elektrisk resistivitet, også kalt spesifikk motstand, er en materialspesifikk, geometrisk uavhengig faktor som sier noe om et materiales evne til å motstå strømgjennomgang. Resistivitet benevnes gjerne med den greske bokstaven ρ (rho) og måles ofte i $k\Omega \text{ cm}$. Dette er den fysiske egenskapen til materialer som kan variere mest, og for betong kan resistiviteten være alt mellom $1 k\Omega \text{ cm}$ til $10^5 k\Omega \text{ cm}$ (Hornbostel, 2015), avhengig av en rekke faktorer som omtales i kapittel 2.3.2 *Faktorer som påvirker resistivitet*. Konduktivitet, som beskriver ledningsevnen til et materiale, er den inverse av resistivitet. Resistivitet er gitt ved ligning (2.2).

$$\rho = R \cdot K \quad (2.2)$$

Hvor ρ er materialets resistivitet ($k\Omega \text{ cm}$), R er materialets målte motstand ($k\Omega$) og K er en korreksjonsfaktor for geometri. Korreksjonsfaktoren er avhengig av prøvelegemets

utforming og kan enten bestemmes eksperimentelt eller ved numeriske metoder som FEM-analyse (Morris et al., 1996). Dette forklares nærmere i kommende delkapitler.

Resistivitet er en parameter som kan fortelle mye om sementbaserte materials egenskaper. I likhet med metodene nevnt i kapittel 2.2 *Elektriske egenskaper i betong og mørtel* kan resistivitet brukes som en indikator på blant annet korrosjonsaktivitet, porøsitet og permeabilitet. På samme måte som for potensialmålinger er det laget tabeller med empiriske resistivitetsverdier som tilsvarer sannsynlighet for korrosjon.

Resistivitet i betong, ρ , k Ω cm	Sannsynlighet for korrosjon
$\rho \leq 10$	Høy
$10 < \rho < 50$	Moderat
$50 < \rho < 100$	Lav
$\rho > 100$	Neglisjerbar

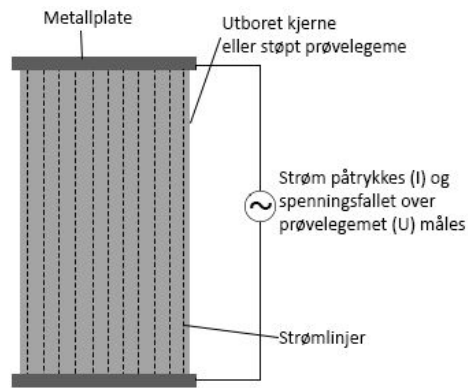
Tabell 2.2: Resistivitet og sannsynlighet for armeringskorrosjon (Polder et al., 2000)

2.3.1 Ulike målemetoder

Det finnes flere metoder for måling av resistivitet i sementbaserte materialer. Det som skiller metodene fra hverandre er i hovedsak elektrodeoppsett og strømtype (AC/DC). Elektrodeoppsettet avgjør hva man faktisk måler, bulk-resistivitet eller overflateresistivitet. Noen av metodene er bedre egnet på laboratorium, mens andre metoder er utviklet for å være enkle å bruke i felt. I denne rapporten fokuseres det på de to mest brukte metodene, *to-elektrode-metoden* og *Wenner-metoden*. Forskning viser at likestrøm (DC) gir polariseringseffekter i prøvelegemet som vil føre til feilavlesninger (Layssi et al., 2015). Derfor benyttes fortrinnsvis vekselstrøm (AC) til måling av resistivitet.

2.3.1.1 To-elektrode-metoden

Metoden brukes til å måle bulk-resistivitet, også kalt volum-resistivitet, og kan være en rask og enkel målemetode. Dessuten kan målinger utføres på de samme prøvelegemene som skal brukes til trykktesting.



Figur 2.5: Prinsipp for måling av bulk-resistivitet

Det påføres en vekselstrøm (AC) og man måler potensialforskjellen (spenningsfallet) gjennom materialet (Layssi et al., 2015). Med Ohms lov kan dette regnes om til motstand og med riktig korreksjonsfaktor for geometri, K (Ligning 2.3) kan en finne resistiviteten i materialet. Denne metoden kan brukes på prøvelegemer med konstant tverrsnitt og lengde, som for eksempel utstøpte sylindere eller utborede kjerner. Før prøver med slik geometri er korreksjonsfaktoren K som følger:

$$K = A/L \quad (2.3)$$

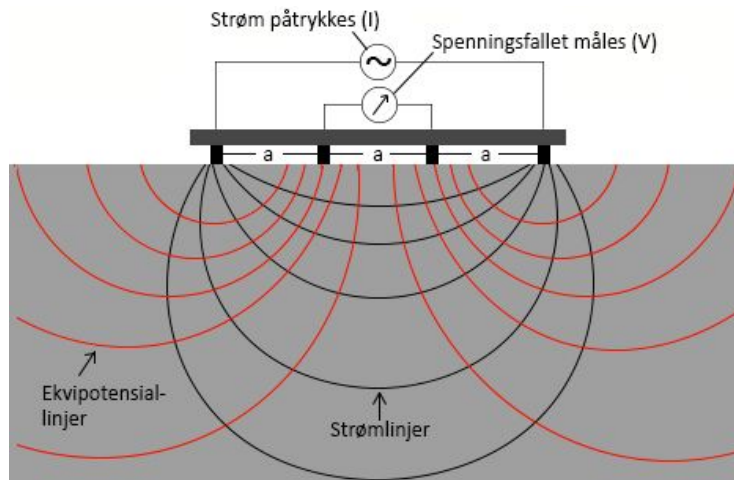
Hvor A er prøvestykkets tverrsnittsareal og L er prøvestykkets lengde. Resistiviteten regnes derfor ut etter ligning (2.4):

$$\rho = R(A/L) \quad (2.4)$$

Av praktiske årsaker er to-elektrode-metoden best egnet på laboratorium. Det er kritisk at det er god kontakt mellom elektrodene og materialet. Dette er vanligvis ikke noe problem på utstøpte prøvelegemer, men utborede kjerner kan ha noe ujevn overflate og derfor er det vanlig å bruke oppfuktede svamper i sjiktet mellom elektrode og prøve. Enkelte laboratorier brukes også ulike typer gel for å sikre god kontakt.

2.3.1.2 Wenner-metoden

Wenner-metoden er en portabel, ikke-destruktiv metode for måling av overflateresistivitet. Metoden ble utviklet av Frank Wenner for måling av resistivitet i leire og i senere tid har denne metoden blitt tilpasset måling på betong (Gowers & Millard, 1999). Fire måleprober, med lik avstand a , trykkes mot betongoverflaten. Mellom de to ytterste probene blir det påtrykket en konstant strøm, og spenningsfallet mellom de to innerste probene måles. Motstanden, som er et forhold mellom spenning og strøm, kan dermed regnes ut.



Figur 2.6: Prinsipp for måling av overflateresistivitet

På samme måte som for to-elektrode-metoden multipliseres den målte motstanden med en korreksjonsfaktor for geometri for å finne resistiviteten. Morris et al. (1996) skriver at standard korreksjonsfaktor for overflateresistivitet bygger på at en antar et "semi-uendelig" betongvolum. Dette betyr i praksis at prøvestykket må være stort nok til at geometrien ikke forstyrrer målingene og med en slik forutsetning er korreksjonsfaktoren K som følger:

$$K = 2 \pi a \quad (2.5)$$

Hvor a er probeavstand (cm). Resistiviteten kan derfor regnes ut etter ligning (2.6).

$$\rho = 2 \pi a R \quad (2.6)$$

Ved måling av overflateresistivitet på laboratorium kan en bruke andre korreksjonsfaktorer som tar hensyn til prøvelegemenes begrensede størrelse. Gowers og Millard (1999) har kartlagt flere potensielle feilkilder ved måling av overflateresistivitet på laboratorium og i felt, og forklarer hvordan en kan ta hensyn til dette. Slike feilkilder kan skyldes prøvelegemenes geometri, betongens inhomogene struktur, dårlig overflatekontakt, lokale variasjoner i betongsammensetning, armering med mer. De har funnet ut at strømmen beveger seg dypere i betongen med økende probeavstand og at større probeavstand minsker påvirkningen av tilslag. Samtidig forklarer de at armering kan ha stor innvirkning på måleresultatene, da jern leder strøm mye bedre enn betong, og at det er vanskeligere å unngå armering når probeavstanden er stor. Mindre probeavstand vil føre til større spredning i måleresultater, og derfor er det viktig å utføre flere målinger. Gowers og Millard (1999) konkluderer blant annet med at probeavstanden bør være større eller lik $1.5 \cdot D_{\max}$ (største tilslagsfraksjon) og mindre eller lik $1/4$ av betonglegemets tykkelse. Weydert og Gehlen (1999) konkluderer i sin forskning med at Wenner-metoden er den enkleste metoden å bruke for måling av resistivitet, men at reproduserbare og representative verdier kun er mulig å oppnå når det ytterste sjiktet av betongen er vannmettet. De foreslår at betongen forvannes 24-48 timer før måling av overflatemotstand i felt.

2.3.1.3 Korrelasjon mellom målemetoder

Forskning viser at verdier overestimeres ved bruk av Wenner-metoden i forhold til to-elektrode-metoden. Morris et al. (1996) nevner 2.63 som et riktig forhold mellom teoretisk overflateresistivitet og bulk resistivitet.

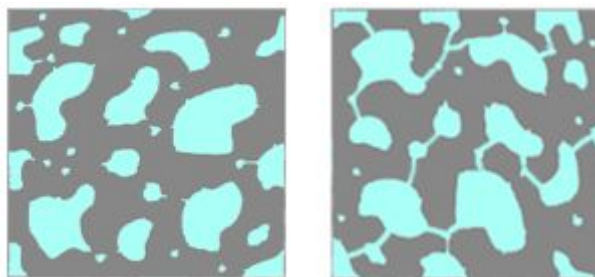
Sengul og Gjørsv (2008) påpeker at endring i probeavstand har svært stor betydning på mindre prøvelegemer, men at variasjonen er mindre ved måling på et større betongvolum. Videre forteller de at forskjellen i målt overflateresistivitet og bulk-resistivitet er omtrent 10%, så lenge forholdet mellom probeavstand og prøvelegemets tykkelse er mindre enn 0.25. For større probeavstander rapporterer de at overflateresistiviteten øker betydelig.

Dette betyr at for et 200 mm tykt betongdekke bør probeavstanden være mindre enn 50 mm for å redusere overestimering av resistivitet med Wenner-metoden.

2.3.2 Faktorer som påvirker resistivitet

2.3.2.1 Fukttinnhold og ionekonsentrasjon

Forskning viser at fukt er den faktoren som har størst innvirkning på den elektriske resistiviteten i sementbaserte materialer (Polder et al., 2000; Andrade et al., 2011; Osterminski et al., 2012). Dette er nærmere beskrevet i kapittel 2.4 *Fukt i betong*. Porevolum er det som styrer hvor mye vann materialet kan inneholde og porestruktur avgjør om nettverket av porer er sammenhengende eller ikke. Det totale porevolumet kan deles inn i to klasser; åpne og lukkede porer. Åpne porer er de som er en del av det sammenhengende poresystemet og disse inkluderer luftporer, kapillærporer og gelporer. Det åpne poresystemet har kontakt med utsiden av materialet og om forholdene ligger til rette kan strøm ledes gjennom disse poregangene. Lukkede porer er isolert fra det sammenhengende poresystemet og bidrar ikke til økt ledningsevne. Det samme gjelder for "blindveier". Figur 2.7 viser eksempel på hvordan sementpasta kan ha samme porevolum, men ulik sammenkobling mellom porer, som vil være avgjørende for resistiviteten i materialet.



Figur 2.7: To poresystemer med ulik sammenkobling

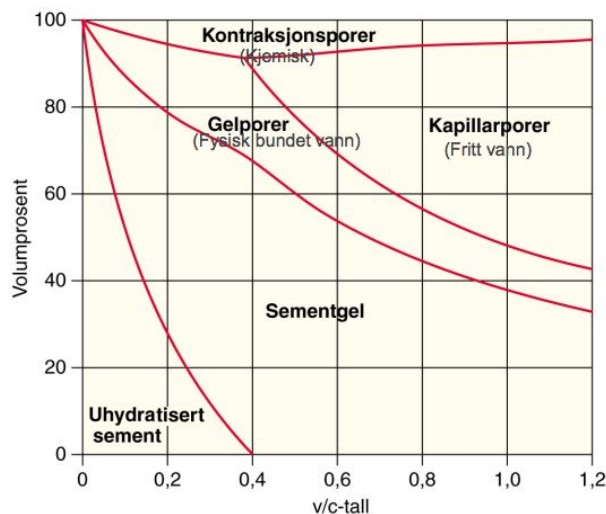
Rent vann har svært lav ledningsevne og fungerer nærmest som en isolator, men om det tilføres ioner i vannet blir løsningen en elektrolytt, som betyr at løsningen kan lede strøm (Golnabi et al., 2009). Løsningens ledningsevne er påvirket av mengde og type ioner i elektrolytten. Ulike typer ioner har forskjellig mobilitet og dette beskriver hvor fort ionene kan diffundere (spre seg). Strøm bæres av ioner og ioner med høy mobilitet vil derfor kunne flytte strøm raskere enn ioner med lavere mobilitet.

Den kjemiske reaksjonen som oppstår mellom sement og vann frigjør store mengder hydroksidioner (OH^-) med høy mobilitet og dette gjør at porevannet kan lede strøm. Det vil også finnes andre typer ioner i sementbaserte produkter som sulfationer (SO_4^{2-}), kaliumioner (K^+), kalsiumioner (Ca^{2+}) og natriumioner (Na^+). Disse påvirker også ledningsevnen, men har lavere mobilitet enn hydroksidionene (Hornbostel, 2015). Mengden porevann og den kjemiske sammensetningen av porevannet vil på denne måten i stor grad påvirke materialets ledningsevne.

Strøm vil alltid bevege seg der hvor motstanden er minst. I betong og mørtel kan dette likevel bety at strømmen må bevege seg langs nokså "krokete" veier, da minste motstands vei er bestemt av porestrukturen og ikke nødvendigvis er en rett linje. Områder som ikke er sammenkoblet med det åpne poresystemet vil også fungere som hindringer som strømmen må bevege seg rundt og på denne måten vil en høy andel av lukkede porer også kunne bidra til økt resistivitet. I tillegg vil for eksempel tilslagsmaterialer, som vanligvis har svært høy resistivitet i forhold til sementpastaen (Hou et al., 2017), ha stor betydning for materialets ledningsevne, da strømmen må bevege seg rundt de relativt isolerende tilslagspartiklene.

2.3.2.2 V/C-tall

Forholdet mellom vann og sement kalles v/c-tall og har stor betydning på sementbaserte materialers egenskaper. Dette har direkte innvirkning på trykkfasthet, hvor et høyt v/c-tall vil resultere i et større porevolum og en mindre tett betong. På denne måten vil v/c-tallet ha betydning for bestandighetsegenskapene, da et høyt v/c-tall vil gi lav permeabilitet. Dette er ensbetydende med at materialet får lavere motstand for både inntrengning av gass og væske, samt strømtransport (Polder et al, 2009). V/c-tallet vil i tillegg avgjøre hvilke typer porer som oppstår i materialet, som vist i figur 2.8.



Figur 2.8: Ulike typer porer som funksjon av v/c-tall (Kristiansen, Udatert)

I dag finnes vannbesparende tilsetningsstoffer (P-stoff og SP-stoff) som gjør at en kan bruke mindre vann og oppnå samme konsistens. Dette gjør at v/c-tallet kan reduseres, hvilket har innvirkning på både trykkfasthet, porevolum og dermed bestandighetsegenskaper.

2.3.2.3 Klorider

Som nevnt, har ionekonsentrasjonen i porevannet betydning for ledningsevnen. Høy permeabilitet i materialet vil kunne tillate inntrengning av klorider fra eksterne kilder som sjøvann og veisalt. En rapport fra Statens Vegvesen forteller at det i dag utelukkende brukes natriumklorid til salting av veier på vinteren og det rapporteres om bruk av magnesiumklorid på sommeren til støvdemping (Statens Vegvesen, 2007). Rapporten nevner også tidligere bruk av kalsiumklorid og magnesiumklorid på vinteren og dette er svært hygroscopiske salter, som vil si at de tiltrekker seg fuktighet. Hverken natriumklorid eller vann er konduktivt i seg selv, men når natriumklorid løses i vann frigjøres kloridioner (Cl⁻). At det tilføres mer ioner til den allerede elektrolytiske væsken vil føre til ytterligere redusert resistivitet. Enevoldsen et al. (1994) forklarer at kloridinnholdet er avgjørende for ledningsevnen når fuktinnholdet holdes konstant. Elkey & Sellevold (1995) antyder at tilsetning av 3-6% NaCl reduserer resistiviteten i vannmettet betong med hele 50%. Dette er delvis årsaken til at klorider utgjør fare for armeringskorrosjon, som omtales nærmere i kapittel 2.5.2 *Kloridinitiert armeringskorrosjon*.

2.3.2.4 Temperatur

Ytre påvirkninger har også betydning for resistivitet i betong og mørtel. Temperatur kan ha betydning ved at økt temperatur reduserer resistiviteten og omvendt. Dette skyldes at økt temperatur senker viskositeten til den elektrolytiske porevæsken og øker mobiliteten til ionene som bærer strømmen (Bertolini & Polder, 1997; Polder, 1998). Elkey og Sellevold (1995) nevner at temperatur påvirker resistiviteten med +3% pr. 1% økning i poremetning over 70%. Gowers og Millard (1999) hevder at en justering av overflateresistivitet på +1 kΩ cm pr. 3 °C temperaturfall kan brukes til praktiske formål (Wenner-metoden).

2.3.2.5 Sementtype

Vanlig portlandsement består av fire hovedmineraler og mengdeforholdet mellom disse har betydning for sementens egenskaper.

Mineral	Egenskap
Trikalsiumsilikat	Gir betongen rask fasthetsutvikling, høy varmeutvikling og slutfasthet.
Dikalsiumsilikat	Gir betongen høy slutfasthet. Fasthets- og varmeutvikling skjer saktere.
Trikalsiumaluminat	Rask fasthetsutvikling og svært rask varmeutvikling.
Tertrakalsiumaluminoferrit	Har liten effekt på sementens egenskaper. Lav fasthets- og varmeutvikling.

Tabell 2.3: Hovedmineralene i portlandsement (Gjerp et al., 2004)

Elkey og Sellevold (1995) antar i sin forskning at høyere varmeutvikling i herdeforløpet vil føre til grovere og mer sammenhengende porer, og viser at herdetemperatur kan påvirke resistiviteten. De konkluderer også med at sementens alkaliinnhold vil ha stor innvirkning på ionekonsentrasjonen i porevannet og dermed ha betydning for ledningsevnen.

Det finnes i tillegg flere tilsetningsmaterialer som kan erstatte en andel av sementen for å endre betongens egenskaper. Enkelte av disse materialene er pozzolane, som betyr at de kan reagere med kalsiumhydroksid i sementpastaen og danne bindestoffer som fyller porene (Gjerp et al, 2004). Dette fører til en tettere betong og dermed en økning i både trykkfasthet og resistivitet. Ved å erstatte deler av sementen med slike materialer senkes konsentrasjonen av ioner i porevannet og resistiviteten øker. Blant de vanligste pozzolane materialene har vi silikastøv, flygeaske og slagg, som er restprodukter fra industrien. Sementer med pozzolane tilsetningsmaterialer kan ha opptil fire ganger så høy resistivitet som vanlig portlandsement, ved samme temperatur og med samme fuktinnhold (Osterminski et al., 2012). I tillegg til at tilsetningsmaterialene kan tilby store fordeler knyttet til bestandighet, kan man redusere sementmengden som brukes, hvilket er positivt for både økonomi og miljø.

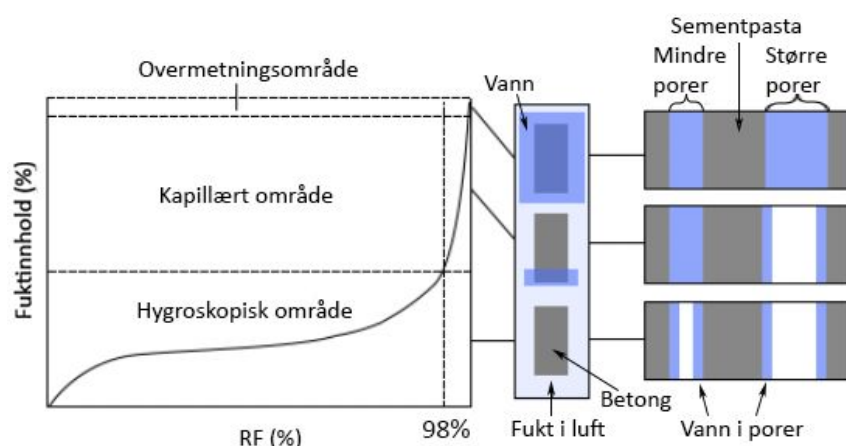
2.3.2.6 Karbonatisering

Karbonatisering er nærmere omtalt i kapittel 2.5.1 *Armeringskorrosjon forårsaket av karbonatisering*. Reaksjonsproduktet fra denne prosessen, kalsiumkarbonat, gir en fortetning av betongens poresystem. Dette kan føre til lavere porevolum og en mindre sammenhengende porestruktur, som videre gir økt resistivitet. Kalsiumkarbonat kan i noen tilfeller felles ut i betongoverflaten. Da bundne klorider løses lettere ved lavere pH kan

karbonatisering også føre til en anrikning av klorider foran karbonatiseringsfronten (Lindland et al., 2016). Denne anrikningen gir en høyere ionekonsentrasjon og kan dermed øke ledningsevnen i dette sjiktet.

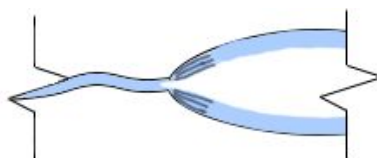
2.4 Fukt i betong

All betong, fersk som gammel, vil i praksis inneholde fukt, og fukten har stor innvirkning på betongens elektriske ledningsevne (Saleem et al., 1996). Porøse materialer tar opp og avgir vann på ulike måter, avhengig av hvordan vannet i omgivelsene er i kontakt med materialet. Materialer trenger ikke å være i kontakt med flytende vann for å ta opp fuktighet, fordi fuktholdig luft vil kunne trekke inn i materialet hygroskopisk. Om vann er i direkte kontakt med materialet, som for eksempel vann i bunn av en søyle, kan fukten trekke inn i materialet kapillært (absorpsjon). Når materialet er helt neddykket i vann vil eksternt vanntrykk i tillegg være avgjørende for i hvilken grad materialet fuktes opp (Bøhlerengen, 2018).



Figur 2.9: Fukt i porer ved ulike typer fuktopptak (Inspirert av Bøhlerengen (2018))

Når et tørt, porøst materiale oppbevares i omgivelser med fuktholdig luft vil poresystemet gradvis fylles ved at fukten trekker inn i materialet og adsorberer på innsiden av poreveggene. Det hygroskopiske området dekker relativ luftfuktighet mellom 0-98%. Ved høyere RF er det kapillær absorpsjon som tar over for fukttransporten og det er i dette området sementbaserte materialer tar opp desidert mest vann (Bøhlerengen, 2018). I det kapillære området er de minste porene fylt med vann og i større porer vil poreveggene være dekket av et kontinuerlig vannlag, som vist i figur 2.10. Vannets overflatespenning vil gjøre at det dannes konkave menisker der hvor porene er koblet sammen (porehalsen) og dette vil føre til et undertrykk i poresystemet, som forsterker materialets kapillærsuging (Stelmarczyk et al., 2017).



Figur 2.10: Konkav menisk i porehalsen som gir undertrykk i poren

Forskning viser at resistivetsmålinger på prøver med lavt fuktinnhold kan være svært ustabile og dette forklares mangelen på fritt vann i porene og Villagrán Zaccardi et al. (2009) hevder at ledningsevnen i sementbaserte materialer er tilnærmet null ved RF lavere enn 42%. Andrade et al. (2011) presenterer resultater som viser ca. ti ganger så høy resistivitet for betong lagret i 55% RF, som betong lagret i 65% RF.

2.4.1 Absolutt fuktinnhold og vannmetningsgrad

Det absolutte fuktinnholdet i et porøst materiale ($V_{\text{vann}}/V_{\text{materiale}}$) kan måles ved å veie et prøvestykke før og etter uttørking. På denne måten finner man vekten av vannet som var i prøven før tørking.

Vannmetningsgrad (V_m) er et mål på hvor stor andel av porevolumet som er fylt med vann. For å bestemme vannmetningsgrad i betong er det nødvendig å finne ut hva et prøvestykke veier ved et gitt fuktinnhold, hva prøvestykket veier når det er vannmettet og hva det veier når det er tørt. På denne måten kan man finne porevolumet (V_{porer}) i prøvestykket, hvor mye av porevolumet som er fylt med vann (V_{vann}) og deretter regne ut vannmetningsgrad ut i fra ligning (2.7).

$$V_m = V_{\text{vann}} / V_{\text{porer}} \quad (2.7)$$

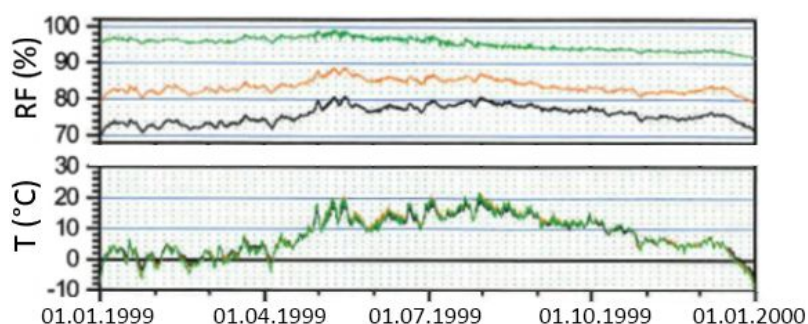
Ved å lagre prøvelegemer i vannbad over tid vil porer som er en del av de åpne poresystemet fylles opp. De største kapillærporene vil normalt være fylt i løpet av en periode over 24 timer, mens mindre kapillærporer tar mye lengre tid å fylle. En kan fremskynde prosessen ved å suge ut luften av prøven med vakuum og senke prøven i vann, for så å fjerne vakuemet, slik at undertrykket i prøven gjør at vann suges inn i det åpne poresystemet (Thomson et al., 2007). Tørking og vannmetning av prøver er en relativt tidkrevende prosess og er ikke mulig å utføre i felt, uten oven til tørking av prøver.

Vannmetningsgrad har innvirkning på resistivitet i betong og mørtel, da dette vil ha betydning for hvor mye elektrolytisk væske porene inneholder, samt hvor god ledningsevne det er mellom porene. Betong med lavt v/c-tall vil normalt ha et relativt lite porevolum og vannmetningsgraden kan teoretisk være 100% uten at porene er sammenhengende. Da vil det heller ikke ledes strøm gjennom materialet. Villagrán Zaccardi et al. (2009) bekrefter dette og forteller at en økning i porevolum ikke nødvendigvis vil øke den elektriske ledningsevnen, målt ved samme relativ fuktighet, da sammenkobling av porer er nødvendig.

2.4.2 Relativ fuktighet

Relativ fuktighet (RF) måles i prosent og beskriver hvor mye vanndamp det er i luften i forhold til hvor mye vanndamp luften kan inneholde når den er mettet. Mengden vanndamp luften kan inneholde avhenger av temperatur. Hvis vanninnholdet i luften er konstant og temperaturen synker, øker den relative fuktigheten. Når RF er 100% er metningspunktet nådd og kondens felles ut fra luften (Bøhlerengen, 2018). I Norge ligger vanligvis den relative luftfuktigheten mellom 50-90% utendørs (Sivle, 2018).

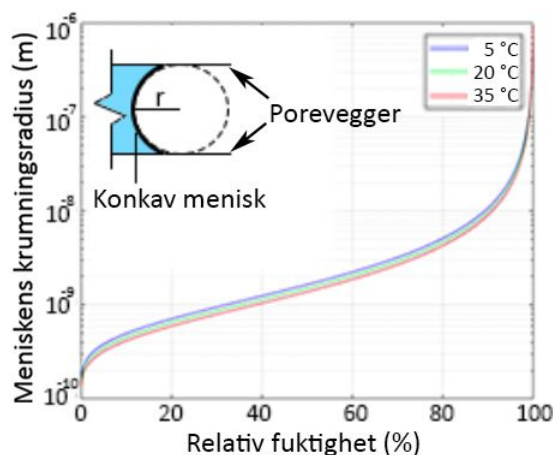
Relativ fuktighet i betong og mørtel oppfører seg annerledes enn i luft. Om fuktinnholdet er konstant i betong, vil RF øke med stigende temperatur (Standard Norge, 2014). Dette kan forklares ved at det fysiske bundne vannet i betongens poreoverflate fordamper i økende grad med økende temperatur. Denne fordampningen vil gi et økt fuktinnhold i poreluften, som videre vil overstyre senkningen av RF i et lukket hulrom (Geving 2007). Dette fenomenet kan observeres ved å studere data fra et tidligere rehabiliteringsprosjekt hvor temperatur og RF ble loggført for tre lokaliteter utendørs over en periode på 1 år, vist i figur 2.11.



Figur 2.11: Loggføring av temperatur og RF i betong (Ødegård & Lund AS, Udatert)

Betong er et materiale som har høy fuktkapasitet og dermed høy fukttreghet ved klimatiske endringer (Xi et al., 1994). Dette betyr at materialet bruker lang tid å stille seg inn på likevektsfuktighet med omgivelsene og dette er forklaringen på hvorfor RF i betong er mye mer stabil enn RF i luft. Figur 2.11 viser at den relative fuktigheten i den undersøkte betongen svinger ca. 10% i løpet av et år.

I det kapillære området er det, som tidligere nevnt, undertrykket i porene som driver vanntransporten. Undertrykket vil øke med andelen av porer som er i det kapillære område. I følge Stelmarczyk et al. (2017) er relativ fuktighet avgjørende for hvor store porer som kan fylles med kapillærkondensert vann, da relativ fuktighet avgjør hvor stor krumningsradiusen til de konkave meniskene i porene kan være. Kapillærkondensasjon foregår langt ned i det hygroskopiske området.



