

Betong som elektrisk isolator i aluminiumsproduksjon

Bjarne Eie Fossum

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Tore Kvande, BAT

Medveileder: Sverre Smeplass, KT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg, anlegg og transport



Oppgavens tittel: Betong som elektrisk isolator i aluminiumsproduksjon	Dato: 06.06.2014		
	Antall sider (inkl. bilag): 138		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Bjarne Eie Fossum			
Faglærer/veileder: Tore Kvande/ Sverre Smeplass			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere:			

Abstract:

Aluminium production takes place in large electrolysis plants and is driven by powerful direct current forces. In such systems, it is very important to prevent electrical short circuit and electromagnetic exposure. When concrete is the preferred material in such plants, this paper's objective was to examine different materials affect on the concretes properties as an electrical insulator.

The concrete mixes evaluated were designed based on material parameters that would most likely increase the concrete's electrical resistance. The concretes were tested in three moisture conditions to consider the minerals' impact in a broader perspective. The moisture conditions were as follows; water stored, sealed for self-dessication, and partially dried to environment (normal indoor temperature and moisture levels).

Through the experiments the moisture level were found to be of dominant character for the concrete's electrical resistance. It was concluded that the moisture level in the construction surface is essential for a structure's total insulating property. The moisture level in the concrete surface is largely governed by the concretes ability to evaporate moisture. Results show that the concretes with the greatest moisture loss also have the best insulating properties. Due to the large difference in electrical resistance between self-dessicated and partially dried out concrete, the dried out concrete will in most cases determine a construction's total resistance. Other changes in concrete characteristics from the material parameters can therefore be neglected. When the moisture level is crucial for the concrete's performance, it is of major importance to protect the concrete against moisture exposure at all times.

The material parameters have great influence on the concrete's ability to evaporate moisture. One can therefore still say that the correct choice of material components will contribute to increased electrical resistance. The results show that a concrete made of "Norcem anleggsement FA, Cem II/A-V (20% FA) ", with additional fly ash (10%) and silica (10%) replacement, and 5 % vol air content (in fresh condition) provides the most favorable insulating properties among the examined concretes in this study. As the examined concretes were not optimized for moisture evaporation, a new experiment should be carried out where moist evaporation is the sole purpose of the investigation. It probably exists a potential for improvement for the examined concretes in this study.

The report also examined the effect of rougher surface texture for increased insulating capacity. One can not recommend such action based on the results in this paper.

Stikkord:

1. Concrete
2. Electric insulation
3. Mineral optimization
4. Aluminium production

Betong i elektrolysehaller for aluminiumsproduksjon

Innledning

Produksjon av aluminium foregår ved elektrolyse av aluminiumoksid, ved meget store strømstyrker. Det er derfor meget viktig at konstruksjonene som omgir prosessen har liten elektrisk ledningsevne og høy overgangsmotstand mot jord, slik at kortslutningsfaren og den elektromagnetiske eksponeringen på operatørene blir så liten som mulig.

Norsk Hydro ønsker i sammenheng med oppgradering og utbygging av industrianlegg for aluminiumsproduksjon å oppgradere betongspesifikasjonene for slike anlegg til dagens kunnskapsnivå, og spesielt vurdere den kunnskapen som i dag er tilgjengelig om betongens elektriske ledningsevne.

Oppgave

Oppgaven går ut på å gjennomføre et litteraturstudium for å påvise hvilke resepttekniske parametre som kan brukes for å redusere betongens elektriske ledningsevne, og vurdere anvendeligheten av disse i storskala betongproduksjon. Effekten på sentrale egenskaper som styrke og bestandighet i det aktuelle miljøet skal også vurderes.

Det skal gjennomføres laboratorieforsøk for å verifisere og karakterisere effekten av aktuelle materialsammensetninger, og spesielt studere hvordan den elektriske ledningsevnen utvikles over tid etter blanding og støp. Det hører med til oppgaven å kartlegge hvordan betongens fukttilstand påvirker resultatene, å påvise hvordan fuktnivået i de aktuelle konstruksjonene kan forventes å utvikle seg under og etter byggearbeidene, og ta dette med i vurderingen av de ulike resepttekniske tiltakene.

Gjennomføring

Oppgaven gjennomføres i samarbeid med Norsk Hydro ASA. Kontaktperson er Grete Hjetland. Laboratoriearbeidet utføres i betonglaboratoriene ved Institutt for konstruksjonsteknikk. Faglærer er prof II Sverre Smeplass. Gjennomføringen av oppgaven skal tilpasses de ressursene som stilles til disposisjon.

Oppgaven er utlevert 6 januar 2014. Besvarelsen skal innleveres innen 2. juni 2014.

Forord

Oppgaven ble skrevet i forbindelse med undertegnede avsluttende mastergrad på Bygg- og miljøteknikk ved NTNU (Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet). Grete Hjetland, ved Hydro, introduserte oppgaven for undertegnede veileder i forbindelse med Norsk betongdag 2013, der undertegnede også var tilstedet.

Jeg vil først og fremst takke min veileder Sverre Smeplass og fagansvarlige Tore Kvande som på en god måte gjorde det mulig for meg å skrive master innenfor Betongteknologi. Jeg vil også spesielt takke Sverre for hans introduksjon til denne masteroppgaven og hans veiledning i mitt arbeid med den.

Jeg vil videre takke Grete Hjetland for muligheten jeg fikk til å skrive denne oppgaven. Jeg satte også stor pris på hennes introduksjon av Hydro og omvisning på Sunndalsøra aluminiumsverk.

Jeg vil til sist takke Steinar Seehuus og Ove Loraas for deres hjelp i betonglaboratoriet, og Karla Hornbostel og Jan-Magnus Østvik for deres gode innspill rundt utfordringer i denne oppgaven. Deres hjelp ble høyt verdsatt.

Trondheim, juni 2014

Bjarne Fossum

Sammendrag

Produksjon av aluminium foregår i store elektrolyseanlegg og drives ved hjelp av kraftige likestrømsstyrker. I slike anlegg er det svært viktig å forhindre elektrisk kortslutning og elektromagnetisk eksponering. Da betong er det foretrukne materialet i anlegg som dette, har denne oppgavens målsetting vært å undersøke forskjellige materialers påvirkning på betongens resulterende egenskap som elektrisk isolator.

Utvalgte betongresepter ble designet basert på hvilke materialparametere som trolig ville gi positiv effekt på betongens elektriske motstand. Betongene ble testet i tre ulike fukttilstander; vannlagret-, egenuttørket- og delvis uttørket tilstand. På denne måten vurderte man materialenes påvirkning i et bredere perspektiv.

Gjennom undersøkelsene ble fuktnivået oppdaget å være av svært dominerende karakter for betongenes elektriske motstand. Det ble konkludert at betongens fuktnivå i konstruksjonsoverflaten er avgjørende for betongkonstruksjons isolerende egenskap. Betongens fuktnivå i overflaten styres i stor grad av betongens avdampningsevne. Resultater viser at betongene med størst fukttap har de beste isolerende egenskapene. Grunnet den store forskjellen i elektrisk motstand for egenuttørket- og delvis uttørket betong, vil den uttørkede betongenoverflaten være avgjørende for konstruksjonens prestasjon i helhet. Andre egenskapsendringer materialparameterene fører til kan derfor neglisjeres. Da fuktnivået er avgjørende for betongens prestasjon er det svært viktig å til enhver tid beskytte betongen mot fukt.

Materialparameterene har stor innflytelse på betongens evne til å avdampe fukt, og man kan derfor likvel si at riktig bruk av disse vil bidra til økt elektrisk motstand. Resultatene fra denne oppgaven viser at betong med Norcem anleggsement FA, Cem II/A-V (20% FA), ekstra flyveaske- og silikaerstatning, og 5%vol luftinnhold (i fersk tilstand) gir den mest gunstige betongen blandt de undersøkte miksene.

Da de undersøkte betongeneresepene ikke ble designet for optimal fuktavdampning, burde en ny undersøkelse gjennomføres der betongenes fuktavdampende egenskap er i hovedfokus. Betonger med bedre avdampningsevne enn de undersøkte i denne oppgaven, vil trolig være bedre egnet som elektrisk isolator i aluminumsverk.

Opgaven undersøkte også effekten av grovere overflatestruktur for betongens evne som isolator. Man kan ikke anbefale et slikt tiltak basert på resultatene i denne oppgaven.

Innhold

1	Innledning	9
1.1	Bakgrunn	9
1.2	Oppgavens målsetting	10
2	Eksisterende litteratur	11
2.1	Strøm	12
2.1.1	Resistivitet og resistans	12
2.1.2	Strøm i betong	13
2.1.3	Strømtype ved måling	15
2.2	Resepttekniske parametere	16
2.2.1	Vann/bindemiddel-forholdet	16
2.2.2	Tilslag/pasta-forholdet	17
2.2.3	Luftinnhold	18
2.2.4	Tilsetningsmaterialenes påvirkning på elektrisk motstand	19
2.2.5	Sammenlikning av tilsetningsmaterialene	22
2.3	Andre påvirkende parametere	24
2.3.1	Prøvestørrelse og geometri	24
2.3.2	Hydratiseringsgrad	24
2.3.3	Vanninnhold	24
2.3.4	Lagring og behandling	25
2.3.5	Herdetemperatur	27
2.3.6	Temperatur ved måling	27
2.3.7	Sammenheng trykkfasthet og elektrisk motstand	28

3	Laboratoriearbeider	29
3.1	Generell presentasjon av arbeidet	29
3.2	Produksjon av betong og prøverstykker	30
3.3	Pakking og prøvebehandling	32
3.3.1	Lagring generelt	32
3.3.2	Prøver for måling av elektrisk motstand	32
3.3.3	Prøver for elektrisk motstand, vannlagret	33
3.3.4	Prøver for måling av relativ luftfuktighet	33
3.3.5	Trykkprøver og prøver for måling av kapillærabsorpsjon	34
3.4	Forsøk	34
3.4.1	Måling av elektrisk motstand	35
3.4.2	Utfordringen med vekselstrøm i delvis tørr betong . . .	41
3.4.3	Erfaring fra prosedyreutviklingen	43
3.4.4	Måling av elektrisk motstand, vannlagret	44
3.4.5	Måling av relativ luftfuktighet	44
3.4.6	Trykktesting og måling av kapillærabsorpsjon	45
3.4.7	Studie av overflatestruktur	46
4	Resultater og Diskusjon	49
4.1	Elektrisk motstand i vannlagret betong	49
4.2	Elektrisk motstand i egenuttørket betong	55
4.3	Elektrisk motstand i delvis uttørket betong	58
4.4	En generell sammenlikning av fukttilstandene	61
4.5	Resultatoppsummering	63
5	Konklusjon	65
6	Videre arbeid	67
A	Appendiks	73
A.1	Elektrisk motstand	74
A.2	Relativ luftfuktighet	78
A.3	Vekttap	86
A.4	Trykkfasthet	94
A.5	Kapillærabsorpsjon og porøsitet	102
A.6	Betongresepter	114
A.7	Tilleggsinformasjon	126

Figurer

2.1	Sammenheng elektrisk motstand og v/b-tall [28]	16
2.2	Sammenheng elektrisk motstand og v/b-tall [6]	17
2.3	Elektrisk motstand avhengig av pastavolum [28]	18
2.4	Elektrisk motstand avhengig av pastavolum [6]	18
2.5	Effekten av silika på elektrisk motstand [28]	20
2.6	Effekten av silika på elektrisk motstand [4]	20
2.7	Sammenheng konduktivitet, porøsitet og silikaerstatning	21
2.8	Sammenheng elektrisk motstand og flyveaskeerstatning	22
2.9	Sammenheng elektrisk motstand, slaggmengde og sementtype	23
2.10	Faktisk og simulert konduktivitet ved forskjellig prøvebehandling	26
2.11	Simulert konduktivitet ved forskjellig prøvebehandling	26
2.12	Herdetemperaturens påvirkning på elektrisk motstand	27
3.1	Tildekking av prøver	31
3.2	Installering av plastpinner	31
3.3	Diffusjonstett pakking imiterer egenuttørking	33
3.4	Diffusjonstett aluminiumsfolie	33
3.5	Teiping og liming	33
3.6	Limt plugg for egenuttørking	34
3.7	Liming av plugg med folie	34
3.8	RF-prøve for delvis uttørking	34
3.9	Oppsett med ecg-gelè	36
3.10	Påført gelè	36
3.11	Oppsett med aluminiumsfolie	38
3.12	Illustrasjon av aluminiumsrynker	39

3.13	Oppsett med gummiskiver	40
3.14	Illustrasjon av likestrøm og vekselstrøm	42
3.15	Måling av RF	45
3.16	Trykkmaskin	46
3.17	Plassering av trykkprøve	46
3.18	Trykkresultat	46
3.19	Kapillærsug og porøsitet	46
3.20	Overflatestruktur I	47
3.21	Overflatestruktur II	47
4.1	Elektrisk motstand i vannlagret tilstand	50
4.2	Rangering av vannlagrede prøver	51
4.3	Sammenheng motstandstall og elektrisk motstand	53
4.4	Sammenheng trykkfasthet og elektrisk motstand	54
4.5	Elektrisk motstand for egenuttørkede prøver	56
4.6	Elektrisk motstand for vannlagret og egenuttørket tilstand	57
4.7	Sammenheng RF og elektrisk motstand	57
4.8	Elektrisk motstand i delvis uttørkede prøver	59
4.9	Sammenheng elektrisk motstand og RF	60
4.10	Sammenheng elektrisk motstand og vekttap	60
4.11	RF for egenuttørkede og delvis uttørkede prøver	61
4.12	Elektriske motstand i ulike fukttilstander	61
4.13	Elektrisk motstand avhengig av betongendybde	62

Tabeller

2.1	Motstandsverdier for tilslag typisk brukt i betong	14
3.1	Reseptoversikt	30
3.2	Reseptforskjeller ved justering av v/b-tall	30
3.3	Antall prøver per prøvetype	31
3.4	Resultater fra ecg-oppsett	36
3.5	Resultater fra aluminiumsoppsett	38
3.6	Målt motstandsfall over tid (gummi-oppsett)	41
3.7	Effekt av uttørking på elektrisk motstand	43
3.8	RF-kontroll	45
4.1	Resultater ved forskjellig overflatestruktur	55

Innledning

1.1 Bakgrunn

Produksjon av aluminium foregår ved elektrolyse av aluminiumoksid. Det brukes meget store strømstyrker i forbindelse med denne prosessen, og det kreves materialer i omgivende konstruksjoner med gode elektrisk-isolerende egenskaper for å hindre kortslutning og minimere elektromagnetiske eksponeringen. Materialer med høy elektrisk motstand er derfor ønsket i anlegg som dette.

Betong har gjennom tidene vært det foretrukne byggematerialet i anlegg for aluminiumsproduksjon. Betong har svært høy elektrisk motstand sammenliknet med for eksempel stål. Betong er også det mest brukte byggemateriale i byggenæringen i dag, og det finnes generelt mye kunnskap om dette materialet.

En normal strømstyrke i dagens aluminiumsanlegg er 300 kA (kiloampère, likestrøm). Utvikling og effektivisering av elektrolyseprosessen krever imidlertid en betydelig økning i strømstyrken for fremtidig produksjon. I forbindelse med Hydros planlagte utvidelse av sitt aluminiumsanlegg på Karmøy, er strømstyrkene for det nye anlegget planlagt å være 450 kA. En slik økning fører til større krav for elektrisk isolering. Hydro ønsker i den forbindelse å optimalisere det nye anlegget slik at driften og sikkerheten blir så god som mulig.

Typiske produksjonstekniske og designmessige tiltak for økt elektrisk isolasjon i aluminiumsverk er krav om minimums betongoverdekning, ikke ledende armeringsstoler, fokus på lite armeringskapp og stålrester i bunn av forskaling, beskyttelse mot oppfukning av betong, og i spesielle tilfeller ikke-metallisk armering. I tillegg til slike tiltak kan man også

gjøre forbedring av betongens materialegenskapene i seg selv. En slik forbedring kan oppnås ved bruk av forskjellige betongkomponenter og deres blandeforhold. Kunnskap rundt strøm i betong, og muligheten for å påvirke dette strømbilde, er stort sett relatert til korrosjonsproblematikk. Hydro ønsker derfor å kartlegge eksisterende og brukbar informasjon for betong i aluminiumsanlegg, og å undersøke potensielt gode betongresepter gjennom egne laboratorieundersøkelser. De ønsker på denne måten å oppdatere kunnskapen rundt betong i aluminiumsproduksjon til dagens kunnskapsnivå og materialtilgjengelighet.

1.2 Oppgavens målsetting

Oppgavens overordnede mål er å finne resepttekniske parametere som kan redusere betongens elektriske ledningsevne. Utvalgte parameterene skal kartlegges ved vurdering av tidligere arbeider rundt tema. Oppgaven skal ikke presentere eller undersøke effekten av sjeldne materialer, men fokusere på materialer som er lett tilgjengelig i betongindustrien i dag. Disse skal videre verifiseres og karakteriseres gjennom egne laboratorieundersøkelser. En konklusjon om hvilke parametere som gir det største utslagene i betongens isolerende egenskap er et ønsket resultat fra denne rapporten. Påvirkningen av betongens fukttilstand skal også inkluderes i denne vurderingen. Betongenes generelle utvikling av elektriske motstand over tid er ønsket undersøkt, da utvikling i tidligfase er av interesse i forbindelse med anleggets oppstartstidspunkt. En slik tidsutvikling er også av interesse for en eventuell vurdering av betongenes videre utvikling.

Etter avtale med veileder ble parameterenes anvendelighet i betongkonstruksjoner og deres effekt på styrke og bestandighet ikke vurdert i denne oppgaven.

Eksisterende litteratur

Det er gjort relativt lite undersøkelser på strøm i betong direkte rettet mot betong som elektrisk isolator. Blandt studiene som finnes er en stor del av arbeidet rettet mot korrosjon, da betongens ledningsevne har stor effekt på korrosjonshastigheten. Litteratur er også funnet relatert til utvikling av beregningsmetoder for elektrisk ledning i betong og rundt muligheten for å beskrive betongens herdingsforløp. I forbindelse med disse problemstillingene har betongens strømbilde blitt rimelig godt forstått. Det er i disse rapportene også gjort undersøkelser direkte rettet mot optimalisering av tilslagsmaterialer.

Dette kapitlet vil presentere erfaring og teori fra tidligere undersøkelser med strøm i betong. Kapitlet starter med en beskrivelse av strømteori og betongens strømbilde. Videre vil det bli fokusert på de materialtekniske parameterene som skal undersøkes i denne oppgaven. Disse vil, basert på tidligere studier, presenteres med deres innvirkning på betongens egenskaper. På denne måten ønsker man å skape en forståelse og et grunnlag for vurdering av laboratorieundersøkelsene som presenteres senere i denne oppgaven. Siste del i dette kapitlet vil belyse andre parametere som kan være viktige å ta hensyn til ved gjennomførelse av laboratoriearbeidet.

Da det ble brukt svært mange kilder som grunnlag for noen av avsnittene, vil kilder kun bli direkte referert til der dette er naturlig. Annen støttelitteratur vil bli referert til i slutten av avsnittene. Dette ble gjort for å få bedre flyt i teksten.

2.1 Strøm

Dette avsnittet vil gi en enkel presentasjon av elektrisk ledning og motstand generelt, før betongens spesifikke strømbilde vil bli beskrevet detaljert. Et siste avsnitt vil gi en generell presentasjon av foretrukket strømtype ved bestemmelse av betongens elektriske motstand.

2.1.1 Resistivitet og resistans

Elektrisk ledningsevne, eller konduktivitet, beskriver materialets grunnleggende evne til å transportere elektrisk ladning. Uttrykket beskriver materialet i samme grad som for eksempel densitet eller spesifikk varmeledningsevne. Ledningsevnen til et materiale er direkte avhengig av materialets elektriske motstand, eller resistiviteten, som er av interesse i denne oppgaven. Disse er gjensidig avhengig av hverandre og kan defineres med invers sammenheng. Dette vises i likning 2.1. Konduktiviteten har symbolet σ , og resistiviteten har symbolet ρ (Ohm m). Både konduktiviteten og resistiviteten beskriver materialets elektriske egenskap uavhengig av geometri og størrelse.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \text{ [Siemens } m^{-1}] \quad (2.1)$$

Gjennom laboratorieundersøkelsene i denne oppgaven ønsker man å finne betongens resistivitet. For å bestemme betongens resistivitet ved måling på bestemte materialprøver må man definere enda et begrep, resistans. Resistansen beskriver den elektriske motstanden for et legemet med bestemt geometri og størrelse (som for eksempel en prøveterning), mens resistiviteten beskriver materialets elektriske motstand i enkelhet. For å bestemme materialets resistivitet, fra resistansen, må man kjenne prøvens kontaktareal med strømkilden og avstanden strømmen må bevege seg gjennom materialet. Sammenhengen mellom resistivitet (ρ) og resistans (R) er vist i formel 2.2. Faktoren R er da motstanden i en prøve med kontaktflateareal A og lengde L. Resistansen har benevnningen Ohm (Ω).

[5], [18] og [27]

$$\rho = \frac{RA}{L} \text{ [Ohm } m] \quad (2.2)$$

Begrepene ledningsevne og motstand vil kunne bli brukt om hverandre videre i oppgaven. Dette er ikke nødvendigvis et forsøk på å differensiere ulike sammenhenger.

2.1.2 Strøm i betong

Alle materialer vil til en viss grad lede strøm. Noen materialer leder strøm svært godt, mens andre svært dårlig. Resultater fra tidligere studier viser at betongens materialtekniske forutsetninger er tilstedet for å kunne oppnå svært gode isolerende egenskaper. Det er imidlertid mange faktorer som kan påvirke det endelige resultatet, og en betong med ugunstige forutsetninger vil kunne prestere svært dårlig.

Å forstå hvordan strømmen beveger seg igjennom betong er nødvendig for optimalisering av betongens elektriske motstand. Betong er et heterogent materiale og har dermed heller ikke konstante egenskaper igjennom en konstruksjon. En betong kan vurderes som et komposittmateriale bestående av tilslag i varierende størrelse omfavnet av en bindemiddelpasta. Strømmen har dermed i enkelhet tre muligheter for ledning gjennom materialet:

1. Gjennom tilslagene og pastaen i serier
2. Gjennom tilslagene som ligger i kontakt med hverandre
3. Gjennom pastaen alene

For vurdering av disse strømbildene må man se på den elektriske motstanden for de enkelte materialene i betongen. Tabell 2.1 viser elektriske motstand for tilslag typisk brukt i betong. Elektrisk motstand i sementpasta og betong (tilslag+pasta) er flere størrelsesordner mindre enn disse. Da det er store forskjeller i konduktivitet for pasta og tilslag vil man derfor kunne vurdere betong som et materiale bestående av ikke-ledende partikler, innbakt i en ledende pasta. Med bakgrunn i "den minste motstands vei"-teorien vil dette bety at strømmen ledes gjennom sementpastaen alene. Det er dermed strømbilde 3 som beskriver betongens egenskap best [27].

For å ytterligere forstå betongens elektriske ledningsevne må man se nærmere på pastaen alene, og hvordan denne er bygget opp. Ved kontakt mellom ureagert sement/bindemiddel og vann vil det skje en oppløsningsprosess. Denne prosessen resulterer i ioner i porevannet. Type ioner og ionekonsentrasjonen som oppstår er sterkt påvirket av type bindemiddel, bindemiddel produsent og vann/bindemiddel-forholdet. Noen av disse ionene blir værende i poreløsningen, mens andre felles ut som hydratiseringsprodukter.

Tab. 2.1: Motstandsverdier for tilslag typisk brukt i betong [27]

Type of rock	Range of resistivity (Ω m)
Granite	$5 \times 10^3 - 1 \times 10^6$
Marble	2.9×10^3
Gabbro	$1 \times 10^5 - 1.4 \times 10^7$
Limestone	$3 \times 10^2 - 1.5 \times 10^3$
Diorite	1×10^4
Quartz-porphyrite	3.4×10^2
Serpentine	$5.3 \times 10^2 - 2 \times 10^4$
Slate	$6.4 \times 10^2 - 6.5 \times 10^4$
Hornblende	$3 \times 10^4 - 1.0 \times 10^6$
Sandstone	$1.8 \times 10^2 - 4 \times 10^3$
Syenite	1×10^6
Gneiss	2×10^5
Conglomerate	$2 \times 10^3 - 1.3 \times 10^4$
Quartz	$3.8 \times 10^4 - 1.2 \times 10^{12}$

Ifølge Whittington et al. [27] foregår ledning i pastaen i hovedsak gjennom pastaens poreløsningen, men noe også gjennom pastaens faststoff. Betongens strømbilde kan dermed forklares ved forklaring av disse i enkelhet og hvordan de påvirker hverandre.

Poreløsningen regnes som det frie fordampbare vannet i betongen. Dens elektriske motstand er flere størrelsesordner lavere en sementpastaens faststoff og løsningen er av den grunn en svært viktig faktor for betongens ledningsevne. Dens ledningsevne vil være avhengig av type ioner og ionekonsentrasjoner. De viktigste ionene for poreløsningens ledningsevne er Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , OH^- og SO_4^{2-} . Ved bruke av sementer og tilslagsmaterialer som senker innholdet av ioner i poreløsningen, vil man dermed kunne redusere betongens elektriske ledningsevne.

Med strømledning i pastaens faststoff regnes ledning gjennom hydratiseringsproduktene (geléen), vannet bundet i hydratiseringsproduktenes mikroporer (gelporer), og i de ureagerte sementmineralene. Strømledningen i pastaen vil være lavere enn i poreløsningen, men pastaen påvirker også indirekte poreløsningens ledningsevne. Det er overenstemmelse i litteraturen om at pastaens mikrostruktur har innvirkning på poreløsningens evne til å lede strøm. Med mikrostruktur mener man porevolum, fordeling av porestørrelser og porekontinuitet. Bevegelsen av porevann og ioner i poreløsningen er da også styrt av pastaens permeabilitet, absorpsjon og forskjellige diffusjonsprosesser.

Litteraturen er entydig i virkningen av tid, der betong i faste omgivelser får høyere elektrisk motstand jo eldre den blir. Dette er både grunnet hydratisering, egenuttøkrning og avdampning. Gjennom hydratiseringsprosessen

vil en andel av poreløsningens ioner bli brukt for å skape hydratiseringsprodukter. Dermed vil poreløsningens elektriske ledningsevne reduseres over tid avhengig av betongens hydratiseringsgrad. I tillegg vil også vannet i seg selv bli brukt i den kjemiske prosessen for produksjon av hydratiseringsprodukter. Da vannet alene har en relativt høy ledningsevne vil denne reduksjonen også redusere betongens totale ledningsevne. I følge Whittington et al. [27] er en betongs elektriske motstand på bakgrunn av hydratiseringsgrad nådd et nivå etter 100 dager der forandringen vil være lav.

Ionene i poreløsningen er, som beskrevet over, direkte knyttet sammen med pastaens resulterende mikrostruktur. Det er med andre ord ikke mulig å optimalisere disse faktorene hver for seg. For vurdering en betongs elektriske motstand er det derfor viktig å vurdere betongen i helhet.

[4], [7], [9], [10], [20], [21], [24], [25], [27] [28] og [29]

2.1.3 Strømtype ved måling

Tidligere undersøkelser av elektrisk motstand i betong viser et mangfold av testoppsett og strømtyper [28]. Etersom produksjon av aluminium foregår gjennom en elektrolyseprosess, er denne prosessen avhengig av likestrømsstyrker (DC). Likestrøm er strøm som beveger seg med konstant styrke i én retning. I teorien er også likestrøm den enkleste strømtypen å bruke ved vurdering av et materialets elektriske motstand. I virkeligheten oppstår det imidlertid utfordringer som gjør det vanskelig å gjøre målinger i så måte. Ved bruk av likestrøm vil det oppstå elektrolytisk polarisasjon rundt elektrodene [19]. Polarisasjonen resulterer i en potensialforskjell mellom elektrodene, der effekten forstyrrer strømmen på 2 måter. Man skiller mellom kjemisk polarisasjon og konsentrasjonspolarisasjon. Ved kjemisk polarisasjon vil ioner legge seg som et beskyttende lag rundt elektrodene og hindre strømgjennomgang. Ved konsentrasjonspolarisasjon reduseres ionekonsentrasjonen rundt elektrodene og ledningsevnen reduseres. Begge disse effektene vil resultere i målefeil med varierende størrelse [16].

For å unngå likestrømmens negative effekter, er det generell enighet om at vekselstrøm skal brukes. Vekselstrøm skifter periodevis retning slik at det i gjennomsnitt går like mye strøm begge veier. På denne måten vil ikke ionene bli trykket i en konstant retning, og man unngår polarisasjonseffekten [26]. I følge Østvik [18] er det generelt godtatt å bruke en frekvens på 1 kHz for måling av elektrisk motstand i betong.

2.2 Resepttekniske parametere

Dette avsnittet vil legge frem tidligere resultater rundt de resepttekniske parameterene som skal undersøkes i denne rapporten. Informasjonen er ment for å skape et grunnlag for vurdering av denne oppgavens resultater. Testmetodene brukt i de ulike rapportene varierer, og man skal derfor være forsiktig med direkte sammenlikning av motstandsverdiene. Det viktige i dette avsnittet er å presentere forsøkens resultatindikasjoner og trender. Resultatene baserer seg i all hovedsak på undersøkelser gjennomført på vannlagrede prøver.

2.2.1 Vann/bindemiddel-forholdet

Vann/bindemiddel-forholdet i betong er en viktig faktor for betongens resulterende mikrostruktur og poreløsningens ionekonsentrasjon. Det er kjent at når v/b -forholdet økes blir porestrukturen grovere og mer sammenhengende. Dette reduserer dens elektriske motstanden. Figur 2.1 hentet fra William Elkey and Erik J. Sellevold [28] viser resultater fra tre uavhengige forsøk der v/b -forholdet økes. Resultatene bekrefter tydelig utviklingen i elektrisk motstand som funksjon v/b -tall. Ifølge William Elkey and Erik J. Sellevold [28] og Whittington et al. [27] er disse invers proporsjonale med hverandre. Nyere studier fra Ghasemzadeh et al. [6] presentert i Figur 2.2 viser også samme trend. Alle disse undersøkelsene viser en tilnærmet lineær sammenheng.