Figur 2.12: Meniskens krumningsradius i forhold til RF (Stelmarczyk et al., 2017)

2.4.2.1 Måling av relativ fuktighet i betong

Måling av RF i en betongkonstruksjon med *borehullsmetoden* gjøres ved at RF-sonder monteres i borhull i betongoverflaten. Det skal tettes rundt sondene for å hindre at luften rundt konstruksjonen trenger inn til sondens målehode og påvirker resultatene. Utilstrekkelig tetting kan ha stor betydning på måleresultatene (Merikallio, 2002, referert i Geving, 2007). Etter 48 timer skal fuktigheten i luften i borehullet være i likevekt med luften i porene i betongen og resultater kan leses av. Sensorer skal ikke plasseres i borehullene direkte etter utboring siden den relative fuktigheten vil bli forhøyet rett etter utboring og vil ofte ligge nær 100%. Sensorene skal i tillegg ha tilnærmet lik temperatur som borehullet for å unngå kondens (Standard Norge, 2014).

Hvor dypt sondene skal plasseres i betongen er avhengig av type konstruksjonselement og elementets tykkelse. I et betongdekke med to eksponerte overflater (etasjeskiller) skal måledybden være 20% av dekketykkelsen, mens i et betongdekke med én eksponert overflate (gulv på grunn) skal måledybden være 40% av dekkets tykkelse (Standard Norge 2014). Ved kalibrering av fuktsonder kan en bruke mettede saltløsninger. Alle salter har kjemiske egenskaper som gjør at løsningene gir en bestemt RF i luften over løsningen i et lukket volum, avhengig av temperatur (Greenspan, 1976). Tabell 2.4 viser eksempler på ulike saltløsninger og hvilken RF de vil gi ved en gitt temperatur.

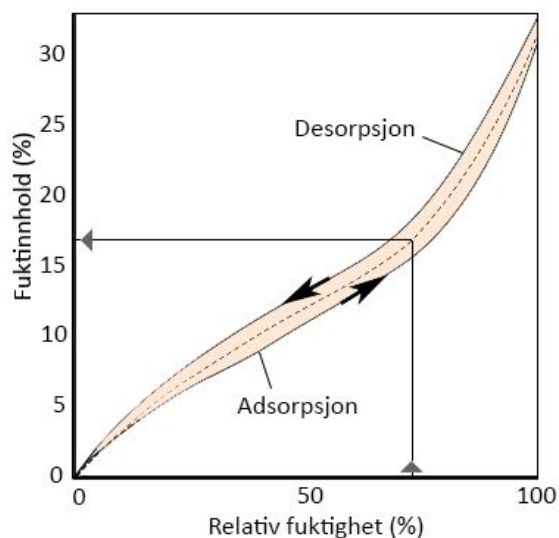
Salter	Temperatur (°C)	RF (%)
NaBr (Natriumbromid)	22	57
KI (Kaliumjodid)	20	69.9
NaCl (Natriumklorid)	22	76
KCl (Kaliumklorid)	22	86

Tabell 2.4: RF ved forskjellige saltløsninger (Broudy, 1933; Choudhury et al., 2011)

RF-sonder må også kalibreres for temperatur. Dette gjøres ved at sondene lagres i omgivelser med konstant temperatur. Temperaturen leses av og eventuelle avvik noteres. Unøyaktigheter tas hensyn til ved neste RF-måling.

2.4.3 Sammenheng mellom absolutt og relativ fuktighet

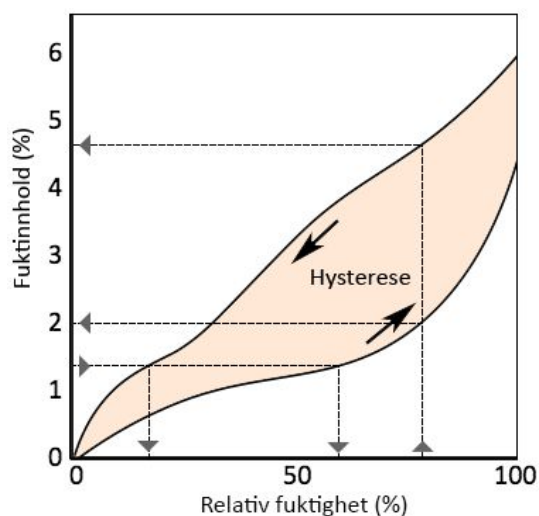
Likevektsfuktighet er den absolutte fuktigheten et porøst materiale vil stille seg inn på over tid og dette avhenger av den relative fuktigheten og temperaturen i materialets omgivelser. Det har blitt utarbeidet kurver for denne sammenhengen, ved måling av fuktinnhold i porøse materialer som oppbevares i omgivelser med ulik RF. Slike kurver kalles sorpsjonskurver og er ofte satt sammen av to kurver; en for adsorpsjon (oppfuktning) og en for desorpsjon (uttørking).



Figur 2.13: Sorpsjonskurve (Prinsipp)

Figuren over viser hvordan en sorpsjonskurve kan brukes til å bestemme fuktinnhold når RF er kjent og omvendt. For en gitt RF vil fuktinnholdet være lavere ved oppfuktning enn ved uttørking og denne effekten kalles hysteresis, som betyr at effekten av en ytre påkjenning ikke forsvinner når påkjenningen fjernes (Bøhlerengen, 2018). I figur 2.13 ligger kurvene for adsorpsjon og desorpsjon nokså tett, hvilket kan være typisk for trevirke og trebaserte materialer. Ved å bruke en midling av disse to kurvene (stiplet linje) kan en finne verdier som vil være nokså riktige, uavhengig om materialet er i oppfuktning- eller uttørkningsfase.

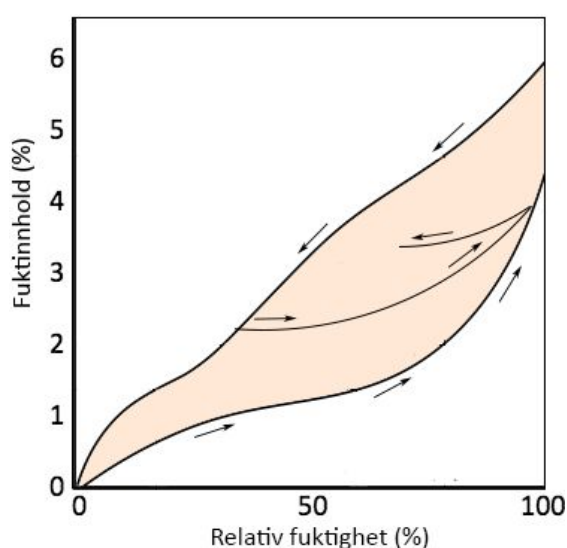
For betong er det vanskelig å lage generelle sorpsjonskurver da betongsammensetningen vil ha svært mye å si for materialets fuktopptak. I tillegg kan utførelse ved støping ha innvirkning på hvordan mikrostrukturen i materialet blir og derfor kan to blandinger av samme betong ha ulike sorpsjonskurver. Figur 2.14 viser et eksempel på sorpsjonskurve for betong. Variasjonsområdet mellom adsorpsjon og desorpsjon er så stort at det er vanskelig å anslå RF ut ifra fuktinnhold og omvendt.



Figur 2.14: Sorpsjonskurve for betong (prinsipp)

Kurvene beskriver hvordan forholdet mellom RF og fuktinnhold er ved fuktendring fra helt tørt til helt vannmettet og omvendt. I virkeligheten kan betongen, ved en gitt RF, ha hvilket som helst fuktinnhold mellom absorpsjons- og desorpsjonskurven, for den relative fuktigheten. Dette betyr i praksis at en må kjenne betongens fukthistorikk og velge enten adsorpsjons- eller desorpsjonskurven for å effektivt kunne bruke sorpsjonskurver for sementbaserte materialer.

Figur 2.15 viser eksempel på hvordan en sorpsjonskurve for betong kan se ut om betongen fuktes opp eller tørkes ut fra et fuktnivå som ikke tilsvarer helt tørt eller helt vannmettet. Sorpsjonskurven vil ikke være lik de "opprinnelige" sorpsjonkurvene.



Figur 2.15: Sorpsjonskurve med hensyn på fukthistorikk

Jiang & Yuan (2013) undersøkte hvordan adsorpsjon i betong ble påvirket ved lave v/c-tall. De fant ut at ved en gitt relativ fuktighet og konstant temperatur vil en sementbasert prøve

med lavere v/c-tall ha en større vannmetningsgrad en prøver med høyere v/c-tall. Årsaken til dette er at lavere v/c-tall gir en tettere mikrostruktur og da kreves det en mindre vannmengde for å oppnå full vannmetning. Videre fant de ut at vannmetningsgraden minker med økende temperatur, dersom den relative fuktigheten er konstant. Årsaken til dette er at porevann omdannes til damp.

Relativ fuktighet i sementbaserte materialer vil også påvirkes av den kjemiske sammensetningen av porevannet, som også inkluderer klorider som kan ha trengt inn i materialet fra eksterne kilder. På grunn av dette anser Espelid et al. (1998) vannmetningsgrad som en mer relevant parameter enn relativ fuktighet, for å beskrive fukttilstanden i betong. Hedenblad og Janz (1994) målte relativ fuktighet i prøver med samme fuktinnhold, men med ulik porevannssammensetning og konkluderer med at mengden alkalier i porevæskene har innvirkning på RF-måling, ved at lavest RF ble målt i prøvene med høyest alkaliinnhold. Karbonatisert betong vil ha et lavere alkaliinnhold, som gir høyere verdier ved måling av relativ fuktighet (Geving, 2007). Enevoldsen et al. (1994) hevder at relativ fuktighet i betong som er lavere enn 70% vil gjøre faren for armeringskorrosjon neglisjerbar. De nevner også at hydratisering i fersk betong vil stoppe dersom den relative fuktigheten i betongen er mindre enn 80%.

2.5 Armeringskorrosjon

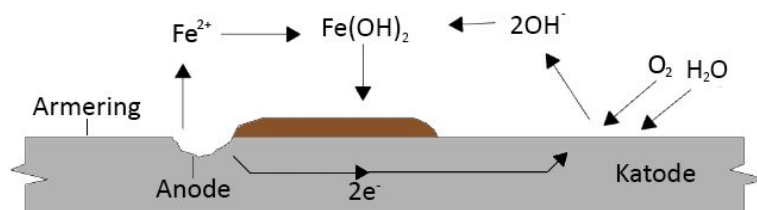
Avhengig av hva en betong utsettes for av ytre påvirkninger, vil ulike mekanismer føre til nedbrytning av materialet over tid. I NS-EN 1504-9 finnes en tabell med oversikt over de vanligste nedbrytningsmekanismene for betong. Tabellen er gjengitt med tillatelse fra Standard Norge:



Figur 2.16: Nedbrytningsmekanismer (Standard Norge, 2008)

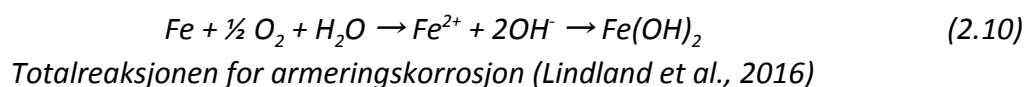
Samtlige nedbrytningsmekanismer fører til forringelse av betongkonstruksjoner, og enkelte av mekanismene kan forårsake enorme skader på kort tid, som brann og eksplosjoner. Likevel er armeringskorrosjon ansett som nedbrytningsmekanismen som utgjør størst fare for betong og infrastruktur (Hornbostel, 2016). Dette kan direkte påvirke bæreevnen og i enkelte tilfeller kan store skader utvikles på relativt kort tid. Siden armeringskorrosjon er en elektrokjemisk prosess vil det blant annet avhenge av betongens resistivitet. Dette kapitlet vil derfor dreie seg om denne typen nedbrytning og relevante rehabiliteringsmetoder.

Armering er vanligvis beskyttet mot korrosjon av betongen den ligger i. Reaksjonen mellom vann og sement gjør betongen svært alkalisk med pH opp mot 13. Dette gjør at det dannes et tynt oksidsjikt på overflaten av stålet. Dette sjiktet passiverer armeringen og i denne tilstanden er korrosjonshastigheten så lav at den er neglisjerbar (Polder et al, 2009). Inntrengning av CO₂ eller klorider kan bryte ned oksidsjiktet og muliggjøre mye høyere korrosjonshastighet.



Figur 2.17: Korrosjonsprosessen

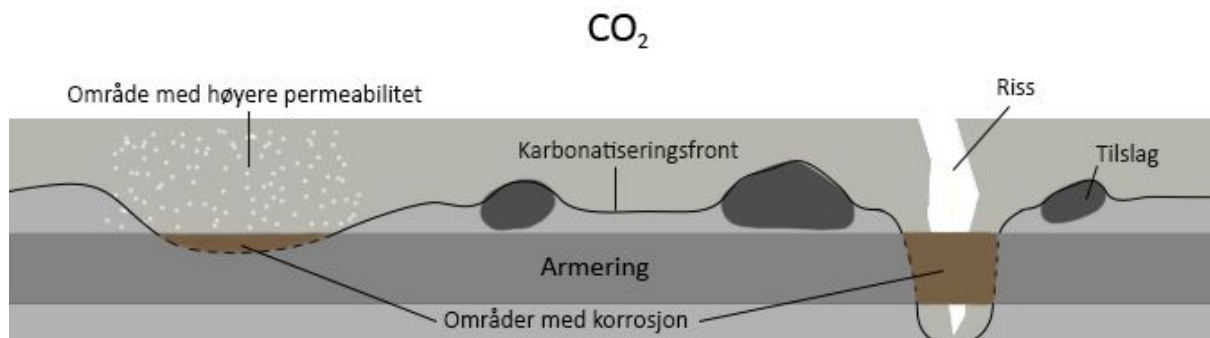
Figur 2.17 illustrerer hvordan armeringskorrosjon foregår. Når oksidsjiktet lokalt brytes ned vil dette området bli en anode og jernet kan løses opp til jernioner (Fe²⁺). Dette vil etterlate et overskudd av elektroner (2e⁻) som transporteres til områder på armeringen hvor oksidsjiktet ikke er nedbrutt (katodiske områder). Her vil elektronene reagere med vann og oksygen og danne hydroksidioner (OH⁻). Disse transporteres tilbake til anoden gjennom den omsluttende betongen og sammen med jernionene dannes korrosjonsproduktet jernhydroksid (Fe(OH)₂) (Osterminski et al., 2012). Dette kalles vanligvis rust. På denne måten vil resistiviteten i betongen være avgjørende for korrosjonshastigheten og betydningen vil være større desto lengre avstand det er mellom anode og katode. Nedenfor vises reaksjonslikningene for hva som foregår i anoden og katoden.



Når armeringskorrosjon er initiert er det flere faktorer som vil ha betydning for korrosjonshastigheten. Andrade & Martínez (2010) nevner fuktnivå, oksygentilgang, temperatur, resistivitet og katode/anode-forhold som de viktigste. Sistnevnte vil være kritisk når de anodiske områdene er svært små i forhold til de katodiske områdene. Polder et al. (2009) forklarer dette med at en økning i korrosjonshastighet skyldes en stor potensialforskjell mellom en liten anode og en stor katode og at dette er typisk for kloridinitiert armeringskorrosjon.

2.5.1 Armeringskorrosjon forårsaket av karbonatisering

Luft inneholder karbondioksid (CO_2) og avhengig av geografi vil CO_2 -innholdet i luften variere. Når CO_2 trekker inn i betongens overflate vil gassen reagere med kalsiumhydroksid i betongen og det dannes kalsiumkarbonat. Den kjemiske reaksjonen kalles karbonatisering og fører blant annet til at pH-nivået i betongen senkes fra det opprinnelige nivået på ca. 13 til ca. 8-9 (Lindland et al., 2016). Om karbonatiseringsfronten når inn til armeringen vil dette kunne forårsake at oksidsjiktet på overflaten av armeringen brytes ned og korrosjon kan forekomme. En betong med høyere kvalitet vil ha lavere permeabilitet og derfor ha høyere motstand mot inntrengning av CO_2 . Dette har mye å si for hvor motstandsdyktig betongen er mot denne typen nedbrytning. Fukttinnhold, temperatur og CO_2 -nivå i luften vil ha betydning på karbonatiseringshastigheten. Prosessen går fortest når den relative fuktigheten i betongen ligger mellom 50-60% og karbonatisering foregår ikke i betong som er helt tørr eller vannmettet (Myrdal, 2009).



Figur 2.18: Karbonatisering av betong

Denne typen nedbrytning tar som regel lang tid. Karbonatisering gir en fortetning av poresystemet, som skjer fordi reaksjonsproduktet, som er en tett masse, fyller porene. Dette gir betongen en liten fasthetsøkning, lavere permeabilitet og gjør at karbonatiseringshastigheten avtar med tiden (Maage, 2016). Som nevnt i kapittel 2.5 *Armeringskorrosjon* er korrosjonshastighet i stor grad styrt av katode/anode-forholdet. Vanligvis vil karbonatiseringsfronten nå frem til et større armeringsareal på omtrent samme tid og forårsake et stort anodisk område, som gir en jevn og relativt saktegående korrosjon (Lindland et al., 2016). I slike tilfeller er det lettere å oppdage korrosjonen før skadene blir altfor store. Figur 2.18 viser hvordan lokal inhomogenitet i betongen likevel kan føre til mindre områder med korrosjon på grunn av karbonatisering.

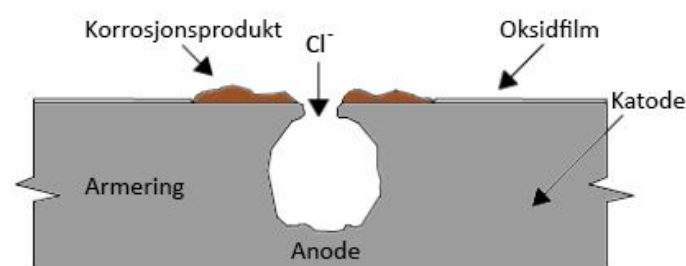
Reaksjonsproduktet fra armeringskorrosjon opptar 3-4 ganger så stort volum som det opprinnelige jernet (Bertolini et al., 2004a). Dette gjør ofte at betongoverdekningen skalles av, slik at armeringen kommer til syne. Fenomenet kalles rustsprengning.

2.5.1.1 Måling av karbonatiseringsdybde

Ved måling av karbonatiseringsdybde sprayeres en pH-indikator (fenolftalein) på betongen og på denne måten er det mulig å oppdage områder i overflaten med forsuring. Ettersom karbonatisering foregår fort helt i overflaten bør pH-indikatoren sprayeres på ferske bruddflater eller i borehull. Delen av betongen som ikke er karbonatisert får et rødlig fargeutslag (Myrdal, 2009).

2.5.2 Kloridinitiert armeringskorrosjon

Initiering av korrosjon ved klorider foregår i prinsipp på samme måte som ved karbonatisering, ved at oksidfilmen brytes ned, slik at korrosjon muliggjøres. Dette kan forekomme om konsentrasjonen av klorider ved armeringen blir stor nok. Kloridinitiert armeringskorrosjon skiller seg likevel ut, da det anses som en større risiko enn korrosjon forårsaket av karbonatisering. Dette er fordi korrosjonshastigheten ved denne typen korrosjon kan være mye høyere og skadeforløpet kan bli større (Miyazato & Otsuki, 2010; Stanish et al., 2001). Høye konsentrasjoner av klorider ved armeringen, og særlig der hvor det er svakheter i passivfilmen på armeringen, kan føre til at kloridionene reagerer kjemisk med passivfilmen. Da kan Cl^- -ionene bytte plass med OH^- -ionene i passivfilmen og komme i kontakt med armeringsjernet (Myrdal, 2009). Korrosjon forårsaket av klorider kan i tillegg resultere i groptæring (pitting-korrosjon) på armeringen. Dette er mye omtalt i litteraturen, fordi det kan være vanskelig å oppdage slike skader, da det ikke nødvendigvis oppstår sprekkdannelser og lignende "faresignaler" i betongoverflaten av denne type korrosjon.



Figur 2.19: Pittingkorrosjon (Inspirert av Lindland et al., 2016)

Ved tilstandsanalyse av eldre bygg er det ikke uvanlig å finne klorider som er støpt inn i betongen. Disse kan enten komme fra delmaterialene som ble brukt i betongen eller være tilført i ettertid. Tidligere var det vanlig å bruke saltholdige tilsetningsstoffer som akselerator i fersk betong, enten for å effektivisere byggeprosessen eller for å hindre frost i størkningsfasen ved vinterstøp. Dette har i senere tid blitt strengt regulert (Kompen, 2014)

I nyere betongkonstruksjoner er salting av veier på vinterstid, eller sjøvann, de vanligste årsakene til forekomster av klorider (Hornbostel, 2015). Saltholdig snø som smelter fra kjøretøy i et garasjeanlegg er et eksempel på hvordan disse kloridene kan utgjøre fare for armert betong.

Gjennom arbeidet med rapporten er det funnet flere kilder som foreslår at kritisk grenseverdi for kloridinnhold i betong ligger rundt 0.4% av sementvekten. (Myrdal, 2009; Lindland et al., 2016). Med kritisk grenseverdi menes konsentrasjonen av klorider som vil utgjøre fare for armeringskorrosjon. Det er laget tabeller som sammenligner kloridinnhold med risiko for korrosjon.

Totalt innhold av klorider i % av sementvekt	Korrosjonsrisiko
< 0,4	Minimal
0,4 - 1,0	Mulig
1,0 - 2,0	Sannsynlig
> 2,0	Sikkert

Tabell 2.5: Grenseverdier for korrosjonsrisiko (Lindland et al., 2016)

Klorider som er kjemisk bundet i betongen utgjør ingen fare for korrosjon og dette er årsaken til at kloridinnhold lavere enn 0.4% anses å være "akseptabelt", da det er denne mengden klorider betong, i teorien, kan binde opp kjemisk. Større konsentrasjoner omfatter "frie" klorider som kan bryte ned oksidsjiktet rundt armeringen og forårsake korrosjon (Lindland et al., 2016).

Angst og Vennesland (2007) har samlet data fra tidligere forskning som forsøker å fastslå hva kritisk grenseverdi for kloridinnhold bør være. I deres rapport konkluderes det med at ethvert forsøk på å finne kritisk grenseverdi for kloridinnhold, som skal gjelde for de fleste betongkonstruksjoner, er nytteløst. Årsaken til dette er at det er for mange ulike faktorer som spiller inn på initiering av korrosjon og de fleste av disse faktorene påvirker hverandre og varierer over tid (Angst og Vennesland, 2007; Lindland et al., 2016).

2.5.2.1 Kloridanalyse

Det finnes flere måter å måle kloridinnholdet i betong på. I SINTEF Byggforsk 520.034 “Kloridinnhold i betong. Prøveuttak og analysemetoder” utarbeidet av Østnor (2015) omtales hele fem ulike metoder for måling av kloridinnhold.

Analysemetode	Feltanalyse	Laboratorieanalyse
Potensiometrisk titrering		x
Volhard titrering		x
Mohrs titrering		x
RCT (Rapid Chloride Test)	x	x
Quantab	x	x

Tabell 2.6: Analysemetoder for bestemmelse av kloridinnhold i betong (Østnor, 2015)

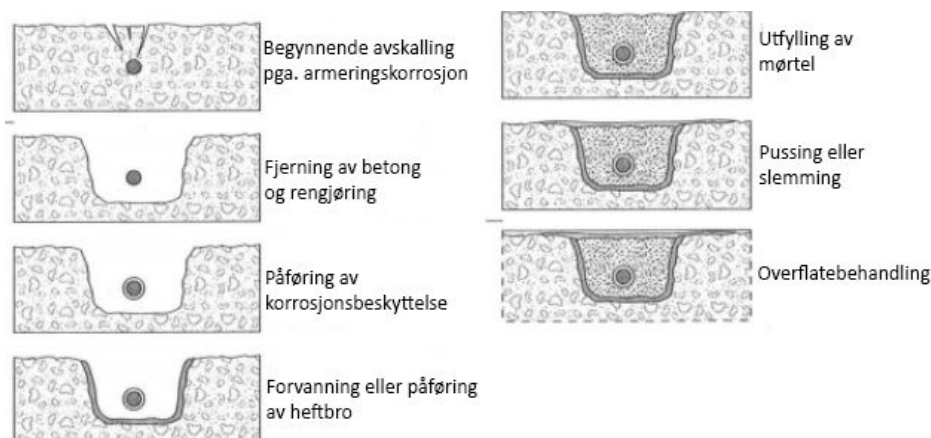
2.6 Betongrehabilitering

I dette kapittelet omtales ulike rehabiliteringsmetoder som er relevante for problemstillingen. En tilstandsanalyse av betongen vil alltid være nødvendig for å avdekke skadeårsak og skadeomfang. En slik kontroll bør i korte trekk omfatte vurdering av betongens og armeringens tilstand, undersøkelse av skadeomfang og skadeårsak og vurdering av hvilke prinsipper og metoder som kan være egnet, ut ifra funnene som er gjort.

I NS-EN 1504-9 er det listet opp 11 prinsipper for rehabilitering av betong. De seks første er prinsipper som gjelder selve betongen og her nevnes blant annet beskyttelse mot inntrengning og regulering av fuktinnhold med underpunkter. De siste fem punktene tar for seg prinsipper som er direkte knyttet til armeringskorrosjon og her nevnes blant annet gjenoppretting av passivitet og økning av elektrisk motstand (Standard Norge, 2008). Hovedfokuset i denne rapporten ligger på sistnevnte, selv om alle punktene er relevante for skader på armerte betongkonstruksjoner.

2.6.1 Mekanisk reparasjon

Denne metoden er den vanligste rehabiliteringsmetoden for betong og er best egnet hvor kun lokale skader har oppstått og skadeomfanget er mindre omfattende (Østvik, 2011; Smørholm, Udatert(a)). Metoden er også helt nødvendig som forarbeid ved andre rehabiliteringsmetoder, som realkalisering og katodisk beskyttelse. Den strukturelle oppbygningen av en mekanisk reparasjon er vist i figur 2.20.



Figur 2.20: Stegvis oppbygging av mekanisk reparasjon (Kristiansen et al., 1998)

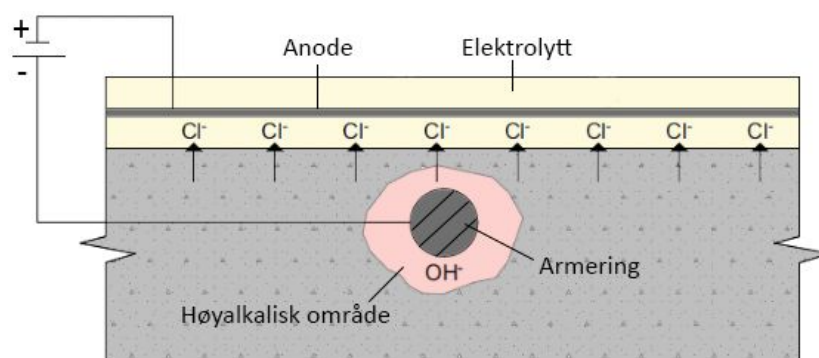
For mekanisk reparasjon skilles det på bærende og ikke-bærende reparasjoner. For bærende reparasjoner skal tapt bæreevne, som følge av skader eller betongarbeider, gjenoppbygges. Dette kan for eksempel innebære å fjerne all betong rundt armering og erstatte skadet armering, for deretter å støpe ny betong. En ikke-bærende reparasjon er en reparasjon som ikke berører konstruksjonens bæreevne (Lindland et al., 2016). I NS-EN 1504-3 stilles det krav til reparasjonsmørtler som definerer mørtelklassene R1 til R4. R1 og R2 er ikke-konstruktive mørtler, mens R3 og R4 er konstruktive mørtler, ment til bærende reparasjoner. Kravene omhandler egenskaper som trykk- og heftfasthet, permeabilitet og termiske egenskaper (Standard Norge, 2005).

I tillegg skilles det på ulike nivåer av mekanisk reparasjon; forenklet, begrenset og fullstendig. Forenklet mekanisk reparasjon er kun egnet som forarbeid til elektrokjemiske behandlingsmetoder. Dette innebærer å avdekke bområder, som er steder med begynnende avskalling eller delaminering av betongen, for deretter å meisle vekk betongen i disse områdene. Skadene støpes igjen med mørtel. Ved elektrokjemisk behandling er dette nødvendig for å sikre enhetlig strømfordeling over hele betongoverlaten. Forenklet mekanisk reparasjon er alene ikke egnet som rehabiliteringstiltak mot armeringskorrosjon, for dette omfatter at en fjerner mer av betongen (begrenset eller fullstendig mekanisk reparasjon) (Polder et al., 2009).

Mekanisk reparasjon blir ofte valgt som rehabiliteringsmetode, for selv om det er en omfattende jobb, så kan det i enkelte tilfeller være mindre kostbart enn alternativene. Polder et al. (2009) viser til forskning som antyder at denne rehabiliteringsmetoden ikke alltid er vellykket og at så mye som 50% av slike rehabiliteringsprosjekter ikke har virkning etter 10 år. Årsaken til dette fortelles å være at det enten ikke fjernes nok kloridinfisert betong rundt armeringen, eller at reparasjonsmørtelen ikke passiverer armeringen tilstrekkelig. Goyal et al. (2018) konkluderer med at elektrokjemiske metoder er mer effektive enn tradisjonelle metoder.

2.6.2 Elektrokjemisk kloriduttrekk

Elektrokjemisk kloriduttrekk er en rehabiliteringsmetode som kan brukes på betongkonstruksjoner med middels høyt innhold av klorider, hvor det lar seg gjøre å forhindre ytterligere kloridinntrengning. Metoden går ut på at armering som er angrepet av klorider repassiveres ved at det tilføres en elektrisk strøm til armeringen fra en midlertidig, ekstern anode (Smørholm, Udatert(b)). Anoden sprøytes inn med en elektrolytt bestående av en vannmettet cellulosemasse og deretter påtrykkes det en likestrøm til anoden. Strømtettheten skal være mellom $1-2 \text{ A/m}^2$ armeringsoverflate og spenningen skal være mellom $10-40 \text{ V}$ (Lindland et al., 2016). Dermed påføres et elektrisk felt mellom anoden og armeringen og dette gjør at de negativt ladde kloridionene føres bort fra armeringen, mot anoden. Videre dannes det et høyalkalisk miljø (pH opptil 16) rundt armeringen på grunn av elektrolyse, som spalter vannet i syre og base. Dette gjør at armeringen repassiveres. Metoden tar som regel fire til seks uker og sluttresultatet skal føre armeringen til et korrosjonsbeskyttet nivå (EBAB, 2017).



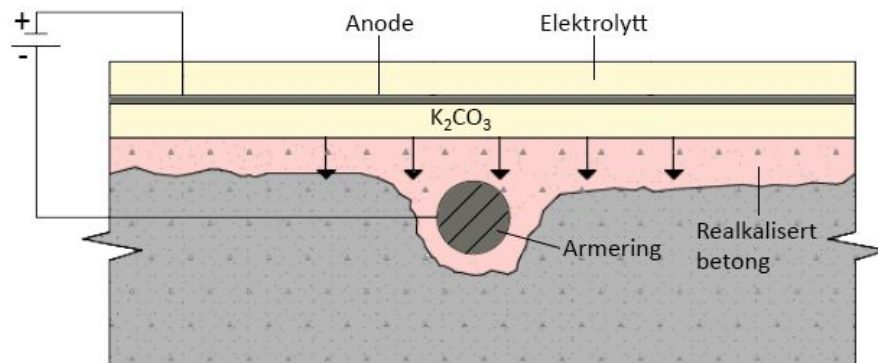
Figur 2.21: Prinsipp for kloriduttrekk

2.6.3 Elektrokjemisk realkalisering

Elektrokjemisk realkalisering er i prinsippet utført på samme måte som elektrokjemisk kloriduttrekk, men denne metoden brukes hvis det beskyttende oksidsjiktet rundt armeringen er brutt ned av karbonatisering. Det basiske miljøet rundt armeringen blir da gjenopprettet og armeringskorrosjonen stanses. I motsetning til elektrokjemisk kloriduttrekk, hvor vann er elektrolytten, benyttes heller kaliumkarbonat utblandet med vann i realkaliseringsprosessen (EBAB, 2017).

I prosessen foregår både elektroosmose, elektrolyse og ionemigrering. Ved elektroosmose føres alkalier inn i betongen og sørger for en permanent pH på rundt 11, som resulterer i passivering av armeringen. Elektrolysen gjør at det produseres hydroksidioner som legger seg som en passivfilm på overflaten av armeringen. Den siste prosessen, ionemigrering, har som hovedmål å skape en elektrobalanse til hydroksidionene, slik at ionene forblir rundt armeringen og opprettholder det beskyttende sjiktet (Lindland et al., 2016).

González et al. (2011) stiller spørsmål til om metoden effektivt bygger opp passivfilmen om den allerede er nedbrutt, eller om elektrokjemisk realkalisering er best egnet som preventiv beskyttelse.



Figur 2.22: Prinsipp for realkalisering

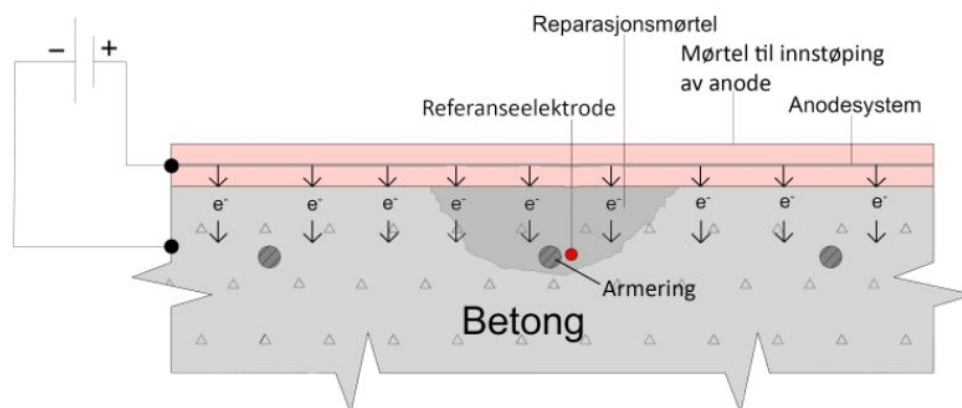
2.6.4 Katodisk beskyttelse

Katodisk beskyttelse (KB) av betong har på verdensbasis vært kommersielt tilgjengelig i over 50 år og blir brukt som rehabiliteringsmetode for armerte betongkonstruksjoner hvor klorider har forårsaket, eller utgjør en fare for, armeringskorrosjon (Consolvo, Udatert). Sohaghpurwala & Scannell (2003) anser dette som den eneste metoden som stopper armeringskorrosjon i kloridinfisert betong, uavhengig av kloridinnhold.

Som tidligere beskrevet i kapittel 2.5 *Armeringskorrosjon*, vil det være både anodiske og katodiske områder på korroderende armering og det er dette som gjør korrosjonsprosessen mulig. Jern løses opp i anoden og elektroner beveger seg fra anoden til katoden, hvor de forbrukes i katodereaksjonen. Om det etableres en ekstern anode i dette systemet og det påtrykkes en strøm fra denne, blir det et overskudd av elektroner som gjør at all armering gjøres om til katode.

Hvor effektiv denne korrosjonsbeskyttelsen er, avhenger av strømtettheten (mA/m^2 armeringsoverflate). Ved katodisk beskyttelse skal strømtettheten ligge mellom 10-20 mA/m^2 (Lindland et al., 2016) og for de fleste anodesystemer av titan skal spenningen være lavere enn 8 V (Østvik, 2011). Strømtetthet er avhengig av størrelsen på den påtrykte spenningen og ved for lav spenning vil ikke det katodiske anlegget ha noen effekt, da tilstrekkelig polarisering ikke forekommer (underbeskyttelse). Ved for høy spenning, og dermed høy strømtetthet rundt anoden, vil det kunne oppstå syredannelse rundt anodematerialet som bryter ned mørtelen i dette området. Sistnevnte vil kunne gjøre anlegget ineffektivt over tid, om den elektrolytiske forbindelsen mellom anode og armering brytes og derfor anbefales det at strømtettheten rundt anoden holdes under 110 mA/m^2 (Li et al., 2009; Bird, Udatert).

Polarisering av armeringen vil si at det elektriske potensialet blir mer negativt, og tilstrekkelig polarisering resulterer i passivering av armeringen. Før man kan etablere et KB-anlegg er det viktig med grundig forarbeid. Reparasjon av skader, kontroll og utbedring av armeringskontinuitet, for å sikre kontakt mellom armeringsjern, er nødvendig. For visse anodetyper som ligger på overflaten av betongen er det også viktig å fjerne eksisterende overflatebehandling som kan hindre strøm i å komme til armeringen.



Figur 2.23: Systemoppbygging av et KB-anlegg med reparasjon og innstøping av anode

(Det presiseres at elektroner ikke ledes i betongen, men fraktes av ionene i porevannet. I figur 2.23 og lignende figurer illustreres ikke dette.)

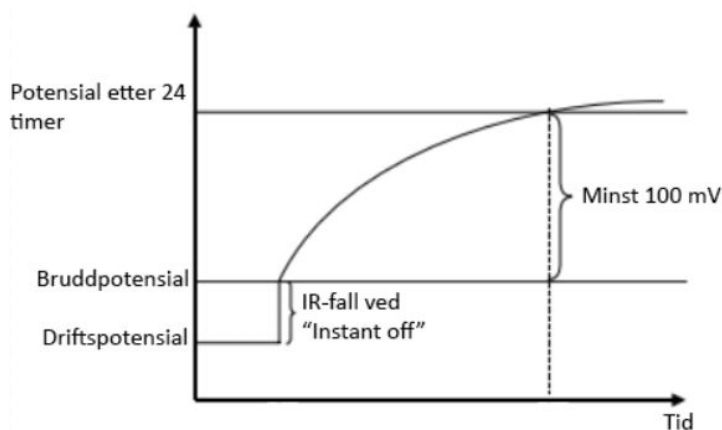
Fra koblingsskapet ledes strømmen til anodene via strømfordelingsbånd. Styringssystemene for et KB-anlegg er laget slik at strømmen kan styres individuelt til flere soner. På denne måten kan man oppnå ønsket polarisering i flere områder med ulik polariseringsmotstand. Det er naturligvis en begrensning for hvor små slike soner kan være, ettersom hver sone krever tilføring av strøm via individuelle kretser.

2.6.4.1 Overvåking av katodisk beskyttelse

Et KB-anlegg er ment å virke over lang tid og det er viktig at anlegget justeres over tid, slik at en hele tiden oppnår ønsket beskyttelse (Li et al., 2009). For å kunne overvåke grad av beskyttelse i et KB-anlegg blir det støpt inn referanseelektroder som registrer armeringspotensialet lokalt. Det er praktisk umulig å overvåke utvikling av potensiale over hele konstruksjonen. Derfor skal referanseelektroder monteres i "representative områder" og med dette menes områder hvor det var korrosjonsaktivitet før skadene ble reparert (Polder et al., 2009). I følge Espelid et al. (1998) anbefales det at det støpes inn to referanseelektroder i samme lokalitet, som en sikkerhet hvis en elektrode svikter og i tillegg bør det plasseres en elektrode i et område uten korrosjonsaktivitet, som referanse.

Overvåking av KB-anlegg skal skje noen få ganger i året, hvor effekten av anlegget måles ved testing av depolarisering. Metoden går ut på å skru av den beskyttende strømmen og overvåke potensialendringen mellom 4-24 timer etter at strømmen kuttes (Polder et al.,

2009). Det vanligste kriteriet for beskyttelse er 100 mV depolarisering, og dette skal gi tilstrekkelig beskyttelse for betongkonstruksjoner oppført over bakken. Prinsippet er vist i figur 2.24.



Figur 2.24: Depolariseringskriteriet (Bjørntegaard & Myren, 2007)

Hvis depolariseringen er for lav under testperioden, skal spenningen økes moderat, og dermed økes strømtettheten. Under neste testperiode vil depolarisering igjen måles for å undersøke om det er tilstrekkelig beskyttelse (Polder et al., 2009). Figur 2.24 viser hvordan potensialet endrer seg (instant off) fra driftspotensial til bruddpotensial og til sluttspotensial, etter 24 timer. Det er vanlig at systemer for katodisk beskyttelse er fjernstyrte, slik at grad av beskyttelse og styring av strømleveranse kan kontrolleres uten at en fysisk trenger å besøke anlegget.

2.6.5 Anodematerialer

Det finnes ulike anodesystemer som brukes ved katodisk beskyttelse. En kan ikke bruke vanlig jern som materiale, da dette vil brytes ned på samme måte som armering og derfor brukes andre metallegeringer som ikke ruster. I dag er det vanligst at anoden er basert på titan, men det finnes også anodesystemer som er basert på grafitt, jern med høyt silisiuminnhold, tantal, niob, bly og sølv (Li et al., 2009). Det skiller altså på hvilke materialer som benyttes, men rent praktisk er det viktigere å betrakte hvordan anodesystemet er utformet. Det er *hva* og *hvor mye* som skal beskyttes som er viktigst for valg av anodesystem. Visse anodesystemer har høyere overflateareal og dette gir lavere strømtetthet rundt anoden (Giorgini & Papworth, Udatert).

2.6.5.1 Titannett

Titannett er det mest brukte anodesystemet på verdensbasis og består av et nett med aktivert titan som er overflatebehandlet med blandede metalloksider. Nettet festes til betongoverflaten og sprøytes inn i mørtel. Her stilles det krav om heft til underliggende betongoverflate og det forutsettes at gammel overflatebehandling av eksisterende betong fjernes (Polder et al., 2009). Fordelene med et slikt anodesystem er jevn strømfordeling,

lang levetid, og at anoden tåler høy strømtetthet (ca. 30 mA/m²). Ulempene er at det er kostbart, at det gir en nokså høy økning i vekt og at heft i grensesnitt mellom sprøytemørtel og betong kan være en utfordring (Lindland et al., 2016).



Figur 2.25: Titannett (Bjøntegaard & Myren, 2007)

2.6.5.2 Båndanode

Båndanoden består vanligvis av perforerte titanbånd og kan fordele en større strømtetthet til armeringen enn vanlig titannett. Denne type anode er anbefalt til bruk i områder med høy armeringstetthet. Båndanoder monteres enten rett på betongoverflaten eller i utfreste spor i betongen og støpes inn i mørtel.



Figur 2.26: Båndanode over reparasjon i bunn av søyle (Privat foto)

2.6.5.3 Stavanode

Stavanoder er staver av titan som settes inn i utborede hull i betongen. Det har vært utfordringer med denne typen anode, både på grunn av kortslutning, ved at anoden treffer armering og at strømfordelingen ikke når spesielt langt. Fordelen med slike anoder er at de er enkle å montere og at de fungerer godt til punktbeskyttelse. (Lindland et al., 2016).



Figur 2.27: Stavanode (Bjøntegaard & Myren, 2007)

2.6.5.4 Ledende belegg og maling

Ledende belegg og maling inneholder grafittpartikler som hovedkomponent for å sikre ledningsevne og er best egnet til katodisk beskyttelse ved lavt strømbehov. Vanligvis vil spenningen være lavere for slike anodesystemer og 2-2.5 V er normalt. Ofte brukes dette som anodemateriale i garasjeanlegg og på fasader, men det kan også brukes i komplekse betongkonstruksjoner der andre anodeinstallasjoner er krevende. Slike anodesystemer gir svært lav vektøkning og erfaring viser at levetiden er på 10 til 15 år (Polder et al., 2009). Over det ledende belegget blir det ved behov påført et slitesjikt for å beskytte anoden og dette sikrer i tillegg et estetisk bedre uttrykk. I områder med høy fuktpåkjenning kan det oppstå problemer med avflassing og i disse områdene vil ikke betongen beskyttes (Lindland et al., 2016).



Figur 2.28: Ledende belegg (Antonsen, 2017)

2.6.6 Mørtel til bruk i KB-anlegg

Betong med høy resistivitet vil vanligvis ha høyere motstand mot nedbrytning enn betong med lavere resistivitet. Det dukker imidlertid opp utfordringer når armeringskorrosjon har blitt initiert og en skal stoppe dette og forhindre videre skadeutvikling med elektrokjemiske metoder. For anodesystemer som støpes inn i mørtel kan det ikke brukes hvilket som helst materiale. Mørtel med svært høy resistivitet, som kunne vært godt egnet i andre situasjoner, vil fungere som en isolator rundt anodematerialet og forhindre strøm i å komme til armeringen. Det har blitt utviklet mørteltyper som skal være egnet til katodisk beskyttelse og noen har også fått tilnavnet "KB-mørtel" eller "ledende mørtel". Enkelte av disse består av mørtel som er tilsatt nikkelbelagte grafittfibre, eller lignende materialer, som har til hensikt å lede strømmen gjennom mørtelen (Bertolini et al., 2004b; He et al., 2014). Slike mørtler kan ha så lav resistivitet som 0.1 - 0.2 k Ω cm (Guo et al., 2017).

Andre mørtler som brukes i forbindelse med katodisk beskyttelse kan ha mye høyere resistivitet enn såkalte ledende mørtler og dette vil i mange tilfeller være nødvendig for å møte anbefalingen om at mørtelen skal ha en resistivitet mellom 50-200% av den opprinnelige betongens resistivitet.

Ved tyngre rehabiliteringsprosjekter (bruer, kaier og lignende) er det ikke uvanlig at samme mørtel brukes til reparasjon av skader og innstøping av anodesystem. Dette både på grunn av logistikk, men viktigst, at påføringsmetoden for mørtelen (tørresprøyte) er den samme. På mindre prosjekter, som garasjeanlegg og lignende, benyttes det i større grad flere ulike produkter, ettersom reparasjon av skader og etablering av anode skjer i ulike faser, samt at metode for påføring kan være ulik (håndmørtling, pumping) (Paul Stavem, teknisk sjef i Mapei AS, personlig kommunikasjon, 12. januar 2019).

2.6.7 utfordringer med katodisk beskyttelse

I teorien er katodisk beskyttelse en svært effektiv metode for å beskytte armert betong, men det forekommer at anleggene ikke fungerer som de skal og at de enten slutter å virke eller at effektiviteten avtar med tiden. Det er flere årsaker til dette.

I følge Sohangpurwala (2009) er kortslutning mellom anode og armering den vanligste årsaken til at KB-anlegg ikke fungerer optimalt. Dette er et problem som oppstår allerede i installasjonsfasen og kan være en utfordring med stavanoder, som monteres et stykke inn i betongen. Slike problemer kan også oppstå med andre anodesystemer, ved at jernbindertråd eller andre metallbiter i betongoverflaten, som er i kontakt med armering, ikke oppdages før anoden monteres og strøm påtrykkes.

Heftbrudd mellom mørtel og betong har også vist seg å være en utfordring (Polder, 2009). Dette gjør at strøm ikke leveres fra anoden til armering og kan resultere i at alt arbeidet med montering av anoden er forgjeves.

Et KB-anlegg kan være dimensjonert for å vare i flere tiår. For å oppdage eventuelle endringer i grad av beskyttelse kreves det at anlegget følges opp jevnlig og dette kan være en utfordring over så lang tid. Sohangpurwala (2009) utførte en spørreundersøkelse i Utah (USA) som avdekket at flere KB-anlegg hadde sluttet å virke på grunn av manglende oppfølging. Hovedårsaken var at personene med ansvar for oppfølging ikke lenger jobbet med dette og dette førte til at mye informasjon gikk tapt, slik at det var vanskelig å lære opp nye personer. Eldre anlegg har styringssystemer som også krever oppgradering og det er ikke uvanlig at dette forsømmes, hvilket kan føre til at systemet slutter å virke.

Den årsaken til ineffektiv, katodisk beskyttelse, som er mest relevant for denne rapporten, knyttes til mørtelen som brukes til reparasjon av skader og innstøping av anodesystem. Feil mørteltype eller feilplassering av referanselektrode kan gjøre at anlegget feilaktig ser ut til

å virke tilfredsstillende, mens armeringen i realiteten er mer eller mindre ubeskyttet. Om resistiviteten i mørtelen som omslutter referanseelektroden er svært høy, vil det virke som at det trengs mer strøm enn nødvendig for å oppnå beskyttelse. Om referanseelektroden er innstøpt i mørtel med lav resistivitet, kan det virke som at en lav spenning er tilstrekkelig når strømmen kun beveger seg i den mørtelen og armering i betong ligger ubeskyttet. (Paul Stavem, teknisk sjef i Mapei AS, personlig kommunikasjon, 27. mars 2019).

3 Metode

Forsøk på laboratorium og i felt utgjør en stor del av arbeidet som er utført i forbindelse med denne rapporten. Det er i hovedsak den gjennomførte litteraturstudien, samtale med eksterne og interne veiledere, samt tidligere ervervet kunnskap om betong som danner grunnlaget for valg av forsøk og metoder. Det er lagt stor vekt på nøyaktighet i målinger og riktig utførelse, som styrker validiteten og representativiteten til resultatene. Dette er også gjort for å øke reproduserbarheten av forsøkene.

Innhenting av data bygger i hovedsak på metoder som beskrives i forskning og standardverk, samt metoder som brukes i det daglige hos eksterne veiledere for denne rapporten. For enkelte delforsøk benyttes det også egenutviklede metoder som er tilpasset forsøkene som utføres. Disse metodene bygger på det som beskrives i litteraturen og kontrolleres grundig. All datainnhenting er kvantitativ og gir data som presenteres i grafer og tabeller. Siden betong er et svært varierende materiale, som i tillegg i stor grad vil påvirkes av miljøet materialet befinner seg i, kan ikke disse dataene kun tolkes kvantitativt. En god tolking krever kjennskap til flere faktorer som kan være ulike fra betong til betong, samt innad i én enkelt konstruksjon. Dette gjør at tolkning av enkelte resultater i større grad bygger på kvalitativ metode. Kapittelet beskriver hvordan datainnhenting er utført og inkluderer relevant informasjon som ligger til grunn for tolkningen av de ulike resultatene.

Merknad: Alle bilder i dette kapittelet er private fotografier.

3.1 Bakgrunn for laboratoriearbeid

Laboratoriearbeidet er i hovedsak utført ved Mapeis FoU-laboratorium i Nord-Odal kommune. Laboratoriet brukes i den daglige driften i selskapet og utstyret kvalitetssikres årlig ved tredjepartskontroller av SINTEF. Her skal det støpes ut to typer mørtler med ulike egenskaper, som skal herde under flere fuktbetingelser. I tillegg skal det skjæres ut betongprismer fra et eksisterende betongdekke, som skal lagres sammen med mørtelen.

3.1.1 Utstøping av mørtelprismer

De to mørteltypene som skal støpes ut er Mapeis egne produkter, *Støpemørtel B20* og *Confix*. Reseptene for mørtlene er konfidensielle og blir derfor ikke vedlagt rapporten, men teknisk datablad for begge produktene finnes i vedlegg A og B.

Støpemørtel B20 er en vanlig tørrmørtel som brukes til mindre støpearbeider innendørs og utendørs. Produktet består av sement, filler og naturlig tilslag og denne sammensetningen er svært lik som for betong. Dette er hovedårsaken til at denne mørtelen skal benyttes i forsøkene. Mangelen på grovt tilslag vil imidlertid gjøre at mengden sementpasta i mørtelen

er større enn for betong. 28 døgns trykkfasthet for Støpemørtel B20 er deklarerert ≥ 25 N/mm² (Mapei AS, 2015).

Confix er en tørrmørtel som møter kravene til reparasjonsmørtel etter NS-EN 1504-3. Deklarert 28 døgns trykkfasthet for Confix er ≥ 25 N/mm² i henhold til klasse R3 (konstruktiv reparasjonsmørtel) (Mapei AS, 2017).

På grunn av de strengere kravene som stilles til reparasjonsmørtler forventes det at mikrostrukturen for de to mørtlene vil være svært ulik og at utviklingen av resistivitet vil være annerledes for Confix enn for Støpemørtel B20.

3.1.2 Ulike fuktbetingelser på laboratoriet

FoU-laboratoriet til Mapei AS holder en konstant temperatur på 22°C og relativ fuktighet på 54%. På laboratoriet finnes et klimaskap med konstant RF på 95% og herdekar hvor prøver kan vannlagres. Vannmetning av prøver og 100% relativ fuktighet er ikke det samme, men for ordens skyld brukes 100% som et mål på vannmetning heretter. For å simulere realistiske fuktbetingelser for felt på laboratoriet, skal samme prinsipp som for kalibrering av fuktsonder benyttes (omtalt i kapittel 2.4.2.1 *Måling av relativ fuktighet*). Det skal lages et herdekar som inneholder en eller flere mettede saltløsninger for å oppnå en konstant RF i karet på 60 - 70%. Etter siste måling av resistivitet (90 døgn) skal porevolum, poremetning og absolutt fuktinnhold undersøkes for alle prøvene.

3.1.3 Resistivitetsmåling på laboratorium

Utviklingen av resistivitet i mørtelprismene skal måles med to-elektrode-metoden over en periode på 90 døgn og sammenlignes med betongprismenes resistivitet. Dette vil forhåpentligvis gi en bedre sammenligning av hvordan resistivitet er i felt for mørtel og betong, enn måling på vannlagrede prøvelegemer, som er vanlig prosedyre i industrien. Fasthetsutviklingen i mørtelprismene skal undersøkes og sammenlignes med utvikling av resistivitet. Ved å måle fasthetsutvikling over tid er det mulig å kontrollere at herdeforløpet foregår som forventet og resultatene kan brukes til å bedre forståelsen av resistivitetsutviklingen. Ved endt herding (90 døgn) skal karbonatiseringsdybden i mørtelprismene måles.

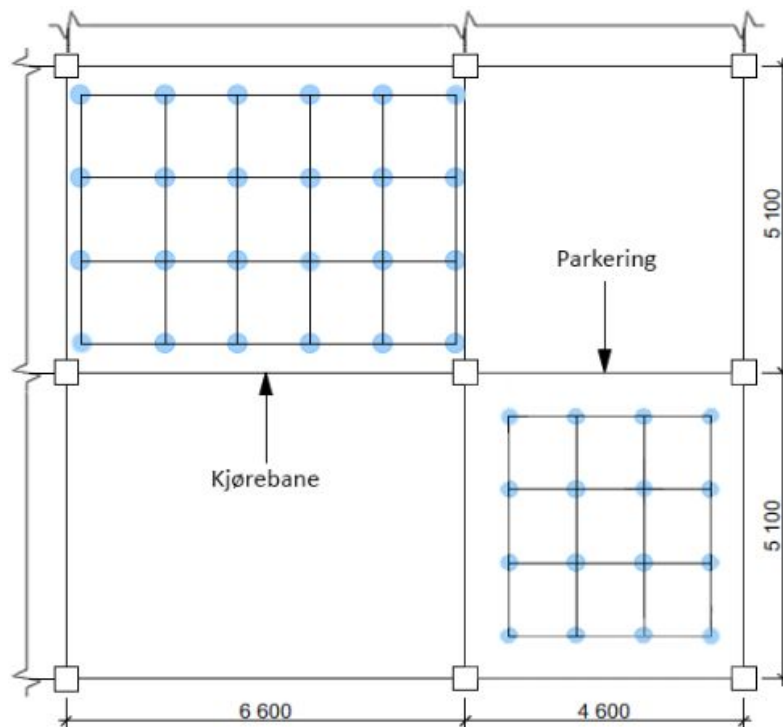
3.2 Bakgrunn for feltarbeid

Feltarbeidet ble utført i et garasjeanlegg i Oslo som ble oppført på 1970-tallet. Her er det et pågående rehabiliteringsprosjekt som ble satt i gang på bakgrunn av at det ble funnet større felter med riss i belegget og betongavskallinger, som følge av rustsprengning. Entreprenøren med ansvar for rehabiliteringen forteller at det ble etablert anlegg for katodisk beskyttelse (KB) ved forrige rehabilitering (15-20 år siden). Det ble da brukt ledende belegget som anodesystem. Over anodesystemet ble det påført et sementbasert strøk med hensikt å nøytralisere eventuell syredannelse som følge av den katodiske beskyttelsen. Over dette sjiktet ble det lagt en epoxysement istrødd sand, som slitelag. Det observeres at det har oppstått riss i slitelaget siden rehabiliteringen. Rissene har blitt forseglet med fiberarmert epoxy, men det har oppstått nye riss rundt forseglingen grunnet mangel på fleksibilitet. I dag ser man at det har oppstått et betydelig skadeomfang og på bakgrunn av dette kan det virke som at KB-anlegget ikke har hatt tiltenkt effekt. Det er usikkert hvordan dekket var overflatebehandlet før forrige rehabilitering. Betongdekket som skal undersøkes har en tykkelse på 150 mm og arbeidstegninger av garasjeanlegget fra 1970-tallet avdekker at dimensjonert betongkvalitet i alle dekker er B300.

I den pågående rehabiliteringen er områder med skader meislet opp og i disse områdene er det ikke mulig å utføre systematiske undersøkelser. Derfor skal undersøkelsene utføres i to felt, et i kjørebane og et i biloppstillingsplass (som vist i figur 3.1) hvor betongen tilsynelatende er uskadet. Områdene anses som representative for store deler av betongdekket.

Det antas at det kan være mer fuktighet og klorider i biloppstillingsplasser enn i kjørebane, da hovedmengden av snø fra bilene smelter der hvor bilene står parkert. For å kunne lokalisere eventuelle variasjoner over betongdekket skal feltene deles inn i rutenett på 1x1 meter. I figur 3.1 viser de blå prikkene områder hvor resistivitet skal måles. På denne måten kan det avdekkes områder med særlig høye og lave resistivitetsverdier. Det skal velges ut seks slike områder hvor det skal utføres supplerende undersøkelser for å kunne vurdere årsaker til den målte resistiviteten. Det er satt opp et dieselfyringsanlegg i garasjen på grunn av den pågående rehabiliteringen. Termostaten på anlegget er innstilt på 10 °C.

Alle feltforsøk utføres mellom januar og mars 2019. Bakgrunn for alle delforsøk knyttet til feltarbeid er forklart i de kommende underkapitler.



Figur 3.1: Inndeling av rutenett for undersøkelser av betongdekket

3.2.1 Resistivitetmåling i felt

Overflateresistivitet i felt skal utføres med *Resipod*, en resistivitetmåler utviklet av Proceq i Sveits (Wenner-metoden). Apparatet har en fast probeavstand på 50 mm, men finnes også med 38 mm probeavstand. I følge Proceq brukes en målefrekvens på 40 Hz og Resipod kan måle resistivitet mellom ca. 1-1000 k Ω cm, avhengig av probeavstand. Apparatet viser resultater med én desimal nøyaktighet (Proceq, 2017).

På bakgrunn av forskningen til Sengul og Gjorv (2008) skal det lages en provisorisk overgang til 35 mm probeavstand. Dette gjøres for å lettere kunne sammenligne resistivetsverdier fra felt og laboratorium og vil også være nyttig for å unngå armering ved måling. En kan korrigere målinger for egendefinert probeavstand med programvaren som følger med apparatet. Det skal også lages en tilsvarende overgang fra Resipod (50 mm probeavstand) til 50 mm for å kontrollere at dette gir samme verdier som målinger uten overgang. Det bemerkes at probeavstand på 35 mm kan gjøre at resultatene blir mer påvirket av tilslag og andre lokale variasjoner. Derfor skal det utføres flere målinger for å minimere effekten av kortere probeavstand.

3.2.2 Måling av RF, absolutt fuktinnhold og poremetning

Værdata fra samme periode tidligere år viser så store svingninger i luftfuktighet som 30-40% RF i løpet av få timer. På bakgrunn av dette anses det ikke som hensiktsmessig å måle luftfuktighet og lufttemperatur og derfor skal RF- og temperaturmålinger utføres ved borehullsmetoden (se kapittel 2.4 *Fukt i betong*). Verifisering av resultatene skal gjøres ved

at målte verdier kalibreres på laboratorium. For å kunne måle poremetning og absolutt fuktinnhold i betongdekke skal det bores ut kjerneprøver fra betongdekket i de seks utvalgte lokalitetene. Prøvene skal fraktes til laboratoriet for veiing og videre undersøkelser.

3.2.3 Kloridanalyse

Som nevnt i kapittel 2.3.2.3 *Klorider*, har kloridinnhold betydning for betongens elektriske ledningsevne (Saleem et al., 1996). Derfor er det nødvendig å undersøke kloridnivået i betongdekket for å avdekke eventuelle årsaker til lavere resistivitet enn hva som er forventet. Det skal tas ut seks kloridprofiler i betongdekket fra utvalgte lokaliteter, og to kloridprofiler i feltet hvor betongprismene skal skjæres ut. Prøvene skal deretter analyseres på laboratorium, slik at kloridnivået kan fastslås for de undersøkte lokaliteter. Konstruksjonens art og alder gjør det sannsynlig at betongen har et forhøyet kloridinnhold. Kloridanalysen skal utføres ved Ødegård og Lund AS sitt laboratorium i Oslo, hvor Quantab-metoden skal brukes. I forbindelse med kloridanalysen måles karbonatiseringsdybde i borhull.