[7] og [18]

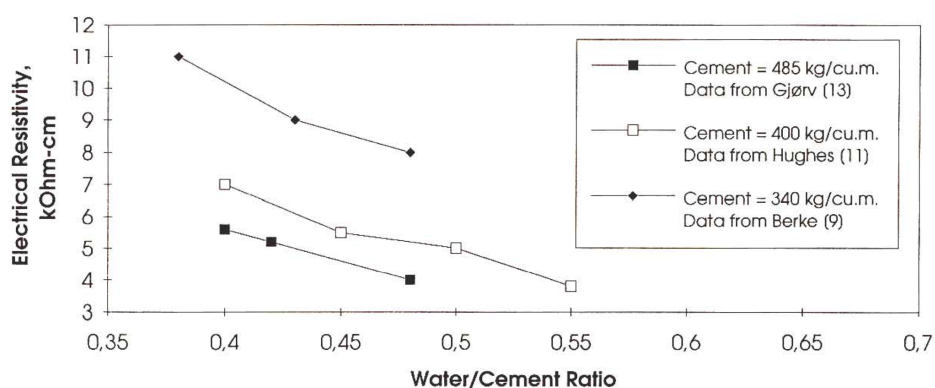


Fig. 2.1: Sammenheng elektrisk motstand og v/b -tall [28]

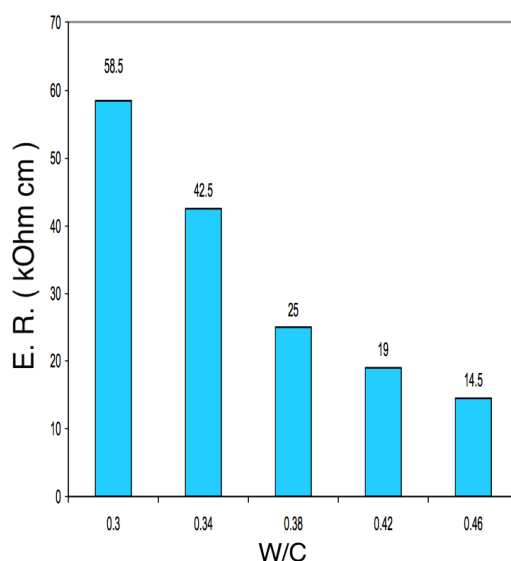


Fig. 2.2: Sammenheng elektrisk motstand og v/b-tall [6]

2.2.2 Tilslag/pasta-forholdet

Som nevnt tidligere har tilslag i betong en elektrisk motstand flere størrelsesordener større enn betongen som helhet. Den elektriske motstanden for en betong er dermed nesten alene avhengig av betongens pastaegenskaper i denne sammenheng. En forandring i tilslag/pasta-forholdet vil likevel gi tilslagene en mulighet til å påvirke betongens elektriske egenskaper. En reduksjon av tilslagsmengden vil øke den relative mengden pasta i tillegg til mengden vann i miksen. Dette øker betongens elektriske ledningsevnen. Med andre ord vil en betong oppnå høyere elektrisk motstand ved bruk av større andel tilslag [27]. Figur 2.3 og 2.4 hentet fra henholdsvis William Elkey and Erik J. Sellevold [28] og Ghasemzadeh et al. [6] bekrefter denne trenden. Trenden kan også sees i Figur 2.1 presentert i avsnitt 2.2.1. I følge William Elkey and Erik J. Sellevold [28] vil en betong med konstant v/b-forhold og en økning på 1% pastavolum redusere betongens elektriske motstanden med 1%. Figur 2.3 viser i tillegg effekten av v/b-forholdet (se forrige avsnitt).

Selv om alle tilslag har høy elektrisk motstand sammenliknet med pastaen kan det nevnes at Shi [20] rapporterer om høyere tilskudd av alkalier til poreløsningen ved bruk av kalkstein. Dette vil ha en negativ effekt på porevannets ledningsevne for betong som elektrisk isolator. Kalkstein er derfor ikke optimalt som tilslag i denne forbindelse. Effekten er imidlertid liten sammenliknet med andre resepttekniske parametere.

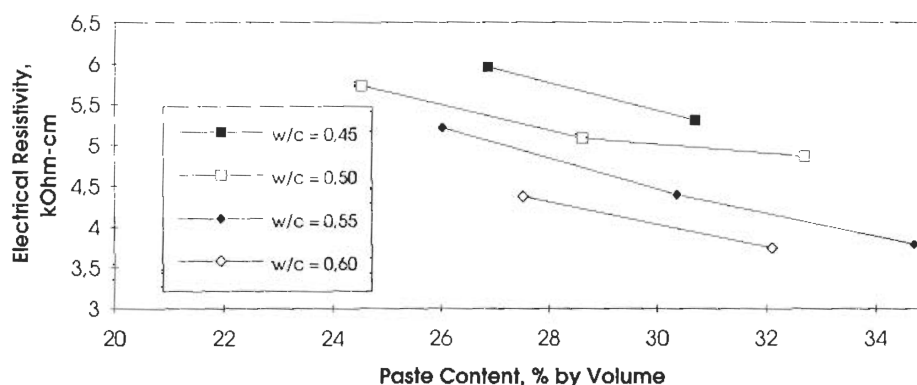


Fig. 2.3: Elektrisk motstand avhengig av pastavolum [28]

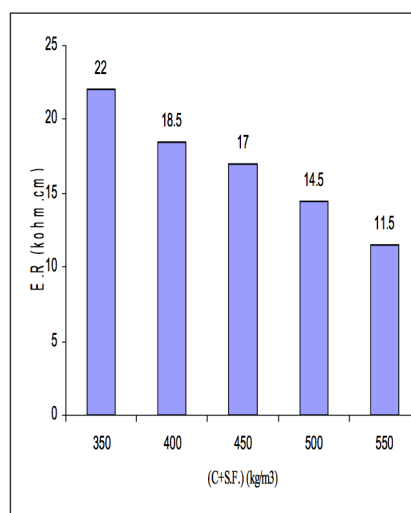


Fig. 2.4: Elektrisk motstand avhengig av pastavolum [6]

2.2.3 Luftinnhold

I følge resultater fra Ola Skjølvold [17] vil en økning i betongens luftinnhold føre til en økning i elektrisk motstand ved kapillær metningsgrad på 65-90%. Vannmettede prøver er dermed ikke forventet å prestere bedre ved et slik tiltak. De egenuttørkede og delvis uttørkede prøvene undersøkt i denne oppgaven skal derimot få en positiv virkning. Utslaget henger muligens sammen med en tidligere dårlig poreløsningskontinuitet ved reduksjon av betongens fuktinnhold.

2.2.4 Tilsetningsmaterialenes påvirkning på elektrisk motstand

Tilsetningsmaterialer brukt i betong varierer avhengig av ønske og behov for betongens egenskaper. Betonger kan bestå av flere forskjellige tilsetningsmaterialer og på denne måten være svært forskjellige. Da alle komponentene i betong har forskjellige egenskaper, vil enhver mengdeforandring få konsekvenser for betongen. Det er kjent at materialer som silika, flyveaske og slagg kan ha betydelig innvirkning på en betongs mikrostruktur og poreløsning, og dermed også betongens evne som elektrisk isolator. Avsnittene nedenfor vil presentere resultater fra tidligere undersøkelser på disse materialene.

Sement

Valg av sementtype påvirker betongens elektrisk ledningsevne. Resultater fra William Elkey and Erik J. Sellevold [28] og Lubeck et al. [10] viser tydelige forskjeller mellom forskjellige sementtyper. Førstnevnte viser også forskjeller mellom to tilsvarende sementer, men fra forskjellige produsenter. Dette kan være tilfelle der et sementprodukt inneholder forskjellig mengde alkalier grunnet dens råmaterialer eller produksjonsprosess. Konsentrasjonen av ioner i betongens poreløsning vil være svært avhengig av sementenes alkaliinnhold. Man kan derfor, ved bruk av sement med lavt alkaliinnhold, skape en betong med lavere ledningsevne. For eksempel vil sement med et høyt innhold av alumina (C_3A) ha positiv effekt på en betongs elektriske motstand [28] [18]. Det er viktig å bemerke at ionene også påvirker porestrukturen og at poreløsningens konsentrasjon ikke alene styrer ledningsevnen til betongen.

Silika

Det er kjent at erstatning av sement med silika fører til en betong med finere porestruktur. I følge William Elkey and Erik J. Sellevold [28] og Shi [20] er det også slik at silika reduserer ionekonsentrasjonen i porevannet. Begge disse faktorene reduserer betongens elektriske ledningsevne.

Grafen presentert i Figur 2.5 er hentet fra William Elkey and Erik J. Sellevold [28]. Den viser resultater fra 4 forskjellige forsøk der prosentmengde silika økes i forhold til sementmengde. Trendene viser en tydelig økning i elektrisk motstand etterhvert som silikamengden øker. Resultatene kan også tyde på at effekten av silika er større for betonger med lavere v/b -tall. Dette

ser også ut til å være tilfelle i resultatene presentert i Figur 2.6 hentet fra Dotto et al. [4].

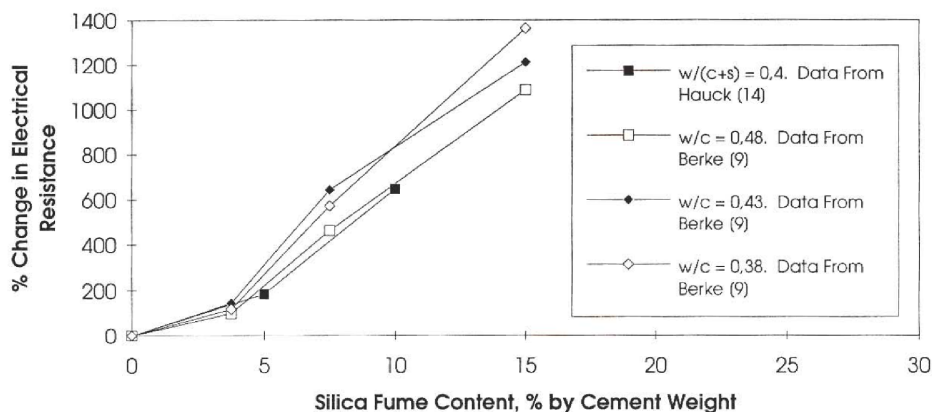


Fig. 2.5: Effekten av silika på elektrisk motstand [28]

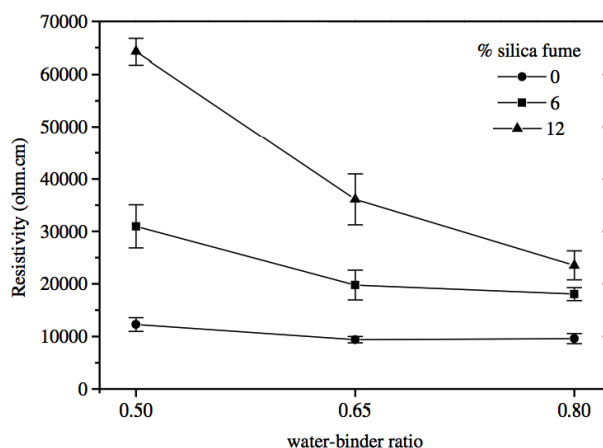


Fig. 2.6: Effekten av silika på elektrisk motstand [4]

Grafen presentert i Figur 2.7 er hentet fra El-Enein et al. [5]. Denne bekrefter trenden om økning i elektrisk motstand ved bruk av silika. Disse fant imidlertid en grenseverdi på 7% erstatningsmengde der den positive effekt av silika gir mindre virkning ved videre økning. Andre kilder konkluderer heller med en nærmere lineær effekt av tilsatt silika, og bekrefter ikke grenseverdien på 7%. [4] [6] [20] og [28]

Figur 2.7 viser også utviklingen av porøsitet ved bruk av silika. En relasjon mellom betongens elektriske konduktivitet og porøsitet kan vise

interessante sammenhenger. En porositetsvurdering vil derfor også bli gjort i laboratorieundersøkelsen i denne oppgaven.

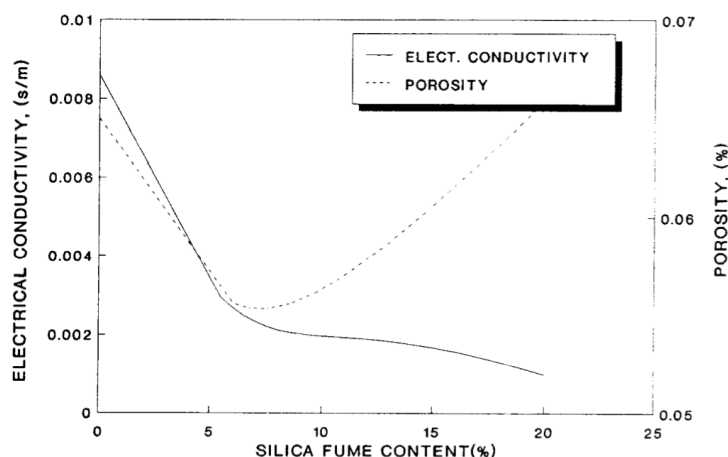


Fig. 2.7: Sammenheng konduktivitet, porøsitet og silikaerstatning ($v/b=0.4$) [5]

Flyveaske

Tidligere undersøkelser viser at bruk av flyveaske i betong forventes å senke poreløsningens elektrisk ledningsevne og over tid gjøre sementpastaen tettere og mer motstandsdyktig mot strømledning. Flyveaske har dermed liknende utslag med silika på betongens mikrostruktur, men med et annet tidsforløp. Dette vil bli drøftet nærmere i avsnitt 2.2.5.

Både resultater fra Shi [20] og Camoes et al. [3] viser en positiv innvirkning av flyveaske på betong. Figur 2.8 hentet fra [3] viser en sammenheng mellom elektrisk motstand, variasjon i flyveaske innhold og variasjon v/b -tall. Grafene identifisert som B600, B500 og B400 har v/b -tall på henholdsvis 0.25, 0.30 og 0.40. Resultatene viser en tydelig økning i elektrisk motstand opp til et flyveaskeinnhold på 40%. Den avtagende effekten etter dette punktet kan ifølge Camoes et al. [3] være grunnet mangelen på kalk for fullstendig possolanreaksjon. Resultatene viser også en kraftigere positiv effekt ved bruk av flyveaske ved lavere v/b -tall. Shi [20] bekrefter ikke trenden med en grenseverdi på 40% flyveaskeinnhold (resultatgraf ikke presentert her). Da 40% var maksimalt testet erstatningsmengde for Shi [20], er det imidlertid heller ikke mulig å avkrefte denne trenden.

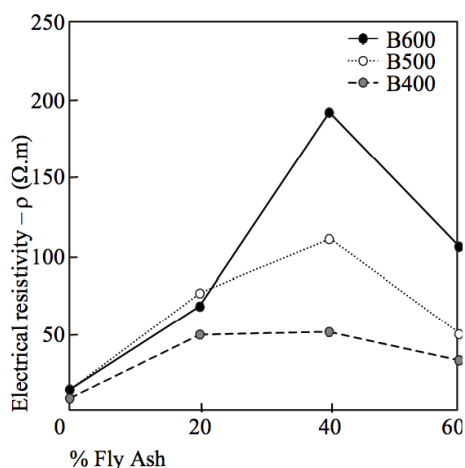


Fig. 2.8: Sammenheng elektrisk motstand, flyveaskeerstatning og bindemiddelmengde [3]

Slaggsement

Det er ikke funnet mye litteratur rundt slagg og dens påvirkning på elektrisk ledning i betong. Den er likevel forventet å påvirke betongen positivt da den resulterer i flere av de samme egenskapene som flyveaske og silika. Grunnet sin kjemiske oppbygning vil bruk av slagg føre til en betong med tettere porestruktur. Den vil også redusere ionekonsentrasjonen i porevannet [2]. Resultater vist i Figur 2.9 fra Lubeck et al. [10] viser en tydelig trend der erstatningen av sement med slagg fører til høyere elektrisk motstand. Ved høyere erstatningsmengde vil utslaget øke. Det er presentert flere studier i Figur 2.9. De blå, grønne, lilla og svarte stolpene er relevante i denne sammenheng. De blå og grønne stolpene representerer utviklingen for en hvit portlandsement, med henholdsvis 50% og 70% slagg. De lilla og svarte stolpene representerer utviklingen for en vanlig grå portlandsement, også med henholdsvis 50% og 70% slagg.

2.2.5 Sammenlikning av tilsetningsmaterialene

De forskjellige tilsetningsmaterialene har til nå blitt presentert relatert til deres virkning på betongens elektriske motstand. Resultatene viser at både silika, flyveaske og slagg kan ha en betydelig positiv virkning på betongens motstand ved riktig bruk. Det kommer også tydelig frem at deres virkning på en betongens mikrostruktur og poreløsning har liknende effekt. Det finnes likevel forskjeller mellom disse materialene. Smith et al. [23] og Shi [20] har observert noen generelle ulikheter mellom dem.

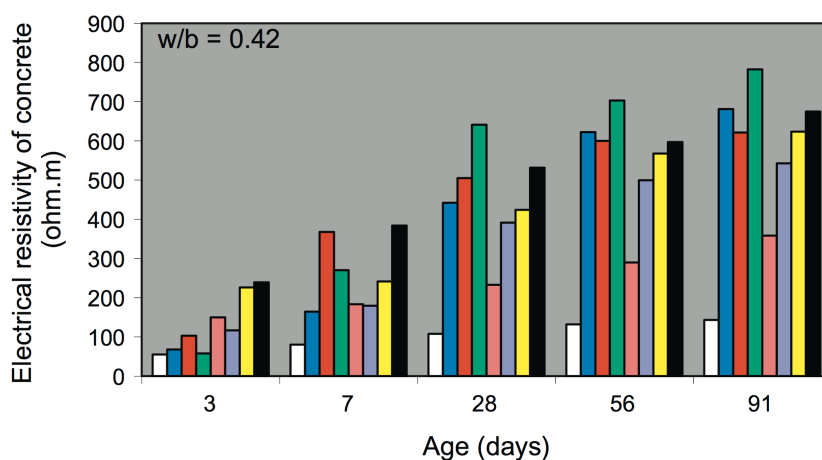


Fig. 2.9: Sammenheng elektrisk motstand, slagmengde og sementtype [10]

Materialenes partikkelstørrelse og reaksjonshastighet er forskjellige og vil dermed utgjøre forskjeller ved ulike tidspunkt. Silika og slag er relativt reaktive sammenliknet med flyveaske. De vil derfor tidlig kunne forbedre en betongs porestruktur og redusere dens permeabilitet. Flyveaske presterer likevel også relativt godt ved tidlige terminer. I følge Shi [20] er den elektrisk ledningsevnen for flyveaskebetong, ved 90 døgn, hovedsakelig styrt av dens positive effekt på poreløsningens ionekonsentrasjon. Ved bruk av silika og slag er det derimot en finere porestruktur, etter kun få døgn herding, som gir det positive utslaget. I følge Smith et al. [23] vil en betong med silika ha et stort startutslag, for deretter å følge en utvikling liknende en vanlig portlandsement. Dette stemmer med resultater fra Shi [20], der det store startutslaget ser ut til å være maksimalt oppnådd etter mellom 100 til 150 døgn. Startutslaget tidsforløp vil være avhengig av sementtype, mengde silika og generelle herdeforhold. Slaggsementen skal også føre til et tydelig utslag fra første stund. Utslaget skal derimot være noe mindre enn silikautsalget, men med en økende utvikling i elektrisk motstand over tid i forhold til en vanlig portlandsement. Flyveaskebetongen vil ofte ha et mindre startutslag enn slaggsementen, men fører til en større økning av elektrisk motstand over tid [23]. Disse trendene stemmer også med resultater fra Shi [20].

I følge resultater fra Smith et al. [23] er betongresepter med trefoldig karakter overlegne ved ønske om høy elektrisk motstand. Ved trefoldig karakter mener man da betongresepter som inneholder tre typer bindemidler. De testede trefoldige kombinasjonene i [23] er da ved bruk av portlandsement, slag og silika, eller portlandsement, flyveaske og silika.

2.3 Andre påvirkende parametere

Tidligere studier gir lite informasjon om undersøkelser rundt elektrisk motstand på delvis tørre prøver og prøver som er lagret forseglet. Arbeidet i laboratoriet gikk derfor også ut på å utvikle et godt testoppsett og en god prosedyrer for slike undersøkelser. Som grunnlag for en slik utvikling var det viktig å kartlegge parametere som kan påvirke måleresultatene. Tidligere forsøk viser til flere slike parametere. Noen av disse påvirker et materiales elektriske motstand permanent, mens andre kun påvirker betongens motstanden i den spesifikke tilstanden. Flere av parameterene er kun relevante for laboratoriearbeidene da de ikke kan påvirkes i et aluminiumsverk.

2.3.1 Prøvestørrelse og geometri

Som vist i likning 2.2 (side 12) er en prøves geometri, størrelse og kontaktareal avgjørende for den målte resistansen. Alle prøvestykkene testet i denne rapporten er av tilnærmet identisk størrelse og geometri, og resultatene kan med dette sammenliknes direkte. Resultatene vil likevel omregnes til resistivitet slik at en eventuell sammenlikning med andre resultateter er mulig.

En liten del av denne rapporten vil fokusere på overflatestruktur. Sammenhengene i likning 2.2 er viktig også her. Dette er drøftet nærmere i avsnitt 3.4.7.

2.3.2 Hydratiseringsgrad

Betongens hydratiseringsgrad har stor betydning for dens elektriske ledningsevne. Hydratisering av betong fører til lavere vanninnhold, laver ionekonsentrasjoner, og tettere mikrostruktur. Alle disse faktorene vil som beskrevet tidligere redusere den elektriske ledningsevnen.

2.3.3 Vanninnhold

Betongens vanninnhold er ifølge Østvik [18] den mest dominerende faktorene for elektriske motstanden. Dersom porevannet reduseres vil det være mindre vann tilgjengelig for distribusjon av strøm og den elektriske ledningsevnen vil minke som resultat av dette. Betongens elektriske motstand vil få en kraftigere økning når fuktinnholdet blir lavere enn en kritisk grense der poreløsningen kontinuitet blir kraftig redusert. Strømmen går da fra å ledes hovedsakelig i poreløsningen i kapillærporene, til å ledes langs de våte

poreveggene eller i pastaen. Grenseverdien varierer, men kan sies å ligge på ca 60% kapillær metning for betong med $v/b=0,40$ og på ca 40% for $v/b=0.60$.

2.3.4 Lagring og behandling

Hvordan en prøve lagres og behandles påvirker i stor grad både prøvens hydratiseringsgrad og vanninnhold. Ettersom begge disse faktorene er av betydelig karakter for en prøves elektriske konduktivitet, er lagrings- og behandlingsforholdene svært viktige faktorer å ta hensyn til gjennom laboratoriearbeidene. Forsøk presentert i Weiss et al. [25] og Spragg et al. [24] viser interessante observasjoner rundt dette.

Det vanligste lagringsscenarioet for prøver tiltenkt motstandsmåling har tidligere vært lagring i vannbad. I en slik tilstand kan man vurdere betongene uten påvirkning av eventuelle fuktforskjeller. Det er imidlertid funnet et par andre utfordringer ved slik lagring.

Den kunstig gode tilgangen på vann ved vannlagring vil kunne øke prøvenes hydratiseringsgrad i forhold til det i en ekte konstruksjon. På denne måten vil prøvene gi misvisende resultater. Ved høy hydratiseringsgrad vil prøvene opparbeide seg en mer motstandsdyktig porestruktur mot elektrisk ledning, og poreløsningen ionekonsentrasjoner vil være annerledes.

Utvasking(leaching) eller inntrengning av ioner vil også kunne være et problem ved vannlagring. Avhengig av forholdene i vannbadet vil vannets ionekonsentrasjoner kunne forandre betongens poreløsningen og dermed påvirke betongens ledningsevnen. Ettersom vannbadet bestemmer prøvenes forutsetning for slike prosesser er det i følge Spragg et al. [24] viktig at alle prøver blir lagret i vannbad av samme vannvolum og løsning.

Resultater fra Weiss et al. [25] og Spragg et al. [24] viser hvordan mulige lagrings- og behandlingsforutsetningene kan føre til betydelig forskjellige resultater. Weiss et al. [25] gjorde tester og simuleringer der samme betongmiks ble lagret og behandlet på tre forskjellige måter. Et sett prøver ble lagret i vannbad og et sett prøver ble lagret forseglet. Dette siste settet ble først testet i sin naturlige fukttilstand før det ble vannmettet og testet igjen. Spragg et al. [24] gjorde simuleringer med det samme forsøksforløpet. Resultatene fra de to rapportene er presentert i Figur 2.10 og 2.11. De simulerte resultatene (rosa farge) i Figur 2.10 og resultatene i Figur 2.11 ser ut til å stemme relativt godt overens med de faktiske målingene presentert i Figur 2.10 (blå farge).

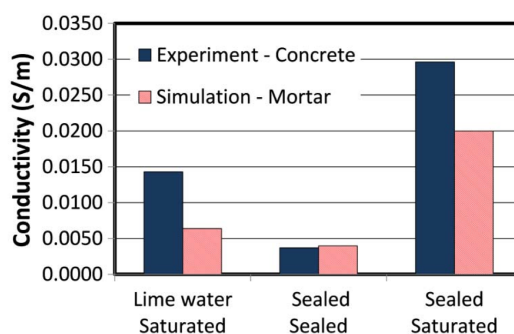


Fig. 2.10: Faktisk og simulert elektriske konduktivitet ved forskjellige lagrings- og behandlingsforutsetninger [25]

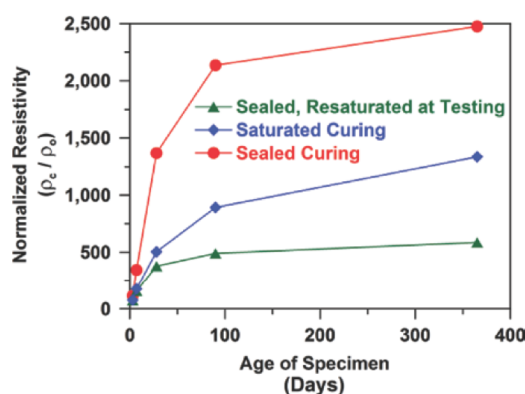


Fig. 2.11: Simulert konduktivitet ved forskjellige lagrings- og behandlingsforutsetninger[24]

Resultatene viser tydelig den viktige effekten av prøvenes vanninnhold, da reduksjonen i elektrisk motstand mellom "sealed curing" og "sealed, resaturated" er avhengig kun av dette. Da disse resultatene er fra samme prøve, men med annet fuktinnhold, vet man også at deres hydratiseringsgrad og porestruktur er identisk. Resultatene viser at en vannlagret prøve har høyere motstand enn en forseglede prøve som er vannmettet. Da konduktiviteten bestemmes av blandt annet hydratiseringsgrad og porestruktur, er det også naturlig at prøvene som ble lagret i vannbad har høyere motstand enn de forseglede prøvene i vannmettet tilstand. Det er også naturlig at de forseglede prøvene har den høyeste motstanden, da disse har betydelig lavere vanninnhold enn de andre prøvene.

2.3.5 Herdetemperatur

I følge William Elkey and Erik J. Sellevold [28] har en betongs herdetemperatur over tid en innvirkning på betongens elektriske motstandsdyktighet. Figur 2.12 viser utvikling av elektrisk motstand ved forskjellige temperaturer og forskjellige silikainnhold. Resultatene viser en tydelig trend der høyere herdetemperatur fører til lavere elektrisk motstand. Trenden blir kraftigere desto høyere innhold av silika det er i betongen. En temperatur på ca 45 °C ser ut til å være en kritisk grense der temperaturens negative utslag øker kraftigere. Dette er i følge William Elkey and Erik J. Sellevold [28] trolig grunnet utvikling av en grovere og mer sammenhengende porestruktur.

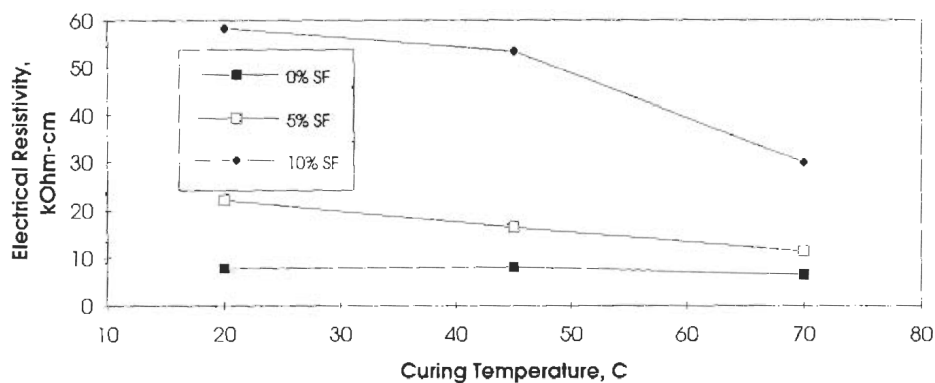


Fig. 2.12: Herdetemperaturens påvirkning på elektrisk motstand for betong med varierende silikainnhold [28]

2.3.6 Temperatur ved måling

Betongens elektriske ledningsevne påvirkes av dens temperatur. Temperaturen påvirker i så måte betongens egenskaper både i laboratoriet og i det virkelige liv. En økning i temperatur vil resultere i to negative forandringer i betongens forutsetning for elektrisk ledning. Hvis temperaturen økes vil poreløsningens viskositet reduseres. Dette fører til økt ionemobilitet. I tillegg vil en økning i temperatur føre til en økning i oppløste ioner i poreløsningen. Effektene er kun midlertidige, og de oppløste ionene vil felles ut igjen når temperaturen synker [24] [28] [18]. I følge William Elkey and Erik J. Sellevold [28] kan man forvente en forandring på 3% i elektrisk konduktivitet per grad celsius ved en referansetemperatur på 21 °C. Spragg et al. [24] mener at temperaturvariasjonen ved testing burde holdes lavere enn ± 2 °C for å kunne neglisjere dens påvirkning.

2.3.7 Sammenheng trykkfasthet og elektrisk motstand

Som beskrevet i avsnitt 2.2.1 har v/b -tallet stor innvirkning på betongens elektriske ledningsevne. Da betongfastheten også er svært avhengig av betongens v/b -tall kan det være en indirekte sammenheng i deres utvikling. Resultater er funnet der en sterkere betong også har høyere elektrisk motstand. Resultatene bygger på undersøkelser der det er brukt forskjellige tilsetningsstoffer for å oppnå variasjon i trykkfasthet. Vanlige komponenter som flyveaske, slag eller silika ble brukt som tilsetning [4]. Denne sammenhengen blir også presentert av Keyvani [7] og Smith et al. [23], der sistnevnte også konkluderer med at utslaget ved bruk av tilsetningsmaterialer vil få liknende relativt utslag på betongfastheten som den elektriske motstanden. Lubeck et al. [10] presenterer imidlertid resultater der disse sammenhengene ikke bekreftes.