3.2.4 Bestemmelse av betongens trykkfasthet

Om en vet hvilken trykkfasthet betongen i en konstruksjon skal ha, vil målte avvik i trykkfasthet kunne gi en indikasjon om det er brukt mer vann enn det som trengs for å oppnå hydratiseringsgrad på 100%. Det er en mulighet at det var overskuddsvann i betongen da garasjeanlegget ble oppført på 1970-tallet. I undersøkelsen skal det bores ut kjerneprøver av betongdekket. Prøvene skal planslipes og trykktestes og trykkfastheten skal vurderes opp mot prosjektert fasthet for garasjeanlegget.

Arbeidstegninger viser at den prosjekterte betongkvaliteten i garasjedekkene er B300. Dette tilsvarer B25 etter dagens betegnelser (Lenschow, 1977). Fastheter oppgitt i standarden gjelder imidlertid 28 døgns trykkfasthet og det kan forventes at målt trykkfasthet på utborede betongkjerner, som har oppnådd slutfasthet, er noe høyere enn dimensjonert trykkfasthet. I tillegg kan det være en fasthetsøkning i sjiktet nærmest betongoverflaten grunnet karbonatisering. Derfor skal karbonatiserte sjikt slipes vekk før trykktesting.

I forbindelse med en fagdag i 2014 viste Statens Vegvesen til reseptdata fra 1976 fra en større betongleverandør (Kompen, 2014). Det beskrives at typisk v/c-tall for en B300-betong lå på rundt 0.6, som kan tyde på at betongen i garasjeanlegget inneholdt overskuddsvann ved utstøping, som har gitt et økt porevolum i betongen. Tabell 3.1 viser en oversikt over ulike betongkvaliteter (etter gammel betegnelse) med tilhørende, "vanlige" verdier for v/c-tall og standard sementinnhold (kg/m^3):

Betongkvalitet	B150	B200	B250	B300	B350	B400	B450	B500
v/c-tall	1.04	0.84	0.7	0.6	0.52	0.45	0.4	0.37
Sementinnhold	160	200	240	282	325	380	425	470

Tabell 3.1: Betongkvaliteter med tilhørende data (Kompen, 2014)

3.3 Gjennomføring av eksperimentelt arbeid

I kommende underkapitler presenteres gjennomføringen av de ulike felt- og laboratorieforsøkene som har blitt utført. Siden både lab- og feltforsøk består av mange delforsøk er de delt opp i mindre underkapitler som forklarer hver enkelt prosedyre.

3.3.1 Bruk av mettede saltløsninger for å oppnå ønsket RF

Dette delforsøket utgjør en nokså liten del av laboratoriearbeidet, men det er en viktig del for å sikre reproduserbarhet av herdeforløpet. Derfor forklares prosessen i detalj.

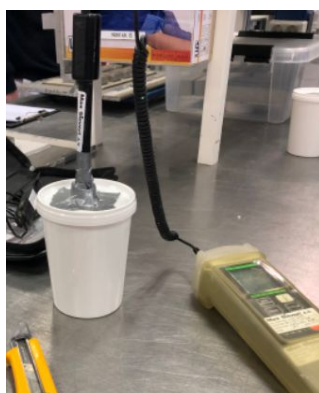
Utstyr

- Herdekar (46 liter)
- Natriumklorid (NaCl)
- Natriumbromid (NaBr)
- Kaliumjodid (KI)
- Romtemperert vann (22°C)
- RF-måler av typen Testo 635 (Manuell logging, kalibreres årlig)
- RF-måler av typen Testo Saveris H2D (Automatisk logging)

Saltene som er brukt er av PA-kvalitet, som vil si at de er ment for analyse. Dette sikrer høy grad av renhet.

Eksperimentet

Som en kvalitetskontroll ble den relative fuktigheten over hver enkelt saltløsning målt før alle saltløsningene ble blandet i større mengde.



Figur 3.2: Kontroll av relativ fuktighet over saltløsning

Saltløsningene ble blandet i romtemperatur (22°C) med magnetrører. Med kjennskap til saltenes løselighet i vann ble det sikret at alle løsningene var mettet. Tabell 3.2 viser en oversikt over de forskjellige saltene som ble brukt under eksperimentet og den relative fuktigheten de skal gi ved gitte temperaturer (Broudy, 1933; Choudhury et al., 2010).

Salter	Løselighet i vann ved 20°C (g/l)	Temperatur (°C)	RF (%)
NaBr (Natriumbromid)	905	22	57
KI (Kaliumjodid)	1430	20	69.9
NaCl (Natriumklorid)	358	22	76

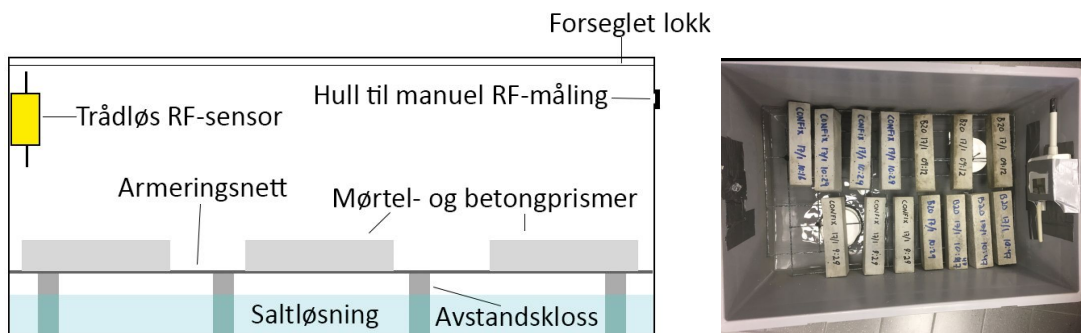
Tabell 3.2: Salter til laboratorieforsøk

Grunnet begrenset mengde av ulike salter på laboratoriet ble det besluttet å lage en blanding av flere ulike, mettede saltløsninger for å oppnå ønsket RF. Til sammen ble det blandet 2 liter mettet saltløsning og ut ifra hvor mye som ble brukt av hver saltløsning, samt hvilken RF hver enkelt saltløsning i teorien skal gi, var det mulig å regne ut teoretisk RF over den blandede løsningen, vist i tabell 3.3.

Salter	Mengde salt brukt (g)	Vann brukt (l)	RF _{teoretisk} (%)
NaBr (Natriumbromid)	1000	0.7	63.4 %
KI (Kaliumjodid)	1000	1.1	
NaCl (Natriumklorid)	72	0.2	

Tabell 3.3: Forventet RF for utblandet saltløsning

I bunn av karet som prøvene skulle lagres i ble det montert et armeringsnett med avstandsklosser under, som vist i figur 3.3. På den måten var det ingen risiko for kapillært opptak av saltløsning i prøvene. Videre ble en av laboratoriets trådløse fuktsensorer (Testo Saveris H2D) montert på innsiden av karet og dette gjorde det mulig å logge RF uten at forseglingen måtte brytes. Som en kontroll ble RF også logget manuelt med en annen RF-måler (Testo 635). Dette ble jevnlig utført av ansatte i Mapei. De første døgnene etter at prismene ble lagt i karet ble lokket åpnet jevnlig, slik at overskuddsfukt kunne slippe ut av karet.



Figur 3.3: a) Herdekar (prinsipp) b) Herdekar

3.3.2 Utstøping av mørtelprismer på lab

Utstyr

- Confix
- Støpemørtel B20
- Romtemperert vann på 22 °C
- Hobart blandemaskin
- Formolje
- Slagbenk
- Håndstamper
- Støpeformer (40x40x160 mm)
- Murskje

Mapei bruker ulike blandedprosedyrer for sine mørtler og prosedyrene bygger på gjeldende standardverk og egenutviklede metoder. Blanding og utstøping av mørtel på lab ble derfor gjort etter instruksjoner gitt av Mapei. De ulike blandedprosedyrene som brukes er nokså spesifikke og gir lite rom for feil. Det som skiller de ulike blandedprosedyrene er i hovedsak blandetid og hastighet på blandeapparatet, samt hvordan prøvene komprimeres i form. Støpemørtel B20 skal ifølge Mapeis instruksjoner håndstamperes i formen for å sikre komprimering, mens Confix komprimeres på slagbenk. Formolje ble brukt for lettere avforming. All håndstamping av Støpemørtel B20 ble utført av samme person for å sikre like resultater.

For å sikre et statistisk bedre datagrunnlag ble det besluttet at det skulle støpes ut tre mørtelprismer av hvert produkt til hver enkelt fukttilstand som prismene skulle lagres i. Med fire ulike fukttilstander (romlagret, herdekar med saltløsning, klimaskap og vannlagret) og to ulike produkter ble det støpt ut totalt 24 prizmer til motstandsmåling, som skulle lagres i totalt 90 døgn. I tillegg ble det støpt ut et prisme av hvert produkt til hver fukttilstand for trykktesting etter 7, 28, 56 og 90 døgn. Dette utgjorde totalt 32 prizmer.



Figur 3.4: a) Blanding av mørtel b) Utstøpte prøvelegemer

For Støpemørtel B20 er anbefalt vannmengde 3-4 liter pr. sekk på 25 kg (se vedlegg A). I forsøket ble det brukt 3 liter vann ved blanding for å holde lavest mulig v/c-tall. Ettersom det forventes at Confix har mye høyere resistivitet enn Støpemørtel B20 vil et lavere v/c-tall i Støpemørtel B20 gjøre mørtlene mer sammenlignbare. Ved blanding av Confix ble det brukt 3,5 liter vann pr sekk på 25 kg, som er anbefalt vannmengde for denne mørteltypen (se vedlegg B). Alle prismene ble støpt på samme dag og avforming ble gjort etter 24 timer \pm 12 minutter.

3.3.3 Uttak av betongprøver i felt

Utstyr

- Covermeter av typen Proceq Profometer 3
- Tommestokk
- Vinkelsliper
- Betongsag
- Kjernebor (\varnothing 70 mm)
- Hammer
- Huggjern
- Vannsuger
- Kompressor (trykkluft)

Ettersom mørtelprismene på laboratoriet har dimensjonene 40x40x160 mm var det ønskelig å forsøke å ta ut betongprismer med de samme dimensjonene. For å unngå armering ble armeringsplassering og overdekning målt med covermeter. Overdekningen ble målt til >60 mm og senteravstand til 400 mm. Hele prøvelegemer på 40x40x160 mm var derfor mulig å skjære ut. Entreprenøren bistod med dette arbeidet, og med betongsag for vertikale kutt og vinkelsliper for horisontale kutt, ble det tatt ut totalt ti prizmer fra betongdekket. Det ble også tatt ut et større stykke til måling av karbonatiseringsdybde (se kapittel 3.3.6 *Måling av karbonatiseringsdybde*). Prismene ble pakket i plast og fraktet til laboratorium hvor veiing ble foretatt. Deretter ble to betongprismer lagret i hver av de ulike fukttilstandene. Dette

ble gjort syv døgn etter utstøping av mørtelprismene, så måling av resistivitet på betongprismene var ikke mulig ved dette tidspunktet.

De to resterende betongprismene skulle brukes til måling av trykkfasthet. Geometrien avvek noe fra 40x40x160 på samtlige betongprismer og derfor ble det avgjort at det var bedre å måle trykkfasthet på utborede betongkjerne (se kapittel 3.3.10 *Bestemmelse av trykkfasthet*).



Figur 3.5: a) og b) Utskjæring av prizmer c) Ferdig utskårne prizmer

Utboring av betongkjerne til trykktesting og måling av fuktinnhold ble utført på det samme betongdekket ved en senere anledning og entreprenøren bistod også med dette arbeidet.

Totalt ble det tatt ut 3 kjerne til trykktesting og disse ble boret ut tvers gjennom betongdekket ($t = 150 \text{ mm}$). Kjerne til måling av fuktinnhold ble tatt ut fra hver av de seks lokalitetene som er omtalt i kapittel 3.2 *Bakgrunn for feltarbeid*. Siden det er fuktinnholdet fra overflaten og ned til armering som er mest interessant i forbindelse med ledningsevne og KB ble det boret ned til armering og prøvene ble deretter brukket løs med huggjern. Prøvene ble merket og pakket i plast umiddelbart etter utboring. Ved kjerneboring utvikles mye varme og boret må vannes. Vannet ble suget opp underveis og prøvene ble tørket med trykkluft for å minimere fuktpåvirkningen av dette.



Figur 3.6: a) Kjerneboring b) Utboret betongkjerne

3.3.4 Måling av resistivitet på lab

Utstyr

- LCR multimeter av typen ELMA 6400 (120 Hz målefrekvens)
- Strømførende gel (ST-gel)
- Stoppeklokke
- Prøvelegemer av mørtel og betong
- ST-gel

På laboratoriet ble to-elektroden benyttet til resistivitetsmålinger. I stedet for fuktige svamper ble det brukt ST-gel, som er en gel-tape som fjernes etter måling, slik at de samme prismene kan benyttes til senere resistivitetsmålinger. Resistiviteten i ST-gel ble kontrollert for å avdekke om dette påvirket resultatene. Prismene ble plassert mellom to elektroder av metall, som var koblet til multimeteret og resultater ble registrert etter 0, 30, og 60 sekunder. Dette ble gjort for å avdekke eventuell drifting i resultater under måling.

En av fordelene med prøvelegemenes geometri (4x4x16cm) er at resultatet som leses av på multimeteret ($k\Omega$) er det samme som resistiviteten i prøvene ($k\Omega\text{ cm}$). Dette skyldes geometrifaktoren for to-elektrode-metoden: A/L , altså $(4 \times 4)/16 = 1$.



Figur 3.7: Resistivitetsmåling på laboratorium

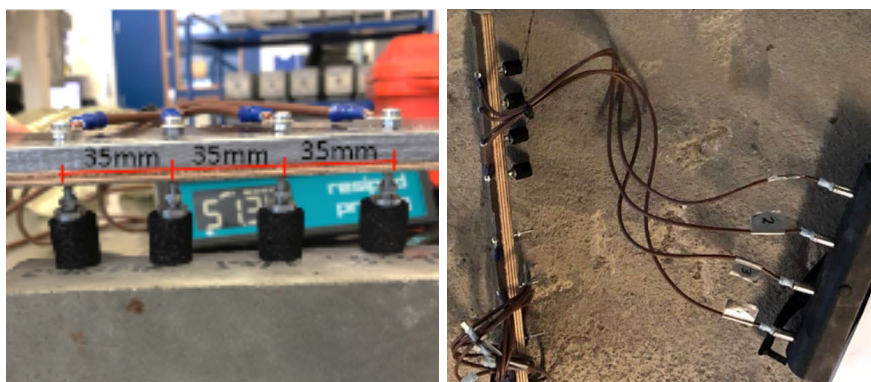
3.3.5 Måling av resistivitet i felt

Utstyr

- Resipod (Wenner-måler, med overgang til 35 mm probeavstand)
- Covermeter av typen Proceq Profometer 3 (måler 0-60 mm)
- Vann
- Støvsuger

Eksperimentet

Det ble laget en overgang til 35 mm probeavstand. I tillegg ble det laget en tilsvarende overgang med samme probeavstand som Resipod, som ble brukt til å utelukke at overgangen påvirket resultatene. På tuppen av probene ble det satt på skumputer som kan fuktet med vann for å sikre god kontakt med betongen.



Figur 3.8: a) Provisorisk overgang til 35 mm b) Proceq Resipod med overgang

Før måling av resistivitet ble betongoverflaten frigjort for støv. Et rutenett delt inn i 1x1 m ble målt opp og markert med tusj over de to feltene som skulle undersøkes. Totalt ga dette 40 målepunkter. Videre ble armeringsjern lokalisert med covermeter, slik at disse kunne unngås ved resistivitetsmålinger. Ved hvert målepunkt ble skumputene på probene fuktet med vann for å sikre god kontakt med betongoverflaten. Jevnlige ble de rensset for smuss. Fem parallelle målinger ble utført i hvert målepunkt og resultater ble notert.

3.3.6 Måling av karbonatiseringsdybde

Utstyr

- pH-indikator (Fenolftalein)
- Tømmestokk

Eksperiment

I felt ble karbonatiseringsdybde målt i området hvor betongprismene ble skåret ut og i borehull i hver av de seks lokalitetene som er omtalt i kapittel 3.2 *Bakgrunn for feltarbeid*. På laboratoriet ble karbonatiseringsdybde målt på mørtelprismene 90 døgn etter utstøping.



Figur 3.9: Karbonatisering i a) betong b) borehull c) mørtel

3.3.7 RF-måling i felt og kalibrering av RF-prober

Utstyr

RF-måling:

- Protimeter MMS fuktmåler med 6 stk. RF-sonder
- Drill og 12mm betongbor
- Silikon
- Teip

Kalibrering:

- 2,5 dl mettet saltløsning (Natriumklorid og kondisjonert vann (22°C))
- 2,5 dl mettet saltløsning (Kaliumklorid og kondisjonert vann (22°C))
- Magnetrører
- Plastbeger
- Teip
- Protimeter MMS fuktmåler med 6 stk. RF-sonder
- Kalibrert RF-måler (Testo 635)
- Kjøleskap

Eksperiment

RF-målingene i betongdekket er utført i henhold til NS 3511 - *Måling av relativ fuktighet (RF) i betong* (Standard Norge, 2014).

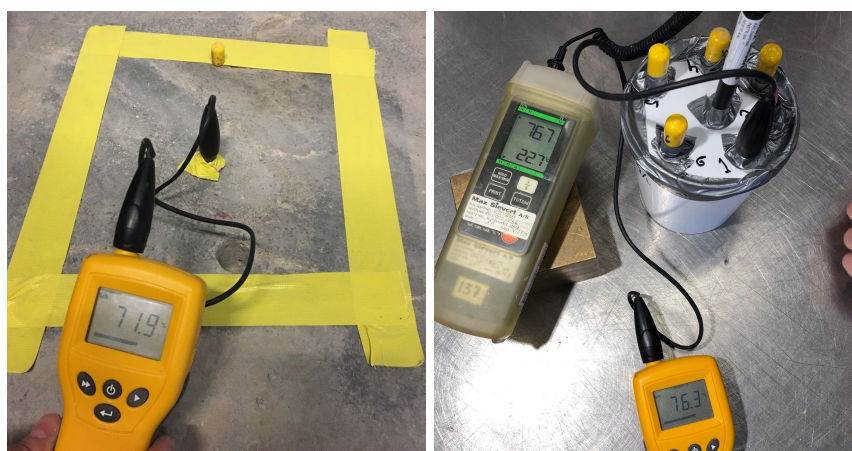
RF-måling i felt:

1. For å kunne vite hvilke av RF-sondene som gir avvik fra faktisk RF ble de merket med tall fra 1-6 med tusj før RF-målinger ble foretatt.
2. Seks hull (\varnothing 12mm) ble boret ut og hullene ble rensert for støv.
3. Etter 72 timer ble sensorene plassert i hullene og isolert med silikon og teip.
4. Etter 48 timer ble avlesning foretatt.

Kalibrering på lab:

(Foretatt med begge saltløsningene for å kontrollere eventuelle avvik ved to ulike fuktnivåer)

1. Mettet saltløsning ble blandet med magnetrører.
2. Det ble satt lokk på begeret og RF-sondene ble trykket gjennom hull i lokket.
3. Til sammenligning ble laboratoriets kalibrerte RF-måler også brukt for å måle RF over saltløsningene.
4. RF-sondene og lokket ble forseglet med tape.
5. Sondene fikk stå i ro på laboratoriet med konstant temperatur på 22°C til de hadde stilt seg inn på stabile verdier, som ble loggført.
6. Deretter ble sondene lagt i kjøleskap sammen med laboratoriets kalibrerte måleutstyr, dette for å undersøke eventuelle måleavvik ved lavere temperaturer ($6^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$). En kan trolig anta at måleavvikene i kjøleskapet samsvarer godt med avvik i feltmålingene, siden disse temperaturene er i samme område.
7. Temperatur og RF for begge måleapparatene ble loggført.



Figur 3.10: a) RF-måling i felt. b) Kalibrering av sonder på lab

3.3.8 Poremetning, absolutt fukttinnhold og porevolum

Utstyr

- Vekt
- Tørkeskap
- Kar med vann

Eksperiment

Eksperimentet ble utført etter metoden som er nevnt i kapittel 2.4.1 *Absolutt fukttinnhold og vannmetningsgrad*. Prøver fra felt ble pakket i plast umiddelbart etter uttakning for å hindre uttørring/oppfuktning på vei til laboratoriet, hvor feltvekt ble målt. Prøver på laboratoriet ble veid etter 90 døgns lagring i de ulike fukttilstandene. Prøvene ble deretter plassert i et varmeskap på 110 °C. Etter 12 timer ble vekten av prøvene kontrollert og etter totalt 24 timer, da vekten var den samme, var prøvene helt tørre. Vekten ble registrert og prøvene ble nedsenket i vann og lagret en uke, før vekten igjen ble registrert.



Figur 3.11: a) Vannlagring av prøver b) Veiing av prøver c) Tørking av prøver

Veiing ved de tre ulike fukttilstandene (felt-/labvekt, tørr og vannmettet) ga grunnlaget til å kunne regne ut absolutt fukttinnhold, porevolum og poremetning (vannmetningsgrad).

3.3.9 Kloridanalyse

Utstyr

- Bormaskin med 25mm bor
- Tømmestokk
- Liten kost
- Prøveposer
- Plastkopper
- Vekt
- Magnetrører
- Salpetersyre (10%)
- Natriumkarbonat
- Quantab titreringspinner
- pH-strips

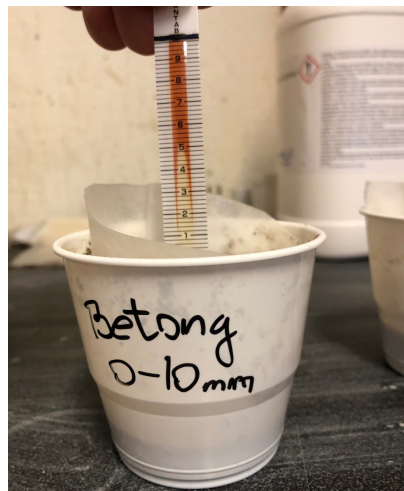
Eksperiment

Uttak av kloridprøver:

Betongstøv ble boret ut fra konstruksjonen i de seks lokalitetene som er omtalt i kapittel 3.2 *Bakgrunn for feltarbeid*. I tillegg ble det tatt ut kloridprøver fra området hvor det ble skåret ut betongprismer. Støv ble tatt ut fra følgende sjikt: 00-10mm, 10-20mm, 20-30mm, 30-40mm og 40-50mm. Borehullene ble rengjort med kost og støvsuger for hvert sjikt som ble boret og støvet ble samlet i lufttette, markerte poser. Deretter ble prøvene tatt med til laboratoriet for analyse. Den eksakte lab-prosedyren kan variere noe ved ulike laboratorier.

Analyse:

Betongstøv ble veid opp i kopper og salpetersyre (10% løsning) ble tilsatt. Dette ble godt blandet med magnetrører for å løse opp kalsiumhydroksidet i betongen, hvor klorider kan være bundet opp. Løsningen ble deretter nøytralisert med natriumkarbonat og pH ble kontrollert for å sikre at løsningen var nøytral, da sur eller basisk løsning vil påvirke resultatene. Løsningen ble filtrert og titreringspinner av typen Quantab ble plassert i løsningen. Væsken suges kapillært opp i Quantab-pinnene, som er fylt med sølvdikromat. Dette stoffet endrer farge om væsken inneholder klorider, slik at verdien kan leses av på Quantab-pinnen (Myrdal, 2015). Til slutt kunne verdien regnes om til kloridinnhold av antatt sementvekt i masseprosent. I følge Kompen (2014) er antatt sementvekt for B300-betong fra 1970-tallet rundt 280 kg/m^3 .



Figur 3.12: Kloridanalyse med Quantab-metoden

3.3.10 Bestemmelse av trykkfasthet

- Utboring av betongkjerner, trykktesting og omregning ble utført i henhold til Byggforsk 520.033 (Jensen, 2013).
- Trykktesting av mørtelprismer ble utført etter NS-EN 12190 (Standard Norge, 1998).

Utstyr

- Betongsag
- Plansliper
- Hydrauliske trykkpresser

Ekspérimentet

Før betongkjernene fra felt kunne trykktestes ble deler av prøvene som var karbonatisert (topp og bunn) kappet av, da dette kan ha innvirkning på trykkfastheten og hensikten med forsøket var å anslå betongkvaliteten. Deretter måtte prøvene planslipes for å sikre jevne trykkflater. Dette ble utført med hjelp fra Ødegård og Lund AS.



Figur 3.13: Ferdig planslippede betongkjerner til trykktesting



Figur 3.14: Hydraulisk trykkpresse for a) betong og b) mørtel

Etter trykktesting ble det utført en visuell inspeksjon av prøvelegemene for å anslå største tilslagsfraksjon (D_{max}) da dette har betydning for resistivitet.

Trykktesting foregår ved at det påføres trykkraft til prøven og ved brudd leses bruddlasten av. Dette kan regnes om til MPa ut ifra prøvenes geometri. Målte verdier må omregnes i henhold til Byggforsk 520.033 for at en skal finne karakteristisk trykkfasthet for utborede kjerner (Jensen, 2013).

4 Resultater

I dette kapitlet presenteres alle resultater fra forsøkene som har blitt gjennomført. Først presenteres resultater som er relevante for laboratoriearbeid, deretter resultater som er relevante for feltarbeid.

4.1 Resultater fra laboratorium

Tabell 4.1 viser de forskjellige saltene som ble brukt under kalibrering av RF-prober og til herdekar med mettet saltløsning. Her sammenlignes teoretisk RF med målt RF for hver enkelt saltløsning. Målte resultater samsvarer godt med teorien.

Salter	RF _{teoretisk} (%) Temperatur (°C)	RF _{målt} (%) (22 °C)
KI	69.9 20	68.4
NaBr	57 22	57.6
NaCl	76 22	76.5
KCl	86 22	85.3

Tabell 4.1: Sammenligning mellom teoretisk og målt RF over saltløsning

Tabell 4.2 viser blandingsforhold av ulike saltløsninger (totalt 2 liter) og den relative fuktigheten i herdekar etter 7 døgn (stabil verdi). Se vedlegg C for detaljer om fuktmåling.

Salter	Metningspunkt (g/l)	Mengde salt (g)	Vann (l)	Målt RF (%) (Etter 7 døgn)
KI	1430	1000	0.7	68
NaBr	905	1000	1.1	
NaCl	360	72	0.2	

Tabell 4.2: Oppnådd RF med blandede saltløsninger i herdekar

I tabell 4.3 presenteres resultater fra resistivetsmåling på mørtel- og betongprismer. Verdiene er de som ble registrert umiddelbart etter påkobling av elektroder. I vedlegg D presenteres alle verdiene fra resistivetsmåling på lab. Fra vannlagring og ned til 68% RF viser resultatene stabile måleverdier for 0, 30 og 60 sekunder. Før prøvene lagret i 54% RF drifter resultatene mer. Resistivetsmåling på ST-gel viste neglisjerbare verdier.

	Vannlageret (k Ω cm)		95 % RF (k Ω cm)		68% (k Ω cm)		54 % RF (k Ω cm)	
	B20	Confix	B20	Confix	B20	Confix	B20	Confix
7 døgnet	2.3	3.5	4.6	5.9	5.5	8.7	37.3	94.7
28 døgnet	3.6	10.3	7.1	17.6	12.0	42.0	277.9	727.4
56 døgnet	4.7	16.6	9.1	29.6	20.2	75.2	724.9	1768.4
90 døgnet	5.2	18.5	10.8	36.8	28.5	96.6	1217.0	2178.0

Tabell 4.3: Utvikling av bulkresistivitet i mørtelprismer over tid

I tabell 4.4 presenteres fasthetsutviklingen over tid for de samme prismene, for sammenligning av dette og resistivitet.

	Vannlageret (MPa)		95 % RF (MPa)		68% (MPa)		54 % RF (MPa)	
	B20	Confix	B20	Confix	B20	Confix	B20	Confix
7 døgnet	32	49	32	52	36	54	32	50
28 døgnet	37	64	36	56	39	57	38	50
56 døgnet	37	59	40	57	38	57	36	52
90 døgnet	42	73	40	62	40	57	38	48

Tabell 4.4: Utvikling av trykkfasthet i mørtelprismer over tid

Med unntak av noen undermålere (røde celler) viser undersøkelsen at trykkfastheten stadig øker, men at utviklingen avtar med tiden, det samme gjelder for utvikling av resistivitet. Alle prøver oppnådde tilfredsstillende trykkfasthet i forhold til deklart verdi (>25 MPa). Confix har både høyere trykkfasthet og resistivitet enn Støpemørtel B20 for alle fukttilstander og ved alle måletidspunkt.

Tabell 4.5 viser resultater fra resistivetsmåling i betongprismene som ble skåret ut i felt og lagret på laboratoriet.

	Vannlageret (kΩ cm)	95 % RF (kΩ cm)	68 % RF (kΩ cm)	54 % RF (kΩ cm)
28 døgn (21)	5.1	90.4	123.1	253.8
56 døgn (49)	5.0	67.2	147.8	573.4
90 døgn (83)	5.3	46.5	147.9	656.8

Tabell 4.5: Bulkresistivitet i betong målt over tid

Som forklart i kapittel 3.3.3 *Uttak av betongprøver i felt* er betongprismene lagret i de ulike fukttilstandene 7 døgn mindre enn mørtlene, og tallene i parentes i tabellen angir faktisk lagringstid. Ved måling etter 49 og 83 døgn ser det ut til at verdiene er i ferd med å stabilisere seg. Heretter vil kun antall døgn etter utstøping av mørtler bli brukt. Geometrien til de utskårne betongprismene hadde et avvik på mindre enn 10% fra 40x40x160 mm.

I følgende diagrammer presenteres en sammenligning av utvikling i resistivitet mellom mørtelprismene og betongprismene. (Merk at verdier på y-aksen er logaritmisk inndelt):

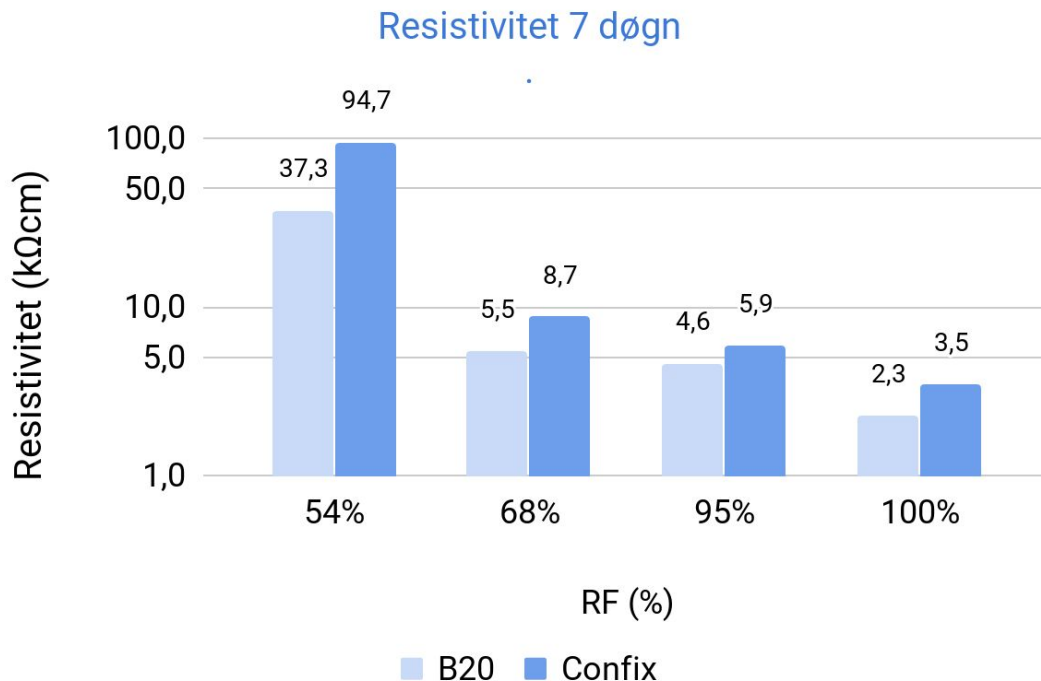


Diagram 4.1: Resistivitet etter 7 døgn. Støpemørtel B20 og Confix

Resistivitet 28 døg

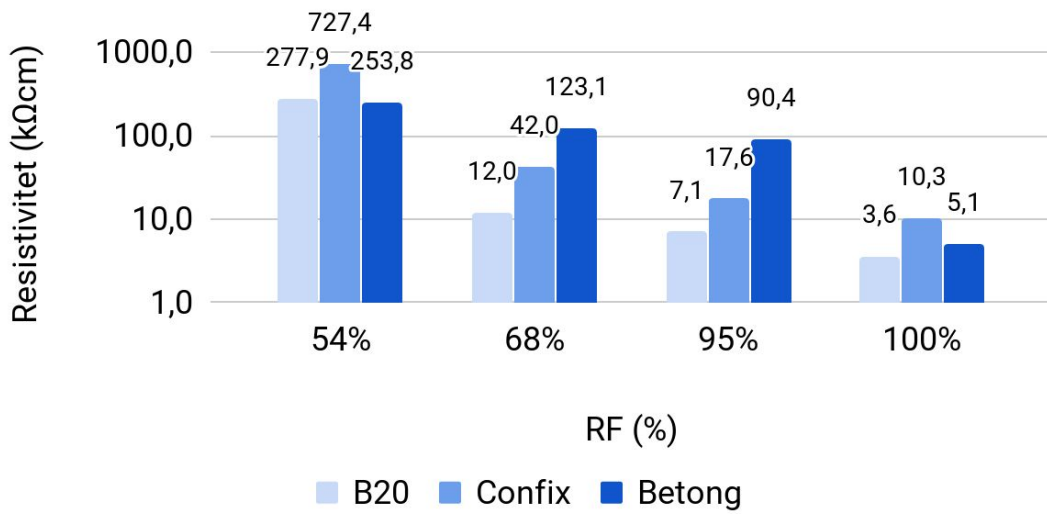


Diagram 4.2: Resistivitet etter 28 døg. Støpemørtel B20, Confix og betong

Resistivitet 56 døg

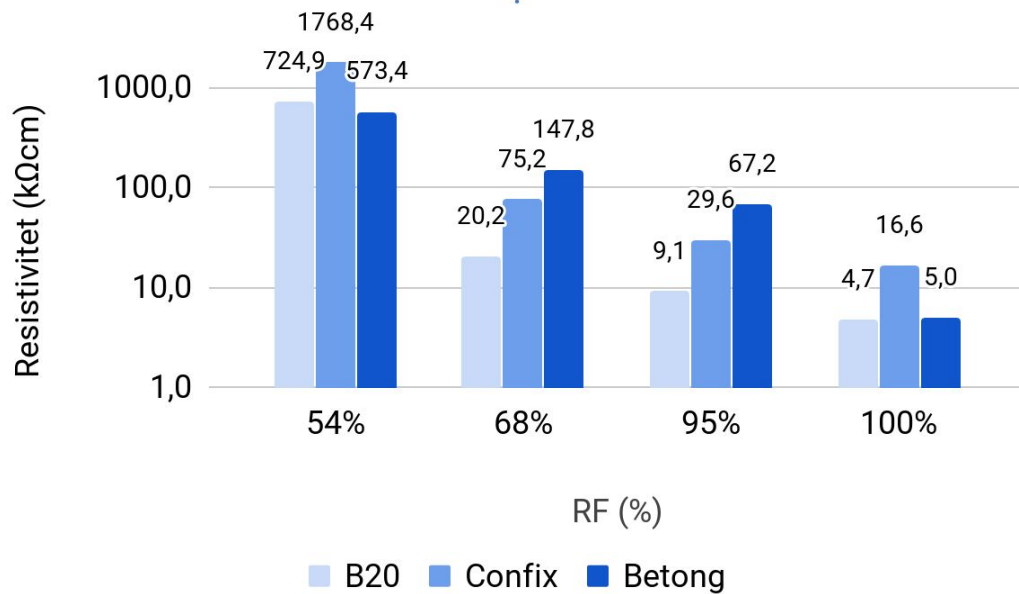


Diagram 4.3: Resistivitet etter 56 døg. Støpemørtel B20, Confix og betong

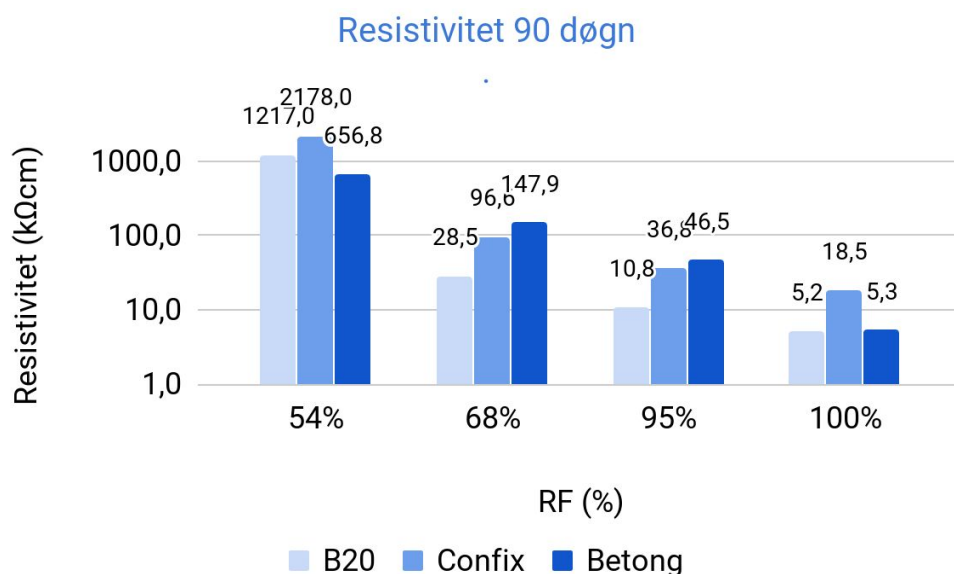


Diagram 4.4: Resistivitet etter 90 døgn. Støpemørtel B20, Confix og betong

Tabell 4.6 viser en sammenligning mellom resistivitet etter 90 døgn, porevolum, absolutt fuktinnhold og poremetning. Dataene er gjennomsnittsverdier av fuktberegninger og resistivitetmåling på flere prøver.

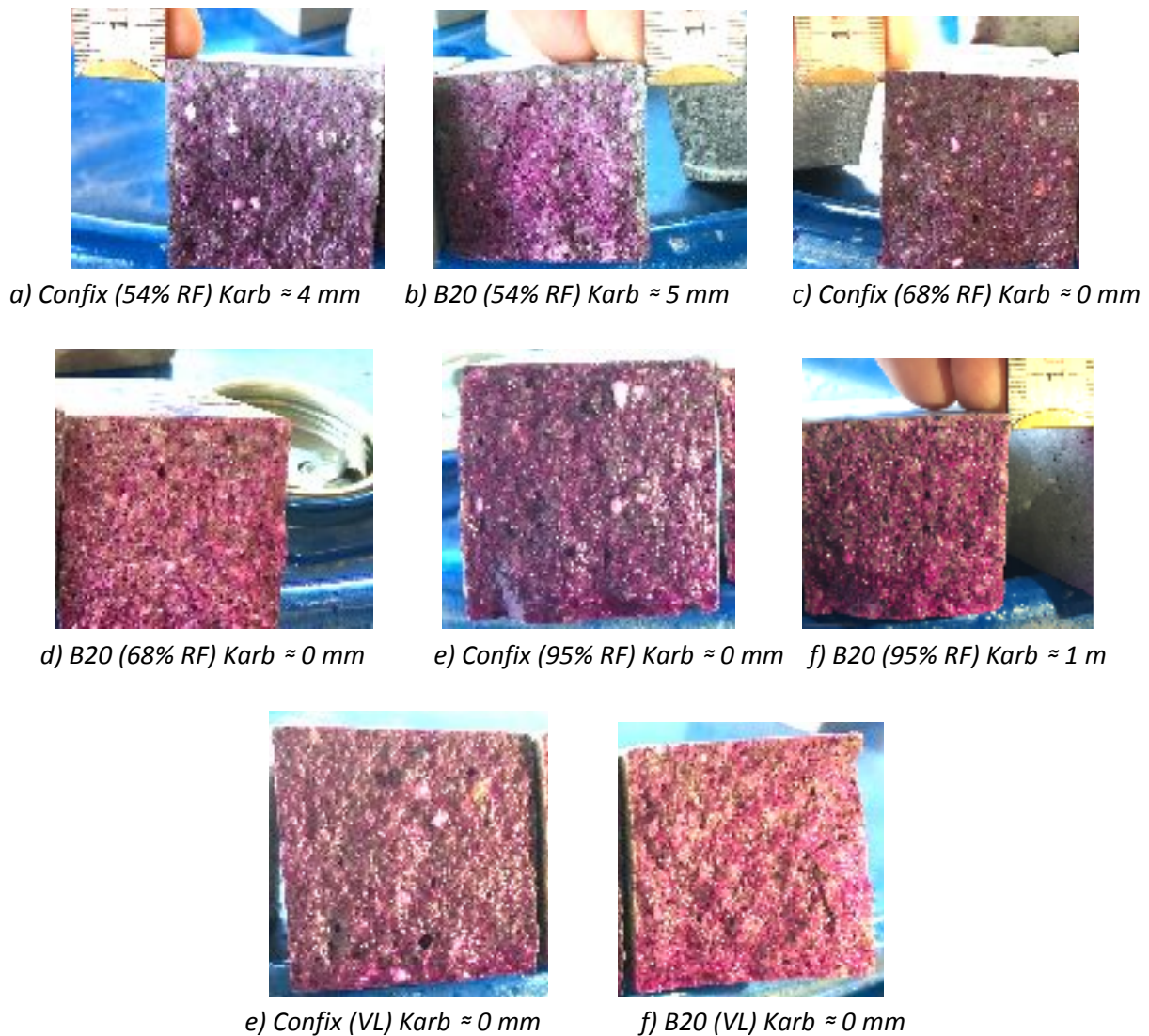
VL	Resistivitet (kΩ cm)	Porevolum (%)	Poremetning (%)	Absolutt fuktinnhold (%)
B20	5,2	9.1	100.0	9.1
Confix	18.5	7.6	100.0	7.6
Betong	5.3	6.8	100.0	6.8
95%				
B20	10.8	8.2	73.2	5.9
Confix	36.8	9.1	76.1	6.9
Betong	46.5	7.0	69.3	4.9
68%				
B20	28.5	9.0	51.1	4.6
Confix	96.6	10.5	59.5	6.3
Betong	147.9	6.6	51.8	3.4
54%				
B20	1217.0	9.5	27.6	2.6
Confix	2178.0	11.4	36.9	4.2
Betong	656.8	6.6	24.1	2.2

Tabell 4.6: Sammenligning mellom resistivitet målt etter 90 døgn og fuktmålinger



Figur 4.1: Karbonatiseringsdybde hvor betongprismene ble skåret ut

Figur 4.1 viser karbonatiseringsdybden der hvor betongprismene ble skåret (8-10 mm)



Figur 4.2: (a-f) Karbonatiseringsdybde i mørtelprismer

Figur 4.2 viser karbonatiseringsdybden i mørtelprismene etter 90 døgn lagring i ulike fukttilstander. Prøvene som er lagret i 54% RF viser betydelig større karbonatiseringsdybde enn de andre.

I følgende tabeller presenteres resultater fra samtlige klordanalyser. De to første diagrammene viser klordinnholdet der hvor betongprismene ble skåret ut. Resterende analyser er fra lokalitetene omtalt i 4.2 - *Resultater fra felt*.

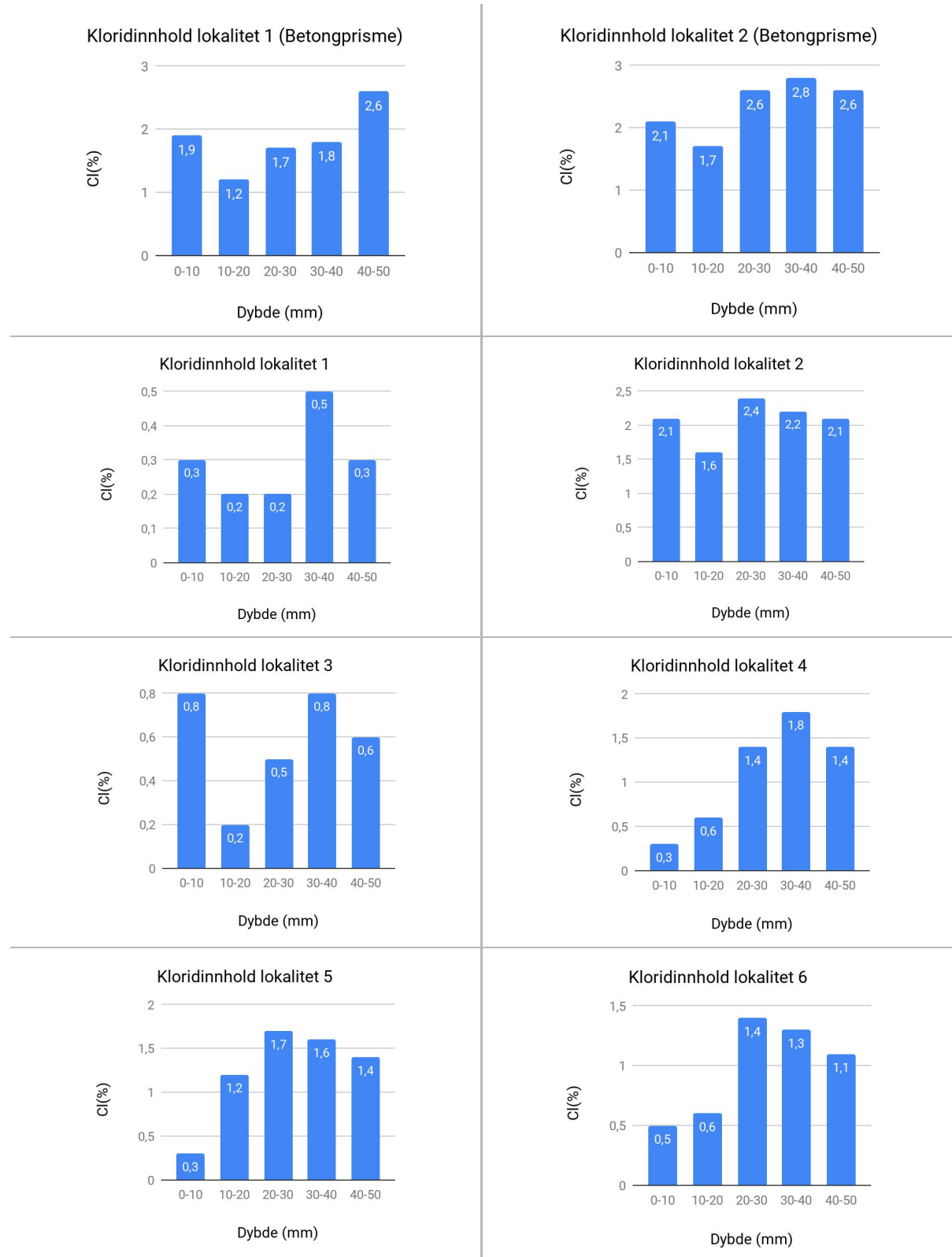
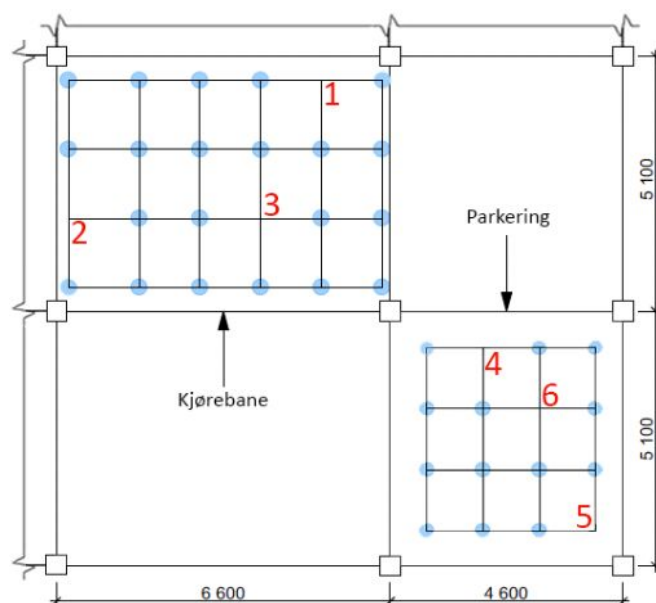


Diagram 4.5: Klordanalyser fra felt

4.2 Resultater fra felt

I vedlegg E finnes resultatene fra resistivetsmåling i felt (Wenner-metoden). Figur 5.2 viser de seks lokalitetene som ble valgt ut til videre undersøkelser, på bakgrunn av disse målingene. Lokalitet 1 og 4 viste høye resistivetsverdier ($>800 \text{ k}\Omega \text{ cm}$), lokalitet 2 og 5 viste lavere resistivetsverdier ($<100 \text{ k}\Omega \text{ cm}$) og lokalitet 3 og 6 viste verdier mellom høye og lave verdier.



Figur 4.3: Oversikt over de utvalgte lokalitetene

Lokalitet	1	2	3	4	5	6
Resistivitet ($\text{k}\Omega \text{ cm}$)	> 1000	30.9	453.5	840.0	60.5	145.8
RF (%)	76.5	91.6	81.7	82.2	82.7	81.7
Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	7.0	7.9	7.5	7.5	7.4	7.3
Poremetning (%)	48.2	73.1	51.6	55.0	66.8	58.9
Porevolum (%)	7.0	6.9	6.9	7.1	6.8	7.1
Fukttinnhold (%)	3.4	5.1	3.6	3.9	4.7	4.0
Karbonatisering (mm)	18-20	6-8	12-14	16-20	10-14	6-10
Klorider						
0 - 10 mm	0.3	2.1	0.8	0.3	0.3	0.5
10 - 20 mm	0.2	1.6	0.2	0.6	1.2	0.6
20 - 30 mm	0.2	2.4	0.5	1.4	1.7	1.4
30 - 40 mm	0.5	2.2	0.8	1.8	1.6	1.3
40 - 50 mm	0.3	2.1	0.6	1.4	1.4	1.1

Tabell 4.7: Måleresultater for ulike lokaliteter i felt

Kalibreringsdata for RF-prober er vedlagt i vedlegg F.

Tabell 4.8 viser målt trykkfasthet på utborede betongkjerner.

Prøvenummer	1	2	3
Trykkfasthet (f_c)	42 MPa	36 MPa	42 MPa

Tabell 4.8: Målt trykkfasthet i betongkjerner

Etter omregning i henhold til 520.033- *Bestemmelse av betongkonstruksjoners trykkfasthet. Uttak og prøving av sylindre* er karakteristisk trykkfasthet for betongen i snitt 32 MPa (B25/B300).

Visuell inspeksjon av betongprøvene som ble trykket viste tydelige tegn til tilfredsstillende trykkbrudd. I tillegg ble D_{max} anslått til 32 mm ved visuell inspeksjon av kjernene etter trykktesting.

5 Diskusjon

Som kjent fra litteraturen har fukt svært stor innvirkning på resistivitet. Laboratorieforsøkene viser en stor forskjell i resistivitet for vannlagrede prøver og prøver som er lagret i 54% RF. For de fleste betongkonstruksjoner vil ikke disse fukttilstandene tilsvare det naturlige fuktinnholdet i materialet. RF i betong svinger mye mindre enn RF i luft på grunn av fukttreghet i materialet og fukttilstandene på 68% og 95% er trolig mer representative for fukt i betong i felt.

I herdekaret med mettet saltløsning var den relative fuktigheten forhøyet den første uken etter at prøvene ble lagt i karet. Fuktigheten steg mot 100% før den gradvis stilte seg inn på 68%. Det tar noe tid for saltene å trekke fukten ut av luften og i tillegg er det sannsynlig at de nylig utstøpte mørtelprismene avga en del fukt til luften i karet. Etter en uke hadde fuktigheten i luften over saltløsningen stilt seg inn på et stabilt nivå. Dette har medført at mørtelprismene som ble lagret i kar har herdet under et høyere fuktnivå den første uken, og det er i denne perioden store deler av fasthetsutviklingen finner sted. Hvis den relative fuktigheten i herdekaret hadde vært 68% under hele forsøksperioden ville trolig resistiviteten i disse prøvene vært noe høyere. Dette kunne vært tatt hensyn til ved å ha et større volum over saltløsningen, slik at fuktigheten i luften ikke hadde blitt like påvirket av fuktigheten som prøvelegemene avga. I diagram 4.1 ser man at resistiviteten for prøvene lagret i karet er svært lik som for prøvene lagret i 95% RF, som tyder på at fuktnivået har vært nokså likt. Dermed er det kun prøvene som ble lagret i 54% RF som har vært lagret i et relativt lavt fuktnivå den første uken.

Resultatene viser at fasthetsutviklingen avtar etter 28 døgn for de fleste mørtelprismene. Resistiviteten fortsetter likevel å øke i stor grad etter 28 døgn og dette skyldes sannsynligvis uttørking av prøvene, som er i ferd med å stille seg inn på fuktliekevikt med omgivelsene. Denne antakelsen forsterkes ved at resistiviteten øker mer i prøver som lagres i lav RF enn prøver som lagres i høy RF, inkludert vannlagrede prøver. Dette kan forklares med at det tar lengre tid for prøvene å oppnå fuktliekevikt ved lavere RF. Luftlagrede mørtelprismer burde vært lagret over en lengre periode, ettersom man ikke kan fastslå at resistiviteten er stabil ut i fra målinger ved 90 døgn. Undermålere ved trykktesting er uheldig og kunne vært unngått med et større antall trykkprøver. Dette ville styrket resultatenes validitet, men praktiske begrensninger på lab gjorde dette umulig. Resultatene anses som gode nok til å vise et riktig bilde av fasthets- og resistivitetsutvikling i mørtlene.

Betongprismer som ble lagret på laboratorium stilte seg gradvis inn på omgivelsenes fuktnivå over tid. Dette fremkommer tydelig i utviklingen av resistivitet (tabell 4.5). For de vannlagrede betongprismene er resistiviteten stabil etter 28 døgn, som indikerer at de er vannmettet. Resistivitetsmålinger av luftlagrede betongprismer viser, som for mørtelprismene, at de fleste prøvene burde vært lagret over en lengre periode for å oppnå

fuktliekevekt på grunn av fukttregheten i materialet. Resistiviteten i betongprismene lagret i 68% RF er stabil etter 56 døgns lagring, og dette indikerer at prøvene har oppnådd fuktliekevekt. Å betrakte utvikling av resistivitet over tid, ved konstante fuktforhold, er nyttig for å se når verdier stabiliserer seg, da dette indikerer et stabilt fuktnivå. I forbindelse med betongrehabilitering er det verdier etter endt fasthetsutvikling, og ved stabilt fuktnivå, som er interessante. Heretter diskuteres derfor lab-resultater etter 90 døgn, da dette viser de mest stabile verdiene.

Resultatene viser en jevn utvikling i resistivitet målt på de forskjellige prøvene fra vannmettet tilstand ned til 68 % RF og ved 54 % RF øker måleverdiene betraktelig, særlig for mørtelprismene. Det var også kun ved dette fuktnivået at målinger viste verdier som driftet mye over tid. Dette knyttes til litteraturen som viser hvor stor betydning endring i RF har for resistiviteten ved lavere fuktnivåer. Betongen skiller seg noe ut ved denne fukttilstanden og viser lavere resistivitet enn forventet, i forhold til prøvene i de andre fukttilstandene. Fordelingen av tilslag i betongprismene ble ikke undersøkt, men det er mulig at betongprøven lagret i denne fukttilstanden inneholdt en mindre andel grovt tilslag, som kan ha gitt lavere resistivitet.

I vannmettede prøvelegemer vil variasjoner i porevannets kjemi, porevolum og porestruktur være avgjørende for ledningsevnen, og det antas at det høye kloridnivået er årsaken til at den vannmettede betongen har lavere resistivitet enn forventet, ut ifra betongens resistivitet i de andre fukttilstandene. Samtidig kan også dette skyldes lokale variasjoner i sammensetning av de ulike betongprismene (f.eks. mindre innhold av tilslag), selv om prismene ble skåret ut fra samme område. Labresultatene viser at Støpemørtel B20 og betongen har svært lik resistivitet ved vannlagring. Dette er annerledes enn for luftlagrede prøver, hvor Confix er nærmere betongen i resistivitet.

Siden reseptene for mørtlene er konfidensielle er det ikke mulig å fastslå årsakene til den store forskjellen i resistivitet for mørtlene, men det at Confix møter krav til en R3 reparasjonsmørtel kan bety at den inneholder en større sementmengde. Porevolumet i sementpastaen i begge mørtlene vil i hovedsak være styrt av v/c-tall. Confix ble blandet med en halv liter mer vann pr. sekk enn Støpemørtel B20, men om sementmengden er større i Confix er det likevel mulig at denne mørtelen har lavere v/c-tall en Støpemørtel B20, og dette er en mulig årsak til at det måles lavest porevolum i Confix for prøver som er vannlagret i 90 døgn. Lavere v/c-tall og større sementmengde kan også være årsaken til den høyere trykkfastheten som måles i Confix.

Resistivetsmålinger viser mye høyere verdier for Confix enn Støpemørtel B20 ved alle fukttilstander og dette kan være et direkte resultat av at Confix har lavere porevolum, men om Confix inneholder pozzolane materialer, som er vanlig for reparasjonsmørtler, kan dette også være en svært medvirkende årsak ettersom silika kan gi mindre sammenhengende porer og redusere ledningsevnen i porevannet.

Litteraturen viser at den indre relative fuktigheten i sementbaserte materialer må være over 80% for at utviklingen av fasthet skal finne sted. Måling av trykkfasthet viser at fuktighetsnivået ved lagring har hatt innvirkning på hydratiseringen av sementen i prøvene og andelen uhydratisert sement øker med synkende fuktnivå. I tillegg, om Confix inneholder mer sement enn Støpemørtel B20, er det sannsynlig at andelen uhydratisert sement i de luftlagrede prøvene er større for Confix enn Støpemørtel B20. Den uhydratiserte sementen vil også trolig fungere som en isolator i prøvene.

Det målte porevolumet er egentlig bare et mål på vektøkning når prøvene lagres i vann etter å ha vært helt tørket. Ved vannlagring av alle prøver etter 90 døgn, for måling av porevolum, ser det ut til at den uhydratiserte sementen i prøvene kan ha reagert med vannet som trengte inn i prøvene. Vektøkningen vil derfor inkludere både vann som bindes kjemisk ved hydratisering og vann som fyller porer. Trolig er den målte vektøkningen i Confix større enn for Støpemørtel B20, fordi mer vann har gått med til hydratisering av en større andel uhydratisert sement i Confix. Om dette er tilfellet kan ikke resultatene for poremetning, som baserer seg på porevolum, brukes som et mål på fuktinnholdet i prøvene.

Effekten av “etterhydratisering” ved vannlagring kunne vært undersøkt om prøvene hadde blitt tørket og veid atter en gang, for å sammenligne tørrvekt før og etter vannlagring. Eventuelt kunne man trykktestet prøvene etter vannlagring for å undersøke om det var en økning i fasthet, som vil bekrefte denne hypotesen. Sannsynligvis kan det også oppstå feil ved måling av porevolum ved neddykking i vann, da tilslag med porøs overflate vil kunne trekke til seg noe vann. Dette vil føre til et høyere målt porevolum, og dermed en lavere poremetning enn hva som er reelt.

Målt porevolum og vannmetningsgrad i prøvene som er vannlagret i 90 døgn vil trolig være “riktig”, ettersom all sementen i disse prøvene har hydratisert før tørking og ny vannmetning. Dette viser at Confix har et lavere porevolum enn Støpemørtel B20.

Absolutt fuktighet er høyere i Confix enn i Støpemørtel B20 for alle luftlagrede prøver. Dette er overraskende, da Confix tilsynelatende har lavest porevolum, men lavere v/c-tall og silika kan ha ført til trangere og mindre porer. Om man knytter dette opp mot fuktteorien vil det lettere kunne oppstå kapillærkondensasjon i slike porer. Figur 2.12 viser at det kreves lavere RF for at konkave vannmenisker skal kunne oppstå i mindre porer og dette kan være årsaken til at fuktinnholdet er høyere i Confix enn i Støpemørtel B20 for luftlagrede prøver. Ved vannlagring er det Støpemørtel B20 som har desidert høyest fuktinnhold, men her vil også fuktopptaket være styrt av andre ting, som vanntrykk. Dessuten viser teorien at større porer fylles raskere ved vannlagring enn små porer.