Laboratoriearbeider

Dette kapitlet vil gi en beskrivelse av laboratoriearbeidet i oppgaven. laboratoriearbeidene ble ikke alle utført etter eksisterende prosedyrer, og det var i den anledning nødvendig å utvikle egne oppsett og rutiner. For senere evaluering og bruk av resultatene er det derfor viet mye plass til forklaringer her.

3.1 Generell presentasjon av arbeidet

Det ble gjennomført flere undersøkelser i forbindelse med denne rapporten. Betongreseptene ble undersøket ved fire terminer i løpet av en forsøksperiode på 84 døgn. Betongene ble hovedsakelig undersøkt for tre egenskaper ved alle de fire terminene. På denne måten vurderte man betongenes egenskapsutvikling over tid. Egenskapene som ble undersøkt var elektrisk motstand, relativ luftfuktighet og trykkfasthet. Det ble støpt prøverstykker som var spesielt tilpasset hver av disse undersøkelsene. I tillegg ble betongreseptenes porestruktur vurdert, og en mindre studie ble gjennomført for vurdering av overflatestrukturens innvirkning på elektrisk motstand.

Vann i betong innstiller seg avhengig av omgivelsene. Hvordan en prøve lagres og behandles påvirker derfor i stor grad både prøvens hydratiseringsgrad og vanninnhold. Etersom begge disse faktorene er av betydelig karakter for en prøves elektriske konduktivitet, er lagrings- og behandlingsforholdene svært viktige faktorer å ta hensyn til. Måling av elektrisk motstand og relativ luftfuktighet ble derfor gjort på prøver med tre forskjellige fuktforutsetninger. På denne måten vurdere man fuktens påvirkningsgrad. Fuktsenarioene representerte betongen i vannlagret tilstand, i egenuttørket tilstand (grunnet

vannets oppbinding i hydratiseringsproduktene) og i en tilstand med avdampningsmulighet til omgivelsene (delvis uttørking).

3.2 Produksjon av betong og prøverstykker

Betongreseptene ble bestemt basert på materialene man ønsket å sammenlikne. Det var ønsket teste både typiske og mindre typiske blandinger. Nøyaktig materialvalg, mengdeforhold og proporsjonering ble bestemt gjennom erfaring fra Sverre Smeplass (veileder) og ved hjelp av et internt proporsjoneringsverktøy fra Skanska. En generell oversikt over de valgte betongmixene er presentert i Tabell 3.1 og 3.2. De detaljerte betongreseptene ligger vedlagt i appendiks A.6.

Tab. 3.1: Reseptoversikt

Sementtype	MixID	v/b-forhold	Silika [% av sementvekt]	Flyveaske [% av sementvekt]	Volum% luft	Kommentar
Aalborg portland rapid	A	0.40	10%	-	2%	Referanse
Cemex Slaggsement, CEM III/B (75% slagg)	B	0.35	-	-	2%	
	C	0.40	-	-	"	
	D	0.40	10%	-	"	
Norcem Anleggsement FA, CEM II/A-V (20% FA)	E	0.35	-	-	2%	
	F	0.40	-	-	"	
	G	0.40	10%	-	"	
	H	0.40	-	10%	"	
	I	0.40	10%	10%	"	
	J	0.40	10%	-	5%	

Tab. 3.2: Reseptforskjeller ved justering av v/b-tall

		v/b=0.35	v/b=0.40
Tilslag	0-2 mm	50% av totalt tilslag	55% av totalt tilslag
	8-16 mm	50% av totalt tilslag	45% av totalt tilslag
Pastavolum		350 liter	330 liter
Plastiserende stoff	SX-N	1.5% av bindemiddel	1.2% av bindemiddel

Det ble støpt 24 terninger for hver betongresept. Terningene ble lagret og behandlet forskjellig avhengig av formål. Det er viktig å være klar over at det ikke er eksakt samme prøve som testes ved måling av for eksempel elektrisk motstand som ved RF-måling. Resultatene vil likevel kunne bli fremstilt slik ved senere anledning. En oversikt over antall prøver for de forskjellige undersøkelsene er presentert i Figur 3.3.

Tab. 3.3: Antall prøver per prøvetype

Prøver produsert per resept	
Trykkfasthet	6
RF	
Egenuttørkning	3
Delvis uttørkning	3
El. Motstand	
Vannlagret	2
Egenuttørkning	3
Delvis uttørkning	3
Kapillærsug	2
Ekstra	
Egenuttørkning	2
Vannlagret (El. vannlagret)	-
Totalt # prøver	24

Etter miksing av betongkomponentene ble slumpmålet, densiteten og luftinnholdet registrert etter retningslinjer gitt i NS-EN 12350-2 [11] og NS-EN 12350-7 [12]. Slumpmålene varierte mellom 15 og 21 cm for de 10 miksene. Luftprosenten varierte mellom 1.2%vol og 2.6%vol, med unntak av miks J som hadde 4.7%vol (luftinnførende middel). Den eksakte mengden superplastiserende stoff ble bestemt ved evaluering av betongkonsistens. Samtlige av disse opplysningene er registrert i appendix A.6.

Betongblandingene ble fylt i standard støpeformer (terninger, 10X10 cm). Formene var i utgangspunktet smørt med olje, men ble forsøkt tørket for å redusere oljens mulige påvirkning ved måling av elektrisk motstand. Terningene ble støpt etter retningslinjer i standard NS-EN 12390-1 [13] og NS-EN 12390-2 [14], og tildekket med plast, fuktig klut og trelokk. Tildekkingen ble gjort for å hindre fukttap og beskytte prøvene før størkning. Prøvene tiltenkt RF-måling ble istøpt en sentrert plastpinne for senere installering av målerutstyr. Se bilde 3.1 og 3.2 for illustrasjon av tildekking og installering av plastpinner.



Fig. 3.1: Tildekking av prøver



Fig. 3.2: Installering av plastpinner

3.3 Pakking og prøvebehandling

Dette kapittelet vil presentere prøvenes forskjellige behandlings- og lagringsforutsetninger. Slike forutsetninger er viktige å presentere da de påvirker betongenes hydratiseringsgrad og vanninnhold ved senere testing. Dette bidrar dermed til en bedre forståelse for resultatene. Det kan også gi kunnskap om foretrukne herdebetingelser og fukttilstander i det virkelige liv.

3.3.1 Lagring generelt

Prøvene lagret i vannbad ble alle lagret i samme vannbasseng i laboratoriet. Prøvene ble lagret i vann med temperatur på 20°C ($\pm 2^{\circ}\text{C}$) som beskrevet i standard NS-EN 12390-2 [14].

Prøvene lagret i luft (egenuttørket og delvis uttørket) ble lagret i betonglaboratoriet på materialteknisk institutt gjennom hele forsøksperioden. Ved testing ble prøvene for egenuttørkning tatt ut av posene, testet og deretter lagt tilbake i posene på samme måte. Prøvene for delvis uttørking ble testet uten utfordringer fra innpakningen. Appendiks A.7. presenterer en graf over variasjon i temperatur og fuktnivå i betonglaboratoriet i perioden prosjektet foregikk. Denne informasjonen er tenkt å kunne brukes ved en eventuell senere vurdering av lagringsforholdene. Det kan nevnes at betonglabben har relativt lav luftfuktighet.

3.3.2 Prøver for måling av elektrisk motstand

Prøvene for måling av elektrisk motstand ble lagret enten for egenuttørkning eller for delvis uttørkning. Dette oppnådde man ved hjelp av diffusjonstett folie av aluminiumsbelagt plast.

Prøvene som representerte egenuttørkningsscenarioet ble lagret i diffusjonstette poser av aluminiumsfolien. Posene ble laget ved hjelp av plastsveising, da dette ble gjort i et annet studie med vellykket resultat [24]. Som en ekstra sikring mot tap av fukt ble prøvene først plassert i en vanlig plastpose og deretter i de diffusjonstette posene. I de diffusjonstette posene la man også en fuktig fille for å sikre høy RF. Posene ble lukket med dobbel bretteing og tekstiltape. Se bilde 3.3 for illustrasjon av de diffusjonstette posene.

Prøvene som skulle representere betong med delvis uttørking ble pakket med folie og teipet med tekstilteip på fire av seks flater. På denne måten ville to av sidene avdampe fukt til omgivelsene i likhet med betongflater i virkeligheten. Prøvene ble også tettet med tokomponent silikon ved avslutning av tekstilteip mot betongens ujevne støpeoverflate. På denne

måten prøvde man å hindret mulige fuktlekkasjer der teipen klebret dårlig. Se bilde 3.4 og 3.5 for illustrasjon av pakking.



Fig. 3.3: Diffusjonstett pakking imiterer egenuttørking



Fig. 3.4: Diffusjonstett aluminiumsfolie



Fig. 3.5: Teiping og liming

3.3.3 Prøver for elektrisk motstand, vannlagret

Hver resept hadde to ekstra terninger lagret i vannbad. Disse var tenkt som sikkerhet i tilfelle uforutsette hendelser skulle skape behov for flere prøver. Prøvene ble bestemt brukt til måling av elektrisk motstand da det dukket opp utfordringer ved måling på de egenuttørkede og delvis uttørkede prøvene (se kapittel 3.4.1). Prøvene ble kun tatt ut av vannbadet i korte perioder for måling.

3.3.4 Prøver for måling av relativ luftfuktighet

Prøvene tiltenkt måling av relativ luftfuktighet ble pakket og lagret på omtrent samme måte som prøvene for elektrisk motstandsmåling. På denne måten ville resultatene være mest mulig sammenliknbare og representative

for hverandre. Prøvene fikk i tillegg installert en plasthylse, som del av målerutstyret, i hullet etter plastpinnene. Plasthylsene ble limt til betongprøvene for å sikre god tetting. Se bilde 3.8, 3.7 og ?? for installering og liming av plastplugger.



Fig. 3.6: Limt plugg for egenuttørking **Fig. 3.7:** Liming av plugg med folie

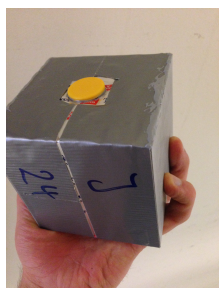


Fig. 3.8: RF-prøve for delvis uttørking

3.3.5 Trykkprøver og prøver for måling av kapillærabsorpsjon

Prøvene tiltenkt trykktesting og måling av kapillærabsorpsjon ble lagret i vannbad. Det ble ikke foretatt noen modifikasjoner av disse prøvene. Betongenes trykkfasthet ble undersøkt ved tre terminer (7, 28 og 84 døgn). Kapillærabsorpsjonen ble undersøkt etter ca 56 døgns herding.

3.4 Forsøk

Dette avsnittet vil beskrive de forskjellige prosedyreoppsettene og gjennomføringen av prosedyrene. Prosedyreutviklingen for måling av elektrisk motstand vil bli spesielt grundig presentert, da det var mange utfordringer rundt

dette. Forklaringene skal gi et tydelig bilde av de endelige prosedyrene og hvorfor de ble gjennomført i så måte.

3.4.1 Måling av elektrisk motstand

Grunnet prosjektets tidsramme var det viktig å støpe prøvestykker tidlig. Betongmiksene ble derfor støpt før fullstendige forsøksprosedyrer var bestemt. Da det viste seg å være utfordrende å måle elektrisk motstand ble det brukt mye tid på prosedyreutvikling og testing. Man forsøkte hovedsakelig fire forskjellige testoppsett. Informasjon om testoppsettene og utviklingen mellom dem vil bli presentert i de neste avsnittene. De fire forskjellige testoppsettene var som følger:

- Ecg-gelè
- Aluminiumsfolie og ecg-gelè
- Grafitt-silikon
- Gummiskiver

Apparatet benyttet for måling av elektrisk motstand var i utgangspunktet et LCR-meter med navn Escort ELC-131D. Apparatet har en 9 volt spenning (batteri) med en frekvens på enten 1 kHz eller 120 Hz. Hydro ønsket å undersøke betong ved bruk av høyere spenning, men utstyr for dette var ikke mulig å oppdrive.

Ecg-gelè

Det var i utgangspunktet tenkt å måle elektrisk motstand slik Sintef har gjort for Hydro tidligere ([17] (konfidensiell)). Denne prosedyren går i utgangspunktet ut på å lagre betongprøvene i vann. I motsetning til mange av prøvene i denne undersøkelsen, er prøvene da tenkt å være tilnærmet vannmettede. Prøvene påføres en ecg-gelè før den legges mellom to kontaktplater av stål. Ecg-gelèen er en strømlerende gelè som opprinnelig brukes ved medisinske institusjoner for ecg-undersøkelser. Gelèen påføres i dette tilfelle for å sikre full kontakt mellom stål og betong slik at alle prøvene får tilnærmet samme kontaktareal. Det er kun 2 av sidene som blir påført gelè. Se Figur 3.9 og 3.10 for illustrasjon av oppsett.

Ved gjennomføring av prosedyren ble det tydelig at motstandsmålingene var ustabile. For kontroll registrert man derfor både motstandsverdier umiddelbart og etter 5 minutter i kontakt med gelèen. Det var en tydelig

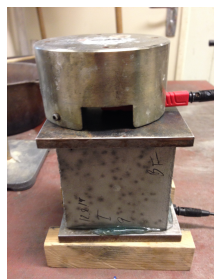


Fig. 3.9: Oppsett med ecg-gelè

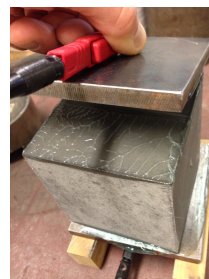


Fig. 3.10: Påført gelè

tendens mot synkende elektrisk motstand desto lengere prøven ble liggende for måling. Fem minutter etter påføring av gelè var de kontinuerlige målingene blitt mer stabile, men fortsatt var det en liten synkende tendens. Tabell 3.4 viser data samlet fra forsøket.

Tab. 3.4: Resultater fra ecg-oppsett

L-C-R-måling med ecg-gel	Direkte avlesing [kOhm]	Avlesing etter 5 min [kOhm]	Diff. Avlesing	% redusert måling	Fuktvurdering			Prøvetype
					vekt før	vekt etter	Diff. Gram vann	
PrøveID								
A 16	68	1.12	-66.88	98.35	-	-	-	Delvis uttørkning
17	54	1.22	-52.78	97.74	-	-	-	
18	135	1.05	-133.95	99.22	-	-	-	
B 16	200	3.36	-196.64	98.32	-	-	-	Delvis uttørkning
17	150	3.62	-146.38	97.59	-	-	-	
18	164	3.52	-160.48	97.85	-	-	-	
C 16	255	3.12	-251.88	98.78	2404.7	2412.5	7.8	Delvis uttørkning
17	218	3.76	-214.24	98.28	2415.2	2422	6.8	
18	-	-	-	-	-	-	-	
D 13	-	1.82	-	-	2450.1	2449.6	-0.5	Egenuttørkning
14	-	1.79	-	-	2399.8	2399.3	-0.5	
15	-	1.84	-	-	2390.6	2390.2	-0.4	
16	213	5.10	-207.90	97.61	2435.0	2439.5	4.5	Delvis uttørkning
17	208	3.60	-204.40	98.27	2435.0	2443.1	8.1	
18	-	-	-	-	-	-	-	

Det er stor differanse mellom målingene gjort på de to forskjellige tidspunktene. De første sekundene etter kontakt var motstandsforandringen på flere titalls kOhm, og det var vanskelig å notere seg nøyaktige verdier. Som eksempel på spredning hadde prøve A18 en motstandsforanring fra 135 kOhm til 1.05 kOhm på 5 minutter. Dette tilsvarer en verdi nesten 130 ganger høyere ved første avlesning enn etter fem minutter. Prøvene lagret for egenuttørkning hadde en mindre betydelig motstandsending enn prøvene lagret for delvis uttørking. Egenuttørkningsprøvene brukte også kortere tid før deres kontinuerlige motstandsmålingene ble mer stabile. De vannmettede prøvene hadde ingen synkende tendens ved denne målingen.

Ettersom ecg-geléen var vannbasert hadde man mistenke om vannoppsug fra gelè til prøve. Det faktum at de våte prøvene hadde stabile målinger

og de egenuttørkede prøvene ble mindre påvirket enn de delvis uttørkede, stemte godt med mistanken om fuktoppsug. At ecg-geløen var tørrere etter kontakt med de delvis uttørkede prøvene førte til videre mistanke. Ukontrollert fukttilførsel er ikke akseptabelt i denne rapporten da et viktig fokus er å bestemme betongreseptenes evne som elektrisk isolator med kjente fuktforutsetninger. Da prøvene har ulike resepter har de også forskjellig sugeevne. Det vil derfor varierende hvor mye vann hver enkelt prøve kan suge til seg i løpet av måleprosessen. Betongenes sammenlikningsgrunnlag vil, i en slik situasjon, ikke være likt. Man var også usikker på hvordan betongenes fuktavdampning kunne bli påvirket av geløens reststoffer på betongoverflaten, da disse ikke kunne vaskes vekk med vann.

Det ble gjennomført en vektkontroll på noen av de testede prøvene for å bekrefte mistanken. Disse resultatene er også presentert i Tabell 3.4. Man ser at vekten til prøvene for delvis uttørkning har en tydelig økning fra før måling til etter måling. Dette tolkes entydig som et resultat av fuktoppsug. Egenuttørkningsprøvene vil ha en lavere evne til å suge vann, i tillegg til større evne for avdampning. Det er derfor ikke overraskende at resultatene ikke viser noen tydelig vektøkning for disse.

Basert på resultatene og vurderingene presentert over ble dette testoppsettet forkastet. Ved senere prosedyreidéer ble det fokusert på løsninger som hindret vannoppsug til prøvene og unngikk problemer med reststoffer på prøveoverflatene.

Aluminiumsfolie og ecg-gelø

Neste forsøkte oppsett liknet det første. Man modifiserte ecg-oppsettet for å eliminere vannoppsuget til prøvene. Ved hjelp av aluminiumsfolie og gelø prøvde man å oppnå den samme gode kontakten som geløen i utgangspunktet skulle gi. Man brukte en stiv, men bøyelig aluminiumsplate som utgangspunkt. Man kledde aluminiumsplaten inn i en slags konvolutt av tynnere aluminiumsfolie og fylte gelø mellom aluminiumslagene. På denne måten ville man skape en slags formbar pute. Puten skulle sikre kontakt mellom prøve og kontaktplate ved hjelp av geløens formbarhet, og hindre kontakt mellom prøve og gelø ved hjelp av aluminiumsfolien. Oppsettet er vist i Figur 3.11 og resultatene er presentert i Tabell 3.5. Ved test av oppsettet ble et utvalg prøver testet først en gang, deretter ble alle testet en gang til.

Resultatene var tydelig mer stabile her enn i det første forsøket. Målingene for delvis uttørkning var ganske stabile, mens egenuttørkningsprøvene fortsatt hadde en synkende tendens.

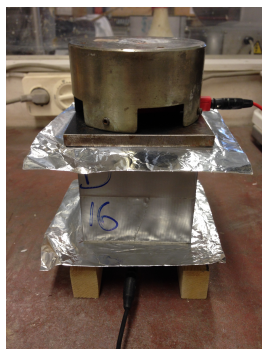


Fig. 3.11: Oppsett med aluminiumsfolie

Tab. 3.5: Resultater fra aluminiumsoppsett

L-C-R-måling med folie	Runde 1 [kOhm]	Runde 2 [kOhm]	Diff
PrøvelD			
A 16	224	340	116
17	239	348	109
18	299	480	181
B 16	462	595	133
17	459	460	1
18	469	768	299
C 16	461	486	25
17	470	553	83
18	454	531	77
D 16	433	489	56
17	432	493	61
18	421	460	39

Prosedyren så i starten ut til å fungere, men viste seg å være lite holdbar over tid. Loddet (3 kg) som skulle sikre god kontakt førte til en gradvis utpressing av geléen. Dette reduserte putens formbare egenskap. I et forsøk på å hindre dette ble geléen presset tilbake mot senter av aluminiumsputene. Dette førte imidlertid til små rynker i folien som hindret konstant kontakt mellom plater og betong. Bilde 3.12 illustrerer rynkene som oppsto i aluminiumsfolien. Grunnet putenes dårlige holdbarhet viste alle resultatene høyere motstandsverdier ved andre måling enn ved første. Økningene var heller ikke av samme størrelse.

Med grunnlag i disse observasjonene forkastet man prosedyren. Ved videre utvikling ble det fokusert på testoppsett med bedre holdbarhet.

Grafit-silikon

Den tredje forsøkte prosedyren baserte seg på tanken om en strømledende pasta. Pastaen skulle sikre kontakt mellom betong og kontaktplater ved



Fig. 3.12: Illustrasjon av aluminiumsrynker

hjelp av lodd. Man fant en veiledende oppskrift på nettet for hvordan man lager en slik pasta. Pastaen besto av tokomponent silikon, tynner og grafittpulver. Etter blanding ble pastaen smørt utover kontaktplatene slik at den ved størkning skulle være permanent heftet til disse. Etter 24 timers tørking kunne man imidlertid se tydelig krakkelering og sprekker i pastaen, og ved kontakt med andre gjenstander smuldret den lett opp. Trolig var dette grunnet det nødvendig høye innholdet av grafit for god ledningsevne. Med bakgrunn i observasjonene om en ikke-holdbar pasta ble også denne prosedyren forkastet.

Gummiskiver

Et fjerde forsøk baserte seg på tanken om en strømlerende gummi brukt som pakning mellom betong og kontaktplater. Gummiskivene ville trolig være holdbare over tid i motsetning til pastaen.

Man greide å oppdrive et gummiprodukt fra en forhandler i USA ved navn Zoflex [30]. Produktet heter "CD45.1 Conductive rubber sheets". Datablad for produktet ligger vedlagt i appendix A.7. Produktet ble bestilt i form av gummiskiver på 300x300x1 mm. Disse ble klippet for tilpasning til kontaktplatene. Utgangspunktet for prosedyregjennomføringen ble basert på erfaring fra de foregående forsøkene. Testoppsettet med gummiskiver er vist i Figur 3.13.

Det ble tidlig registrert at motstandsmålingene hadde den samme synkende tendensen i dette oppsettet som i oppsettet med aluminiumsfolie. Det skal nevnes at målingene for de delvis uttørkede prøvene ble stabile etter en viss uttørkningstid. Man står da igjen med spørsmålet om hvorfor målingene av elektrisk motstand er ustabile på egenuttørkede prøver, eller i tilstand mellom 85-99 % RF, når både prøver som er vannmettet og prøver som er tydelig uttørket gir stabile avlesninger.

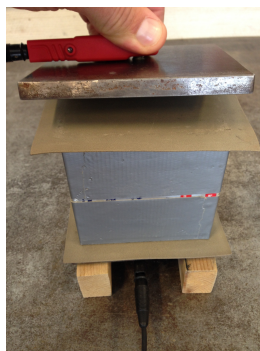


Fig. 3.13: Oppsett med gummiskiver

Mye tid ble brukt i forsøk på å eliminere den synkende tendensen for de egenuttørkede prøvene. Man vurderte fuktvandring som en mulig influerende faktor også her. Muligheten for vannoppsug fra prøve til gummiskive ble vurdert og forsøkt hindret ved plassering av aluminiumsfolie mellom prøve og gummiskive. Den synkende tendensen var fortsatt tilstede og man konkluderte med at fuktvandring ikke var årsaken til fenomenet denne gangen.

En annen mulighet kunne være at gummiskivene trengte innstillingstid for å gi stabile avlesninger. Man prøvde å belaste utstyret over en viss tid for å se om målingene stabiliserte seg, men det tok svært langt tid før målingene ble tilnærmet stabile. Å bruke en slik prosedyre ville være ugunstig da prøvene for egenuttørking burde isoleres fra potensiell uttørking så fort som mulig. Man prøvde også å påskynde innstillingstiden ved bruk av en initiell tung last og deretter avlastning. Dette ga varierende resultater.

Som eksempel på utfordringene rundt varierende avlesning presenterer Tabell 3.6 målinger gjort på en prøve på tilfeldige tidsintervaller over nesten 28 minutter. Prøven var påtrykket av strømmen fra måleapparatet i alle de 28 minuttene. Målingene viser en avtagende tendens for motstandsfallet, men dette tok lang tid.

Grunnet utfordringene ved måling av elektrisk motstand ble man usikker på måleapparatets egnethet for oppgaven. Man lånte et nytt apparat fra Sintef med navn Agilent U1732C. Dette apparatet var i utgangspunktet et liknende apparat, men av nyere årgang. Det var også nylig kontrollert og justert av Sintef. Apparatet viste av uviss grunn langt lavere motstandsverdi enn Escorten, men heller ikke dette apparatet viste stabile avlesninger for de egenuttørkede prøvene. Man undersøkte derfor videre målerutstyret og hvordan påtrykking av vekselstrøm påvirker elektrisk motstand i betong. Dette er diskutert i avsnitt 3.4.2

Etter videre undersøkelser presentert i 3.4.2 ble likevel det generelle

Tab. 3.6: Målt motstandsfall over tid

Test for avlesning over tid	Tid etter målestart	kOhm
Prøve C18	0:00:00	1380
	0:06:15	1273
	0:12:00	1235
	0:22:30	1200
	0:27:30	1189
	ikke stabil
Total motstandsreduksjon		191

oppsette med bruk av gummiskiver vurdert som godt. Gummien gir god kontakt mellom prøve og kontaktplater. Man unngår problemer med vannoppsug fra geléen og oppsettet er holdbart over tid. Ved vurdering av de senere terminene må man i følge Polder [19] kunne forvente tydelige avvik mellom prøver fra identiske prøverreseptet uavhengig av testoppsettet.

3.4.2 Utfordringen med vekselstrøm i delvis tørr betong

Dette avsnittet vil detaljert formulere utfordringen rundt vekselstrøm og måling av elektrisk motstand i egenuttørket og delvis uttørket betong. Da tidligere undersøkelser i liten grad har utført undersøkelser på slike prøver, var det vanskelig å vurdere de uventede utslagene. To personer med spesiell kompetanse ble kontaktet i den anledning. Karla Hornbostel (doktorgradstudent, NTNU) og dr. Jan-Magnus Østvik var svært behjelpelige med sin kunnskap. Teorien rundt systemet kan utdypes i adskillig større grad enn det som er gjort nedenfor.

Ved motstandsmålinger i betong kan man se for seg betongprøven som en vanlig motstandskomponent i en strømkrets. Dette er vist i venstre del av Figur 3.14. Dersom man ser bort ifra polarisasjonsproblematikken vil man ved påtrykking av likestrøm kunne registrere betongens "ekte motstand". Ved påtrykking av vekselstrøm derimot vil det oppstå et noe annerledes og mer avansert strømbilde. Dette er vist på høyre side i Figur 3.14.

I motsetning til likestrøm er vekselstrøm en funksjon av tid. Spenningen, U , kan da uttrykkes som en sinusfunksjon av tid med en tilhørende faseforskyvning i frekvens. Frekvensen bestemmes av strømkilden og var i hovedsak 1 kHz for apparatene brukt i denne oppgaven. Impedans (Z) er en utvidelse av begrepet elektrisk motstand som er nødvendig når man går fra likestrøms- til vekselstrømsbetraktninger. Impedansen består av to elementer som kalles for motstand (R) og kondensator (C). Motstanden

fungerer tilsvarende en motstand i en likestrømskrets, men er ikke av samme størrelse. Kondensatoren derimot vil lagre ladninger når det blir satt på strøm. Ved høyere spenning vil dens evne til lagring bli større. Denne evnen identifiseres som kapitans.

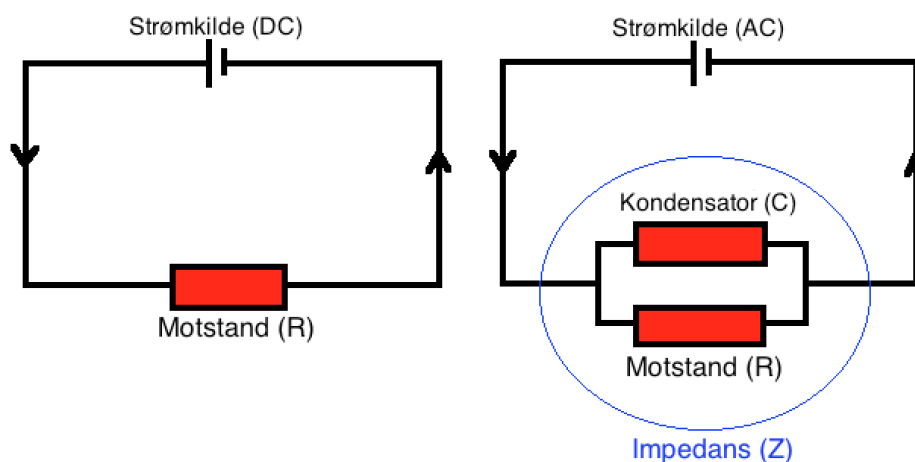


Fig. 3.14: Illustrasjon av likestrøm og vekselstrøm

Matematisk kan impedansen betraktes som et komplekst tall ($Z = R + iX$) hvor realdelen R er elektrisk motstand [Ω] og imaginærdelen X er reaktans [Ω] ($i = \sqrt{-1}$). Reaktansen er avhengig av kondensatorens ladningsevne (kapitansen) og strømkildens frekvens. Motstanden (realdelen) er avhengig av spenningen (U), strømmen (I) og frekvensen (ω) ([1]). For videre forståelse av problemet understrekes det da at både real- og imaginærdelen er avhengig av frekvens.

I samarbeid med Hornbostel testet man forskjellige prøveapparater opp imot hverandre for å bedre forstå deres måleverdier. Escorten, Agilenten, og et Elektrokjemisk Impedans Spektroskopi (EIS) ble testet ved måling på utvalgte betongprøver. Den store måleforskjellen mellom escort og Agilent ble ikke bedre forstått. Derimot konkluderte man med at Agilentens måleverdier viser realdelen av impedansen, men utelater imaginærdelen. Utfordringene oppstår da forskjellige betonger ikke reagerer likt på like frekvenser. Når den totale impedansen ikke er kjent, og reaktansen (imaginærdelen) har forskjellig verdi for forskjellige betonger, kan man risikere å rangere betongene på feil grunnlag.

Prøvenes fuktinnhold viser seg også å gjøre utslag på impedansens verdier. Ved måling av impedans på vannmettede prøver gir alle apparatene samme verdi ved samme frekvens. Desto lavere fuktinnhold prøvene har, desto større avvik er det mellom den riktige impedansen og Agilentens avlesning.

Dette er da grunnet imaginærdelens økende tendens uten at den vises i målingene. Dette er tilfelle for alle betongene, men ikke nødvendigvis med likt utslag. Dr. Jan-Magnus Østvik diskuterer dette i sin doktorgrad [18]. Han presenterer resultater som enstydig indikerer at målinger med en bestemt frekvens vil beskrive impedansen med økende imaginærdel ved redusert fuktinnhold. Dette gjør elektrisk motstandmåling utfordrende på ikkevanntettede prøver.