Resultatene viser at porevolumet i betongprismene er nokså konstant ved alle fuktbetingelser. Dette indikerer at lagring ved de ulike fukttilstandene ikke har ført til etterhydratisering i betongprismene. Det er en mulighet at all sementen i betongen var hydratisert allerede ved uttak av prizmer i felt. På bakgrunn av dette vil sannsynligvis mål av porevolum i betongen være ganske riktig. At porevolumet er lavere i betongen enn i mørtlene skyldes en større andel tilslag, som vil gi mindre rom for sementpasta og derav et mindre porevolum.

Litteraturen nevner poremetning/vannmetningsgrad som et viktig mål i forbindelse med resistivitet. Poremetning vil likevel være et mål som kun kan brukes til sammenligning av materialer med samme porevolum. To materialer med med ulikt porevolum kan ha samme poremetning og likevel svært ulik resistivitet. På samme måte kan to materialer med samme porevolum ha svært forskjellig resistivitet dersom porestrukturen er annerledes. Absolutt fuktinnhold er ikke avhengig av porevolum og kan sannsynligvis være bedre mål for direkte sammenligning av resistivitet i ulike materialer.

Vannmettede mørtelprøver er ikke karbonatisert og dette er som forventet på bakgrunn av litteraturen. Prøver lagret i 95% RF er nesten ikke karbonatisert, som kan forklares ved det høye fuktinnholdet og at karboniseringshastigheten er størst ved RF mellom 50-60%. Mørtelprøvene som er lagret i det isolerte herdekaret (68% RF) er ikke karbonatisert og dette tyder på at herdekaret har vært tett nok under testperioden, slik at inntrenging av CO₂ har vært minimal. For de ovennevnte prøvene er karboniseringsdybden så lav at det ikke anses som avgjørende for resistiviteten. Resultatene viser en betydelig dypere karbonatisering ved 54% RF enn i de andre luftlagrede prismene og dette kan være en medvirkende årsak til den høye resistiviteten målt i prøvene ved denne fuktbetingelsen.

Ettersom betongprismene er skåret ut av toppsjiktet av betongen, er karboniseringsdybden i disse ca. 10 mm. Dette utgjør er en vesentlig del av prismenes tverrsnitt og vil ha betydning for resistivitet. Dette omtales nærmere senere i kapittelet.

For laboratorieforsøk kan temperaturen anses som konstant og tilnærmet lik referansetemperaturen som brukes i litteraturen (21 °C). Det skal nevnes at resistivitetmåling i felt gjøres ved en temperatur som er ca. 10 °C lavere enn på laboratoriet. Resistiviteten i betongprismene på lab vil derfor vise en lavere resistivitet enn tilsvarende betong i felt.

Det vil alltid være en viss usikkerhet knyttet til feltundersøkelser, da lokale variasjoner av ulike faktorer kan gjøre at prøvene man tar ut ikke er representative for betongen som helhet. Derfor er det viktig å utføre nok undersøkelser for å danne et representativt datagrunnlag.

Resultatene fra felt viser at fukt har svært stor innvirkning på resistiviteten og dette er kjent fra litteraturen. I tillegg indikerer feltresultatene at tilstedeværelsen av klorider i betongen har betydning for resistiviteten. Forskning viser at klorider øker den elektrolytiske ledningsevnen i porevannet, og dette kan være en årsak til den reduserte resistiviteten. Forsøkene avdekker imidlertid at det er betydelig høyere RF, absolutt fuktighet og poremetning i områder med høyt kloridinnhold og dette knyttes opp mot salters evne til å binde fuktighet. Det er usikkert hvilke salter som befinner seg i betongen, men resultatene kan tyde på at de er av hygroskopisk art og at det forhøyede fuktnivået, som følge av kloridenes tilstedeværelse, har påvirket resistiviteten i felt. Kloridkonsentrasjoner kan være lokale, for eksempel i riss eller ved hjulplassering på biloppstillingsplasser. Det er også uvisst om enkelte biloppstillingsplasser brukes hyppigere enn andre. Et større antall prøver kunne økt prøvenes pålitelighet.

Feltresultatene viser også at det er omvendt korrelasjon mellom RF og den målte resistiviteten. Dette fremkommer tydeligst i lokalitet 1-3, hvor områder med høy RF viste lav resistivitet og omvendt. I lokalitet 4-6 er ikke dette like tydelig. Labresultatene viser at porevolum og poremetning sannsynligvis er mål som kan benyttes for betongen. Det absolutte fuktinnholdet og poremetningen i betongkjernene har en tydeligere sammenheng med resistiviteten enn RF for alle lokaliteter. Differansen mellom høyest og lavest RF utgjør 16%, men for poremetning og absolutt fuktinnhold utgjør denne differansen henholdsvis 34% og 33% og derfor er dette mål som er lettere å relatere til ulike resistivitetsverdier enn RF.

Måling av relativ fuktighet i betong virker som en nokså rask og enkel metode og dette er mindre destruktivt enn uttak av prøver som tas med på lab. Standarden setter krav til måling, for å sikre at målingene blir nøyaktige, og disse kravene gjør at RF-måling i felt i praksis tar lang tid. I tillegg kan det være utfordrende å tolke hva resultatene egentlig betyr for absolutt fuktinnhold, da man er nødt til å kjenne materialets fukthistorikk for å velge riktig sorpsjonskurve. Dessuten forutsetter bruk av sorpsjonskurver at en har kurver som stemmer med betongens v/c-tall og dermed kreves også kjennskap til dette.

Resultatene viser, som nevnt, at områder med høyt kloridinnhold også har høyt fuktinnhold. I disse områdene måles høye verdier for RF. Litteraturen forteller at ved et gitt fuktnivå vil tilføring av salter i betongen kunne senke den relative fuktigheten. Problemet er at fuktnivået også endres med tilstedeværelsen av salter. Karbonatisert betong kan også gi økt RF på grunn av redusert alkaliinnhold. Effekten av dette er ikke undersøkt.

Karbonatiseringsdybden i felt er varierende og dybden virker å være lavere i områder med høyt kloridinnhold (og dermed høyt fuktinnhold). Dette er naturlig, ettersom karbonatisering vil gå saktere i betong med høy fuktighet, som senker materialets permeabilitet. I lokalitet 1 og 4 er resistiviteten spesielt høy og dette er også områdene med størst karbonatiseringsdybde. Det er usikkert om den høye resistiviteten skyldes karbonatisering eller lavt fuktinnhold. Det skal nevnes at målingene av karbonatisering i borhull er mindre nøyaktige enn i den utskårne prøven, da det ofte er vanskelig å anslå eksakt hvor karboniseringsfronten er.

Temperaturvariasjoner i de undersøkte lokaliteter er svært små (avvik på 1,3 °C) og den målte temperaturen i betongen er noe lavere enn lufttemperaturen. Feltnålingene viser at betongtemperaturen i de undersøkte lokaliteter avviker fra referansetemperatur (21 °C) med ca. 12-14 °C. Hvilken effekt dette har hatt på resistivitetsmålinger er usikkert, men som nevnt i kapittel 2.3.2 *Faktorer som påvirker resistivitet* kan et temperaturfall på 3 °C korrigeres med en justering på +1 kΩ cm (Gowers & Millard, 1999). Om en bruker denne anbefalingen gir dette et tillegg på 4-5 kΩ cm for alle lokaliteter, hvilket er forsvinnende lite. Det anses ikke som presist nok å bruke funnene til Elkey og Sellevold (1995), ettersom disse baserer seg på metningsgrad over 70% og kun én lokalitet hadde metningsgrad over dette nivået. Det er utviklet mer nøyaktige metoder for å ta hensyn til avvikende temperatur, men dette anses som for komplisert til å være praktisk nyttig. Metodene i litteraturen er utviklet for å korrigere målinger i felt, slik at de kan sammenlignes med målinger på lab. I praksis er det kanskje riktigere å korrigere labmålinger til feltforhold, ettersom det er i felt produktet skal brukes.

I felt har man ikke kontroll på fuktnivået. Økt temperatur på sommerhalvåret vil føre til en uttørkning av betongen. Litteraturen viser at økt temperatur fører til lavere resistivitet, men tørrere betong vil ha høyere resistivitet. Dette, i kombinasjon med at RF i betong øker med stigende temperatur, gjør det svært vanskelig å anslå temperaturpåvirkningen på resistivitet i betong. Effekten av varmluften fra fyringsanlegget, som lokalt kan tørke ut betongen i overflaten, er ikke vurdert, men kan trolig ha betydning for resistiviteten i de øvre sjiktene av betongdekket i lokale områder. Det antas at slike sjikt kan ha omtrent samme effekt på resistiviteten som karbonisert betong.

Trykktesting av utborede kjerner viste at betongen hadde den trykkfasthet som var dimensjonert for betongdekket (B25/B300). I følge tabell 3.1 skal en slik betongkvalitet fra 1970-tallet ha et v/c-tall på rundt 0.6, som tilsvarer at det var en viss andel av overskuddsvann i betongen ved utstøping. Måling av fuktinnhold i betongen på lab kan tyde på at all sementen var hydratisert i betongprismene og dette ville trolig ikke vært tilfellet om v/c-tallet var 0.4. Med v/c-tall på 0.6 er dette derimot ikke umulig.

To-elektrode-metoden har vist seg å være en god metode for måling av bulk-resistivitet på lab, både for utstøpte prøvelegemer og utborede betongprøver fra felt. For sistnevnte anses metoden som særlig destruktiv, når betongprøver må bores eller skjæres ut for måling av resistivitet. Det stilles noen spørsmål til enkelte resultater som oppnås med denne metoden og det kan være vanskelig å være sikker på at det er full kontakt mellom elektroder og prøvelegeme, som er kritisk ifølge litteraturen. Likevel bør en kunne være tryggere på resultater som er oppnådd med denne metoden, ettersom målinger utføres på laboratorium hvor man i større grad har kontroll på påvirkende faktorer som fukt og temperatur.

På mørtelprismer, som er nokså homogene i struktur, gir to-elektrode-metoden svært jevne resultater ved måling på flere prøvelegemer, og særlig ved høyere fuktinnhold i prøvene. Det stilles spørsmål til om betongprismer med samme dimensjon (40x40x160 mm) er egnet for to-elektrode-metoden. Tverrsnittsarealet er relativt lite og større tilslag kan påvirke resultater i stor grad. Utskjæringen av slike prizmer gir også et stort rom for feil i prøvenes geometri og det kreves en del av den utførende for å få ut hele prøvestykker. I tillegg kan betongprismer, som er skåret ut fra toppsjiktet i et dekke, inneholde en relativt stor andel karbonisert betong og kloridnivåer som er mer representative for betongens overflate enn betongen som helhet. Sannsynligvis vil det være riktigere å bruke prøvelegemer med større tverrsnittsareal, boret ut i et sjikt som er vinkelrett på betongoverflaten. Dette vil kunne redusere effekten av grovt tilslag og andre inhomogeniteter i prøven. Slike prøver bør planslipes for å sikre god kontakt mellom elektrode og prøvelegeme. Denne metoden er destruktiv, men vil sannsynligvis gi de mest presise svarene på fuktinnhold i betong.

For feltundersøkelser er man avhengig av å bruke utstyr som er praktisk å ha med seg i felt og resultatene viser at det kan være behov for å utføre svært mange målinger for å danne et representativt bilde av betongens resistivitet. Wenner-metoden er godt egnet til feltarbeid og kan være et nyttig verktøy til evaluering av resistivitet og betongens bestandighetsegenskaper. Et av de viktigere argumentene for å bruke Wenner-metoden er at det er en effektiv, portabel og ikke-destruktiv metode. Utførelsen av selve målingen er svært enkel og en kan dekke store områder på relativt kort tid, men litteraturen (og feltundersøkelsene) viser at tolkning av resultatene kan være utfordrende. Det kreves at en har kjennskap til parametere som fuktinnhold, karboniseringsdybde, kloridinnhold, tilslagsstørrelse, armeringsplassering m.m. og flere av disse parametrene kan kun undersøkes ved destruktive undersøkelser.

Tidligere forskning viser hvor ømfintlig denne målemetoden kan være for små påvirkninger når man måler på utstøpte prøvelegemer på laboratorium. Her har man god kontroll på påvirkende faktorer og dette understreker hvordan tolkning av feltmålinger kan være utfordrende. Resultater fra måling av overflateresistivitet (Vedlegg E) viser at verdier kan variere svært mye, selv på korte avstander. Dette viser at det kan være vanskelig å fastslå hvilken resistivitet en betong har, selv om man deler betongoverflaten inn i ulike "resistivitets-soner".

Gjennom arbeidet med denne rapporten har det blitt lagt vekt på å identifisere faktorer som kan ha endret resistiviteten i betongen i felt. Dette er viktig for å skjønne hvorfor armeringskorrosjon initieres, men i praksis, når det skal velges en mørtel som skal brukes til katodisk beskyttelse, er ikke *årsaken* til den reduserte resistiviteten så veldig interessant. Betongen har den resistiviteten den har og mørtel bør velges deretter for at en skal oppnå best mulig beskyttelse når likestrøm påtrykkes. Det som er viktig er å eliminere kilder til feilmålinger som kan vise en resistivitet som ikke er representativ for betongen.

For det aktuelle betongdekket ($t = 150$ mm), hvor D_{\max} ble anslått til 32 mm, var det ikke mulig å møte alle kravene til probeavstand gitt av Gowers og Millard (1999). Dette gjelder forøvrig hvilken som helst probeavstand. (Se kapittel 3.2.1 *Resistivitetsmåling i felt*). Probeavstanden som ble benyttet ved feltmålinger (35 mm) ble valgt for å lettere kunne sammenligne felt- og labmålinger. Denne probeavstanden gjør målinger mer påvirket av lokale variasjoner i betongen og kan derfor gi mer varierende resultater enn større probeavstander. Apparatet som ble benyttet (Proceq Resipod) viser resultater med én desimal nøyaktighet og for praktiske formål anses dette som unødvendig. Det er ikke veldig interessant å vite om resistiviteten for eksempel er 10.3 eller 20.8 $k\Omega$ cm, da det som er interessant er å vite om resistiviteten er lav nok til at korrosjon kan forekomme og dette kan man oppnå både med probeavstanden som ble benyttet og med større probeavstander.

Som nevnt i kapittel 2.3.1.2 *Wenner-metoden* foreslår Weydert og Gehlen (1999) at betongen bør vannmettes en periode før måling av overflateresistivitet i felt, for at en skal oppnå reproducerbare og representative verdier. Labforsøkene indikerer at dette kan bidra til å gi reproducerbare verdier, men det er lite sannsynlig at dette gir *representative* verdier, ettersom vannmetning ikke er en naturlig fukttilstand for betongkonstruksjoner på land.

Ettersom resistiviteten i stor grad varierte mellom ulike lokaliteter i betongdekket er det nødvendig å se nærmere på hver enkelt lokalitet og sammenligne verdier med labresultater.

Fuktinnholdet i mørtel og betong som er lagret i vann eller i 54% RF avviker i stor grad fra fuktinnholdet i betongen, målt i felt. Fuktinnholdet i prøvelegemer på lab som er lagret i 68% og 95% RF virker å være mer representativt. Om man sammenligner resistiviteten i feltlokaliteter og betongprismer med tilsvarende fuktinnhold, ser man at resistiviteten ikke nødvendigvis er den samme. For betongprismene som ble lagret i 68% RF er fuktinnholdet helt likt som i betongen i lokalitet 1. Likevel ser man en mye lavere resistivitet i prismene enn i felt. Dette kan sannsynligvis forklares med det svært høye kloridinnholdet i prismene og det lave kloridinnholdet i lokalitet 1. I tillegg ser man at karbonatiseringsdybden er betydelig dypere i lokalitet 1.

Betongprismene som ble lagret i 95% RF viser en resistivitet som er nokså lik betongen i lokalitet 2. Her er både fuktinnhold, kloridinnhold og karbonatiseringsdybde nokså likt.

Ettersom verdiene er så like skulle en forventet noe lavere resistivitet på lab, på grunn av høyere temperatur. Lokale variasjoner kan være en mulig årsak til at dette ikke måles.

I tillegg viser betongprismene som er lagret i 68 % RF tilnærmet lik resistivitet som lokalitet 6. I denne lokaliteten er resistiviteten middels høy og dette gjenspeiles i de påvirkende faktorene som er tilnærmet like for betongen målt på lab og i felt. Fukten er noe høyere i felt, som skulle tilsa at resistiviteten var lavere der, men temperaturen på lab vil redusere resistiviteten i betongprismene og kan derfor gjøre at det målet omtrent lik resistivitet.

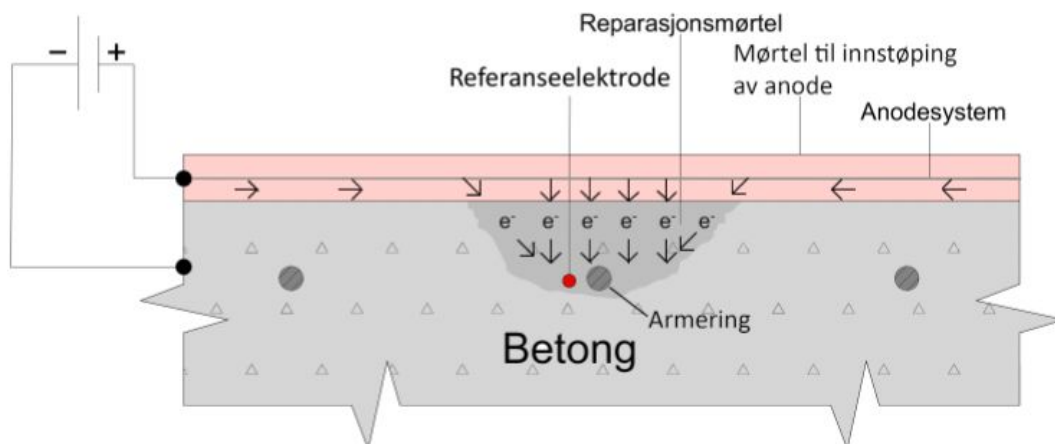
Observasjonene viser at når fuktforhold og andre påvirkende faktorer er like, så er også resistiviteten tilnærmet lik i felt og på lab. Dette indikerer at det vil være riktiger å måle resistivitet på mørtler under realistiske fuktbetingelser enn å måle på vannlagrede prøvelegemer, ettersom dette viser svært annerledes resultater enn for luftlagrede prøver. Ettersom det ser ut til at realistiske fuktforhold er gjenskapt på laboratorium, kan man sammenligne resistivitet i mørtel- og betongprismene. For disse fuktbetingelsene (68% og 95% RF) har Confix en resistivitet som er likere betongen enn Støpemørtel B20 og dette er motsatt for de andre fuktbetingelsene.

Dette bør kunne danne et grunnlag for å velge en mørtel som har resistivitet som er innenfor 50-200% av lokal betongresistivitet, som også burde også være riktig når mørtelen brukes til katodisk beskyttelse i felt. Resultatene viser at én mørtel med en gitt resistivitet ikke vil være tilstrekkelig for å møte det overnevnte kravet for hele betongdekket, og at det i praksis vil være nødvendig å bruke flere mørteltyper med ulik resistivitet til reparasjon av hele betongdekket. Dette vil trolig aldri gjennomføres i praksis, da det krever kartlegging av resistivitet over hele dekket. I tillegg vil trolig effektiviteten ved rehabilitering bli kraftig redusert om man skal bruke ulike mørtler med spesifikke resistiviteter. Dette er trolig årsaker som gjør at standarden også nevner at reparasjoner utført med et materiale som er kjent for å være kompatibelt med katodisk beskyttelse er viktigere enn vilkårlige resistivitetsgrenser (Norsk Standard, 2016).

I kapittel 2.6.6 - *Mørtel til bruk i KB-anlegg* nevnes det at innstøping av anodesystem og reparasjon av skader i noen tilfeller utføres med samme mørtelprodukt. Dette avhenger også av at anodesystemet er av typen som krever innstøping. Nedenfor diskuteres tilfeller som kan oppstå ved bruk av mørtel med ulik resistivitet. For alle tilfellene er det en forutsetning at mørtelen som anoden er støpt inn i har lav nok resistivitet til å gi en enhetlig strømfordeling til betongoverflaten. Prinsippet vil sannsynligvis bli det samme når anoden består av ledende maling.

Ved innstøping av referanseelektrode for overvåking av KB-anlegg blir denne gjerne støpt inn i reparasjonsmørtel. Hvis mørtelen har betydelig lavere resistivitet enn betongen rundt, vil strømmen hovedsakelig ledes gjennom mørtelen. Dette vil gjøre at verdier som måles med referanseelektroden ikke vil være representative for beskyttelsen av betongen og at

det hovedsakelig er armeringen i reparasjonsområdet som blir beskyttet katodisk. Dette anses som unødvendig, da denne armeringen likevel vil være beskyttet av den høyalkaliske reparasjonsmørtelen som repassiverer armeringen. I figur 5.1 vises plasseringen av en referanseelektrode i reparasjonsmørtel med lav resistivitet, og om beskyttelsesstrømmen styres ut ifra potensialene som denne referanseelektroden måler, vil det kunne virke som at strømbehovet er mye lavere enn det som kreves for å effektivt beskytte armeringen i betongen.

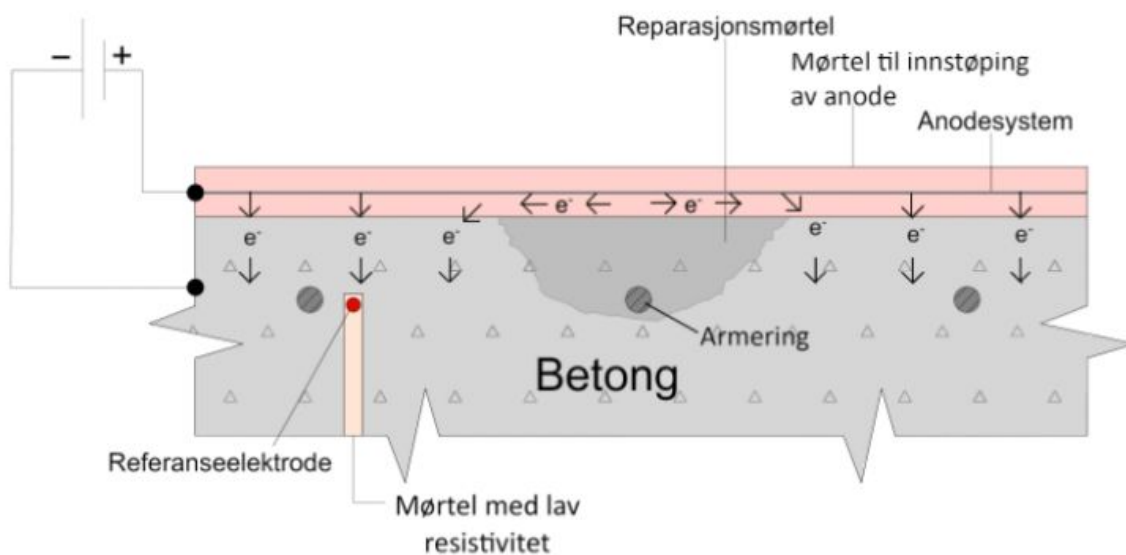


Figur 5.1: Ujevn strømfordeling mellom betong og reparasjonsmørtel

Om reparasjonsmørtelen som brukes har samme resistivitet som betongen vil beskyttelsesstrømmen fordeles likt til armering som ligger i betong og reparasjonsmørtel. Resultatene indikerer likevel at dette kan være vanskelig å oppnå, da mørtel som er egnet i en lokalitet kan være uegnet i en annen lokalitet. Som eksempel kan man betrakte lokalitetene fra feltundersøkelser. Om det hadde vært skader i samtlige lokaliteter, som ble reparert med reparasjonsmørtel med resistivitet på $50 \text{ k}\Omega \text{ cm}$ for aktuelle bruksbetingelser, ville strømfordelingen i teorien vært jevn i mørtel og betong for lokalitet 2 og 5. I de andre lokalitetene ville mørtelen trolig vært et strømsluk, som hadde ført til at armering i betong hadde blitt beskyttet i mindre grad.

Om resistiviteten i reparasjonsmørtelen derimot er vesentlig høyere enn i betongen rundt, og referanseelektroden er plassert som i figur 5.1, kan dette også medføre problemer. Armeringen vil være beskyttet ved et strømnivå som virker å være for lavt ved måling med referanseelektroden. På grunnlag av dette justeres strømmen opp til et nivå som er høyere enn nødvendig for å beskytte armeringen i betongen. Som forklart i kapittel 2.6.4 *Katodisk beskyttelse* vil dette over lengre tid kunne medføre syredannelse rundt anodematerialet, som bryter ned mørtelen rundt. Dette kan føre til dårligere kontakt mellom anode og mørtel, som kan redusere strømmengden som når frem til armeringen og resultatet kan bli mindre polarisering. Dette vil registreres av referanseelektroden og spenningen må derfor justeres opp for at anlegget skal gi tilstrekkelig beskyttelse, hvilket resulterer i mer syredannelse. På denne måten kan et KB-anlegg bli ineffektivt over tid.

Det er trolig mulig å unngå misvisende målinger ved å plassere referanseelektroden annerledes. Figur 5.2 viser en alternativ plassering som vil gjøre at referanseelektroden registrerer strømmen som faktisk beveger seg i betongen og i slike tilfeller vil ikke måling med referanseelektroden være avhengig av reparasjonsmørtelens resistivitet. I dette eksempelet har reparasjonsmørtelen høyere resistivitet enn betongen og derfor vil strømmen primært bevege seg i betongen. For å sikre pålitelige målinger med en slik plassering av referanseelektroden bør innstøpingsmaterialet til referanseelektroden ha lav resistivitet, slik at det ikke isolerer og hindrer referanseelektroden i å måle armeringspotensialet.



Figur 5.2: Alternativ plassering av referanseelektrode

I tilfeller hvor armering ligger i flere lag er det sannsynlig at lagene lengst unna anoden blir mindre beskyttet enn de som ligger nærmest anoden. Denne effekten kan trolig forsterkes for armeringsjern som ligger under en reparasjon med høy resistivitet.

Når et heldekkende anodesystem støpes inn i mørtel vil trolig mørtelen bidra til å endre fuktforholdene i den underliggende betongen. Som eksempel kan regnvann i stor grad påvirke fuktinnholdet i betong, dersom betongen er eksponert for regnet. Et overliggende lag med mørtel vil trolig gjøre at fukten svinger mer i mørtelen og mindre i den underliggende betongen. Vannavvisende overflatebehandling på mørtelens overflate kan minimere slike fuktpåkjenninger og sikre en jevnere fuktighet (og resistivitet) i begge materialene.

6 Konklusjon

Av de undersøkte faktorene som påvirker resistivitet i sementbaserte materialer er det fukt som har desidert størst betydning. Uten fuktighet i materialene vil andre faktorer ha liten betydning for resistiviteten. Absolutt fuktinnhold anses som lettest å relatere til resistivitet. Kloridinnhold viser seg å være av større betydning enn forventet, ettersom dette i stor grad påvirker fuktigheten i betong. Det kan ikke konkluderes med at det er "riktig" eller "galt" å måle resistivitet på vannlagrede prøvelegemer på laboratorium. Labresultatene viser imidlertid at det er svært stor forskjell på resistiviteten i de ulike materialene ved ulike fukttilstander. Ettersom resistivetsforholdet mellom de ulike materialene er forskjellig for vannlagring og luftlagring, konkluderes det med at det er nødvendig å utføre resistivetsmålinger på prøver som er lagret ved realistiske fuktforhold for å få en indikasjon om hvordan produktet vil prestere i felt. Relativ fuktighet mellom 70-90% anses som en god tilnærming til virkeligheten for den undersøkte betongen. Det vil heller ikke være problemer med å oppnå stabile måleverdier for resistivitet ved den nedre grensen. Relativ fuktighet under 70% anses som lite interessant, da dette gir så høy resistivitet at faren for armeringskorrosjon kan neglisjeres. Resistivetsmåling på laboratorium bør fortrinnsvis utføres ved en temperatur som er realistisk for aktuelle feltforhold. Årsmiddeltemperatur kan med fordel benyttes for produkter som skal brukes utendørs.

For valg av mørtel til katodisk beskyttelse er det nødvendig å ha kjennskap til resistiviteten i den eksisterende betongen som skal beskyttes. Målinger kan enkelt utføres med Wenner-metoden, men ved tolkning av resultatene bør man ha god kjennskap til faktorer som kan gi feilmålinger. Utvikling av standardiserte målemetoder for resistivitet i felt vil kunne sikre mer pålitelige måleverdier, og dette anses som nødvendig for at bransjen skal ta i bruk slike målemetoder. Ettersom resistivitet i betong kan variere mye over et lite areal, anbefales det at mørtel som brukes til innstøping av anode er tilpasset områdene i betongen med lavest resistivitet, da dette er områdene som er mest utsatt for korrosjon.

Da det kan være umulig å møte anbefalte resistivetsgrenser, uten å bruke flere forskjellige mørtler med ulik resistivitet, bør det vurderes om det kan benyttes mørtel med høy resistivitet til reparasjon av skader, slik at strømmen fortrinnsvis beveger seg til armeringen i betongen og ikke til armeringen i reparasjonsområdene, da denne armeringen likevel er beskyttet av mørtel. Dette vil fortrinnsvis være aktuelt der hvor armeringen ligger i ett lag. Det overnevnte kan i visse tilfeller være viktigere for effektiv katodisk beskyttelse enn at mørtelen i alle tilfeller skal ha resistivitet mellom 50-200% av betongens resistivitet. Ved etablering av katodisk beskyttelse er det svært viktig å velge fornuftige plasseringer av referanseelektroder. Ved å plassere elektrodene som vist i figur 5.2 kan man unngå at resistiviteten i reparasjonsmørtelen gjør at det måles verdier som ikke representerer beskyttelse av armeringen.

7 Videre arbeid

- Vurdere resistivitet i kjerneprøver boret ut i sjikt fra betongoverflate til armering. Kjerneprøvene bør ha en diameter som er betydelig større en D_{max} , for at påvirkningen av tilslag skal kunne minimeres. Ved dimensjonering av anlegg for katodisk beskyttelse kan slike prøver gi verdifull informasjon, da resistiviteten i prøvene representerer betongen mellom overflate og armering.
- Vurdere effekten av tilsetning av hydrofoberende stoffer i mørtel. Dette kan trolig sikre et mer konstant fuktinnhold i materialet. Hva er betydningen av at resistiviteten i betong vil variere når resistiviteten i mørtelen er stabil?
- Det hadde vært interessant å støpe ut mørtelprøver i felt og måle resistiviteten i prøvene jevnlig, både med Wenner-metoden og to-elektrode-metoden. Dette kan med fordel utføres på egenkomponerte mørtler, hvor man har kjennskap til v/c-tall, pozzolaner og andre tilsetninger, for å vurdere effekten av mindre variasjoner i reseptene.

8 Kilder

- Andrade, C. & Martínez, I. (2010). Techniques for measuring the corrosion rate (polarization resistance) and the corrosion potential of reinforced concrete structures, *Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures*, 2(1):284-315.
- Andrade, M. C., Bolzoni, F., & Fulla, J. (2011). Analysis of the relation between water and resistivity isotherms in concrete. *Materials and Corrosion*, 62(2): 130-138.
- Angst, U. & Vennesland, Ø. (2007). Critical chloride content. Tilgjengelig fra: https://www.sintef.no/globalassets/sintef-byggforsk/coin/sintef-reports/sbf-bk-a07037_critical-chloride-content.pdf (lest 23.04.2019)
- Angst, U. M. (2018). Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete. *Materials and Structures*, 51(1): 1-20.
- Antonsen, R. (2017). Tyngre bruvedlikehold- Katodisk beskyttelse. Status, forskings og innovasjonsbehov. Tilgjengelig fra: https://www.vegvesen.no/_attachment/2045718/binary/1213943?fast_title=Tyngre+Bruvedlikehold+%E2%80%93+Katodisk+beskyttelse%2C+status%2C+forskings+og+innovasjonsbehov.pdf (lest 23.03.2019)
- ASTM Standard. (2012a). New Test Method for Measuring the Surface Resistivity of Hardened Concrete Using the Wenner Four-Electrode Method, (ASTM WK37880), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard. (2012b). Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete, (ASTM C1760-12), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard. (2015). *Standard Test Method for Corrosion - Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*, (ASTM C876-15), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard. (2016). New Test Method for Bulk Electrical Resistivity of Concrete, (ASTM WK56480), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bertolini, L., Polder, R.B. (1997). Concrete resistivity and reinforcement corrosion rate as function of temperature and humidity of the environment. Delft: TNO Building and Construction Research

- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., & Polder, R. (2004a). *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Bertolini, L., Bolzoni, F., Pastore, T., & Pedferri, P. (2004b). Effectiveness of a conductive cementitious mortar anode for cathodic protection of steel in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(4): 681-694.
- Bird, A. R. (Udatert). Cathodic Protection of Reinforced Concrete Structures - A Practical Method of Arresting Rebar Corrosion. Tilgjengelig fra:
<https://www.marineandcivil.com.au/Cathodic%20Protection%20of%20Reinforced%20Concrete%20Structures.pdf> lest (17.04.2019)
- Bjøntegaard, Ø., & Myren, S. A. (2007). *Drift og vedlikehold av betongkonstruksjoner: Teknologidagene 2007*. Tromsø: Vegdirektoratet.
- Broudy, H. (1933). *An attempt to find salts which in saturated solution yield relative humidities not yet obtainable for use in biological research*. Masters Theses. University of Massachusetts Library.
- Bøhlerengen, T. (2018). 421.132 Fukt i bygninger. Teorigrunnlag. SINTEF byggforsk. Tilgjengelig fra:
https://www.byggforsk.no/dokument/184/fukt_i_bygninger_teorigrunnlag (lest 10.03.2019)
- CementLab. (Udatert). Cement and Art. Tilgjengelig fra:
<http://cementlab.com/cement-art.htm> (lest 03.04.2019)
- Chen, C. T., Chang, J. J., & Yeih, W. C. (2014). The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete. *Construction and Building Materials*, 71(1): 35-43.
- Choudhury, D., Sahu, J. K., & Sharma, G. D. (2011). Moisture sorption isotherms, heat of sorption and properties of sorbed water of raw bamboo (*Dendrocalamus longispathus*) shoots. *Industrial Crops and Products*, 33(1): 211-216.
- Claisse, P. A. (2015). *Civil Engineering Materials*. 1. utg. Oxford: Butterworth-Heinemann
- Consolvo. (Udatert). Katodisk beskyttelse. Tilgjengelig fra:
<https://consolvo.no/katodisk-beskyttelse/> (lest 10.03.2019)
- Ducman, V., Kramar, S., & Šajna, A. (2018). Alkali activated repair mortars based on different precursors. *Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*: 263–292.

- EBAB. (2017). Elektrokjemisk realkalisering og elektrokjemisk kloriduttrekk. Oslo: Norsk forening for betongrehabilitering.
- Elkey, W., & Sellevold, E. J. (1995). Electrical resistivity of concrete. Norwegian public roads administration. Publikasjons no. 80.
- Elsener, B. (2002). Macrocell corrosion of steel in concrete—implications for corrosion monitoring. *Cement and concrete composites*, 24(1): 65-72.
- Enevoldsen, J. N., Hansson, C. M., & Hope, B. B. (1994). The influence of internal relative humidity on the rate of corrosion of steel embedded in concrete and mortar. *Cement and concrete research*, 24(7): 1373-1382.
- Espelid, B., Sletten, G. I., Vennesland, Ø., Sellevold, E., Videm, K., Myrdal, R. og Blankvoll, A. (1998). OFU Gimsøystraumen bru. Anbefalinger for instrumentert korrosjonsovervåkning av kystbruer i betong. *Vegdirektoratet*, 88(1): 1-56.
- Figur 1 fra NS-EN 1504-9:2008 er gjengitt av Øyvind Fremmergård og Benjamin Udenæs i Masteroppgave [Resistivitet i mørtel i forbindelse med katodisk beskyttelse av betong] med tillatelse fra Standard Online AS . Standard Online er ikke ansvarlig for eventuelle feil i gjengitt materiale. Se www.standard.no.
- Geving, S. (2007). *Fukt i betong – Målemetoder og uttørking*. Litteraturundersøkelse. Oslo: SINTEF Byggforsk.
- Ghosh, P., & Tran, Q. (2015). *Correlation between bulk and surface resistivity of concrete*. International Journal of Concrete Structures and Materials, 9(1): 119-132.
- Giorgini, R., & Papworth, F. (Udatert). Galvanic Cathodic Protection System Complying With Code Based Protection Criteria. Tilgjengelig fra: <http://duromac-cp.de/downloads/corrpre/CP%20Complying%20With%20Code%20Based%20Criteria.pdf> (lest 18.04.2019)
- Gjerp, P., Opsahl, M., & Smeplass, S. (2004). *Grunnleggende betongteknologi*. 2. utg. Oslo/Lillestrøm: Byggenæringens forlag
- Golnabi, H., Matloob, M. R., Bahar, M., & Sharifian, M. (2009). Investigation of electrical conductivity of different water liquids and electrolyte solutions. *Iranian Physical Journal*, 3(2): 24-28.
- González, F., Fajardo, G., Arliguie, G., Juárez, C. A., & Escadeillas, G. (2011). Electrochemical realkalisation of carbonated concrete: An alternative approach to prevention of reinforcing steel corrosion. *International Journal of Electrochemical Science*, 6(1): 6332-6349.

- Gowers, K.R. & Millard, S.G. (1999). Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion. *ACI Materials Journal*, 96(5): 536-541.
- Goyal, A., Pouya, H. S., Ganjian, E., & Claisse, P. (2018). A review of corrosion and protection of steel in concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(10): 5035-5055.
- Greenspan, L., (1976). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of Research of the National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry*. 81A(1).
- Guo, W., Hu, J., Wang, Y., Zhang, Z., Yin, S., Wei, J., & Yu, Q. (2017). Preparation and performance of conductive mortar based on lightweight conductive aggregates. *Construction and Building Materials*, 156, 340-350.
- Haach, V. G., Vasconcelos, G., Lourenço, P. B. (2011). Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 25(6): 2980-2987.
- He, Y., Lu, L., Jin, S., & Hu, S. (2014). Conductive aggregate prepared using graphite and clay and its use in conductive mortar. *Construction and Building Materials*, 53(1): 131-137.
- Hedenblad, G & Janz, M. (1994) *Inverkan av alkali på uppmätt RH i betong*. Rapport TVBM, vol. 3057, Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.
- Hornbostel, K. (2015). *The role of concrete resistivity in chloride-induced macro-cell corrosion*. Doktoravhandling. Trondheim: Norges teknisk- og naturvitenskapelige universitet.
- Hou, T. C., Nguyen, V. K., Su, Y. M., Chen, Y. R., & Chen, P. J. (2017). Effects of coarse aggregates on the electrical resistivity of Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, 133(1): 397-408.
- Imbabi, M. S., Carrigan, C., & McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1(2): 194-216.
- Jensen, T. M. (2013). 520.033 Bestemmelse av betongkonstruksjoners trykkfasthet. Uttak og prøving av sylindre. SINTEF byggforsk. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/291/bestemmelse_av_betongkonstruksjoners_trykkfasthet_uttak_og_proeving_av_sylindre (lest 17.01.2019)

- Jiang, J., & Yuan, Y. (2013). Relationship of moisture content with temperature and relative humidity in concrete. *Magazine of Concrete Research*, 65(11): 685-692.
- Kjellsen, K. O., Guimaraes, M., & Nilsson, A. (2005). The CO₂ balance of concrete in a life cycle perspective. Danish Technological-DTI.
- Kompen, R.(2014). Betongregelverk relatert til bestandighet. Betongbruer i et historisk perspektiv. Tilgjengelig fra:
https://www.vegvesen.no/_attachment/588403/binary/940810?fast_title=8+Kompen+Betongregelverk+og+betongbruer+i+et+historisk+perspektiv.pdf (lest 23.04.2019)
- Kristiansen, B., Lindland, J., & Østmoen, T. (1998). *Betongrehabilitering- Metoder og utførelse*. Oslo: BA forlaget.
- Kristiansen, B. (Udatert). Når fungerer SKB Type konstruksjoner og betongkvaliteter. Tilgjengelig fra:
<https://betong.net/wp-content/uploads/%C3%85pent-faglig-m%C3%B8te-18.09.18.Betong-svinn.pdf> (lest 04.04.2019)
- Layssi, H., Ghods, P., Alizadeh, A.R., & Salehi, M. (2015). Electrical Resistivity of Concrete. *Concrete International*, 37(5): 41-46.
- Lenschow, R. (1977) *Betongkonstruksjoner* (1. utg.). Trondheim: Tapir forlag
- Li, Z., Leung, C., & Xi, Y. (2009). *Structural renovation in concrete*. London & New York: Routledge.
- Lindland, J., Helgedagrud, T., Lurfald, S. A., Røtter, F., Stavem, P., & Østmoen, T. (2016). *Betongrehabilitering- Reparasjonsmetoder, utførelse og kontroll*. 2. utg. Oslo: Norsk Forenings for Betongrehabilitering.
- Liu, Y., & Presuel-Moreno, F. J. (2014). Normalization of temperature effect on concrete resistivity by method using Arrhenius law. *ACI Materials Journal*, 111(4): 433-442.
- Maage, M. (2016). "Modeller" til forklaring av delmateriale for betong, struktur, oppbygging og betongeigenskaper. I Helland, S., Maage M. & Bjøntegaard, Ø., Praktisk betongteknologi for produksjons- og kontrollleder, formann/BAS - (U1)(Del 2) Oslo:Norsk betongforening.

- Mapei AS. (2015). Støpemørtel B20- Finbetong til mindre støpearbeider. For innvendig og utvendig bruk. Tilgjengelig fra:
https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider60/products-documents/10044-stopemortel-b20-no.pdf?sfvrsn=100b3a49_0 (lest 21.03.2019)
- Mapei AS. (2017). Confix- Reparasjons- og støpemørtel. Tilgjengelig fra:
https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider60/products-documents/10032-confix-no.pdf?sfvrsn=2e277556_0 (lest 21.03.2019)
- Marcus, K. (Udatert). *Colosseum, Roma*. Tilgjengelig fra:
<https://www.saatchiart.com/print/Photography-Colosseum-Rome-Italy/696355/1984726/view> (hentet 01.05.2019)
- Miyazato, S. I., & Otsuki, N. (2010). Steel corrosion induced by chloride or carbonation in mortar with bending cracks or joints. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 8(2): 135-144.
- Morris, W., Moreno, E. I., & Sagüés, A. A. (1996). Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe. *Cement and concrete research*, 26(12): 1779-1787.
- Multiconsult. (2018). Karbonfangstanlegg Norcem Brevik. Tilgjengelig fra:
https://www.norcem.no/system/files_force/assets/document/90/6d/melding_karbo_nfangst_norcem.pdf?download=1 (lest 28.02.2019)
- Myrdal, R. (2009). 520.061 Armeringskorrosjon. SINTEF byggforsk. Tilgjengelig fra:
<https://www.byggforsk.no/dokument/298/armeringskorrosjon> (lest 15.03.2019)
- Osterminski, K., Polder, R.B., & Schiessl, P. (2012). Long term behaviour of the resistivity of concrete, *HERON*, 57(3): 211-230.
- Polder, R.B. (1998). Cathodic protection of reinforced concrete structures in The Netherlands - experience and development. *Heron*, 43(1): 3-14.
- Polder, R., Andrade, C., Elsener B., Vennesland, Ø., Gulikers, J., Weidert, R., & Raupach, M. (2000). Rilem tc 154-emc: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion - Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. *Materials and Structures*, 33(1): 603-611
- Polder, R., Kranjc, A., Leggedoor, J., Šajna, A., Schuten, G., Stipanović, I., & Eri, J. (2009). Guideline for smart cathodic protection of steel in concrete. Tilgjengelig fra:
http://arches.fehrl.org/?m=7&mode=download&id_file=9669 (lest 06.03.2019)

- Proceq. (2017). Operating Instructions Concrete Durability Testing. Tilgjengelig fra: https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Resipod%20Family_Operating%20Instructions_English_high.pdf lest (20.01.2019)
- Puttock, D. (Udatert). *Pantheon, Roma (ca 125 e.Kr.)*. Tilgjengelig fra: <https://smarthistory.org/the-pantheon/> (hentet 01.05.2019)
- Rupnow, T. D., & Icenogle, P. (2011). *Evaluation of surface resistivity measurements as an alternative to the rapid chloride permeability test for quality assurance and acceptance*. Louisiana Transportation Research Center, 11(479): 1-50
- Saleem, M., Shameem, M., Hussain, S. E., & Maslehuddin, M. (1996). Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, 10(3): 209-214.
- Sassolini, A., Colozza, N., Papa, E., Hermansson, K., Cacciotti, I., & Arduini, F. (2019). Screen-printed electrode as a cost-effective and miniaturized analytical tool for corrosion monitoring of reinforced concrete. *Electrochemistry Communications*, 98(1): 69-72.
- Sengul, O., & Gjrv, O. E. (2008). Electrical resistivity measurements for quality control during concrete construction. *ACI Materials Journal*, 105(6): 541-547.
- Silva, P. C., Ferreira, R. M., & Figueiras, H. (2011). Electrical resistivity as a means of quality control of concrete – influence of test procedure. *International Conference on Durability of Building Materials and Components*. 12(1): 1-8.
- Sivle, A. D. (2018). Luftfuktighet. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/luftfuktighet> (lest 30.4.2019)
- SINTEF. (Udatert). Betong. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/betong/> (lest 04.03.2019)
- Smørholm. (Udatert(a)). Mekanisk reparasjon. Tilgjengelig fra: <http://www.smoerholm.no/article/?cat=1082&id=1159> (lest 27.03.2019)
- Smørholm. (Udatert(b)). Elektrokjemisk kloriduttrekk. Tilgjengelig fra: <http://www.smoerholm.no/article/?cat=1082&id=1108> (lest 27.03.2019)
- Sohanghpurwala, A. A., & Scannell, W. T. (2003). Long-term effectiveness of cathodic protection systems on highway structures (No. FHWA-RD-01-096). United States: Federal Highway Administration.

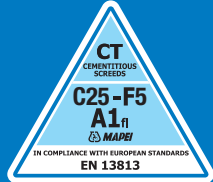
- Sohanghpurwala, A. A. (2009). *Cathodic protection for life extension of existing reinforced concrete bridge elements*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Spragg, R. P., Castro, J., Nantung, T., Paredes, M., & Weiss, J. (2012). Variability analysis of the bulk resistivity measured using concrete cylinders. *Advances in Civil Engineering Materials*, 1(1): 1-17.
- Spragg, R., Villani, C., Snyder, K., Bentz, D., Bullard, J. W., & Weiss, J. (2013). Factors that Influence Electrical Resistivity Measurements in Cementitious Systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2342(1): 90–98.
- Standard Norge. (1998). *Produkter og systemer for beskyttelse og reparasjon av betongkonstruksjoner - Prøvmingsmetoder - Bestemmelse av trykkfasthet for reparasjonsmørtel* Norsk standard, Vol. NS-EN 12190:1998.
- Standard Norge. (2005). *Produkter og systemer for beskyttelse og reparasjon av betongkonstruksjoner - Definisjoner, krav, kvalitetskontroll og evaluering av samsvar - Del 1: Definisjoner* Norsk standard, Vol. NS-EN 1504-1:2005.
- Standard Norge. (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* Norsk standard, Vol. NS-EN 1504-3:2005.
- Standard Norge. (2008). *Produkter og systemer for beskyttelse og reparasjon av betongkonstruksjoner - Definisjoner, krav, kvalitetskontroll og evaluering av samsvar - Del 9: Allmenne regler for bruk av produkter og systemer* Norsk standard, Vol. NS-EN 1504-9:2008+NA:2013.
- Standard Norge. (2014). *Måling av relativ fuktighet (RF) i betong* Norsk Standard, vol NS 3511:2014.
- Standard Norge. (2016). *Katodisk beskyttelse av stål i betong (ISO 12696:2016)* Norsk standard, Vol. NS-EN ISO 12696:2016.
- Standard Norge. (2017). *Betong - Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar* Norsk standard, Vol. NS-EN 206:2013+A1:2016+NA:2017.
- Stanish, K. D., Hooton, R. D., & Thomas, M. D. (2001). Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review (No. FHWA Contract DTFH61-97-R-00022). United States: Federal Highway Administration

- Stelmarczyk, M., Rapp, T., Hedlund, H., Gränne, F., & Gunnarsson, M. (2017). Diffusionstorkning av betong samt annat fuktutbyte med dess omgivning. Stockholm: SBUF.
- Statens Vegvesen. (2007). Salting av veger- En kunnskapsoversikt. Tilgjengelig fra: https://www.vegvesen.no/_attachment/70107/binary/35099 (lest 29.04.2019)
- Suprenant, B. A. (1991). Testing for chloride permeability of concrete. *Concrete Construction*: 531-533.
- Thomson, M., Lindqvist, J. E., Elsen, J., & Groot, C. J. W. P. (2007). 2.5 Porosity of mortars. Report 28: Characterisation of Old Mortars with Respect to their Repair-State-of-the-Art *Report of RILEM Technical Committee 167-COM*, 28, 75.
- Østnor, T. A. (2015). 520.034 Kloridinnhold i betong. Prøveuttak og analysemetoder. SINTEF byggforsk. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/292/kloridinnhold_i_betong_proeveuttak_og_analysemetoder (lest 22.03.2019).
- Østvik, J. M. (2011). Nedbrytningsmekanismer, reparasjon og vedlikehold av betongkonstruksjoner. Teknologidagene 2011. Tilgjengelig fra: https://www.vegvesen.no/_attachment/275075/binary/485341 (lest 27.03.2019)
- Villagrán Zaccardi, Y. A., Fullea García, J., Huélamo, P., & Di Maio, Á. A. (2009). Influence of temperature and humidity on Portland cement mortar resistivity monitored with inner sensors. *Materials and Corrosion*, 60(4), 294–299.
- Weydert, R., & Gehlen, C. (1999). Electrolytic resistivity of cover concrete: relevance, measurement and interpretation. *Durability of building materials and components*, 8(1): 409-419.
- Xi, Y., Bažant, Z. P., Molina, L., & Jennings, H. M. (1994). Moisture diffusion in cementitious materials moisture capacity and diffusivity. *Advanced Cement Based Materials*, 1(6): 258-266.

Vedlegg



Støpemørtel B20



Finbetong til mindre støpearbeider. For innvendig og utvendig bruk

BRUKSOMRÅDE

Støpemørtel B20 benyttes til mindre støpearbeider innvendig og utvendig. Velegnet til utstøping i U-blokk og såleblokk samt muring av naturstein. Frostsikker.

TEKNISKE EGENSKAPER

Støpemørtel B20 er en tørrmørtel bestående av sement, filler og naturlig tilslag. Mørtelen skal kun blandes med vann og kan benyttes både innvendig og utvendig.

RETNINGSLINJER FOR BRUK

Forbehandling

Overflatene skal rengjøres for slam, støv, fett og løse partikler. Sugende underlag forvannes. Fritt vann skal ikke finnes på overflaten når arbeidet starter. Underlagets og luftens temperatur skal være over +5°C.

Blanding

Støpemørtel B20 blandes med 3 – 4 liter vann pr. sekk avhengig av ønsket konsistens. Økt vannmengde utover dette gir lavere fasthet, økt svinn og risiko for separasjon. Blandes med tvangsblander, frittfallsblander eller drill og visp.

PÅFØRING

Støpemørtel B20 legges ut med vanlig murerverktøy, sørg for god komprimering og utfylling. Unngå å benytte masse som har begynt å herde. Ved lavere temperaturer kan det tilsettes **Antifreeze N** for frysepunktnerdsetting. Alle forhåndsregler med oppvarming og tildekking bør gjøres for å unngå at herding stopper opp.

ETTERBEHANDLING

Umiddelbart etter utstøping beskyttes overflaten mot uttørring ved bruk av **Mapecure 1** membranherder, tildekking med plastfolie eller ettervanning.

RENGJØRING

Produktet kan fjernes fra verktøy og utstyr med vann hvis dette gjøres umiddelbart etter utførelse. Dersom produktet har fått herde må det fjernes mekanisk.

FORBRUK

1 sekk å 25 kg gir ca. 12 - 13 liter ferdig mørtel.

EMBALLASJE

Støpemørtel B20 leveres i 25 kg sekker og 1200 kg big-bag.

LAGRING

Støpemørtel B20 kan lagres i inntil 12 måneder, tørt i lukket originalemballasje.

Støpemørtel B20 er i samsvar med kravene i Annex XVII av regulativet (EC) No 1907/2006 (REACH), punkt 47.

SIKKERHETSINSTRUKSJONER FOR KLARGJØRING OG BRUK

Støpemørtel B20 inneholder sement som i kontakt med svette eller andre kroppsvæsker forårsaker en irriterende alkalisk reaksjon og et allergisk utslett på personer som er følsomme for slike produkter. Kan forårsake øyeskade. Det anbefales å bruk vernehansker og briller samt ta vanlige forhåndsregler for bruk av



TEKNISKE DATA (typiske verdier)

PRODUKTIDENTITET

Konsistens:	pulver
Farge:	grå
D _{max} (mm):	4,0
Tørrestoff (%):	100

BRUKSEGENSKAPER (ved + 20 °C og 50 % RF)

Farge etter blanding:	grå
Blandingsforhold:	12-16% vann, 3 – 4 liter per 25 kg sekk dette gir et masseforhold på 0,55-0,60
Blandingens massetetthet (kg/m ³):	2100
Brukstemperatur:	fra +5°C til +35°C
Brukstid:	ca. 2 timer

SLUTTEGENSKAPER (14 % vannmengde, + 20 °C og 50 % RF):

Mekaniske egenskaper	Testmetode	Deklarerte klasser	Produktegenskaper
Brannpåvirkning:	EN 13501-1	A1 _{fl}	
Trykkfasthet:	EN 13892-2	C25	> 10 N/mm ² (7 døgn) > 25 N/mm ² (28 døgn)
Bøystrekkfasthet:	EN 13501-1	F5	Ca. 6 N/mm ²
Svinn:	EN 13454	NPD	
Konsistens:	EN 12706	NPD	
Heftfasthet:	EN 13892-8	NPD	

kjemikalier. Hvis produktet kommer i kontakt med øynene, skylk umiddelbart med store mengder vann og søk medisinsk hjelp.

For ytterligere og fullstendig informasjon vedrørende sikker håndtering av våre produkter, vennligst se vår siste utgave av sikkerhetsdatablad for produktene.

FOR PROFESJONELT BRUK

MERK

De tekniske anbefalinger og detaljer som fremkommer i denne produktbeskrivelse representerer vår nåværende kunnskap og erfaring om produktene. All overstående informasjon må likevel betraktes som retningsgivende og gjenstand for vurdering.

Enhver som benytter produktet må på forhånd forsikre seg om at produktet er egnet for tilsiktet anvendelse. Brukeren står selv ansvarlig dersom produktet blir benyttet til andre formål enn anbefalt eller ved feilaktig utførelse.

Vennligst referer til siste oppdaterte versjon av teknisk datablad som finnes tilgjengelig på vår webside www.mapei.no

**Alle relevante referanser
for produktet er tilgjengelige
på forespørsel og fra
www.mapei.no**



BUILDING THE FUTURE



VEDLEGG B



Confix

Reparasjons- og støpemørtel



BRUKSOMRÅDE

Confix er en tørrmørtel spesielt beregnet til reparasjon, forsterkning og vedlikehold av betong i tykkelse 10-50 mm der fasthet, lavt svinn og tetthet er avgjørende.

Eksempler på bruk:

- Limt påstøp og reparasjon med monolitisk binding.
- Reparasjoner av betongdekker.
- Støp av fall mot sluk og avrenninger.
- Støp av hulkiler.
- Generell reparasjon av betongkonstruksjoner.

TEKNISKE OPPLYSNINGER

Confix er en pumpbar sementbasert tørrmørtel med blandingsforhold sement/velgradert sand opp til 4,0 mm (ca. 1:4) med tilsetninger som gir god støpe- og bearbeidelighet.

Confix som kun skal tilsettes vann, er sammensatt med tanke på maksimal tetthet, fasthet og lavt svinn. Som sprøytemørtel benyttes fortrinnsvis våtmetoden.

Confix er i samsvar med prinsippene beskrevet i EN 1504-9 «Produkter og systemer for reparasjon av betongkonstruksjoner: Definisjoner, krav, kvalitetskontroll og evaluering av samsvar. Almene regler for bruk av produkter og systemer», og kravene beskrevet i EN 1504-3 «Reparasjonsmørtel for bærende og ikke bærende reparasjoner, klasse R3».

ANBEFALINGER

- ved ekstra dype sår påføres **Confix** på horisontale flater eller med horisontal støtte kan **Confix** påføres ett lag.
- Tilsett ikke ekstra vann etter at blandingen har begynt å avbinde.
- Bruk ikke **Confix** hvis sekken er skadet eller tidligere åpnet.

RETNINGSLINJER FOR BRUK

Forbehandling

Underlaget må rengjøres grundig, løs betong og urenheter på flaten det støpes mot skal fjernes. Prikkhugging, meisling eller sandblåsing kan være nødvendig. Sårkanter hugges minimum 10 - 20 mm rett inn i betongen, slik at utflasking til null unngås. Deretter vannes betongen, helst dagen før, slik at den kan tørke noe igjen. Fritt vann skal ikke forekomme.

Blanding

Mindre mengder kan blandes med drill og visp. Større volum blandes med mørtelblander eller tvangsblander. Blandetid minimum 3 minutter. Konsistensen reguleres med vanntilsetning, men vær oppmerksom på at høyere vannmengde enn anbefalt ca. 3,25 liter pr. sekk à 25 kg kan gi større svinn, redusert fasthet og dårlig resultat.

Dersom tykkelsen som skal legges er større enn 50 mm kan **Confix** tilsettes ca. 30% pukk 8-12.

Mørtlene må være plassert senest 2 timer etter blanding og aldri tilsettes mer vann etter at avbinding har startet.

PÅFØRING

Mørtelen plasseres med vanlig murerverktøy, pumpe eller egnet sprøyteutstyr og komprimeres godt. Anvendes ved temperatur +5°C til +35°C.

Monolittisk liming

For å oppnå sikker heft og kraftoverførende adhesjon til underlaget kan **Confix** limes til underlaget med **Mapepoxy L**. Metoden utføres vått-i-vått.

Mapepoxy L påføres den herdede betongen (underlaget) med kost eller med gummisparkel på jevne flater. På større flater og på steder med armering kan traktesprøyte også benyttes. Pass på at **Mapepoxy L** påføres innenfor limets brukstid (avhenger av temperatur). Fersk **Confix** må påføres innen limets åpentid (avhenger av temperatur). Hvis åpentid ikke kan overholdes skal limet avstrøs med sand, og nytt lag lim påføres. Liming med fersk **Confix** til herdet betong med **Mapepoxy L** kan gjøres ved alle temperaturer det er forsvarlig å støpe med **Confix**, uten tilsetning av frosthindrende tilsetningsstoff. Sikrere resultat fås dersom flaten er overflatetørr, men noe fuktighet i betongoverflaten kan tolereres (se eget teknisk datablad for **Mapepoxy L**).

Etterbehandling

Dette skjer sikrest ved å påføre frie overflater membranherder **Mapecure 1**, **Cur-Imp** eller **Mapecure WF-75** umiddelbart etter utstøping for så å tilføre vann fra neste dag og 3 - 4 dager framover. Tildekking med plastfolie er også effektivt og foretrekkes når flaten skal overflatebehandles.

RENGJØRING

Fersk mørtel kan fjernes fra verktøy og utstyr med vann. Herdet materiale fjernes mekanisk.

FORBRUK

Ca. 2 kg pr. liter ferdig masse.

EMBALLASJE

Confix leveres i 25 kg sekker og 1200 kg bag.

LAGRING

Må lagres tørt og er i uåpnede sekker holdbar i 12 måneder.

Produktet er i samsvar med kravene i Annex XVII i Forordning (EC) 1907/2006 (REACH), Art. 47.

SIKKERHETSINSTRUKSJONER FOR KLARGJØRING OG BRUK

For instruksjon vedrørende sikker håndtering av våre produkter, vennligst se siste utgave av sikkerhetsdatablad på vår nettside www.mapei.no

PRODUKT FOR PROFESJONELT BRUK.

MERK

De tekniske anbefalinger og detaljer som fremkommer i denne produktbeskrivelse representerer vår nåværende kunnskap og erfaring om produktene. All overstående informasjon må likevel betraktes som retningsgivende og gjenstand for vurdering. Enhver som benytter produktet må på forhånd forsikre seg om at produktet er egnet for tilsiktet anvendelse. Brukeren står selv ansvarlig dersom produktet blir benyttet til andre formål enn anbefalt eller ved feilaktig utførelse.