Sammen med Østvik konkluderte man med at Agilentens målinger likevel skulle være relativt god for dette formålet. Reaktansen vil trolig ikke variere mer en at betongenes rangering vil være den samme som ved en helt riktig måling. Hvorfor målingene var ustabile for de egenuttørkede prøvene greide man ikke å forstå.

3.4.3 Erfaring fra prosedyreutviklingen

Man ble gjennom prosedyreutviklingen oppmerksom på flere påvirkende faktorer for prøvenes elektriske motstand. Disse faktorene vil bli presentert nedenfor.

Eksponeeringstid

Tabell 3.7 viser målinger gjort på egenuttørkningsprøver over 5 minutter (tilfeldige intervaller). Prøvene var kun påtrykket strøm ved måling (ikke gjennom alle 5 minuttene). Den økende elektriske motstanden kommer trolig av fuktavdamping fra betongoverflaten til omgivelsene. Resultatene viser viktigheten av å gjøre undersøkelsene effektivt for å fort beskytte prøvene fra avdamping. Ved testing burde kun én og én prøve bli tatt ut av posene.

Tab. 3.7: Effekt av uttørking på elektrisk motstand

Uttørking av egenuttørkningsprøver	Elektrisk motstandsmålinger over 5 minutter [kOhm]					
	måling 1	måling 2	måling 3	måling 4	måling 5	måling 6
E13	179.1	365	590	708	779	755
E14	133	385	461	413	848	913
E15	38.53	450	562	649	708	905

Ulempen med hydratisering

Ved måling av elektrisk motstand i betong vil hydratiseringsprosessen stadig forandre dens egenskaper. Det er derfor en god idé å ha en målereferanse for jevlig kontroll av måleoppsettet. Referansen må være av et materiale

uten forandring. På denne måten kan man sikre at oppsettet gir likt utslag hver gang. En slik referanse vil også være gunstig ved utarbeidelse av nye prosedyrer som i denne oppgaven. Undertegnede ønsket seg en referanseprøve i forbindelse med prosedyreutvikling. En slik prøve ble ikke anskaffet.

Motstanden i systemet

Den elektriske motstanden i det endelige målesystemet varierer mellom 5 og 10 Ohm. Denne skal i følge Hornbostel være på 0.3 Ohm, og er dermed ikke tilfredsstillt. Verdien er likevel relativt liten, og vil derfor ikke påvirke betongenes rangering nevneverdig. På grunn av dette er det ikke tatt videre hensyn til systemets motstand.

3.4.4 Måling av elektrisk motstand, vannlagret

Måling av elektrisk motstand for vannlagrede prøver ble gjennomført som forklart i prosedyreoppsettet med ecg-gelè (avsnitt 3.4.1, Ecg-gelè).

3.4.5 Måling av relativ luftfuktighet

Måling av relativ luftfuktighet ble gjort etter retningslinjer presentert i en intern prosedyre fra Skanska [22]. Oppsettet er vist i bilde3.15. Ved hjelp av instrumentet Protimeter Hygromaster BLD5800 kunne man måle både relativ luftfuktighet og temperatur i prøvene. Prøvene for RF-måling hadde installerte plastikkhylser som forklart i kapittel 3.3.4. Målingene ble gjort over 3 dager for hver undersøkte termin. Dette var nødvendig for tilstrekkelig tid for probebytter og innstillingstid. Den første dagen i en termin installerte man probene slik at luftfuktighetene skulle innstille seg. Det er anbefalt 12 timer mellom probeplassering og avlesning. Probene ble i dette tilfellet stående i 24 timer. Målingene ble registrert før probene ble kryssbyttet mellom to prøveresepser. Dette ble gjort for å kontrollere og utligne probenes feilmarginer. Prøvene ble deretter målt etter nye 24 timer. For å kontrollere prøvenes faktiske fukttap ble de også veid ved hver termin.

Prosedyren fra Skanska krever regulering av målt RF til en referansetemperatur på 20 °C. Da prøvene i dette forsøket er lagret innendørs, og temperaturen i prøvene varierte mellom 19 °C og 21.5 °C, valgte man å neglisjere denne justeringen. Utslaget for en slik justering er på maksimalt 0,3 prosentpoeng RF. Variasjonen ved probenes kryssbytte er av betydelig større karakter. En slik justering vil dermed ikke gjøre betydelig utslag.

I følge Smeplass finnes en svensk prosedyre for tilsvarende fuktmåling. I denne prosedyren anbefales det 48 timers innstillingstid. Det ble derfor

gjennomført en kontroll av en slik forskjell. Resultatene er presentert i Tabell 3.8. Man ser ingen betydelig forskjell mellom målinger gjort etter 24 eller 48 timers innstillingstid.

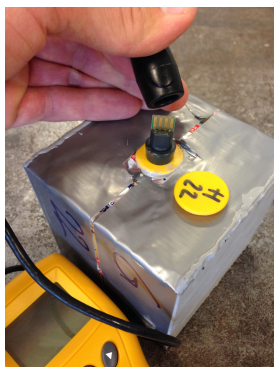


Fig. 3.15: Måling av RF

Tab. 3.8: RF-kontroll

RF Kontroll	24 timer		48 timer		Diff.
	RF	Celcius	RF	Celcius	
G 20	89.4	21.0	89.9	20	0.5
21	87.1	21.0	87.5	20	0.4
22	87.8	21.0	88.4	20	0.6
23	88.4	21.0	90	20	1.6
H 20	87.1	21.0	87.5	20	0.4
21	92.8	21.0	93.3	20	0.5
22	89.7	21.0	91.5	20	1.8
23	88.4	21.0	89.9	20	1.5
I 20	87.1	20	87	19	-0.1
21	93	20	92.8	19	-0.2
22	89.7	20	89.6	20.6	-0.1
23	88.6	20	88.6	20.6	0.0
J 20	89.5	20	89.5	20.4	0.0
21	87.2	20	87.1	20.3	-0.1
22	88	20	88	20.6	0.0
23	88.6	20	88.4	20.7	-0.2

3.4.6 Trykktesting og måling av kapillærabsorpsjon

Det ble gjennomført målinger for trykkfasthet og kapillærabsorpsjon etter retningslinjer i henholdsvis NS-EN 12390-3 [15] og KS70 110 [8](intern prosedyre). Dette ble gjort for kontroll av betongenes fasthetsutvikling og for

sammenlikning av betongens porestruktur og elektriske egenskap. Testing av trykkfasthet ble gjort ved terminene 7, 28 og 84 døgn. Kapillærabsorpsjonen ble vurdert etter ca 56 døgns herding. Prøvenes absorpsjon ble vurdert ved hjelp av et regneark tilhørende KS70 110 [8]. Ingen spesielle omstendigheter trengs nevnes rundt disse testene. Bilde 3.16, 3.17 og 3.18, viser henholdsvis trykkmaskinen brukt, prøveplassering ved testing og prøve etter brudd. Bilde 3.19 viser bilde av betongskivene for testing av kapillærabsorpsjon.



Fig. 3.16: Trykkmaskin



Fig. 3.17: Plassering av trykkprøve



Fig. 3.18: Trykkresultat

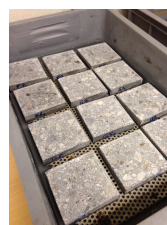


Fig. 3.19: Kapillærsug og porøsitet

3.4.7 Studie av overflatestruktur

I et aluminiumsverk er det stor risiko for kontakt mellom betongoverflater og personell eller maskineri. Dette vurderes som svært farlig da disse kan bli ledere for strøm til jord. Det er i teorien mulig å redusere denne faren ved bruk av overflatebehandling i form av coating. I praksis er dette likevel utfordrende da maskiner og utstyr utgjør stor slitasje på betongenoverflatene. Som vist i likning 2.2 i kapittel 2.1.1, er en komponents elektriske motstand direkte knyttet til kontaktarealet mellom komponenten og strømlederen. Det kan derfor muligens være effektivt med en grovere betongoverflate der dette er mulig. Ved grovere betongoverflate vil kontaktarealet og dermed

ledningevnen reduseres. Det er imidlertid ikke klart om effekten av redusert areal er proporsjonal med utslaget i elektrisk motstand, da dannelsen av elektromagnetiske felt muligens kan redusere dens positive effekt. Grunnet tidspress ble testing av overflatestruktur utført i liten skala sammenliknet med andre studier i denne rapporten. Kun et vannlagret prøvesett ble modifisert for slik testing. Det ble saget spor i en av prøvenes sideflater, slik at kontaktarealet for denne siden ble redusert med 50%. Det ble gjort målinger før og etter reduksjonen av arealet for sammenlikning. Se Figur 3.20 og 3.21 for illustrasjon av overflatestruktur.

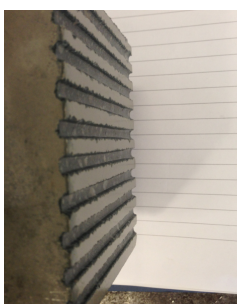


Fig. 3.20: Overflatestruktur I



Fig. 3.21: Overflatestruktur II

Resultater og Diskusjon

Gjennom laboratoriearbeidet ble det samlet inn store mengder data. For å tydeliggjøre sammenhengene funnet mellom disse, vil kun relevant data for diskusjon og konklusjon bli presentert her. Hensikten med dette kapitlet er å belyse viktige sammenhenger slik at resultatene blir forstått på en enkel og tydelig måte. De resterende resultatene er lagt ved i appendiks.

Resultatdiskusjonen er hovedsakelig presentert i fire deler. De tre første kapitlene er delt inn etter betongens fukttilstand. Et siste avsnitt vil deretter gjøre en generell sammenlikning av resultatene på tvers av fukttilstandene.

Resultatene for elektrisk motstand vil i hovedsak bli vurdert basert på to terminer. Problemer med måleprosedyren førte til uregistrerte resultater ved de to første terminene. Optimalt sett skulle minimum tre terminer vært registrert slik at eksponensielle sammenhenger kunne blitt oppdaget. For en bedre forståelse av betongenes elektriske motstand burde prøvene også vært vurdert over et lengre tidsrom, da deres egenskaper ikke er stabile etter 84 døgn.

Det informeres om at betongmiksene ofte vil bli referert til kun med deres miks ID (f. eks. Miks A). En oversikt over de forskjellige betongmiksene er blandt annet presentert i forklaringen på høyre side i Figur 4.1.

4.1 Elektrisk motstand i vannlagret betong

Det ble gjennomført målinger på vannlagrede prøver ved alle fire terminene (7,28,56 og 84 døgn). Testene ga gode og stabile målinger og er vurdert som godt representative for prøvenes faktiske motstand i denne tilstanden. Resultatene er presentert i Figur4.1.

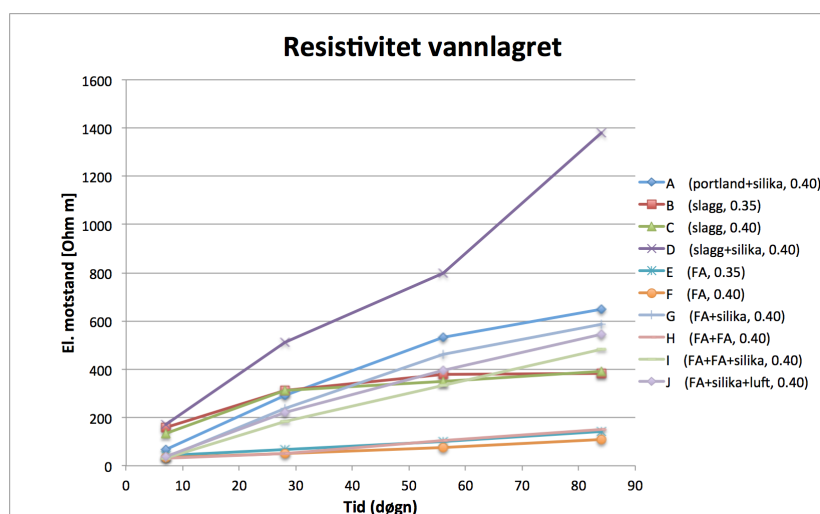


Fig. 4.1: Elektrisk motstand i vannlagrede prøver (Større format i A.1.)

Betongene lagret i vannbad er tilnærmet vannmettet ved testing. Utslaget i elektrisk motstand er dermed hovedsakelig avhengig av betongenes mikrostruktur og tilhørende ionekonsentrasjon.

Generelt kan man se en tydelig økning i elektrisk motstand over tid. Dette stemmer godt med teorien om hydratiseringsgrad og dens påvirkning på betongens elektriske egenskaper. Man ser også en tydelig differanse mellom betongmiks D og de resterende miksene. Betongen av slaggsement med 10% erstatning av sement med silika er dermed vurdert til å ha gunstig mikrostruktur og ionekonsentrasjon.

Litteraturen presentert i kapittel 2 er hovedsakelig basert på undersøkelser gjennomført på vannlagrede prøver. Ved vurdering av vannlagrede prøver i denne oppgaven burde man derfor kunne se liknende utslag. For å tydeliggjøre disse utslagene er betongenes verdier ved siste termin plottet i et stolpediagram i Figur 4.2. De neste delkapittlene vil, basert på denne grafen, drøfte forskjellene i elektrisk motstand med utgangspunkt i deres resepttekniske forskjeller. Ved vurdering av de forskjellige materialparameterene kommer deres virkning tydeligst frem ved å vurdere miksene med lik sement opp imot hverandre. Man vil derfor først drøfte slaggsementene og flyveaskesementene som egne grupper, for så å gjøre en samlet vurdering.

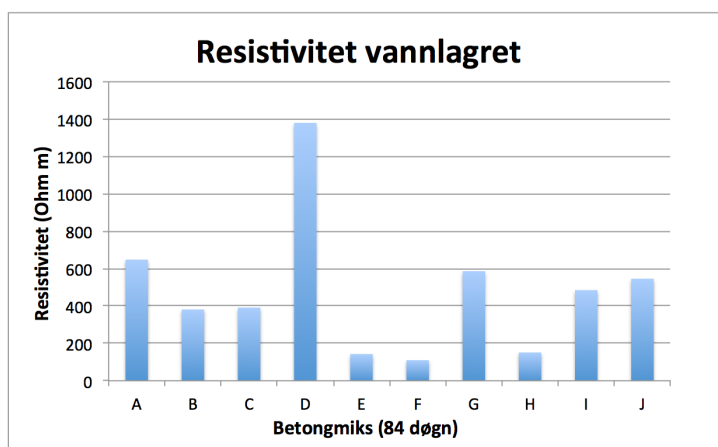


Fig. 4.2: Rangering av vannlagrede prøver (84 døgn)

Slaggsement

Betongmiksene B, C og D består av slaggsement. Ved sammenlikning av miks C og D viser slaggbetongene en kraftig økning i elektrisk motstand ved bruk av silika. Effekten blir tydelig mellom 7 og 28 døgnterminen, og bidrar til positiv utvikling etter dette (se Figur 4.1). Dette stemmer godt med tidligere funn, som hevder at bruk av silika i betong skal gi et tidlig og tydelig utslag for betongens elektriske egenskaper. Ved vurdering av miks B og C viser forandringen i v/b -tallet uventet utslaget. Det lavere v/b -tallet gir her et negativt utslag på den elektriske motstanden. Det finnes imidlertid faktorer som kan påvirke dette utslaget i uventet retning. Et eksempel på en slik faktor kan være tilslag/pasta- forholdet, da dette ble justert ned fra $v/b=0.40$ til $v/b=0.35$ (se Tabell 3.2). Dette ble gjort for å sikre gode reologiske egenskaper ved støping av prøvestykkene. Da motstandsverdiene er såpass like, vil også prøveavvik kunne påvirke rangeringen her.

Flyveaskesement

Betongmiksene E til J består av sement med 20% flyveaske. Betongen viser trender som stemmer godt med tidligere resultater. Miks E presterer bedre enn F da den har lavere v/b -tall. Det store spranget fra miks F til G er et resultat av 10% erstatning av sement med silika. Man kan også her se at silikaens utslag påvirker betongen tydelig fra 7 døgnterminen og utover (se Figur 4.1). Miks H er en tilsvarende miks som F, men med enda 10% erstatning av sement med flyveaske. Resultatene mellom disse blir relativt like. Den lille positive effekten kommer trolig av flyveaskens gunstige ionekonsentrasjon sammenliknet med sementen. Miks I består

av FA-anlegg med både flyveaske- og silikaerstatning. Den har tydelig bedre elektrisk motstand enn FA-blandingene uten silika. Den litt lavere prestasjonen sammenliknet med miks G, kommer trolig av flyveaskens reduserte hydratiseringsrate og dermed lavere hydratiseringsgrad. Miks J presterer i liknende grad som miks G. Forskjellen mellom disse reseptene er bruken av luftinnførende middel og dermed forskjellig luftinnhold. I fersk tilstand hadde G et luftinnhold på 1,8%vol og J på 4,7%vol. Tidligere resultater indikerer at et økt luftinnhold skal gi en positiv effekt for betongens motstand dersom den har en kapillærmethning på 65-90%. Det er derfor ikke motsigende at en positiv effekt uteblir i vannmettet tilstand.

Sammenlikning av betongene

Ved sammenlikning av betongene vil man forstå deres relative forskjeller. Dette er viktig for rangering av betongenes elektriske egenskaper.

Portlandsementen presterer overraskende godt i vannlagret tilstanden. Portlandsements høye hydratiseringsrate kan være årsaken til dens gode prestasjon sammenliknet med flyveaskebetongene. Den presterer spesielt bedre enn FA-miksene uten silika. Basert på tidligere undersøkelser hadde man en forventning om at FA-miksene med silika skulle prestere bedre enn portlandsementen ved siste termin. Da det kun ble produsert en miks med ren portlandsement, er det vanskelig å vurdere effekten silika har på dens prestasjon.

Slaggsementen er forventet å gi et større startutslag enn flyveaske ved utvikling av elektrisk motsand. Det stemmer derfor at FA-miksene, ved 84 døgn, presterer dårligere enn sine tilsvarende slaggmikser.

Bruk av silika gir et stort utslag for alle betongmiksene, men utslaget er ikke likt for alle. Silika gir det desidert største utslaget i elektrisk motstand ved kombinasjon med slaggsement. Flyveaskebetongene får imidlertid større prosentvis forandring fra silikaerstatningen og kan i så måte ende opp med et større utslag over tid. Generelt kan man se at alle betongene med silika presterer bedre enn betongene uten silika. Utslaget ved bruk av silika stemmer derfor også godt med teorien om at de trefoldige betongreseptene presterer godt. Da alle de trefoldige miksene i denne oppgaven inneholder silika er det vanskelig å vurdere om utslaget er et resultat av silikaen alene eller den trefoldige kombinasjonen som helhet.

Det er vanskelig å vurdere betongenes videre utviklingen og rangering etter 84 døgn. Fra Figur 4.1 ser imidlertid miks D, J og I ut til å ha de beste utsiktene. Betongenes hydratisering vil fortsatt påvirke deres elektriske motstand. Den videre utviklingen er imidlertid forventet å være lavere enn utviklingen de første 84 døgnene. Mulighetene er allikevel tilstede for en

forandring av rangeringen. Betongmiks D har et tydelig forsprang på de andre betongene, men dens utvikling etter siste termin er ikke forventet å være like god som for flyveaskebetongene. Avhengig av flyveaskenes kvalitet og egnethet kan den muligens konkurrere med slaggsementen i et lengre tidsperspektiv .

Porestrukturens påvirkning på elektrisk motstand

Elektrisk motstand i betong er avhengig av betongens porestruktur. Ved undersøkelse av betongenes kapillærabsorpsjon beregnet man et motstandstall. Motstandstallet er ikke en generell materialeegenskap, men et uttrykk for kapillær transporthastighet. Betongen får en verdi avhengig av hastigheten den suger vann. Ved høyt motstandstall suger betongen sakte vann. Transporthastigheten er avhengig av porestørrelsesfordelingen og vil på denne måten beskrive porestrukturen. Fine porer burde dermed gi både høy elektrisk motstand og langsom kapillær transport.

Man ønsket å finne en sammenheng mellom betongenes motstandstall og deres elektriske motstand. Prosedyren ble gjennomført på vannlagrede prøver og resultatene må derfor også vurderes mot motstandsmålinger for slike prøver. Figur 4.3 viser betongenes motstandstall opp imot deres elektrisk motstand.

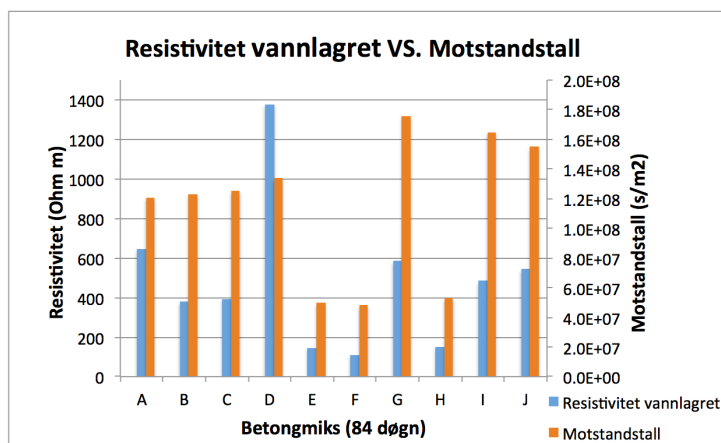


Fig. 4.3: Sammenheng motstandstall og elektrisk motstand (84 døgn)

Utfordringen ved tolkning av disse sammenhengene oppstår da betongenes resepttekniske ulikheter resulterer i forskjeller uavhengig av porestrukturen. Disse forskjellene vil reflekteres i målingene for elektrisk motstand, men ikke i motstandstallet direkte. For å enklere kunne vurdere porestruk-

turens virkning er det derfor effektivt å vurdere sementgruppene hver for seg før man gjør en generell sammenlikning.

Ved vurdering av slaggsementene ser man at betongene med høyere elektrisk motstand har høyere motstandstall. De relative forholdene er imidlertid ikke like. Miks D får en større økning i elektrisk motstand fra silikaerstatningen enn hva økningen i motstandstallet tilsier. Ettersom silika også bidrar med en gunstig ionekonsentrasjon, skyldes utslaget muligens dette.

Ved vurdering av FA-miksene ser man også liknende trender. Her resulterer imidlertid silikatilsetningen i et kraftig forhøyet motstandstall med en mindre tilhørende økning i elektrisk motstand.

Man ser at motstandstallet for flyveaskene med silika er høyere enn for slaggsementene med silika. Slaggmiks D har likevel høyere elektrisk motstand. Man kan derfor ikke bruke betongenes motstandstall til en direkte rangering av deres resistivitet. Det er likevel tydelig at porestrukturen er påvirkende for betongens ledningsevne. Tettere porestruktur gir da høyere elektrisk motstand for betongen.

Trykkfasthetens sammenheng med elektrisk motstand

I følge litteraturen kan det være en indirekte sammenheng mellom betongens trykkfasthet og dens elektriske motstand. Figur 4.4 presenterer betongenes trykkfasthet og elektriske motstand etter 84 døgn. Resultatene gir ingen gode indikajsoner for en slik sammenheng. Noen utslag kan stemme med forventningene, men den relativt lave forskjellen i trykkfasthet er ikke avgjørende for de store variasjonene i elektrisk motstand. Det er tydelig at andre faktorer er viktigere i denne sammenheng.

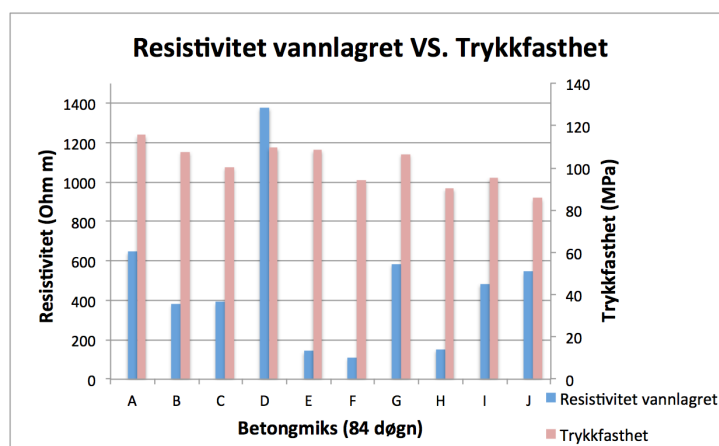


Fig. 4.4: Sammenheng trykkfasthet og elektrisk motstand (84 døgn)

Overflatestruktur

En reduksjon i kontakteareal er forventet å øke den elektriske motstanden i en gjenstand. Resultatet av en grovere betongoverflate er redusert kontaktareal. Hvordan utslaget av denne reduksjonen gjenspeiles i elektrisk motstand er likevel usikkert, da det kan oppstå elektromagnetiske felt. Tabell 4.1 viser resultatene fra forsøket der miks D fikk sitt kontaktarealet redusert med tilnærmet 50%. Målingene ble gjennomført både med gummiskiver og med gelè.

Tab. 4.1: Resultater ved forskjellig overflatestruktur

Miks D	El. Motstand uten spor Areal = 100%		El. motstand med spor Areal = 50 %		Prosentmessig forandring i el. motstand (%)	
	Gelè	Gummiskive	Gelè	Gummiskive	Gelè	Gummiskive
9	13.1	14.6	12.66	13.36	-3.4%	-8.5%
10	13.03	12.97	12.26	13.7	-5.9%	5.6%

Resultatene viser at en reduksjon i kontaktareal ikke resulterer i tilsvarende reduksjon i elektrisk motstand. Hvorfor den elektriske motstanden i flere av tilfellene er lavere ved mindre kontaktareal er trolig en respons på andre faktorer. Dette kan være en forandring i temperatur eller fukttilstand gjennom utarbeidelsen av spor i betongoverflaten. Man konkluderer med at elektrisk motstanden er omtrent upåvirket av en arealreduksjon på 50%, dersom prøvene er vannmettet. Det er imidlertid uvisst om overflatestrukturen kan gjøre utslag ved andre fukttilstander.

4.2 Elektrisk motstand i egenuttørket betong

Prøvene lagret for egenuttørking kan gi svært god informasjon ved rangering av betongenes elektriske motstand. Disse prøvene representerer betongen slik den ofte opptrer naturlig i en konstruksjons kjerne. Ettersom betongens vanninnhold har stor effekt på den elektriske motstanden, kan betongenes egenuttørkingsevne være svært relevante ved valg av betong. De vannmettede prøvene inkluderer ikke effekten av slike egenskaper. Tilgjengeligheten på vann vil også være en viktig forutsetning for betongens hydratiseringsgrad. Vurderingen av egenuttørkede prøver vil derfor gi en mer relevante rangeringen av materialparametere enn hva de vannlagrede prøvene gjør. Figur 4.5 illustrerer prøvenes målte motstandsverdier.

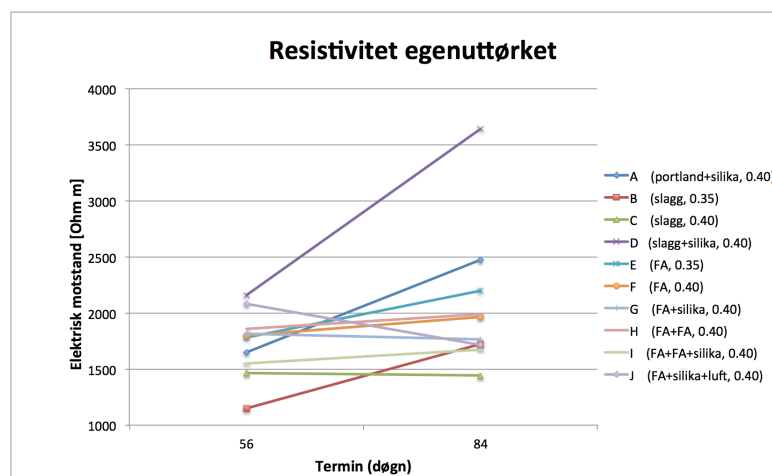


Fig. 4.5: Elektrisk motstand for egenuttørkede prøver (Større format i A.1.)

Betongene viser generelt høyere motstandsverdier her enn i vannlagret tilstand. Dette henger sammen med deres reduserte vanninnhold. Man ser også en tydelig stigende trend i elektrisk motstand med økende hydratiseringsgrad.

En sammenlikning av vannlagrede og egenuttørkede prøver er presentert i Figur 4.6. Resultatene fra egenuttørkingen rangerer betongene noe annerledes enn de vannlagrede prøvene. Resultatene ser likevel ut til å stemme nokså godt med både de vannlagrede prøvene og med tidligere studier. Også lavere v/b-tall for slaggsementen resulterer i forventet utslag her. Som for de vannlagrede prøvene presterer betongmiks D bedre enn de andre miksene. Hvorfor miks J har en kraftig synkende tendens er vanskelig å forstå. Det har trolig skjedd en feil ved 56 døgnterminen for denne betongen.

Et uventet utslag er effekten av silika på FA-betongene. Erstatningen av sement med silika utgjør et stort positivt utslag for slaggsementen, men er heller negativt for FA-sementen. Et negativt utslag fra erstatning av FA-sement med silika strider imot tidligere forskning. I et forsøk på å forstå silikaerstatningens uventede utslag plottet man elektrisk motstand mot prøvenes relative luftfuktighet. Figur 4.7 viser dette. Selv om både miks G og I har relativt høye RF-verdier er det vanskelig å se tydelige trender i denne sammenlikningen. Maksimal og minimal RF-verdi er på henholdsvis 91.6% og 86.2%. Trolig er denne variasjonen for liten til å gjøre synlige utslag i resultatene. Flere avanserte prosesser skjer gjennom hydratiseringsprosessen for de ulike betongene. En kombinasjon av effekter fra faktorene hydratiseringsgrad, fuktinnhold, fuktfordeling, porestruktur og ione konsentrasjon fører til resultater uten tydelige indikasjoner.

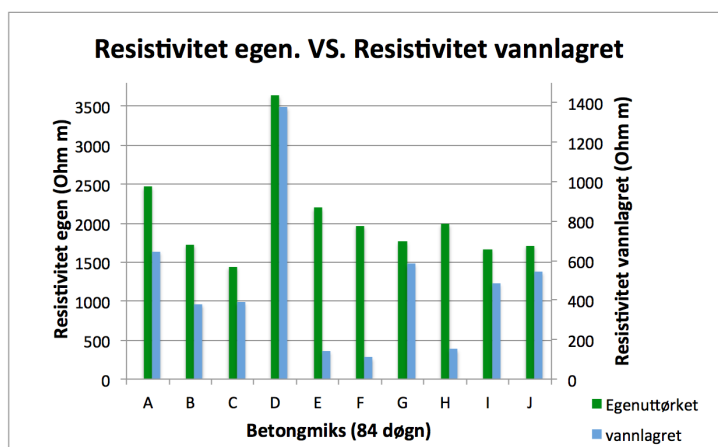


Fig. 4.6: Elektrisk motstand for vannlagret og egenuttørket tilstand

Ofte motvirker også noen av disse faktorene hverandre. Eksempel på slike motvirkende faktorer kan være possolanenes resulterende økte porevolum og frie vannmengde. Dette resulterer i høyere elektrisk ledningsevne. Utslaget motvirkes imidlertid av en også finere porestruktur. Man har ikke grunnlag for en god vurdering av disse prosessene her.

Ettersom miks D også presterer svært godt i egenuttørket tilstand, er betongene trolig påvirket av porestruktur og ionekonsentrasjon i høy grad også ved RF ned til 85%. Dette er da det laveste registrerte fuktinnhold blandt de egenuttørkede prøvene.

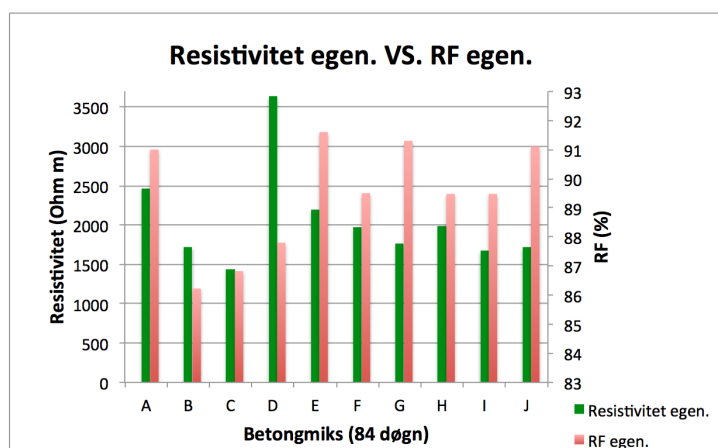


Fig. 4.7: Sammenheng RF og elektrisk motstand

For senere konklusjon skal det nevnes at prosedyren for måling av elektrisk motstand ikke fungerte optimalt for de egenuttørkede prøvene.

Avlesningene var ikke stabile og ustabiliteten var relativt stort sammenliknet med betongenes registrerte motstandsverdi. Med dette menes ikke at resultatenes indikasjoner er feil, men at deres vekt må vurderes dersom resultatene avviker tydelig fra andre og mer solide indikasjoner.

4.3 Elektrisk motstand i delvis uttørket betong

Prøvene lagret for delvis uttørking er tenkt å illustrere betongenes elektriske motstand etter uttørking gjennom betongoverflaten. Ved rangering av betongene i slik tilstand vil man, i tillegg til effekten av porestruktur, ionekonsentrasjon og egenuttørking, vurdere dens evne til å avdampe fukt. Viktig datagrunnlag ved en slik vurdering vil være betongenes RF-verdier og vekttap, da disse beskriver betongens fukttilstand. Vekttapet er da vurdert som avdampning av vann fra en betongprøve til omgivelsene.

Når man antar at motstandstallet gir uttrykk for poresystemets finhet, er dette indirekte beskrivende for betongens avdampningsevne. Da motstandstallene er beregnet for vannlagrede prøver, og disse kan avvike fra motstandstallene for de delvis uttørkede prøvene, har man vært forsiktig med bruk av motstandstallene i denne vurderingen.

Resultater fra målingene på delvis uttørkede prøver er presentert i Figur 4.8. Alle prøvene viser stor økning i elektrisk motstand fra egenuttørket til delvis uttørket tilstand, og rangeres tydelig annerledes enn både vannlagret og egenuttørket betong. Betongmiks I, J og C skiller seg ut som de beste betongmiksene i denne tilstanden. Disse presterte middelmådig ved vannlagring og dårligere enn middels ved egenuttørking. Resultatene indikerer også at høyere v/b -tall fører til økt elektrisk motstand i delvis uttørket tilstanden. Dette er trolig grunnet en mer åpen porestruktur og en økt avdampningsevne.

Figur 4.9 viser differansen i elektrisk motstand mellom de delvis uttørkede prøvene og de vannlagrede prøvene (svarte stolper i diagramm). På denne måten ser man vekk ifra egenskaper som er direkte relatert til materialparameterene, og fokuserer kun på effekten av fukttilstand. Differansen i elektrisk motstand sammenliknes med RF-verdiene for de delvis uttørkede prøvene (røde stolper i diagramm). Elektrisk motstand vises da på den venstre y-aksen og RF-verdiene vises på den høyre y-aksen.

Resultatene fra en slik fremstilling viser ingen tydelige trender, og man finner ingen sammenheng mellom betongenes elektriske motstand og RF-verdiene. Dersom differansen i elektrisk motstand (delvis-lagret) derimot vurderes opp imot prøvenes vekttap, kan man se sammenhenger. Dette er illustrert i Figur 4.10.

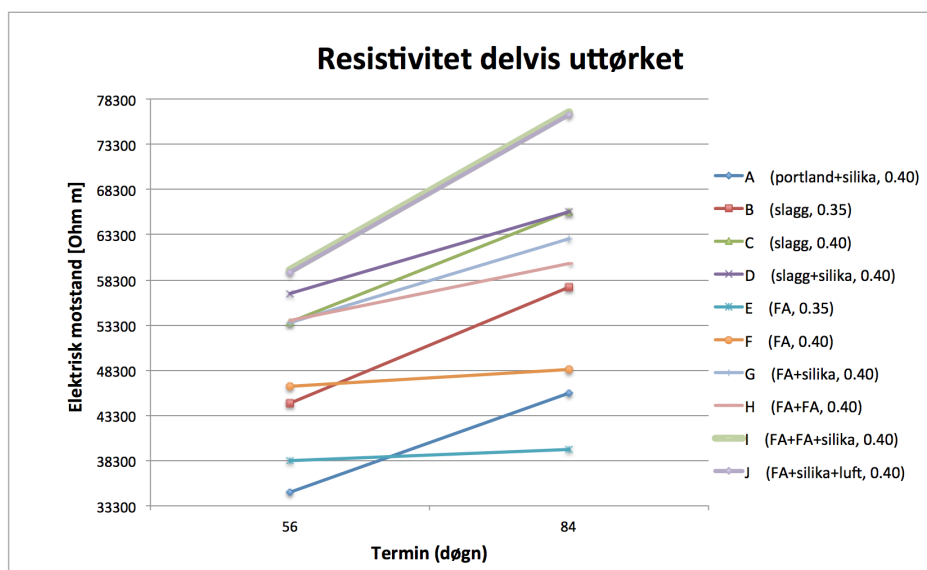


Fig. 4.8: Elektrisk motstand i delvis uttørkede prøver (Større format i appendiks)

Grafen viser tydelig at betongene med høyt fukttap har høy elektrisk motstand. Sammenhengen er likevel ikke dominerende nok for en rangering av betongene basert på vekttap alene, da betonger med ulike materialer responderer forskjellig på like fukttap. Man ser for eksempel at FA-betongene med silika må ha et lavere fukttap for økning i elektrisk motstand enn hva FA-betongene uten silika trenger for å oppnå den samme økningen. Dette henger trolig sammen med betongenes porestruktur og hvordan poreløsningens kontinuitet forandrer seg ulikt i ulike porestrukturer.

RF-verdiens dårlige indikasjoner for elektriske motstand henger trolig sammen med betongens tetthet. Betongens generelt trege evne til å omfordele fukt resulterer i lang tid før overflatetørkingen blir visende i kjernens RF-nivåer. Mistanken om treg omfordeling styrkes også da RF-verdiene for delvis uttørkede prøver rangeres omtrent likt med RF-verdiene for egenuttørkede prøver, selv om betongene har betydelig forskjellig fukttap i vekt. Da den tørre betongoverflaten også har betydelig større elektrisk motstand enn kjernen, vil effekten av kjernens fuktnivå bli svært liten (sistnevnte vil bli diskutert nærmere i kapittel 4.4). En sammenlikningen av RF for egenuttørket og delvis uttørket prøver er presentert i Figur 4.11. Man ser tydelig at prøvene rangeres nesten helt likt.

Selv om sammenhengen mellom RF og elektrisk motstand er dårlig, ser man imidlertid at miksene I og J er blandt betongene med størst RF reduksjon. Disse har også størst økning i elektrisk motstand fra egenuttørket-

til delvis uttørket tilstand, i tillegg til størst vekttap ved delvis uttørking. Muligens er disse bedre til å omfordele fukt og tørker fortere enn de andre betongene.

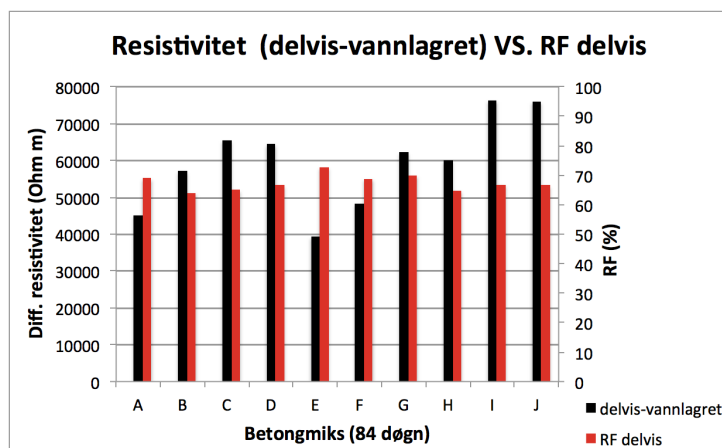


Fig. 4.9: Differansen mellom elektrisk motstand for vannlagrede og delvis uttørkede prøver, opp imot RF for delvis uttørkede prøver (84 døgn)

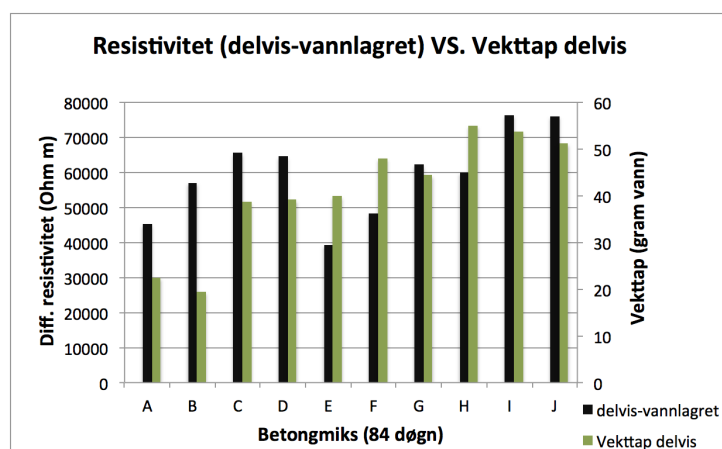


Fig. 4.10: Differansen mellom elektrisk motstand for vannlagrede og delvis uttørkede prøver, opp imot de delvis uttørkede prøvene sitt vekttap (84 døgn)

Betongenes motstandstill er forventet å påvirke betongens uttørkingshastighet. Etersom motstandstillene i denne oppgaven ikke direkte representerer de delvis uttørkede prøvene, ønsker man ikke å legge mye vekt på disse her. Det er likevel noe motsigende at miks I og J er blandt miksene med høyest avdamping, når de også har blandt de høyeste motstandstillene i vannlagret tilstand (se A.5. for rangering av motstandstill).

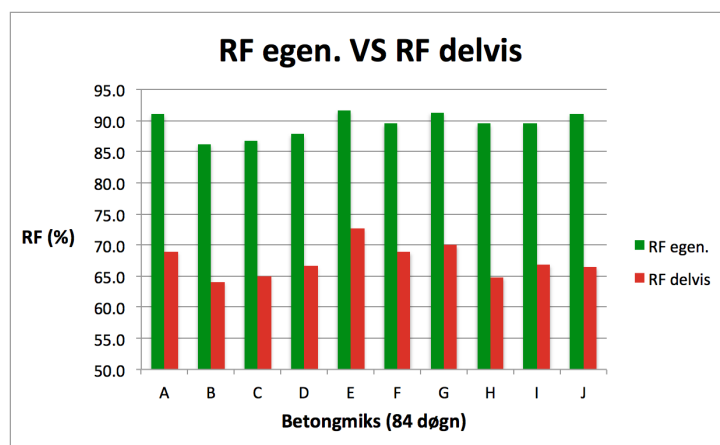


Fig. 4.11: RF for egenuttørkede og delvis uttørkede prøver (84 døgn)

4.4 En generell sammenlikning av fukttilstandene

Resultatene i denne rapporten indikerer tydelig at hydratiseringsgrad og tørking bidrar til økt elektrisk motstand. Det er også tydelig at betongenes rangering blir ulike ved forskjellige fukttilstander. De ulike rangeringene kan alle være riktige, men kun en betongmiks kan brukes i produksjon. Ved å sammenlikne elektrisk motstand i de forskjellige fukttilstandene vil man se forskjellene mellom disse. Figur 4.12 presenterer denne sammenheng.

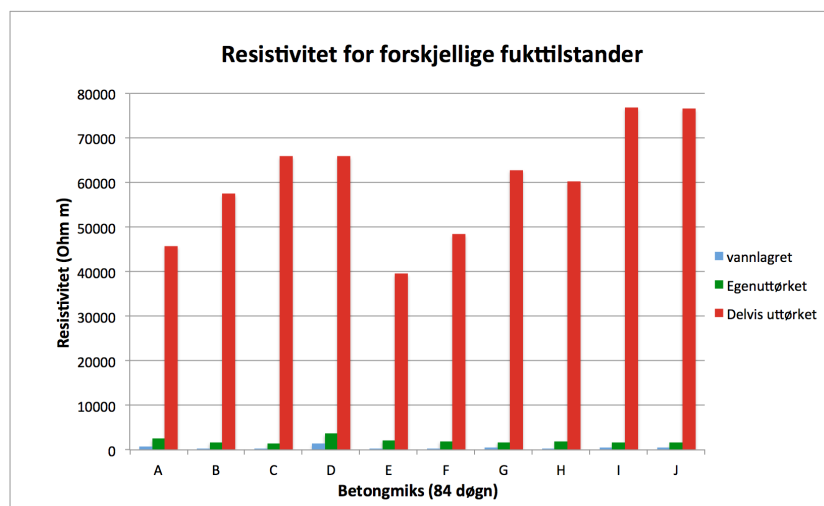


Fig. 4.12: Elektriske motstand i ulike fukttilstander (84 døgn)

Ved å plote de forskjellige fukttilstandene opp imot hverandre kommer det frem at de delvis uttørkede prøvene har mange ganger høyere elektrisk motstand enn både vannlagrede og egenuttørkede prøver. Prøveresultatene for egenuttørket og delvis uttørket tilstand varierer i et området fra 1443.3 Ohm til 76813.3 Ohm ved 84 døgns terminen. Den beste miksen i delvis uttørket tilstand har over 21 ganger høyere elektrisk motstand enn den beste miksen ved egenuttørking. Selv den dårligste miksen ved delvis uttørking har nesten 11 ganger høyere elektrisk motstand enn denne.

Ettersom betong i de fleste situasjoner opptrer i både delvis- og egenuttørket tilstand, vil dimensjoner, armeringsforutsetninger og miljøpåvirkninger være med å bestemme betongkonstruksjonens egenskaper. Figur 4.13 illustrerer hvordan elektrisk motstand kan øke i takt med betongtykkelsen strømmen må passere. Grafens to øvre linjer representerer en konstruksjon med 10 cm delvis uttørket betong i overflaten, mens de to nedre representerer en konstruksjon med 5 cm delvis uttørket betong i overflaten. Videre innover er betongen regnet å være egenuttørket. Utviklingen er basert på resistivitsverdiene for prøve D og I etter 84 døgn. Disse betongene er brukt som eksempel da miks I har den høyeste motstanden i delvis tørr tilstand og miks D har den høyeste motstand i egenuttørket tilstand. Disse miksene gir den mest konservative sammenlikningen blandt de undersøkte betongene.

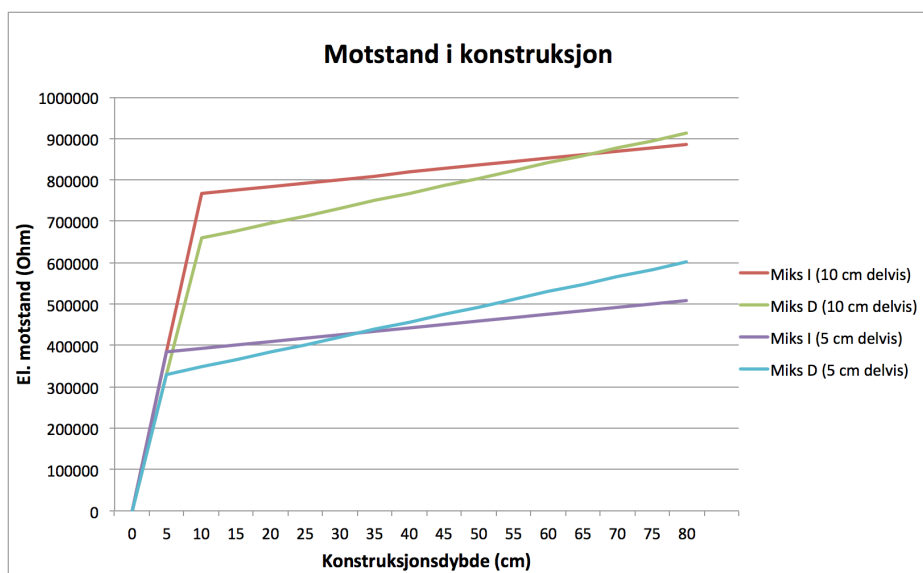


Fig. 4.13: Elektrisk motstand avhengig av betongdybde

Grafen viser et betydelig startutslag i de første 5 cm eller 10 cm innover i konstruksjonen. Dette er et resultat av den delvis uttørkede betongen. Videre innover vil betong D, med best egenskaper i egenuttørket tilstand, prestere bedre enn miks I. Miks D har derfor en brattere kurve enn I her. Tilfellene med 5 eller 10 centimeter delvis uttørket overflate vil trenge en dybde på henholdsvis 33 cm og 63 cm før miks I og D oppnår tilnærmet lik elektrisk motstand. Ved grunnere dybder enn dette vil miks I ha best isolerende egenskap, og ved dypere dybder vil miks D ha best isolerende egenskap. Ved kalkulasjon basert på resultatene fra 56 døgns terminen, vil dybdene bli på ca 25 og 50 centimeter for henholdsvis 5 eller 10 centimeter uttørket overflate. I perioden før 56 døgn vil betongen være mer påvirket av egenuttørkede tilstand desto nærmere man er konstruksjonens støpedato. Påvirkningen fra betongenes egenuttørkede egenskap vil bli mindre etterhvert som betongen tørker. Dersom betongkonstruksjonen beskyttes mot fuktpåkjenninger, vil eksempelet også bli mer konservativ over tid.

Hydro sin nyeste elektrolysehall på Sunndalsøra, SU4, hadde et krav på 50 mm betongoverdekning. Dersom strømmen skal finne jord via betongen i et slikt anlegg, kan man regne med at den må bevege seg igjennom minst to overdekningstykkelser. Dette tilsvarer 100 mm. Transporten av strøm ved kontakt med armering regnes å være svært god og neglisjeres i denne sammenheng. De to overdekningene er ikke nødvendigvis uttørket i samme grad, men man vil likevel basert på eksempelet over kunne si at 250 og 330 mm betong er relativt store tykkelser.

4.5 Resultatoppsummering

Ved vurdering av vannlagret betong, bekreftes det at betongens materialparametere har direkte innvirkning på dens elektriske egenskaper. Betongmiks D (slag, 10% silika, $v/b=0.40$) presterer tydelig best i denne tilstanden. De vannlagrede prøvene viser at silika gir positiv virkning sammen med både slaggsement og FA-sement. En økning i flyveaskemengden for FA-betongen viser også positive utslag. Redusert v/b -tall gir en positiv virkning for flyveaskebetongene og vil trolig også påvirke betongen med slaggsement positiv. Det er tydelig at betongenes motstandstall har sammenheng med deres elektriske motstand, men andre materialtekniske parametere påvirker også betongenes rangering i denne tilstanden.

De egenuttørkede prøvene har generelt høyere elektrisk motstand enn de som er vannlagret. En ny rangering bekrefter at betongenes fukttilstand og evne til egenuttørking har betydning for betongens elektriske motstand. Det er likevel tydelige fellestrekk mellom rangeringen for vannlagrede prøver

og de egenuttørkede prøvene. Slaggmiksen med silika (miks D) presterer best også her. Trolig er dermed porestruktur og ionekonsentrasjon en viktig faktor ved RF ihvertfall ned til 85 %. Dette er den laveste RF verdien målt for de egenuttørkede prøvene. Hvorfor bruk av silika resulterer i en negativ endringer for flyveaskebetongene er ikke forstått.

Gjennom undersøkelser på de delvis uttørkede prøvene ble det igjen bekreftet at fuktnivået og uttørkingen påvirker betonger ulikt. Det er generelt stor forskjell i elektrisk motstand mellom delvis uttørkede og de andre prøvene. Betongene hadde også en annen rangering her enn begge de tidligere tilfellene. Forskjeller i betongenes avdampingssevne bestemmer i stor grad denne rangeringen. Blandt betongene testet for delvis uttørkning, er det betongene med størst fukttap som viser høyest elektrisk motstand. Betongmiks I (10% flyveaske, 10% silika) og betongmiks J (10% silika, og 5% luft) har høyest og tilnærmet lik elektrisk motstand i denne tilstanden.

Konklusjon

I det store og hele er det betongens fukttilstand og ikke materialkomponentene, som bestemmer dens egnethet som elektrisk isolator i et aluminiumsverk. Betongoverflatene i et slik anlegg vil være delvis uttørket og ha betydelig større elektrisk motstand enn den egenuttørkede kjernen. Kun i situasjoner med svært ung betong, i betong utsatt for fukt, eller ved unormalt kraftige dimensjoner vil betongens materialkomponenter kunne påvirke rangeringen av de anbefalt betongene direkte. Da materialparameterene har stor innvirkning på betongens fuktavdampende evne, vil riktig bruk av disse likevel utgjøre store fordeler for betongens isolerende egenskap.

Med bakgrunn i eksempelet presentert i 4.4 vil betongenes rangering i delvis uttørket tilstand være avgjørende allerede før betongens 56 dognstermin. Da den store forskjellen mellom kjerne og overflate er et resultat av fuktforskjeller, er det svært viktig å til enhver tid beskytte betongen mot kontakt med vann. Dersom dette gjøres vil betongen prestere bedre og bedre over tid dersom omgivelsene er stabile.

Teoretisk sett vil den beste betongen for et aluminiumsverk ha høy avdampningsevne og tett porestruktur. På denne måten vil man oppnå gode elektriske egenskaper både i den egenuttørkede kjernen og i den delvis uttørkede overflaten. Dette er vanskelig i praksis, da disse egenskapene motstrider hverandre. Betong med tett porestruktur vil trenge lengre tid for avdampning og tørking grunnet lavere diffusivitet. På den andre siden vil betonger egnet for rask avdampning ha fordel av en porøs og åpen porestruktur.

Flyveaskebetongene med ekstra flyveaske og enten silikaerstatning eller luftinnførende middel presterte best blandt betongene i denne undersøkelsen (miks I og J). Disse har også det høyeste vekttapet etter 84 døgn. Trolig

vil en FA-betong med 10% ekstra flyveaskeerstatning, 10% silikaerstatning og 5%vol luftinnhold prestere bedre enn både miks I og J, da den vil få et positive utslaget fra samtlige av disse tiltakene.

Det kan nevnes at slaggbetongen med silika (miks D) viste best isolerende egenskap for de egenuttørkede og vannlagrede prøvene ($RF > 85\%$). For elektrisk isolasjon med betong i slik fukttilstand vil denne derfor være best egnet. Dette er ikke av interesse for normal aluminiumsproduksjon.

Reseptene i denne oppgaven ble i utgangspunktet designet for illustrasjon av tilsetningsmaterialenes direkte innvirkning på betongens elektriske motstand. De forskjellige behandlings- og lagringsforutsetningene skulle gi informasjon om betongenes evne til egenuttørking og avdamping, og den tilhørende responsen i elektrisk motstand. Betongenes fuktforutsetning hadde større betydning en først antatt og man så i ettertid at betongene burde vært designet for maksimalisering av deres avdampningsevne. Slike betonger vil trolig oppnå bedre egenskaper for elektrisk isolasjon enn de undersøkt i denne oppgaven. Det er viktig å understreke at avdampningsevnen ikke kan brukes for å rangere betongene alene, da betongene responderer forskjellig på like fukttap. Dersom nye undersøkelser blir gjennomført må derfor betongenes elektriske motstand måles.

Man kan ikke anbefale produksjon av betong med grovere overflatetsstruktur basert på resultatene i denne undersøkelsen.

Videre arbeid

I arbeidet med denne oppgaven er det oppdaget flere potensielle problemstillinger for videre arbeid. Disse er kort oppsumert her.

Evne til fuktavdamping - Det er forstått at fuktinnholdet er en avgjørende faktor for betongenes evne som elektrisk isolator. Ved nye studier burde det fokuseres på betongenes avdampingsegenskaper og en eventuell optimalisering av denne. Betongens elektriske motstand må likevel måles for endelig rangering. En betongmiks med porøs og åpen porestruktur er forventet å gi gode resultater her. Det kan også være interessant å undersøke muligheten for bruk av polypropylenfiber for å gjøre betongen ytterligere porøs og åpen, da dette muligens vil bedre transporten av fukt ut av konstruksjonen. Kanskje kan polypropylenfibrene også gi en liknende effekt med luftinnførende middel som er diskutert i avsnitt 2.2.3.

Det er også av interesse å undersøke tørkehastigheten innover i en betongkonstruksjon i et aluminiumsverk. Kan dette estimeres ved hjelp av programmet TorkaS?

Mikrostrukturens påvirkning - Betongene har forskjellig mikrostruktur. Avhengig av dette vil den elektriske motstanden kunne utvikle seg eksponentielt etterhvert som fukttapet stiger. Dette vil skje når poreløsningen mister sin kontinuitet. Ved en god forståelse av betongenes kritiske vannmetningsgrad kan man bedre forutsi deres mulige eksponentielle gevinst i elektrisk motstand. Er det mulig å utvikle betong med god avdampingsevne og tidlig eksponentiell gevinst.

Måling av elektrisk motstand i delvis tørr betong - Man har gjennom oppgaven oppdaget utfordringer ved måling av elektrisk motstand i egenuttørket og delvis uttørket betong. Måleprosedyren utviklet har potensiale for forbedring. Både prosedyreoppsett og strømtype kan vurderes i denne anledning:

- Hvordan kan man unngå utfordringene rundt betongenes forskjellige frekvensrespons.
- Hvordan kan man unngå måleapparatenes manglende representasjon av impedansens imaginærdel.
- Hvorfor er målingene av elektrisk motstand ustabile for prøver i en fukttilstand mellom 85-99 % RF (egenuttørket), når både vannmettede- og delvis uttørkede prøver gir stabile avlesninger?

Elektriske felt i tørr betong - Overflatestrukturen ble i denne oppgaven kun undersøkt i vannmettet tilstand. Hvordan påvirker overflatestrukturen den elektriske motstanden i delvis uttørket betong?

Motstandstall for delvis uttørket betong - Betongenes motstandstall ble i denne oppgaven kun beregnet for vannlagret betong. For en bedre vurdering av porestrukturens innvirkning på elektrisk motstand, vil det være interessant å vurdere motstandstallet for delvis uttørkede prøver.

Litteratur

- [1] Andersen, K. Overgangsmotstand i betong. Tech. rep., Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU, 2013.
- [2] Bijen, J. Benefits of slag and flyash. Tech. rep., Institute for Materials and Environmental Research, TU Delft, 1995.
- [3] Camoes, A., Ferreira, R. M., de Aguiar, J. B., and Jalali, S. Durability of high-performance concrete with fly ash. Tech. rep., Department of Civil Engineering, University of Minho, 2002.
- [4] Dotto, J., de Abreu, A., Molin, D. D., and Muller, I. Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars. Tech. rep., Federal University of Rio, 2004.
- [5] El-Enein, S. A., Kotkata, M., Hanna, G., Saad, M., and Razek, M. A. E. Electrical conductivity of concrete containing silica fume. Tech. rep., Faculty of Science, Ain Shams University, 1995.
- [6] Ghasemzadeh, H., Mohammadi, Y., Nouri, G., and Nabavi, S. An investigation of the effect of the different mix constituents on concrete electric resistivity. Tech. rep., Department of Civil Engineering, UMA, 2009.
- [7] Keyvani, A. Electrical resistivity of cement types in reinforced concrete structures of electrically powered transit lines. Tech. rep., Civil Engineering Department, ASMU, 2013.

- [8] KS70 110. Betongprøving, kapillær sugsevne og porøsitet. Tech. rep., Sintef (intern), 1996.
- [9] Lopez, W. and Gonzalez, J. Influence of the degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement. Tech. rep., Cement and Concrete Research, 1993.
- [10] Lubeck, A., Gastaldini, A., Barin, D., and Siqueira, H. Compressive strength and electrical properties of concrete with white portland cement and blast-furnace slag. Tech. rep., Federal University of Santa Maria, 2011.
- [11] NS-EN 12350-2. Prøving av fersk betong del 2: Synkmål. Tech. rep., Standard Norge, 2009.
- [12] NS-EN 12350-7. Prøving av fersk betong del 7: Luftinnhold trykkmetoder. Tech. rep., Standard Norge, 2009.
- [13] NS-EN 12390-1. Prøving av herdnet betong del 1: Form, mål og andre krav til prøvelegemer og former. Tech. rep., Standard Norge, 2001.
- [14] NS-EN 12390-2. Prøving av herdnet betong del 2: Støping og herdning av prøvelegemer for fasthetsprøving. Tech. rep., Standard Norge, 2009.
- [15] NS-EN 12390-3. Prøving av herdnet betong del 3: Prøvelegemers trykkfasthet. Tech. rep., Standard Norge, 2009.
- [16] Nygaard, P. Non-destructive electrochemical monitoring of reinforcement corrosion. Tech. rep., Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2008.
- [17] Ola Skjølvold. Concrete for aluminum electrolysis plants. Tech. rep., Sintef Building and Infrastructure, SBF 2012 FO251, 2012.
- [18] Østvik, J. M. Thermal aspects of corrosion of steel in concrete. Tech. rep., Department of structural engineering, NTNU, 2004.
- [19] Polder, R. B. Test methods for on site measurements of resistivity of concrete - a rilem tc-154 technical recommendation. Tech. rep., TNO Building and Construction Research, 2001.
- [20] Shi, C. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (astm c1202 or asshto t277) results. Tech. rep., CJS Technology Inc, 2003.

- [21] Simon, T. K. and Vass, V. The electrical resistivity of concrete. Tech. rep., Budapest university of Technology and Economics, 2012.
- [22] Skanska. Måling av fukt i betong. Tech. rep., Skanska Norge (intern).
- [23] Smith, K. M., Schokker, A. J., and Tikalsky, P. J. Performance of supplementary cementitious materials in concrete resistivity and corrosion monitoring evaluations, title no. 101-m43. Tech. rep., ACI Materials Journal, 2004.
- [24] Spragg, R., Villani, C., Snyder, K., Bentz, D., Bullard, J. W., and Weiss, J. Factors that influence electrical resistivity measurements in cementitious systems, journal no. 2342. Tech. rep., Transportation research record, 2013.
- [25] Weiss, J., Snyder, K., Bullard, J., and Bentz, D. Using a saturation function to interpret the electrical properties of partially saturated concrete. Tech. rep., Purdue University, 2013.
- [26] Whiting, D. and Nagi, M. Electrical resistivity of concrete - a literature review, serial no. 2457. Tech. rep., Portland cement Association, 2003.
- [27] Whittington, H., McCarter, J., , and Forde, M. The conduction of electricity through concrete. Tech. rep., Department of Civil Engineering and Building Science, University of Edinburgh, 1981.
- [28] William Elkey and Erik J. Sellevold. Electrical resistivity of concrete, publication no. 80. Tech. rep., Norwegian Public Roads Administration, 1995.
- [29] Xiao, L. and Li, Z. New understanding of cement hydration mechanism through electrical resistivity measurement and microstructure investigations. Tech. rep., Department of Civil Engineering, HKUST, 2009.
- [30] Zoflex. Produkt: Cd45.1 conductive rubber sheets. (mars 2014). URL <http://www.zoflex.com/products.html>.

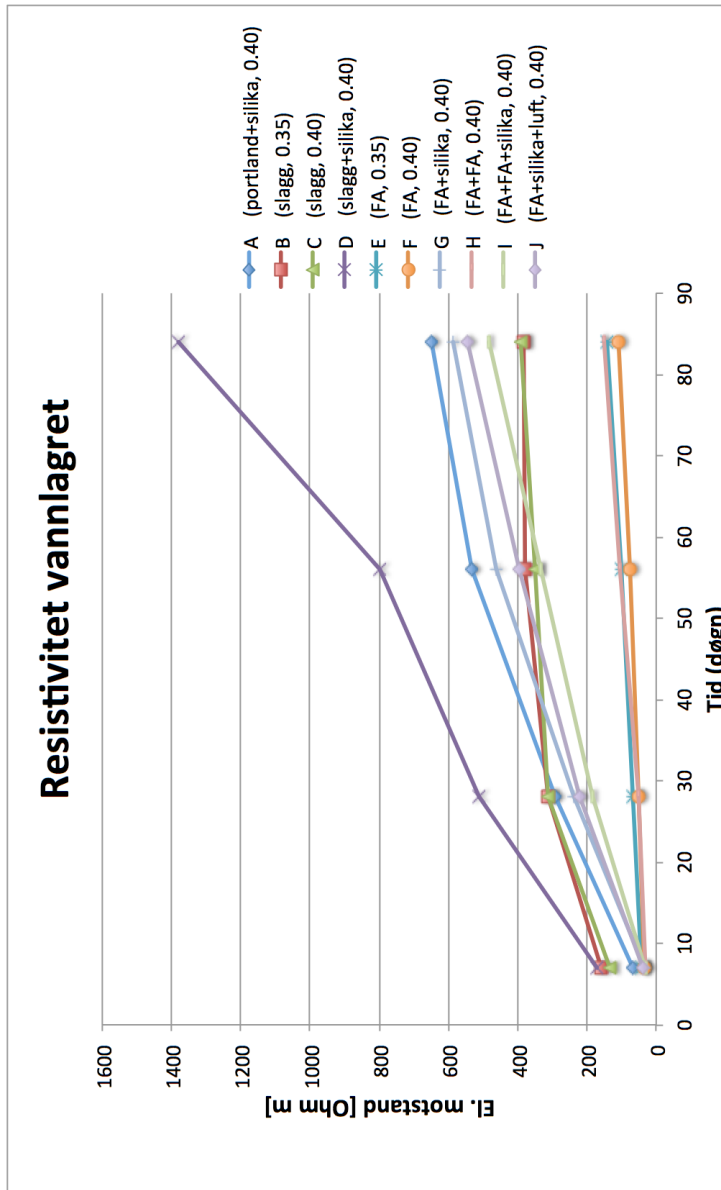
A

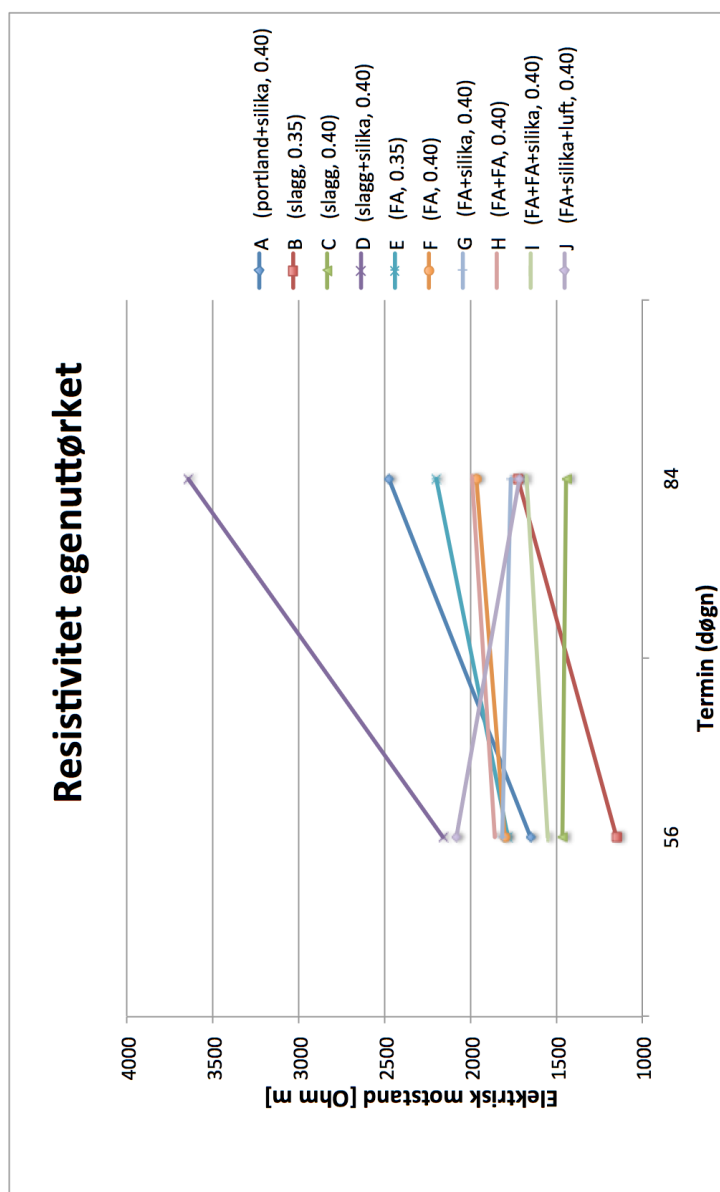
Appendiks

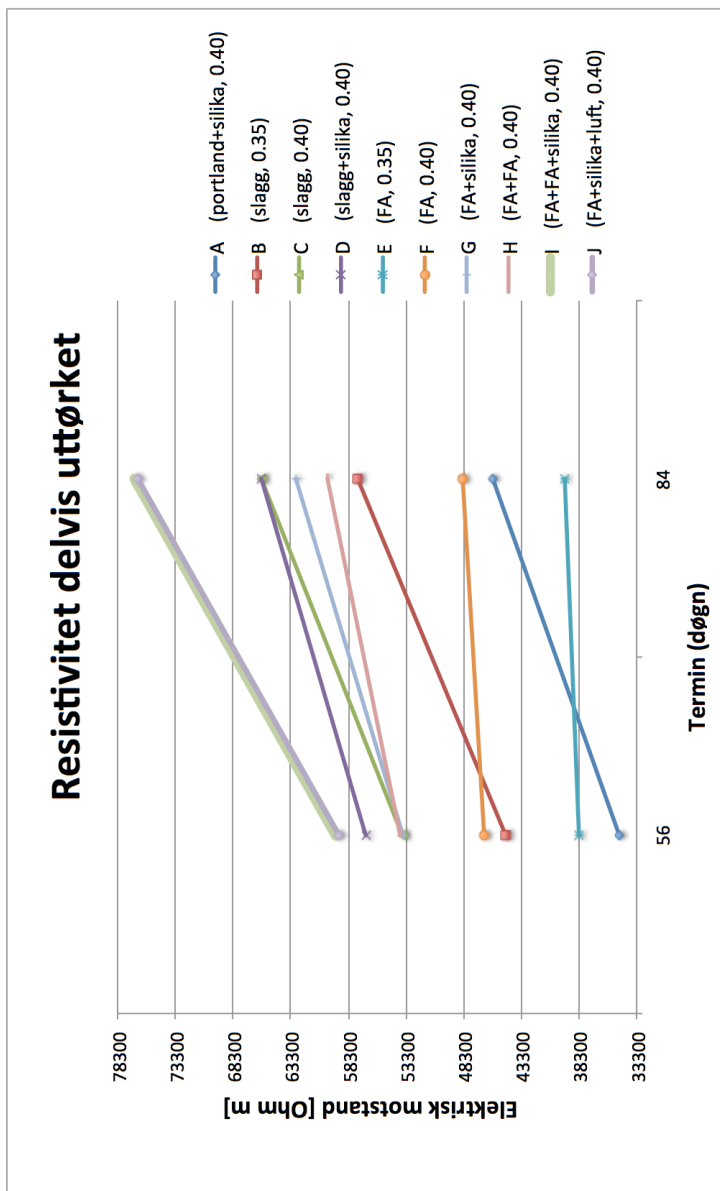
A.1 Elektrisk motstand

Inneholder i følgende rekkefølge:

- Elektrisk motstand for vannlagrede prøver
- Elektrisk motstand for egenuttørkede prøver
- Elektrisk motstand for delvis uttørkede prøver



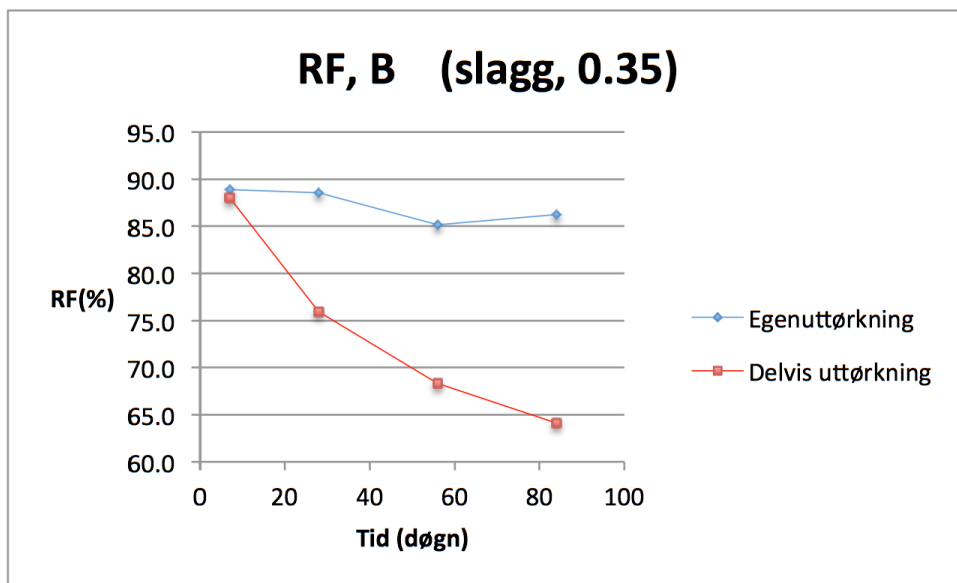
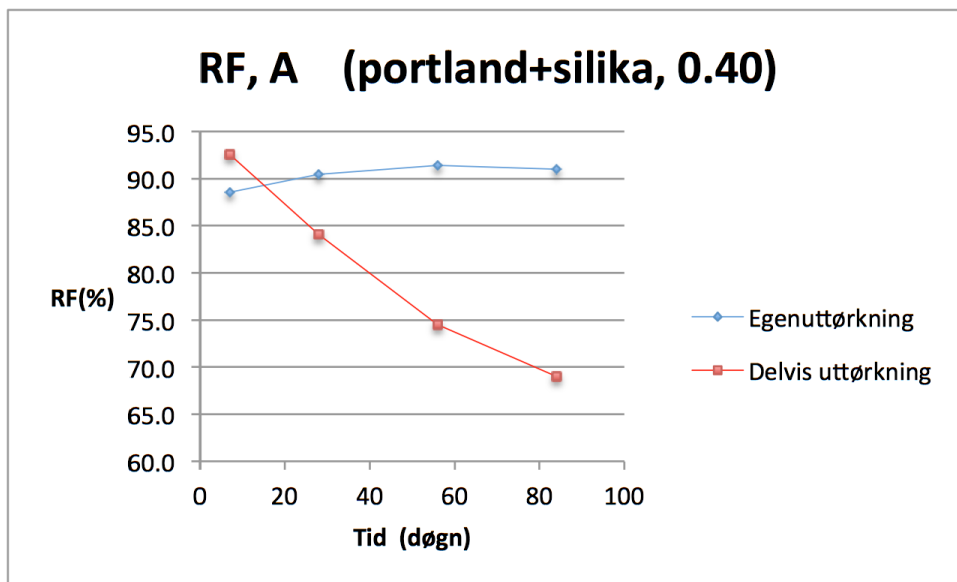


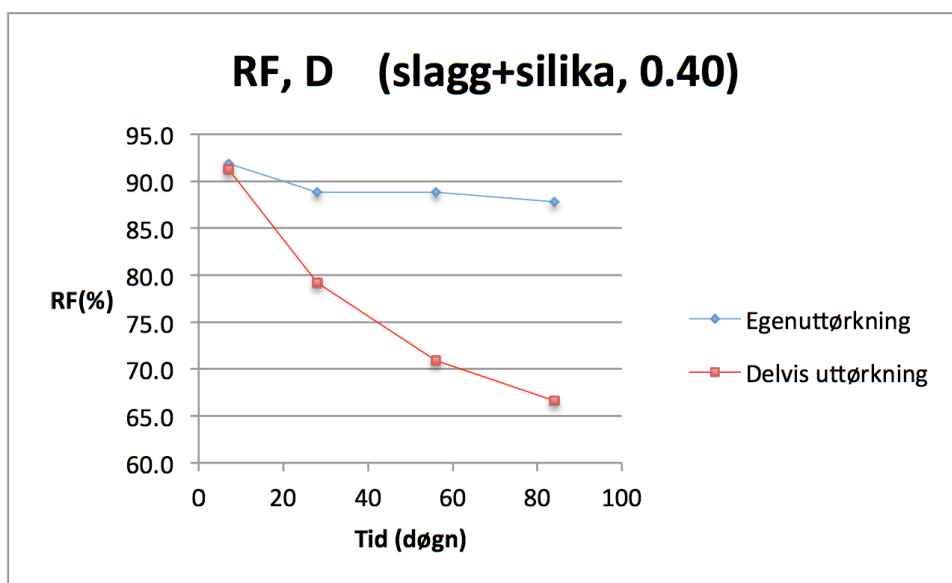
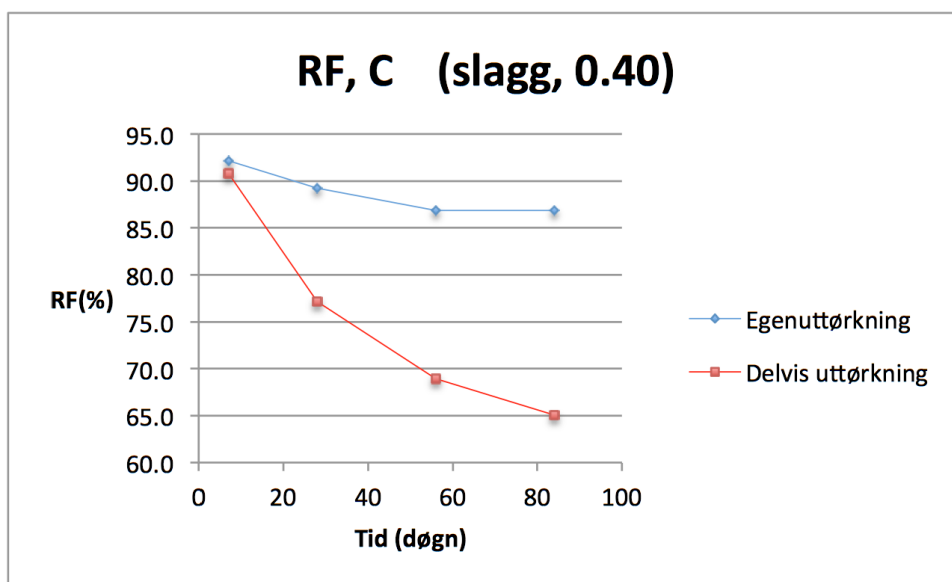


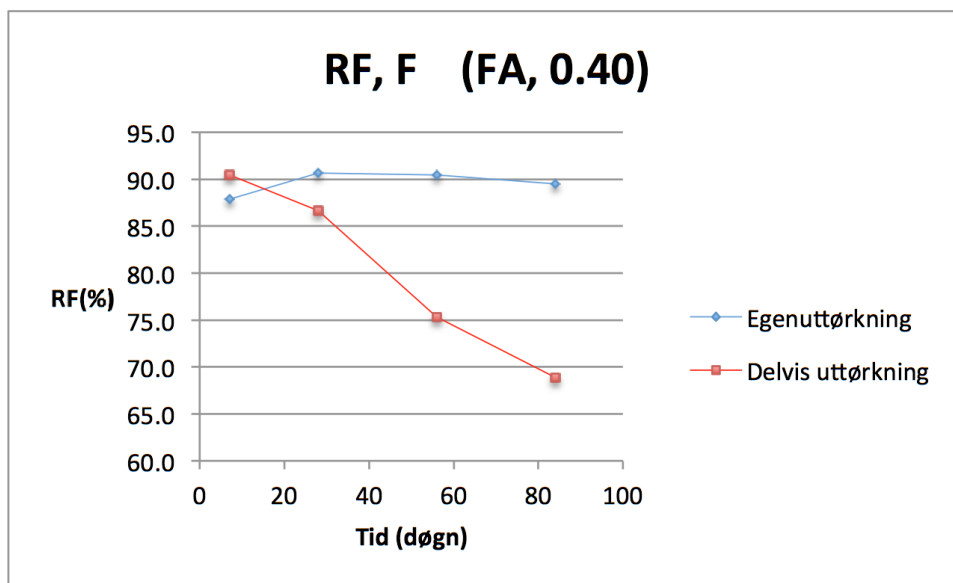
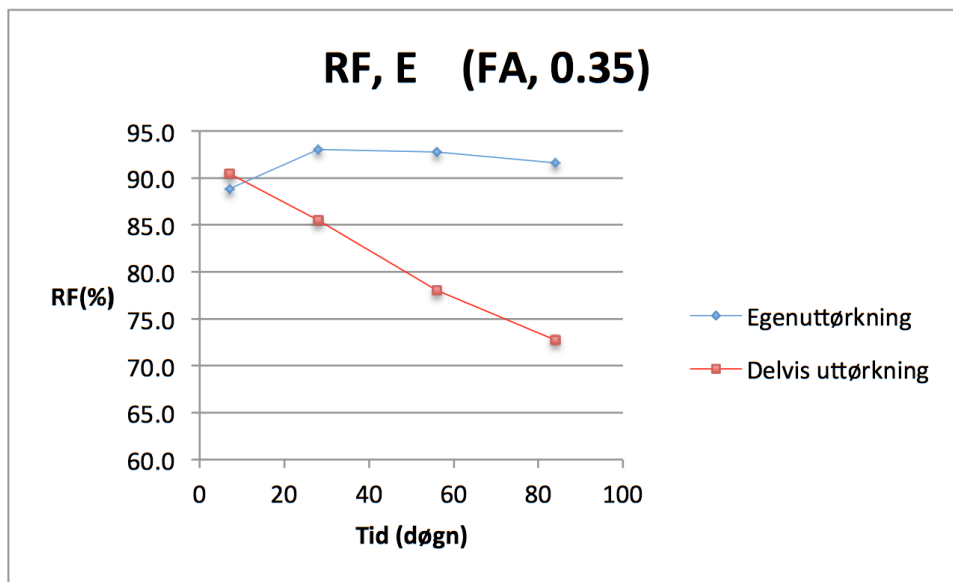
A.2 Relativ luftfuktighet

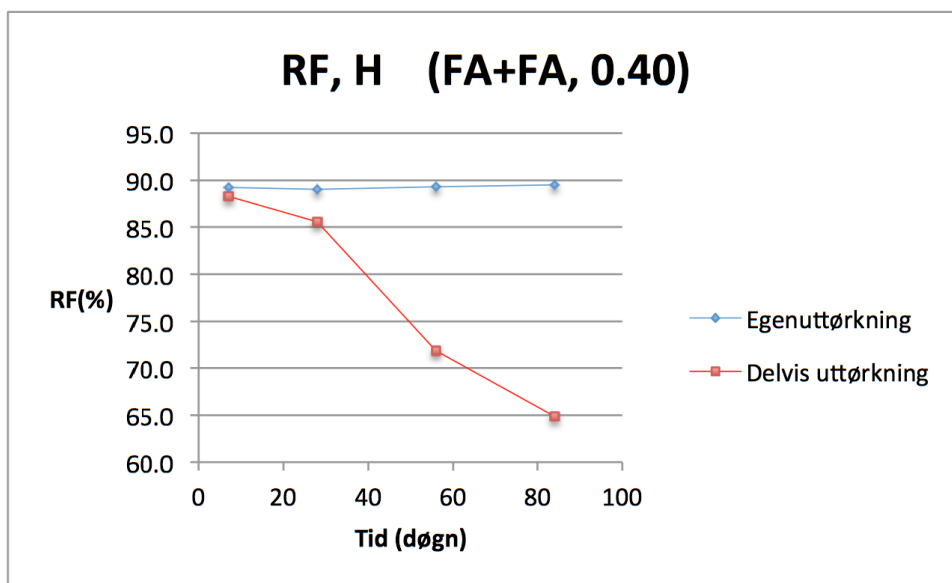
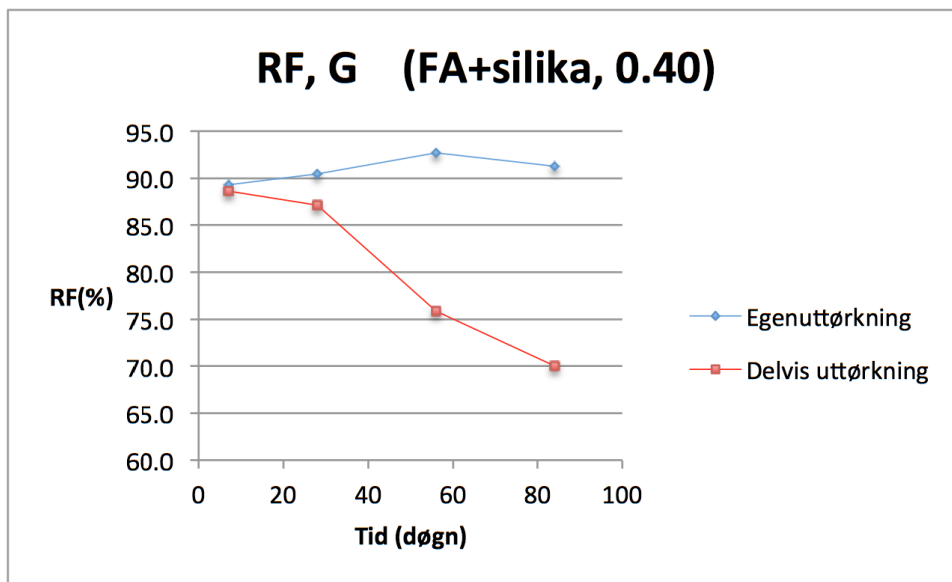
Inneholder i følgende rekkefølge:

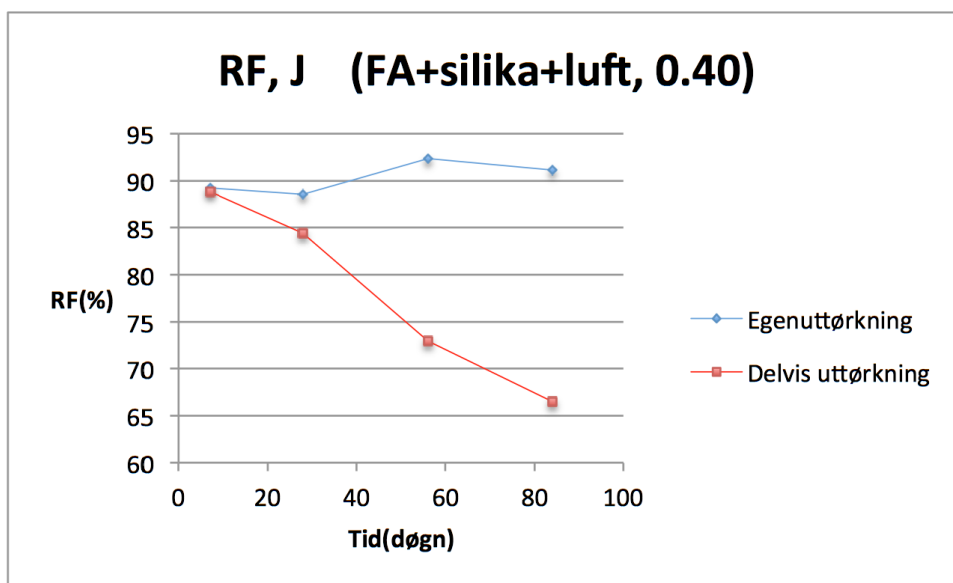
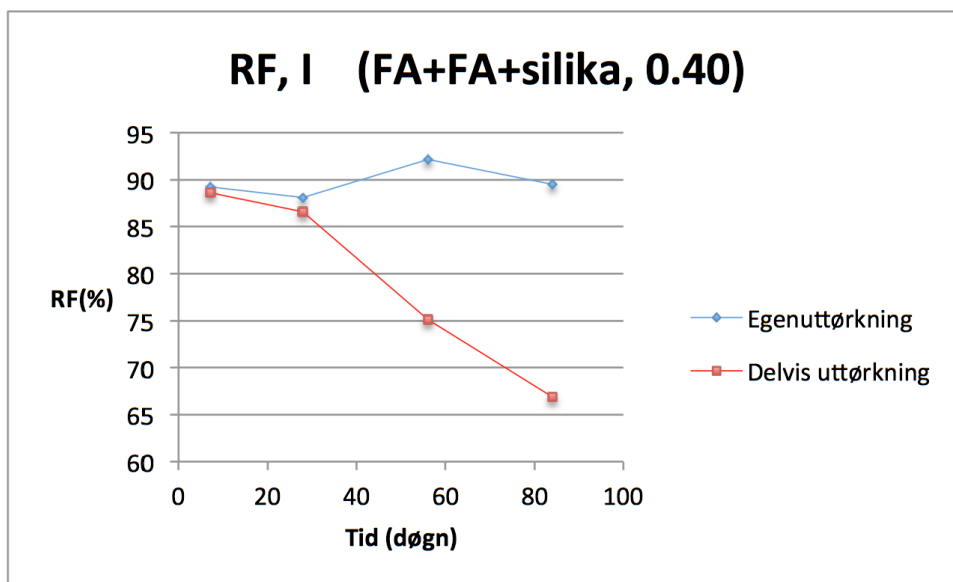
- RF-utvikling miks A
- RF-utvikling miks B
- RF-utvikling miks C
- RF-utvikling miks D
- RF-utvikling miks E
- RF-utvikling miks F
- RF-utvikling miks G
- RF-utvikling miks H
- RF-utvikling miks I
- RF-utvikling miks J
- RF-sammenlikning egenuttørking (84 døgn)
- RF-sammenlikning delvis uttørking (84 døgn)

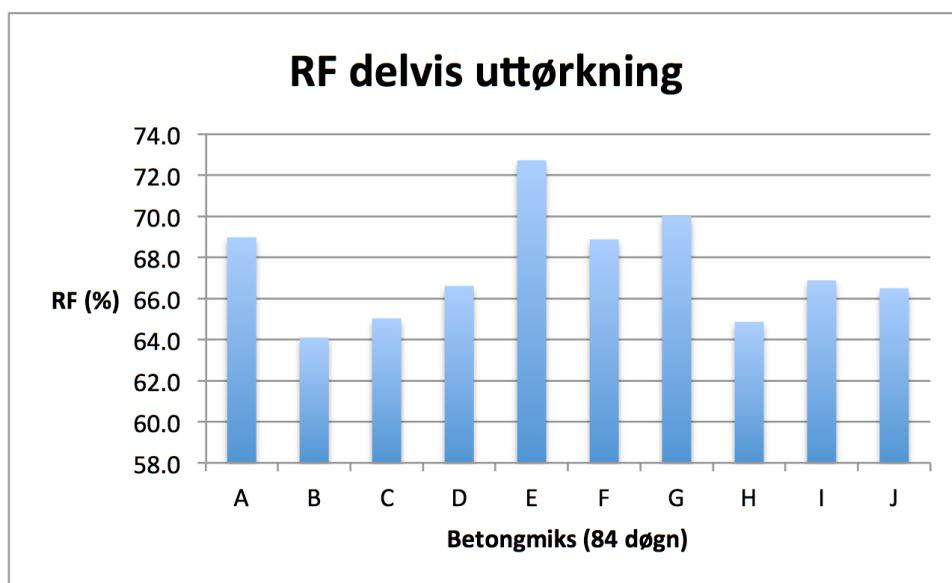
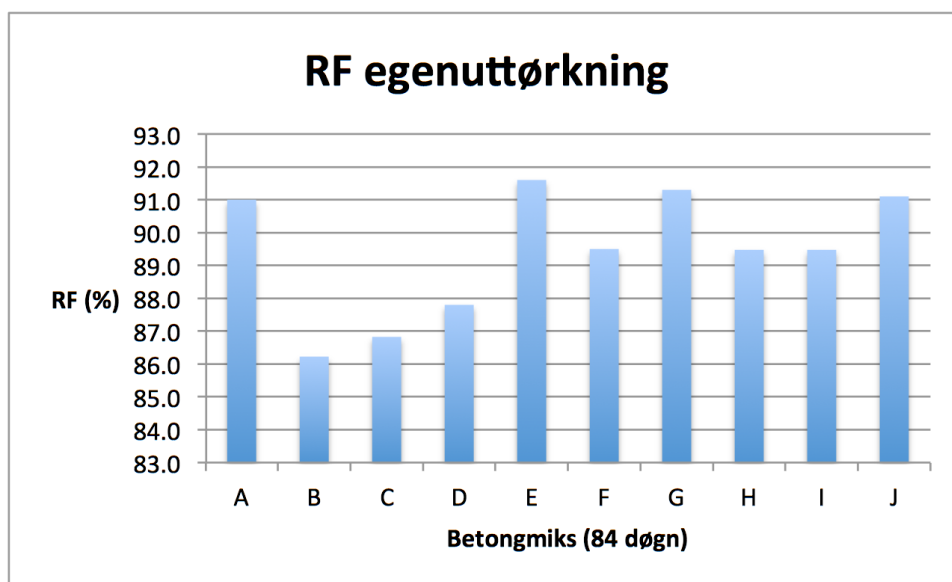








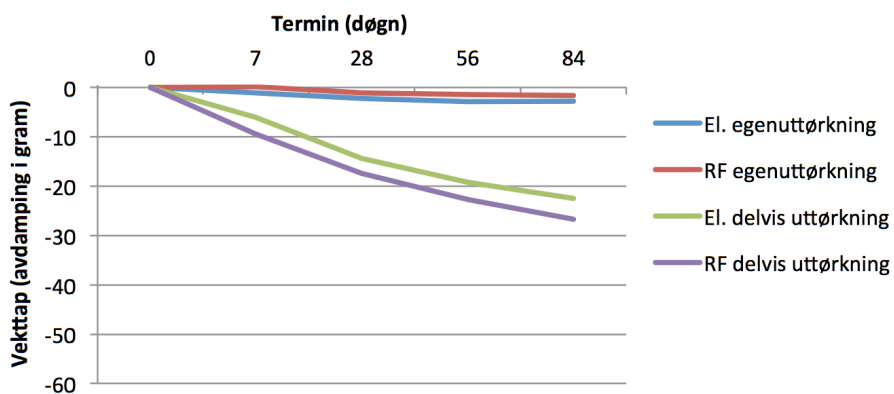
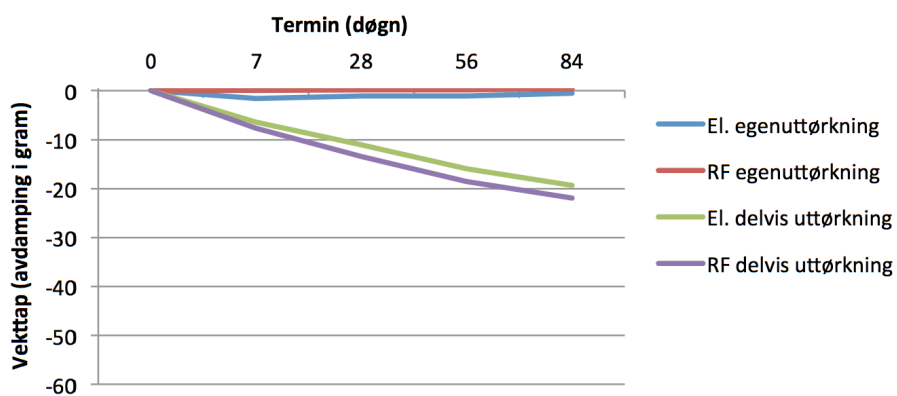


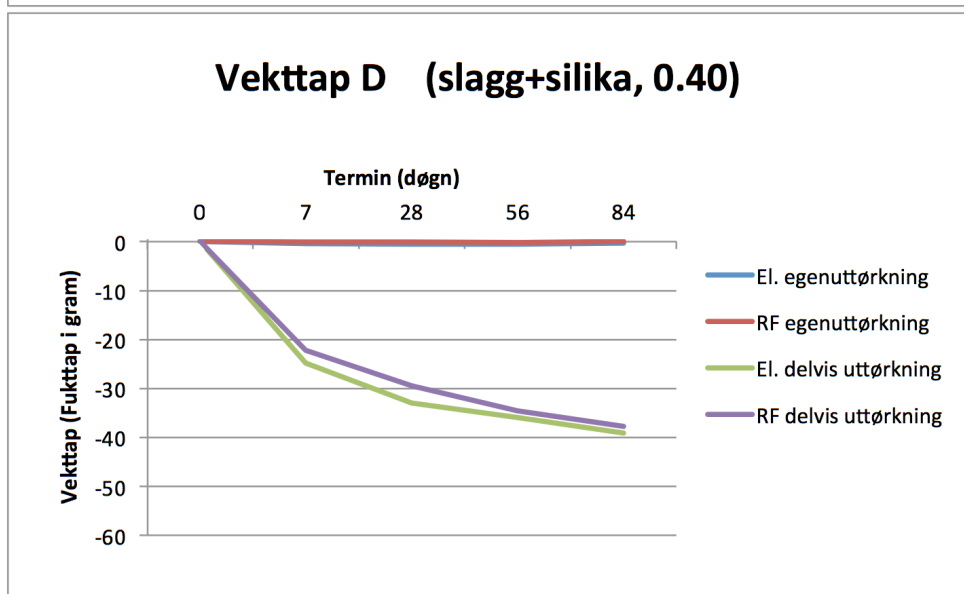
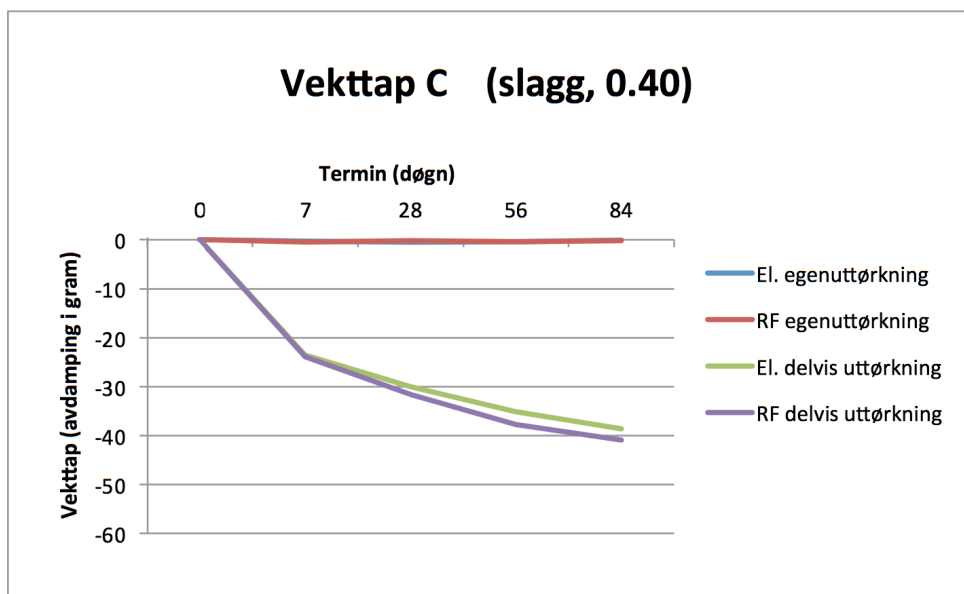


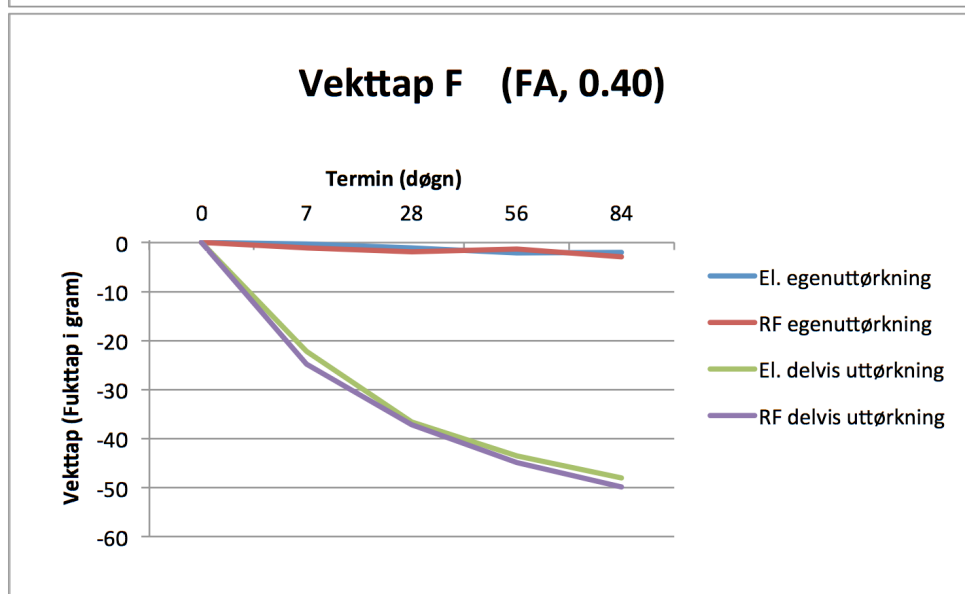
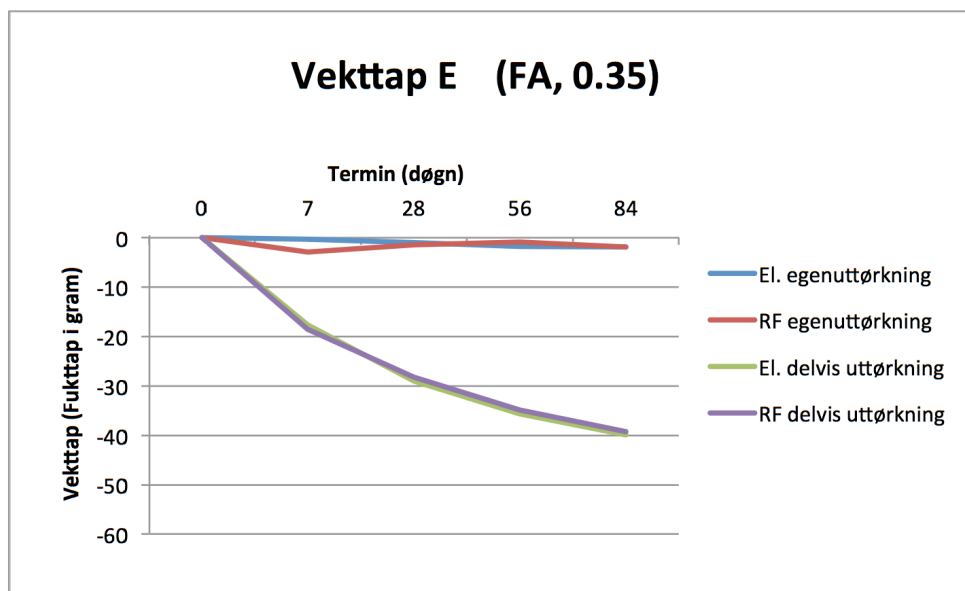
A.3 Vekttap

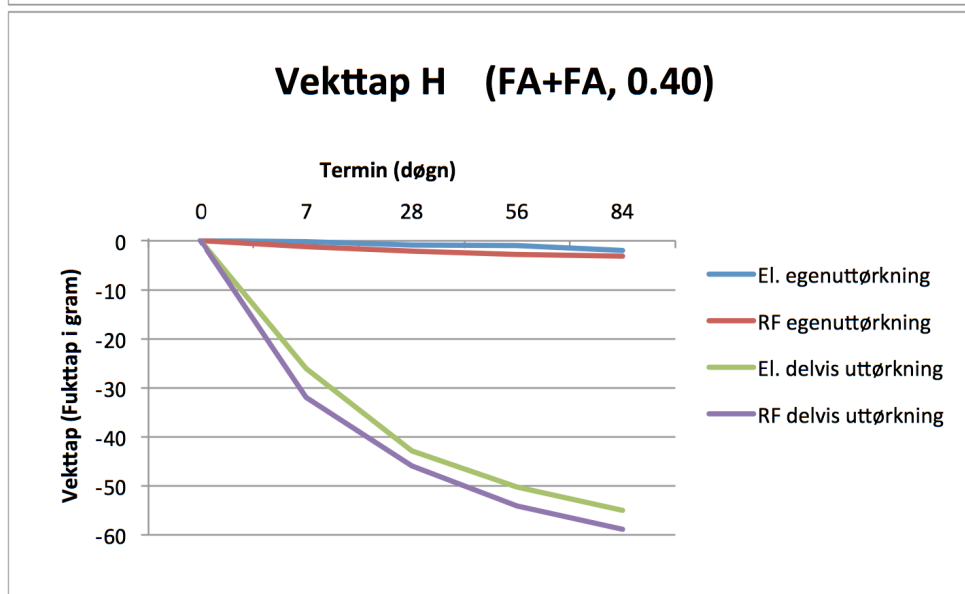
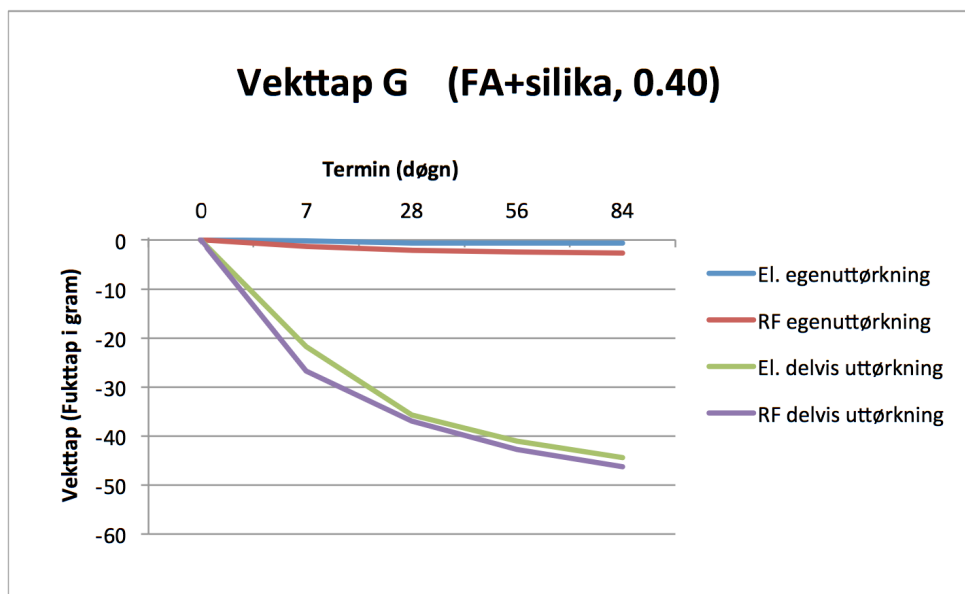
Inneholder i følgende rekkefølge:

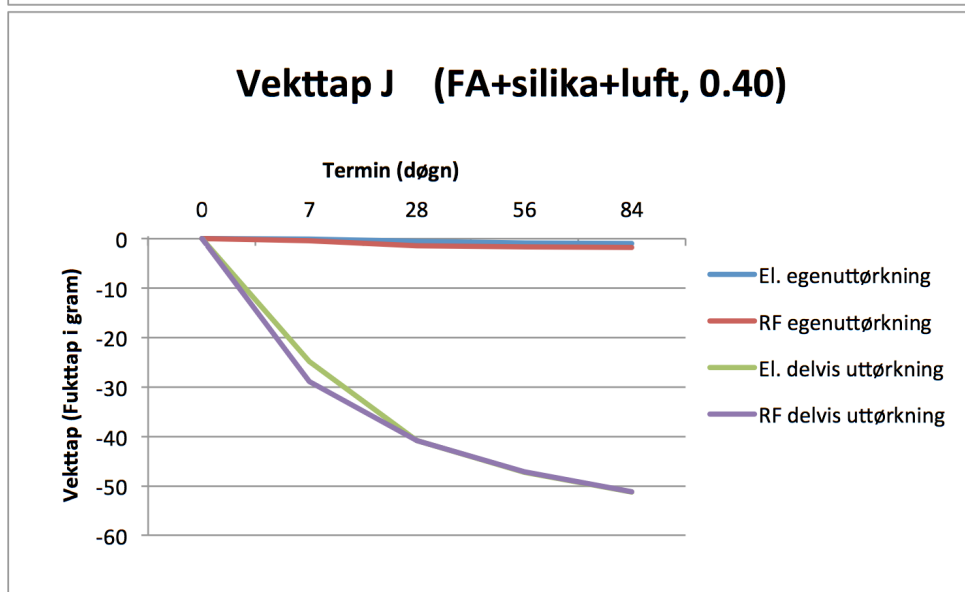
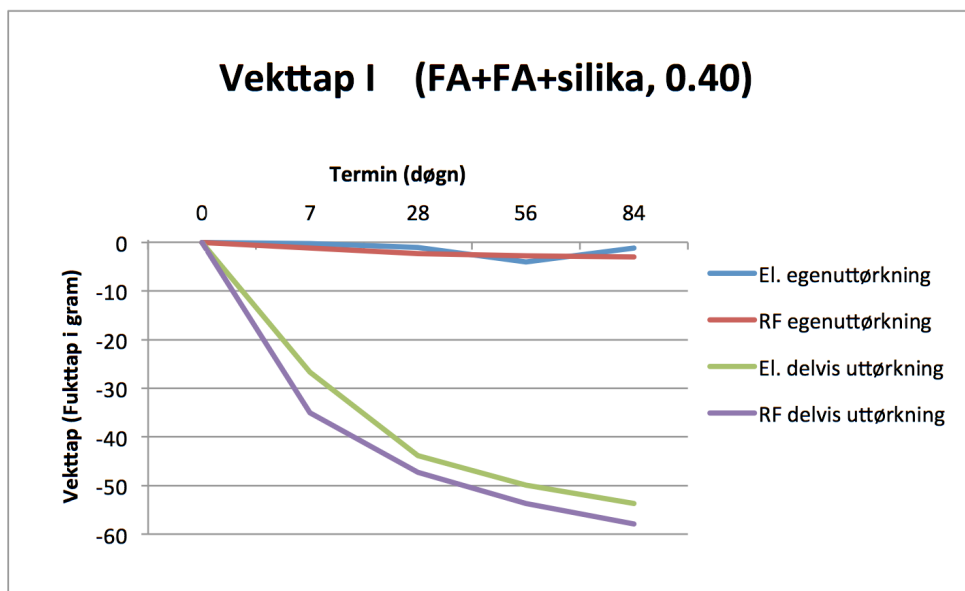
- Vekttap miks A
- Vekttap miks B
- Vekttap miks C
- Vekttap miks D
- Vekttap miks E
- Vekttap miks F
- Vekttap miks G
- Vekttap miks H
- Vekttap miks I
- Vekttap miks J
- Sammenlikning vekttap for delvis uttørkede prøver (84 døgn)

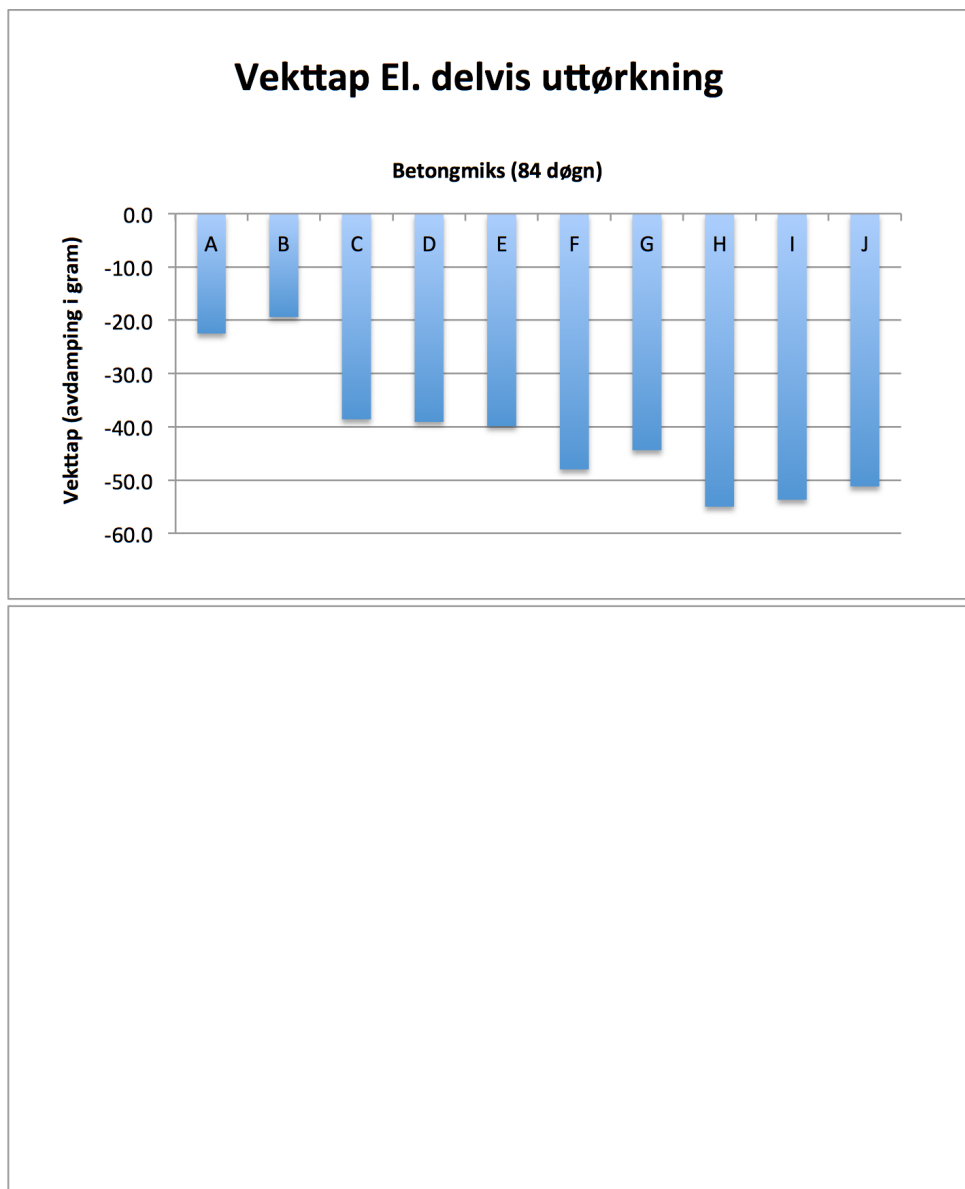
Vekttap A (portland+silika, 0.40)**Vekttap B (slag, 0.35)**







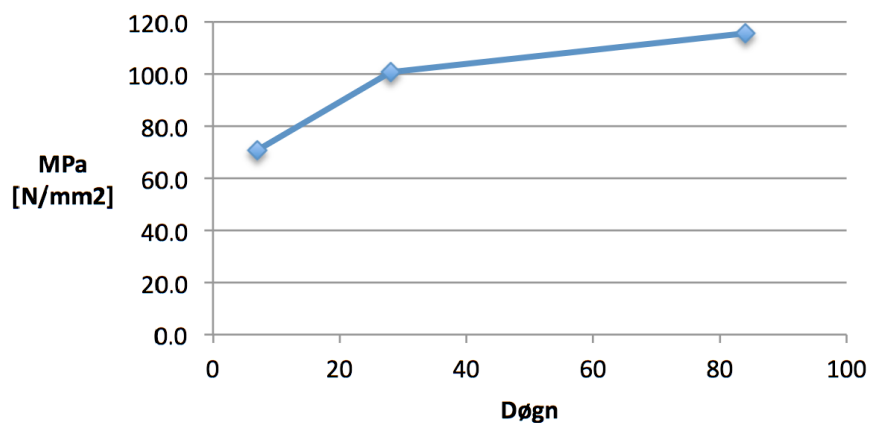
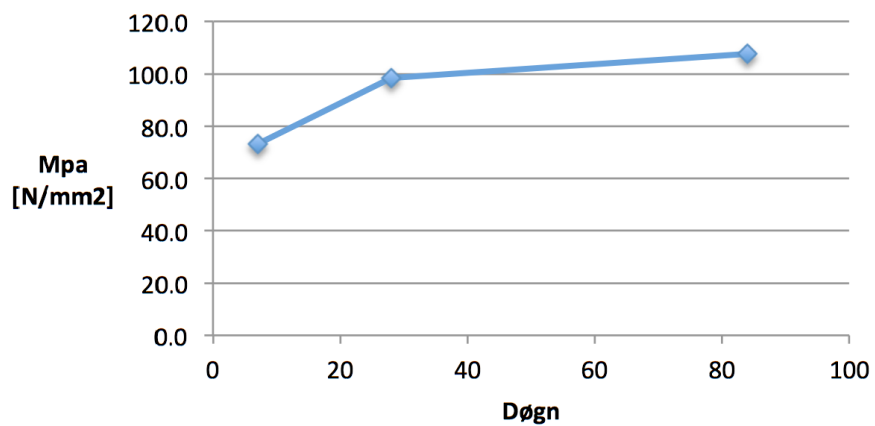


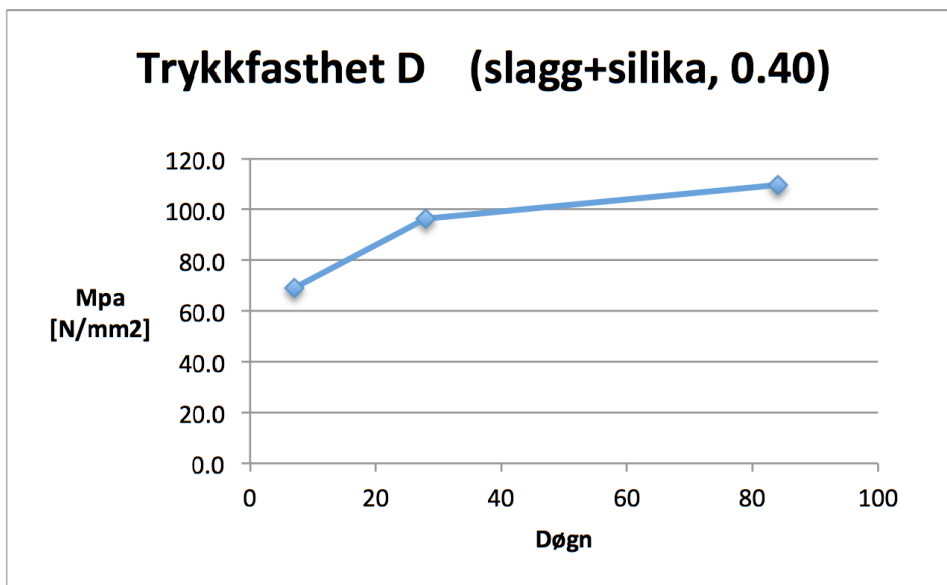
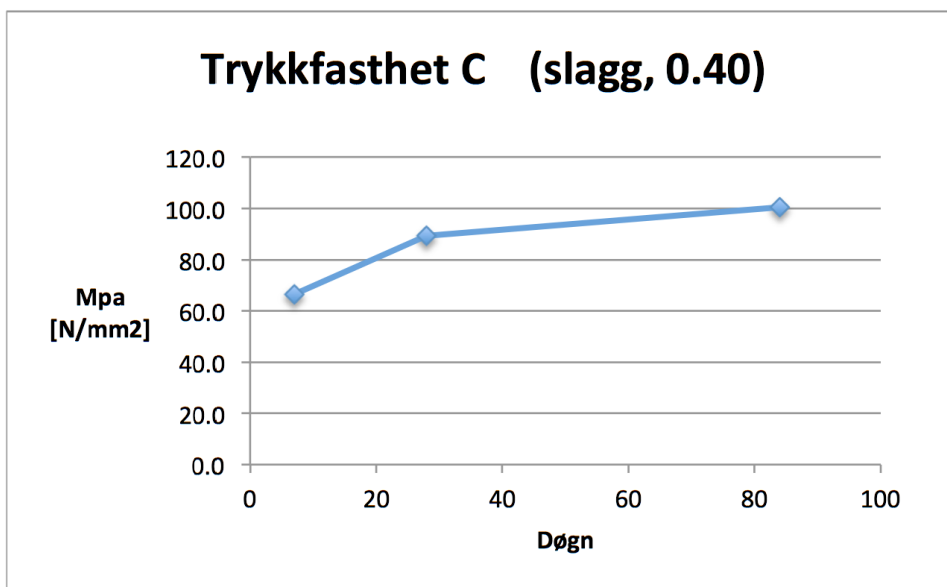


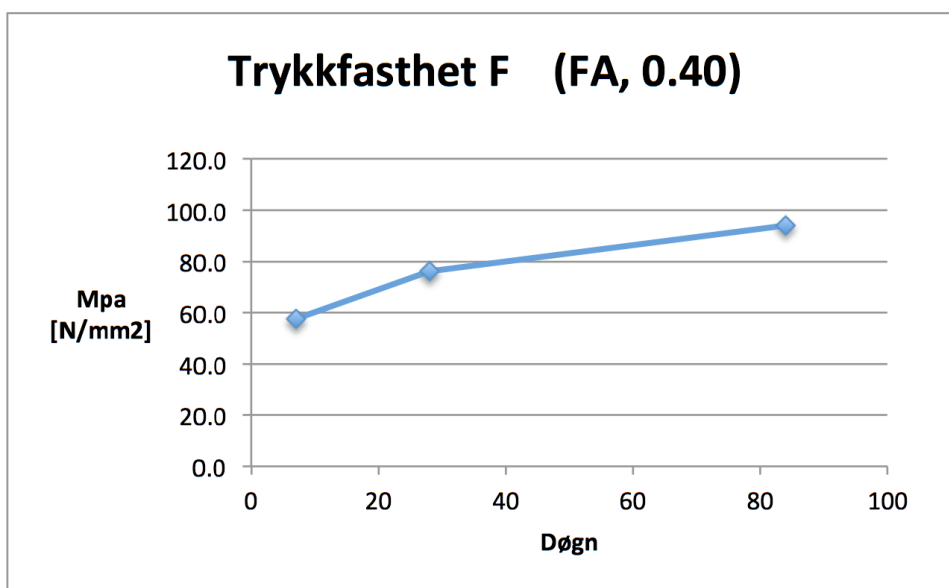
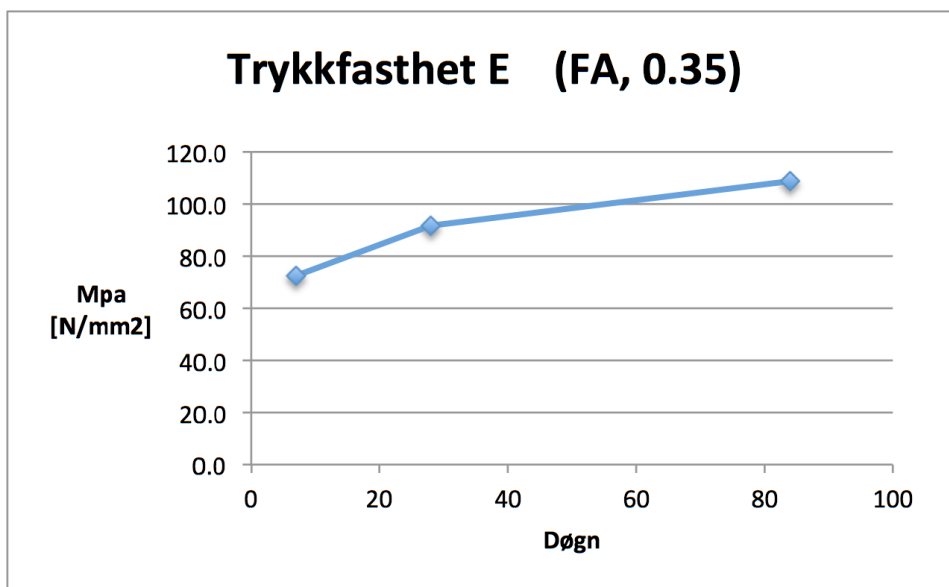
A.4 Trykkfasthet

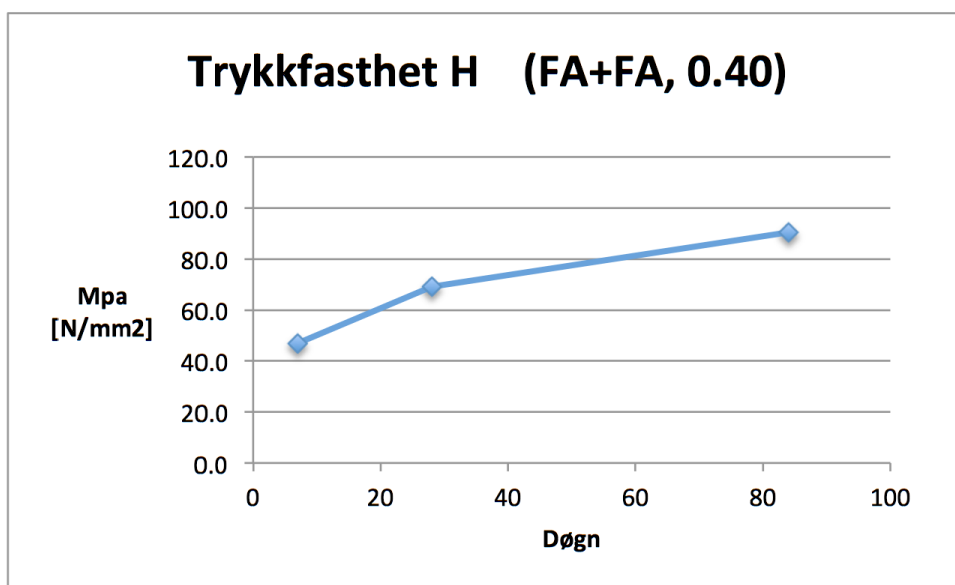
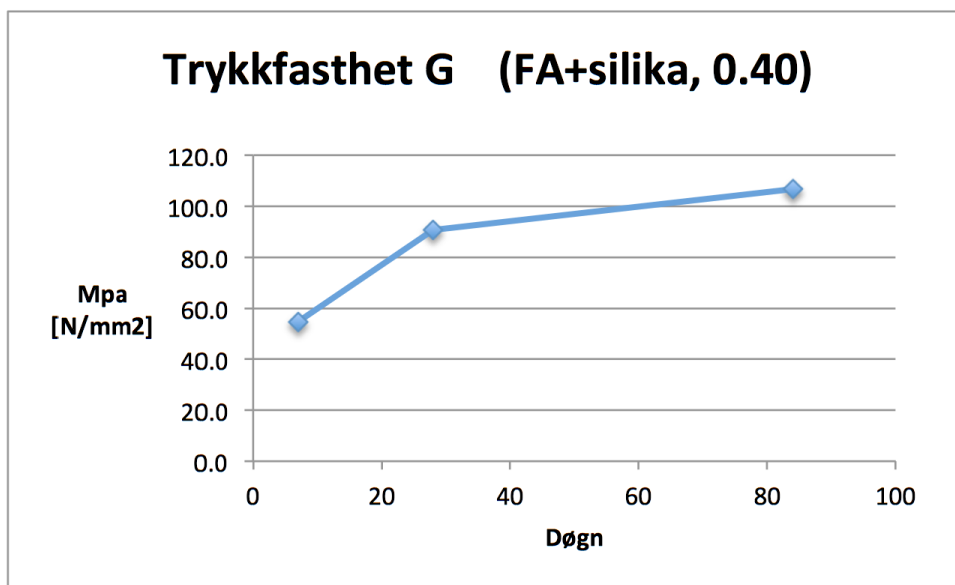
Inneholder i følgende rekkefølge:

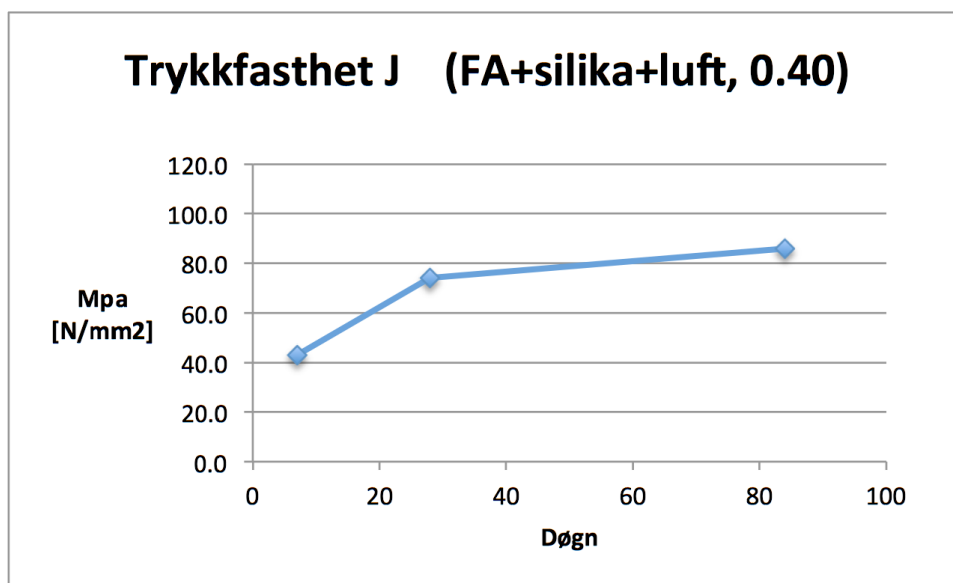
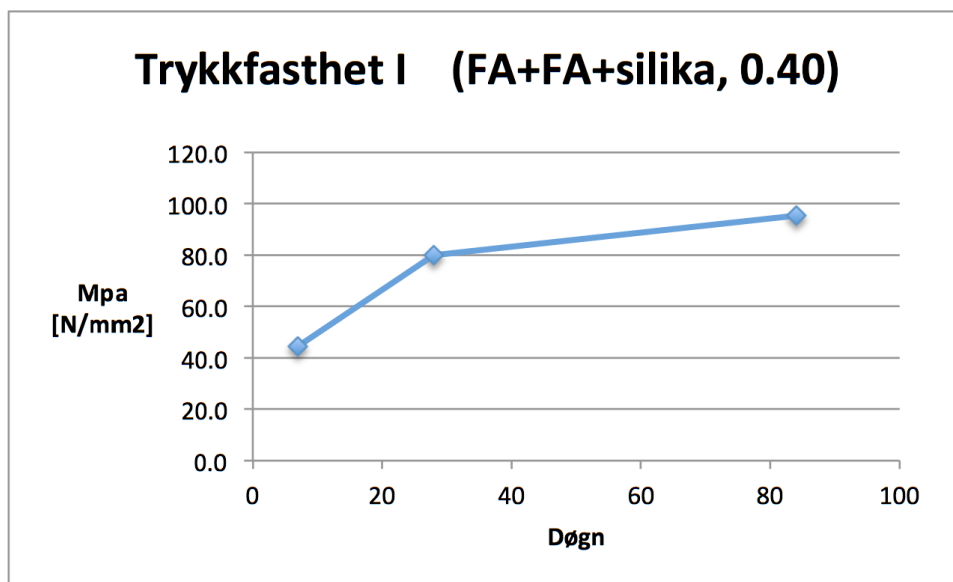
- Trykkfasthet miks A
- Trykkfasthet miks B
- Trykkfasthet miks C
- Trykkfasthet miks D
- Trykkfasthet miks E
- Trykkfasthet miks F
- Trykkfasthet miks G
- Trykkfasthet miks H
- Trykkfasthet miks I
- Trykkfasthet miks J
- Sammenlikning trykkfasthet (84 døgn)

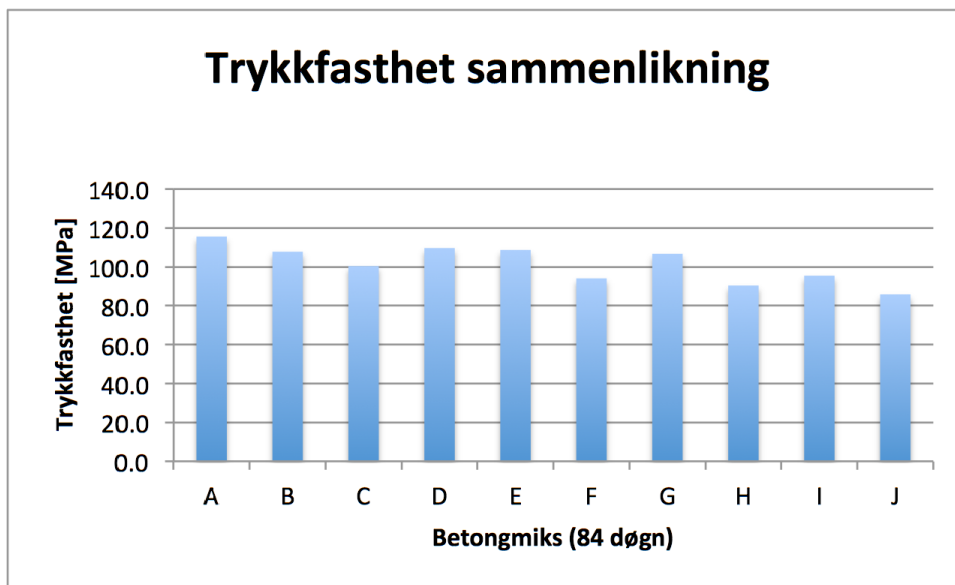
Trykkfasthet A (portland+silika, 0.40)**Trykkfasthet B (slag, 0.35)**











A.5 Kapillærabsorpsjon og porøsitet

Inneholder i følgende rekkefølge:

- Kapillærabsorpsjon miks A
- Kapillærabsorpsjon miks B
- Kapillærabsorpsjon miks C
- Kapillærabsorpsjon miks D
- Kapillærabsorpsjon miks E
- Kapillærabsorpsjon miks F
- Kapillærabsorpsjon miks G
- Kapillærabsorpsjon miks H
- Kapillærabsorpsjon miks I
- Kapillærabsorpsjon miks J
- Sammenlikning motstandstall (ca 56 døgn)

Kapillærabsorpsjon

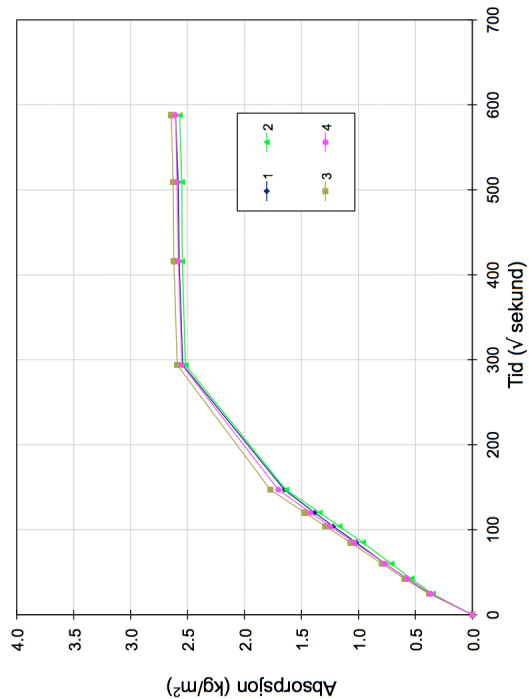
KS 14-05-04-110

SS 2012-04-26

Betongresept A

Størrelse	Middelværdier	Var. koeff. / std.av.
Moistandstall	1.21E+08 [s/m ²]	7.2 %
Kapillaritetstall	1.13E-02 [kg / m ² θ s]	4.6 %
Sugporøsitet	12.7 [% vol.]	0.6 %
Åpen makroporøsitet	0.2 [% vol.]	9.1 %
Lukket makroporøsitet	1.4 [% vol.]	5.5 %
PF-verdi (samlet)	0.10	-
Faststoffdensitet	2702 [kg / m ³]	3 [kg / m ³]
Tørrdensitet	2318 [kg / m ³]	6 [kg / m ³]

Antatt bindemiddelmengde	419 [kg/m ³]
Estimert mengde sementlim	307 [l/m ³]
Antatt hydrasjonsgrad	0.70
Antatt possolaninnhold	10 [%]
Estimert masseforhold	0.40



Kapillærabsorpsjon

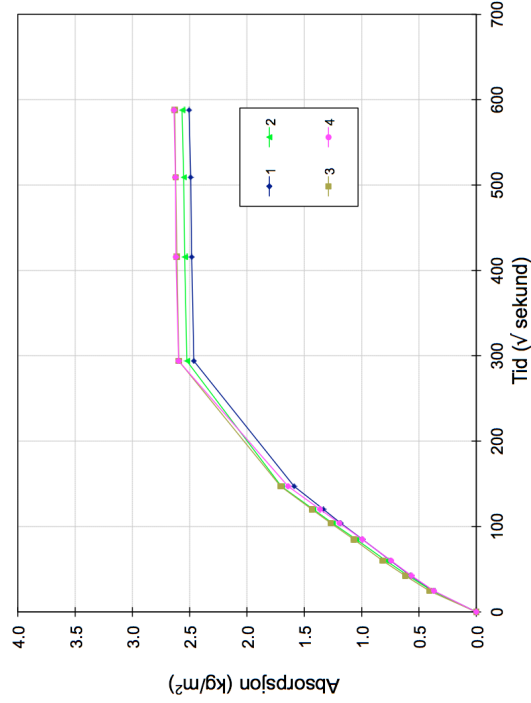
KS 14-05-04-110

SS 2012-04-26

Betongresept B

Størrelse	Middelverdier	Var. koeff. / std.av.
Moistandstall	1,23E+08 [s/m ²]	5.6 %
Kapillaritetstall	1,11E-02 [kg / m ² ∅ s]	3.9 %
Sugporøsitet	12.5 [% vol.]	1.9 %
Åpen makroporøsitet	0.2 [% vol.]	13.7 %
Lukket makroporøsitet	1.0 [% vol.]	7.0 %
PF-verdi. (samlet)	0.07	-
Fasistofdensitet	2716 [kg / m ³]	2 [kg / m ³]
Tørdensitet	2344 [kg / m ³]	10 [kg / m ³]

Antatt bindemiddelmengde	481 [kg/m ³]
Estimert mengde sementlim	336 [l/m ³]
Antatt hydratasjonsgrad	0.70
Antatt possolaninnhold	0 [%]
Estimert masseforhold	0.38



Kapillærabsorpsjon

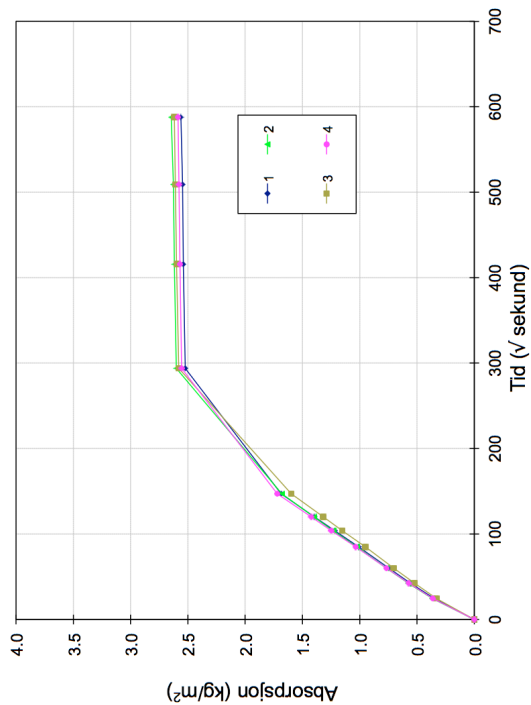
KS 14-05-04-110

SS 2012-04-26

Betongresept C

Størrelse	Middelverdier	Var. koeff. / std.av.
Moistandstall	1.25E+08 [s/m ²]	8.6 %
Kapillaritetstall	1.12E-02 [kg / m ² ∅ s]	3.5 %
Sugporøsitet	12.8 [% vol.]	2.0 %
Åpen makroporøsitet	0.2 [% vol.]	10.0 %
Lukket makroporøsitet	1.2 [% vol.]	7.0 %
PF-verdi (samlet)	0.09	-
Fasstoffdensitet	2708 [kg / m ³]	9 [kg / m ³]
Tørredensitet	2324 [kg / m ³]	5 [kg / m ³]

Antatt bindemiddelmengde	418 [kg/m ³]
Estimert mengde sementlim	311 [l/m ³]
Antatt hydrasjonsgrad	0.70
Antatt possolaninnhold	0 [%]
Estimert masseforhold	0.43



Kapillærabsorpsjon

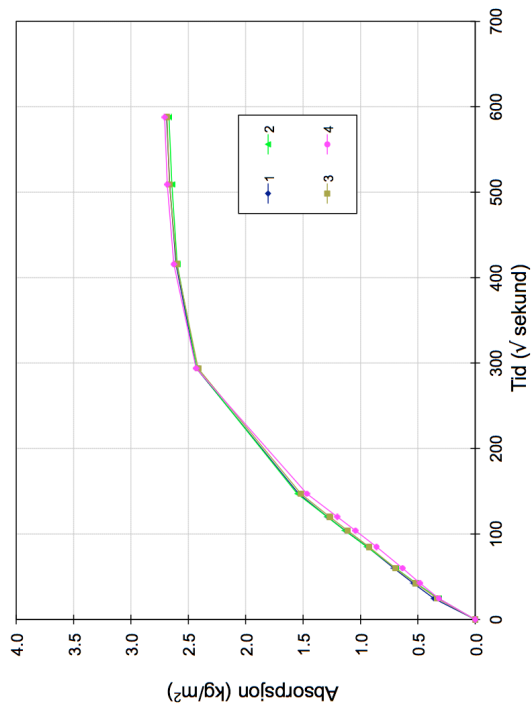
KS 14-05-04-110

SS 2012-04-26

Betongresept D

Størrelse	Middelverdier	Var. koef. / std.av.
Motstandstall	1.34E+08 [s/m ²]	11.6 %
Kapillaritetstall	1.01E-02 [kg / m ² ∅ s]	4.6 %
Supporøsitet	13.0 [% vol.]	0.5 %
Åpen makroporøsitet	0.3 [% vol.]	9.8 %
Lukket makroporøsitet	1.5 [% vol.]	4.8 %
PF-verdi (samlet)	0.10	-
Fasstoffdensitet	2700 [kg / m ³]	5 [kg / m ³]
Tørrdensitet	2301 [kg / m ³]	6 [kg / m ³]

Antatt bindemiddelmengde	412 [kg/m ³]
Estimert mengde sementlim	307 [l/m ³]
Antatt hydrasjonsgrad	0.70
Antatt possolaninnhold	10 [%]
Estimert masseforhold	0.41



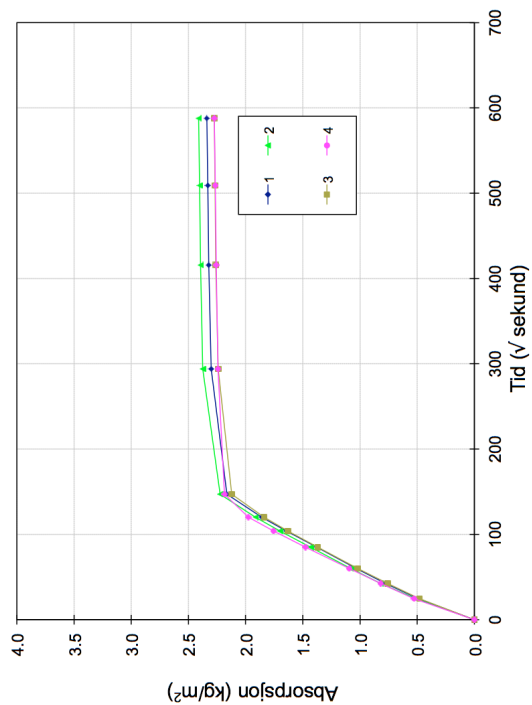
Kapillærabsorpsjon

KS 14-05-04-110
SS 2012-04-26

Betongresept E

Størrelse	Middelverdier	Var. koeff. / std.av.
Moistandstall	4.97E+07 [s/m ²]	7.2 %
Kapillaritetstall	1.59E-02 [kg / m ² ∅ s]	3.8 %
Supporøsitet	11.5 [% vol.]	1.7 %
Åpen makroporøsitet	0.2 [% vol.]	10.3 %
Lukket makroporøsitet	1.1 [% vol.]	7.1 %
PF-verdi (samtlet)	0.08	-
Faststoffdensitet	2695 [kg / m ³]	6 [kg / m ³]
Tørredensitet	2351 [kg / m ³]	8 [kg / m ³]

Antatt bindemiddelmengde	481 [kg/m ³]
Estimert mengde sementlim	326 [l/m ³]
Antatt hydrasjonsgrad	0.70
Antatt possolaninnhold	0 [%]
Estimert masseforhold	0.36



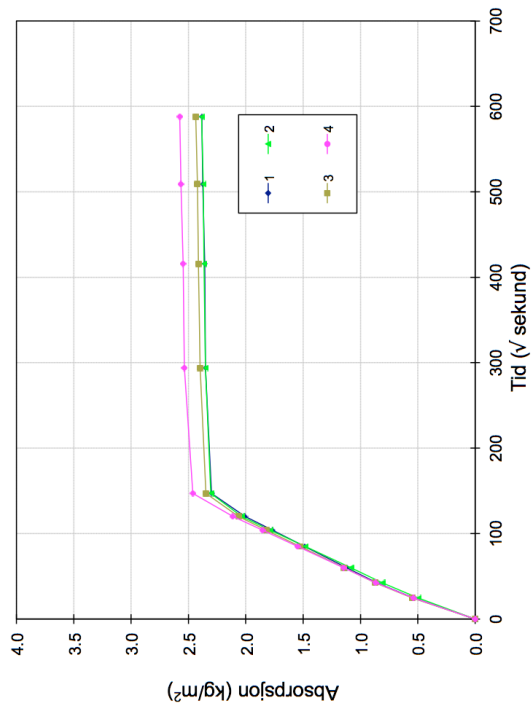
Kapillærabsorpsjon

KS 14-05-04-110
SS 2012-04-26

Betongresept F

Størrelse	Middelverdier	Var. koeff. / std.av.
Moistandstall	4.82E+07 [s/m ²]	2.9 %
Kapillaritetstall	1.71E-02 [kg / m ² θ s]	2.3 %
Sugporøsitet	12.1 [% vol.]	2.3 %
Åpen makroporøsitet	0.1 [% vol.]	7.4 %
Lukket makroporøsitet	1.4 [% vol.]	7.1 %
PF-verdi (samlet)	0.10	-
Faststoffdensitet	2712 [kg / m ³]	2 [kg / m ³]
Tørredensitet	2343 [kg / m ³]	9 [kg / m ³]

Aniatt bindemiddelmengde	418 [kg/m ³]
Estimert mengde sementlim	304 [l/m ³]
Aniatt hydratasjonsgrad	0.70
Aniatt possolaninnhold	0 [%]
Estimert masseforhold	0.41

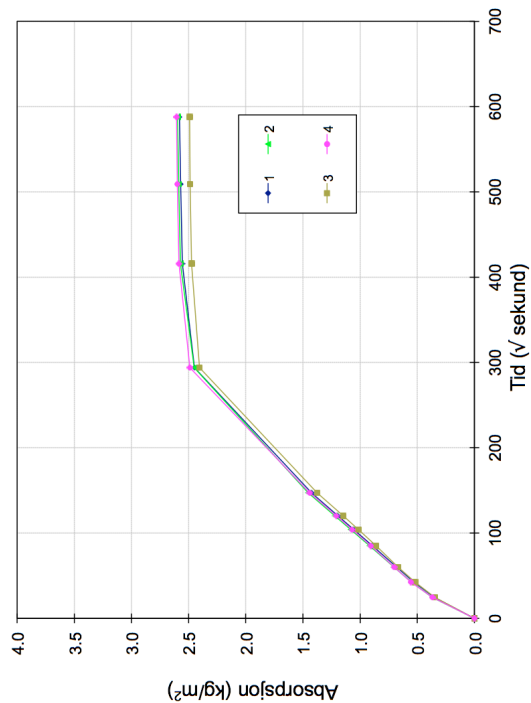


Kapillærabsorpsjon
KS 14-05-04-110
 SS 2012-04-26

Betongresept G

Størrelse	Middelverdier	Var. koeff. / std.av.
Moistandstall	1,76E+08 [s/m ²]	3,9 %
Kapillaritetstall	9,27E-03 [kg / m ² s]	2,8 %
Sugporøsitet	12,9 [% vol.]	1,9 %
Åpen makroporøsitet	0,2 [% vol.]	7,8 %
Lukket makroporøsitet	1,4 [% vol.]	3,0 %
PF-verdi (sarnlet)	0,10	-
Faststoffdensitet	2712 [kg / m ³]	4 [kg / m ³]
Tørrdensitet	2319 [kg / m ³]	5 [kg / m ³]

Antatt bindemiddelmengde	412 [kg/m ³]
Estimert mengde sementlim	305 [l/m ³]
Antatt hydratasjonsgrad	0,70
Antatt possolaninnhold	10 [%]
Estimert masseforhold	0,41



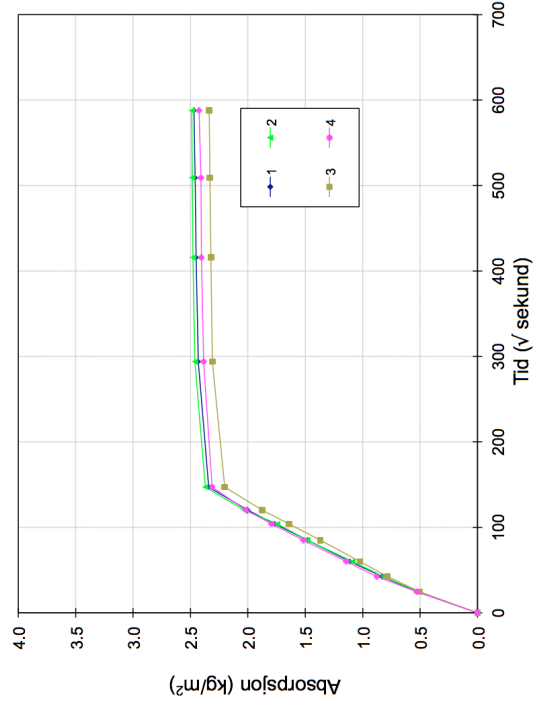
Kapillærabsorpsjon

KS 14-05-04-110
SS 2012-04-26

Betongresept H

Størrelse	Middelverdier	Var. koeff. / std.av.
Moistandstall	5.29E+07 [s/m ²]	6.0 %
Kapillaritetstall	1.63E-02 [kg / m ² θ s]	4.3 %
Sugporøsitet	12.2 [% vol.]	3.0 %
Åpen makroporøsitet	0.2 [% vol.]	8.9 %
Lukket makroporøsitet	1.5 [% vol.]	3.9 %
PF-verdi (samlet)	0.11	-
Faststoffdensitet	2711 [kg / m ³]	3 [kg / m ³]
Tørrdensitet	2335 [kg / m ³]	7 [kg / m ³]

Aniatt bindemiddelmengde	412 [kg/m ³]
Estimert mengde sementlim	299 [l/m ³]
Aniatt hydratasjonsgrad	0.70
Aniatt possolarinnhold	10 [%]
Estimert masseforhold	0.39



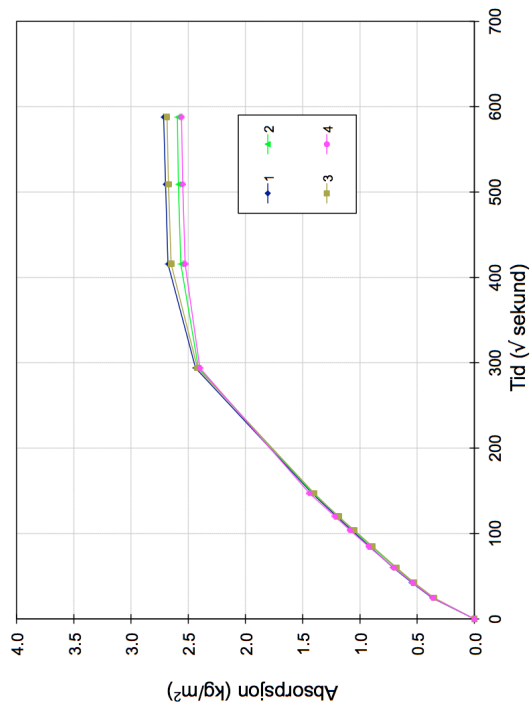
Kapillærabsorpsjon

KS 14-05-04-110
SS 2012-04-26

Betongresept I

Størrelse	Middelverdier	Var. koef. / std.av.
Moistandstall	1,65E+08 [s/m ²]	5.1 %
Kapillaritetstall	9,43E-03 [kg / m ² ∅ s]	2.0 %
Sugporøsitet	13.3 [% vol.]	2.2 %
Åpen makroporøsitet	0.2 [% vol.]	4.7 %
Lukket makroporøsitet	1.5 [% vol.]	5.7 %
PF-verdi (samlet)	0.10	-
Faststoffdensitet	2717 [kg / m ³]	5 [kg / m ³]
Tørdensitet	2309 [kg / m ³]	6 [kg / m ³]

Antatt bindemiddelmengde	407 [kg/m ³]
Estimert mengde sementlim	303 [l/m ³]
Antatt hydratasjonsgrad	0.70
Antatt possolaninnhold	20 [%]
Estimert masseforhold	0.40



Kapillærabsorpsjon