Vennligst referer til siste oppdaterte versjon av teknisk datablad som finnes tilgjengelig på vår webside www.mapei.no

JURIDISK MERKNAD:

Innholdet i dette tekniske databladet kan kopieres til andre prosjekterrelaterte dokumenter, men det endelige dokumentet må ikke suppleres eller erstatte betingelsene i det tekniske datablad, som er gjeldende, når MAPEI-produktet benyttes. Det seneste oppdaterte datablad er tilgjengelig på vår hjemmeside www.mapei.no ENHVER ENDRING AV ORDLYDEN ELLER BETINGELSER, SOM ER GITT ELLER AVLEDET FRA DETTE TEKNISKE DATABLADET, MEDFØRER AT MAPEI SITT ANSVAR OPPHØRER.

Alle relevante referanser for produktet er tilgjengelige på forespørsel og på www.mapei.no

TEKNISKE DATA (typiske verdier)

PRODUKTIDENTITET

Fasthetsklasse ihht. EN 1504-3:	R3
Type:	CC
Konsistens:	pulver
Farge:	grå
Tilslag:	naturesand 0-4 mm
Bindemiddel:	sement
Kloridione innhold - minimumskrav $\leq 0,05$ % - ihht. EN 1015-17 (%):	$\leq 0,05$

BRUKSEGENSKAPER (ved +20°C-50%RH)

Farge etter blanding:	grå
Blandingsforhold:	100 deler Confix med 13 deler vann (ca. 3,25 l pr 25 kg sekk)
Konsistens:	tiksotropisk
Blandingens massetetthet (kg/m ³):	2 200
Blandingens pH:	> 12
Brukstemperatur:	fra +5°C til +35°C
Brukstid:	ca. 2 timer

SLUTTEGENSKAPER (vannmengde 13 %):

Mekaniske egenskaper	Testmetode	Minimumskrav ihht. EN 1504-3 for R3 klasse mørtel	Produktegenskaper
Trykkfasthet (N/mm ²):	EN 12190	≥ 25 (etter 28 døgn)	10 (etter 1 døgn) 20 (etter 7 døgn) 41 (etter 28 døgn)
Bøyestrekfasthet (MPa):	EN 196-1	ingen	> 3 (etter 1 døgn) > 5 (etter 7 døgn) > 6 (etter 28 døgn)
Karbonatiseringsmotstand:	EN 13295	$D_k \leq$ referanse (MC(0,45))	oppfyller kravene
E-modul (GPa):	EN 13412	≥ 15	27 (etter 28 døgn)
Heft til betong (MC 0,40, v/c = 0,40) i hht. EN 1766 (MPa):	EN 1542	$\geq 1,5$ (etter 28 døgn)	> 2,0 (etter 28 døgn)
Kapillær absorpsjon (kg/m ² ·h ^{0,5}):	EN 13057	$\leq 0,5$	< 0,29
Motstand mot fryse-tine sykluser med avisningssalter, målt i hht. EN 1542 (MPa):	EN 13687-1	$\geq 1,5$ (etter 50 sykluser)	> 1,5
Brannmotstand:	Euroklasse	Verdier deklartert av produsent	A1

VEDLEGG C

Avlesning %RH i fuktkar

Dato	Klokkeslett	Avlest RH Testo 635	Avlest %RH SQC_S2
18.01.2019	15:03	99,9	90,8
21.01.2019	09:06	75,0	77,6
— " —	12:00	72,0	76,7
22.01.2019	09:15	70,0	73,9
— " —	13:45	70,3	73,1
23.01.2019	09:10	69,8	70,9
— " —	14:15	69,4	70,9
24.01.2019	07:30	69,4	71,2
25.01.2019	14:15	66,9	67,1 *
28.01.2019	08:30	66,8	67,6
29.01.2019	11:00	66,2	68,2
30.01.2019	11:00	66,6 66,6	68,1 68,1
31.01.2019	12:45	66,3	67,7
01.02.2019	13:00	67,2	68,2
04.02.19	13:30	66,0	67,2
05.02.19	13:00	—	67,4
06.02.19	12:50	65,9	67,6
07.02.19	11:00	65,8	67,7
08.02.19	10:45	65,0	67,5
11.02.19	12:30	65,7	67,6
12.02.19	10:35	65,6	67,7
13.02.19	10:30	65,2	67,8
19.02.19	13:50	66,8	67,9
21.02.19	10:45	67,8	67,7
26.02.19	10:35	65,1	65,9
28.02.19	11:00	66,4	67,5
5.03.19	10:00	66,3	68,00
7.03.19	10:30	66,8	67,9
12.03.19	10:35	65,6	67,7
14.03.19	—	—	—
19.03.19	11:47	65,8	—

avlest vha. Testo Saveris Viewer

* 1000, åpnet på formiddag

Alle registrert i. Spjeld og Benjamin var her.

18.1.19 - 31.1.19

Device	Page 1/1	Min:	Max:	Mean:
Sagstua	C:8 [%rH] SQC_S2_2	33.6	95.6	61.7



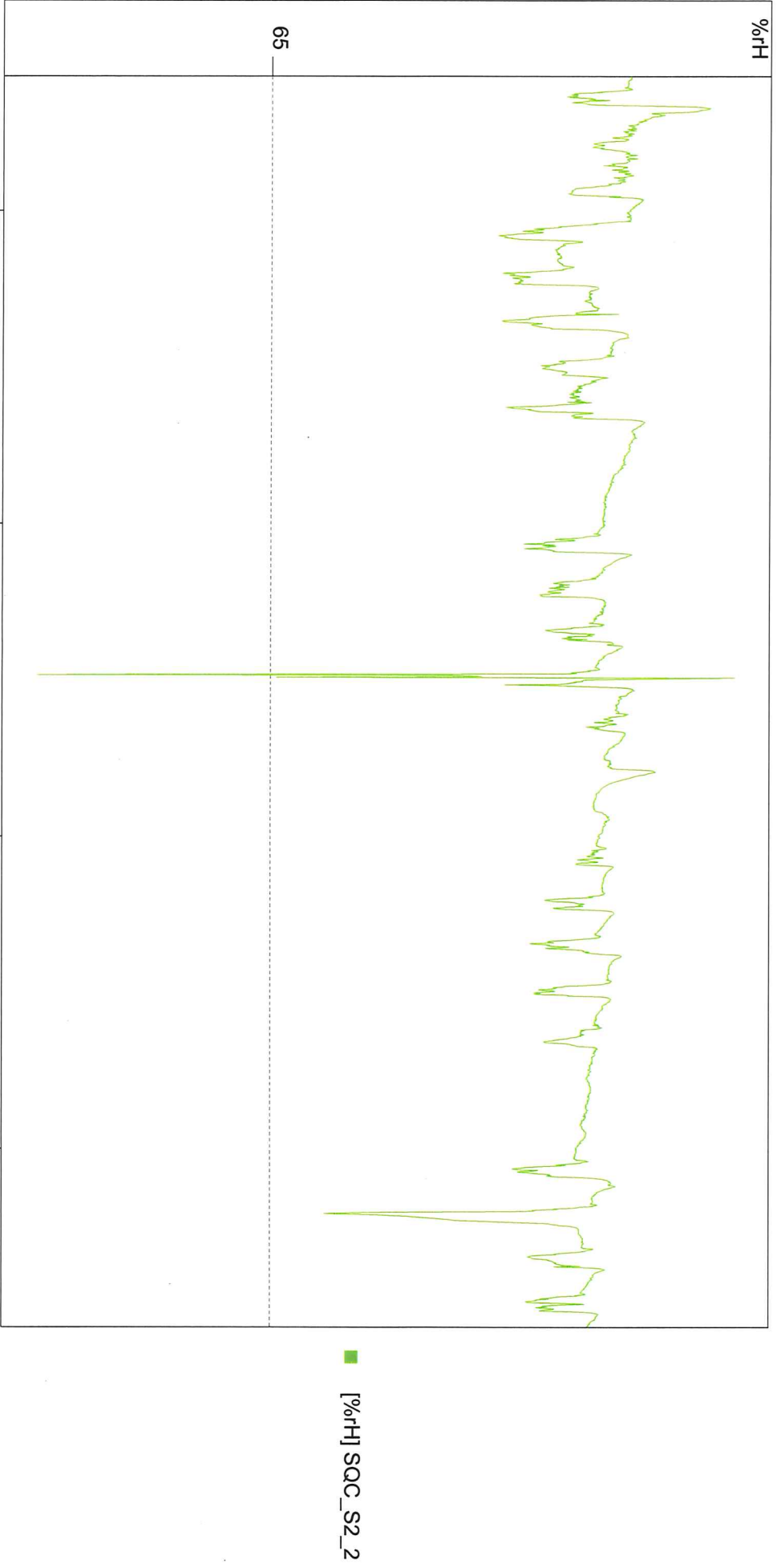
21/01/2019
00:00:00

28/01/2019
00:00:00

■ [%rH] SQC_S2_2

01.2.19 - 28.02.19

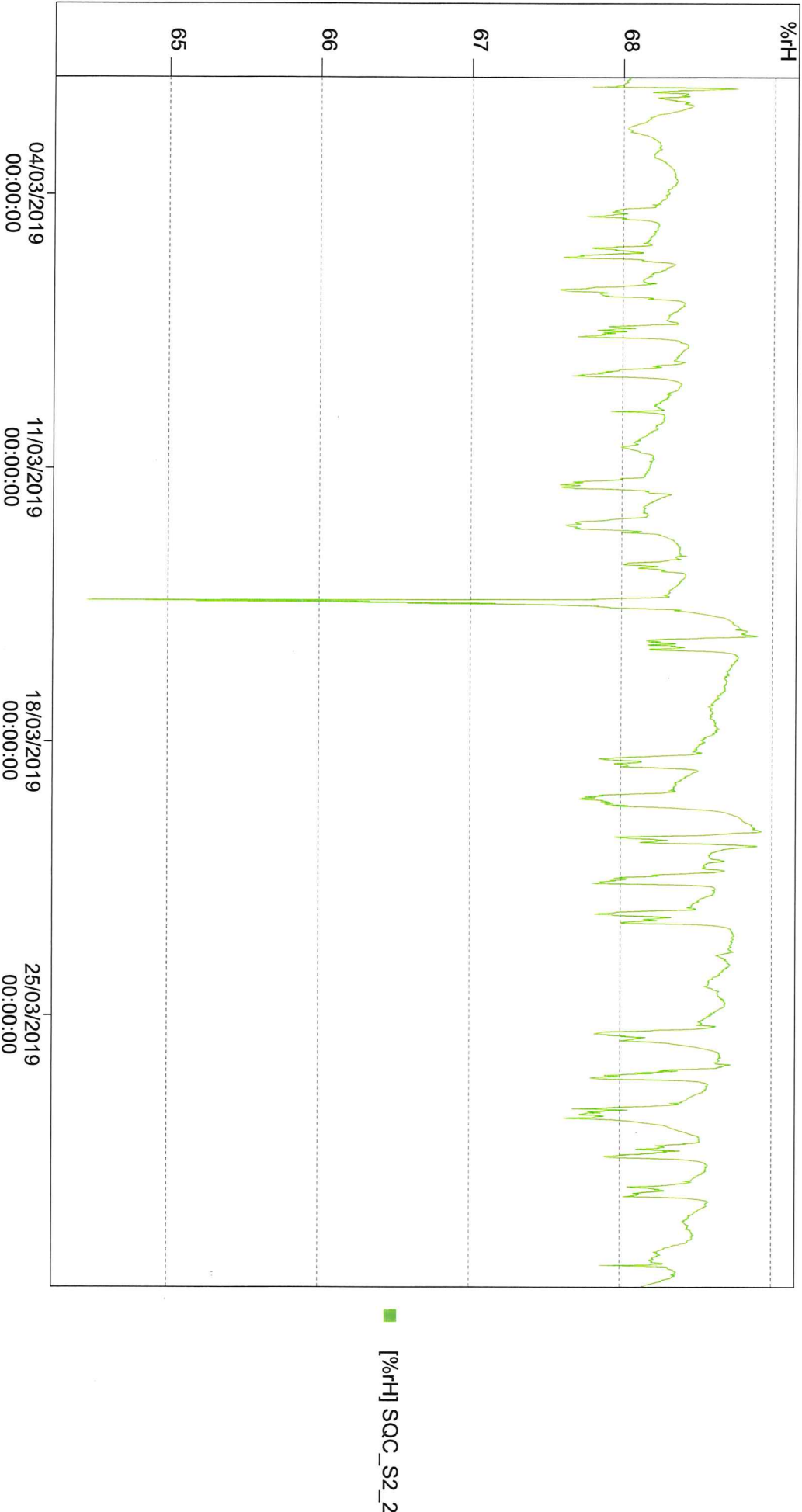
Sagstua	Device	Page 1/1	C:8 [%rH] SQC_S2_2	Min: 62.8	Max: 69.4	Mean: 68.1



■ [%rH] SQC_S2_2

01.05.19 - 31.03.19

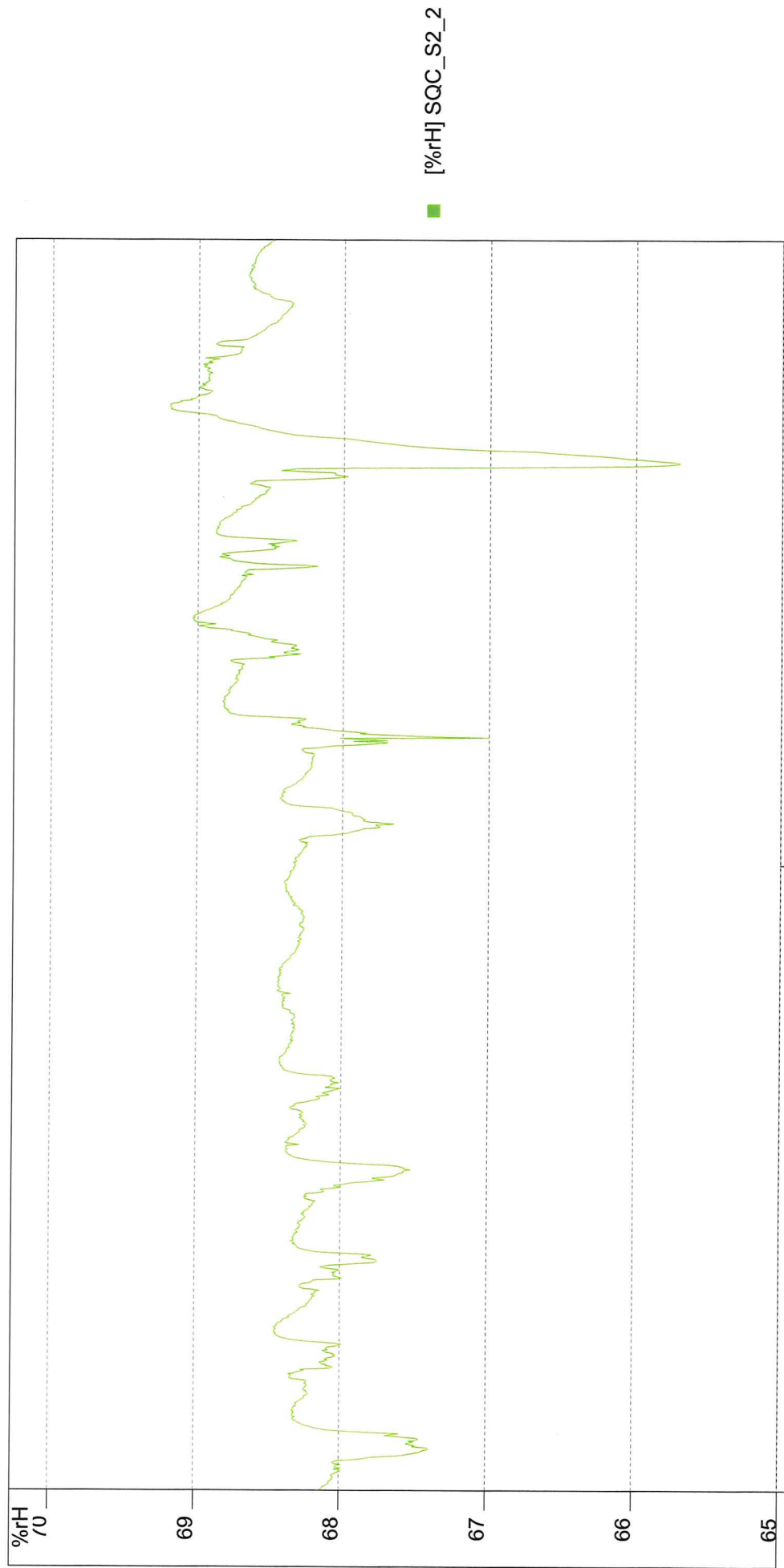
Sagstua	Device	Page 1/1	C:8 [%rH] SACC_S2_2	Min:	64.5	Max:	68.9	Mean:	68.3



■ [%rH] SACC_S2_2

01.4.19 - 14.04.19

Device	Page 1/1	Min:	Max:	Mean:
Sagstua	C:8 [%rH] SQC_S2_2	65.7	69.2	68.3



08/04/2019
00:00:00

VEDLEGG D

RESISTIVITETSMÅLING PÅ MØRTEL- OG BETONGPRISMER OVER TID

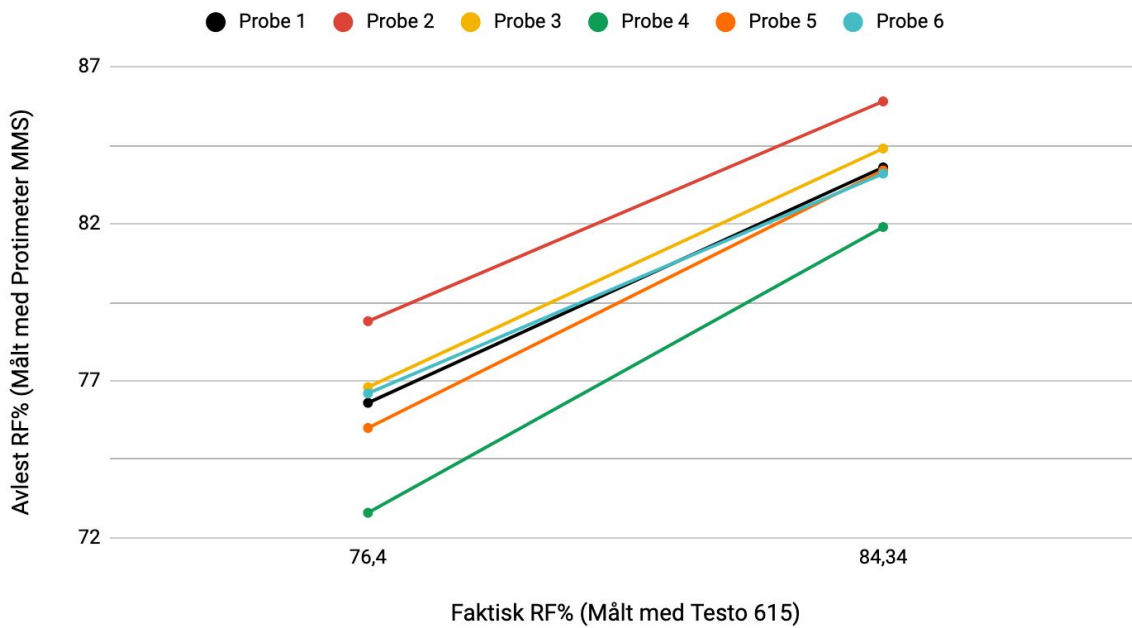
RESISTIVITET 7 døgn KØcm						RESISTIVITET 28 døgn KØcm						RESISTIVITET 56 døgn KØcm						RESISTIVITET 90 døgn KØcm																	
VL	KØcm	0 s	30s	60s	KØcm	VL	KØcm	0 s	30s	60s	KØcm	VL	KØcm	0 s	30s	60s	KØcm	VL	KØcm	0 s	30s	60s	KØcm												
B20 1	2,3	2,3	2,3	2,3	B20 1	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	B20 1	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	B20 1	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	B20 1	5,2											
B20 2	2,2	2,2	2,3	2,3	B20 2	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	B20 2	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	B20 2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	B20 2	5,2											
B20 3	2,3	2,3	2,3	2,3	B20 3	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	B20 3	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	B20 3	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	B20 3	5,2											
Confix 1	3,4	3,5	3,5	3,5	Confix 1	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	Confix 1	16,7	16,8	17,0	17,0	17,0	Confix 1	18,1	18,5	19,0	19,0	19,0	Confix 1	19,0											
Confix 2	3,5	3,5	3,5	3,5	Confix 2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	Confix 2	16,5	16,6	16,7	16,7	16,7	Confix 2	19,8	20,0	20,1	20,1	20,1	Confix 2	20,1											
Confix 3	3,4	3,4	3,4	3,5	Confix 3	10,4	10,4	10,4	10,4	10,4	Confix 3	16,7	16,9	16,9	16,9	16,9	Confix 3	17,6	18,0	18,3	18,3	18,3	Confix 3	18,3											
BETONGPRISMER						BETONGPRISMER						BETONGPRISMER						BETONGPRISMER																	
95%	0 s	30s	60s	60s	M1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	M1	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	M1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	M1	5,1											
B20 4	4,6	4,6	4,6	4,6	M2	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	M2	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	M2	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	M2	5,6											
B20 5	4,6	4,6	4,6	4,6	95%						0 s	30s	60s	95%						0 s	30s	60s	95%						0 s	30s	60s				
B20 6	4,7	4,7	4,7	4,7	B20 4	7,0	7,0	7,0	7,1	7,1	B20 4	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2	B20 4	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9	B20 4	10,9											
Confix 4	6,0	6,0	6,0	6,0	B20 5	7,2	7,0	7,0	7,1	7,1	B20 5	9,0	9,0	9,1	9,1	9,1	B20 5	10,7	10,7	10,7	10,7	10,7	B20 5	10,8											
Confix 5	5,9	5,9	5,8	5,8	B20 6	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	B20 6	9,2	9,3	9,3	9,3	9,3	B20 6	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	B20 6	10,9											
Confix 6	5,9	5,9	5,9	5,9	Confix 4	17,6	17,6	17,6	17,6	17,6	Confix 4	29,5	29,6	29,7	29,7	29,7	Confix 4	35,9	36,0	36,2	36,2	36,2	Confix 4	36,2											
88%	0 s	30s	60s	60s	Confix 5	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7	Confix 5	30,0	30,0	30,1	30,1	30,1	Confix 5	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	Confix 5	37,3											
B20 7	5,3	5,3	5,3	5,4	Confix 6	17,4	17,3	17,3	17,3	17,3	Confix 6	29,4	29,5	29,7	29,7	29,7	Confix 6	37,4	37,4	37,4	37,4	37,4	Confix 6	37,4											
B20 8	5,4	5,4	5,4	5,4	BETONGPRISMER						4,3,4	4,3,6	4,3,9	BETONGPRISMER						3,1,3	3,1,3	3,1,5	BETONGPRISMER						3,1,3	3,1,5					
B20 9	5,7	5,7	6,0	6,0	M3	60,1	62,6	64,7	64,7	64,7	M3	91,0	90,9	91,4	91,4	91,4	M3	61,6	61,6	61,6	61,6	61,6	M3	61,6											
Confix 7	8,6	8,6	8,6	8,6	M4	60,1	62,6	64,7	64,7	64,7	M4	91,0	90,9	91,4	91,4	91,4	M4	61,6	61,6	61,6	61,6	61,6	M4	61,6											
Confix 8	8,6	8,6	8,6	8,6	88%						0 s	30s	60s	88%						0 s	30s	60s	88%						0 s	30s	60s				
Confix 9	9,0	9,0	9,0	9,0	B20 7	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	B20 7	20,7	20,9	21,1	21,1	21,1	B20 7	29,5	29,7	29,7	29,7	29,7	B20 7	29,7											
54%	0 s	30s	60s	60s	B20 8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	B20 8	21,8	22,0	22,2	22,2	22,2	B20 8	28,8	28,9	29,1	29,1	29,1	B20 8	29,1											
B20 10	36,7	36,6	36,3	36,3	B20 9	12,2	12,2	12,2	12,3	12,3	B20 9	18,2	18,2	18,3	18,3	18,3	B20 9	27,1	27,3	27,3	27,3	27,3	B20 9	27,3											
B20 11	40,2	40,1	40,1	40,1	Confix 7	41,8	41,8	41,8	41,8	41,8	Confix 7	74,9	75,1	75,3	75,3	75,3	Confix 7	95,4	95,4	95,5	95,5	95,5	Confix 7	95,5											
B20 12	35,1	34,7	34,4	34,4	Confix 8	41,5	41,5	41,5	41,5	41,5	Confix 8	75,3	75,3	75,3	75,3	75,3	Confix 8	99,4	99,4	99,4	99,4	99,4	Confix 8	99,4											
Confix 10	95,4	94,5	93,8	93,8	Confix 9	42,8	42,8	42,8	42,5	42,5	Confix 9	75,3	75,4	75,4	75,4	75,4	Confix 9	94,9	95,1	95,2	95,2	95,2	Confix 9	95,2											
Confix 11	96,7	96,3	96,1	96,1	BETONGPRISMER						154,5	156,4	156,7	BETONGPRISMER						154,3	156,5	157,5	BETONGPRISMER						154,3	157,5					
Confix 12	91,9	91,3	91,2	91,2	M5	110,1	112,5	114,8	114,8	114,8	M5	141,2	142,9	143,5	143,5	143,5	M5	141,4	143,5	144,8	144,8	144,8	M5	144,8											
BETONGPRISMER						BETONGPRISMER						BETONGPRISMER						BETONGPRISMER																	
54%						0 s	30s	60s	54%						0 s	30s	60s	54%						0 s	30s	60s	54%						0 s	30s	60s
54%						B20 10	280,5	279,3	277,6	B20 10	704,8	718,2	724,6	B20 10	1231,7	1245,0	1251,4	B20 10	1231,7	1245,0	1251,4	1251,4	1251,4	B20 10	1251,4										
54%						B20 11	289,6	289,8	289,0	B20 11	748,7	756,5	759,2	B20 11	1139,2	1169,0	1187,3	B20 11	1139,2	1169,0	1187,3	1187,3	1187,3	B20 11	1187,3										
54%						B20 12	263,6	264,3	265,0	B20 12	721,2	732,4	735,2	B20 12	1280,2	1290,1	1291,2	B20 12	1280,2	1290,1	1291,2	1291,2	1291,2	B20 12	1291,2										
54%						Confix 10	708,1	713,4	715,7	Confix 10	1569,2	1578,9	1584,4	Confix 10	2168,0	2174,0	2183,0	Confix 10	2168,0	2174,0	2183,0	2183,0	2183,0	Confix 10	2183,0										
54%						Confix 11	741,2	743,0	743,2	Confix 11	1951,2	1973,1	1984,4	Confix 11	2193,0	2194,0	2195,0	Confix 11	2193,0	2194,0	2195,0	2195,0	2195,0	Confix 11	2195,0										
54%						Confix 12	732,9	737,5	737,6	Confix 12	1784,8	1802,8	1806,0	Confix 12	2173,0	2179,0	2187,0	Confix 12	2173,0	2179,0	2187,0	2187,0	2187,0	Confix 12	2187,0										
BETONGPRISMER						BETONGPRISMER						BETONGPRISMER						BETONGPRISMER																	
BETONGPRISMER						M7	282,1	282,5	288,6	M7	610,7	617,2	625,6	M7	590,0	602,9	607,8	M7	590,0	602,9	607,8	607,8	607,8	M7	607,8										
BETONGPRISMER						M8	225,4	245,5	268,3	M8	536,1	540,6	544,8	M8	723,5	729,9	735,2	M8	723,5	729,9	735,2	735,2	735,2	M8	735,2										

Alle verdiene under er snitt av 5 målinger.

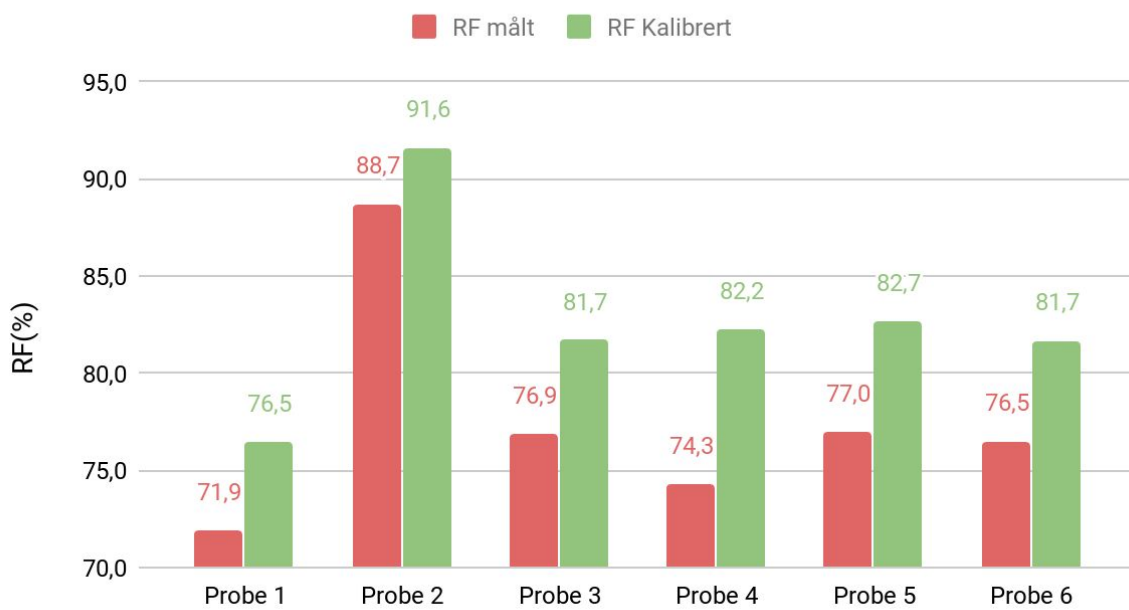
Felt 1 (Kjørebane)			
Resistivitet K Ω cm			
829.8	641.0	131.9	824.3
> 1000	174.0	509.3	315.3
473	222.3	453.5	477.3
262.5	158.3	522.0	338.3
209.3	44.5	63.1	577.5
76.1	40.2	30.9	37.2

Felt 2 (Parkeringsplass)			
Resistivitet K Ω cm			
117.5	110.5	158.3	60.5
161.5	145.8	369.5	153.3
840.0	654.8	158.8	134.0
423.0	179.8	330.3	161.0

Kalibreringsdiagram



RF målt og RF Kalibrert





Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway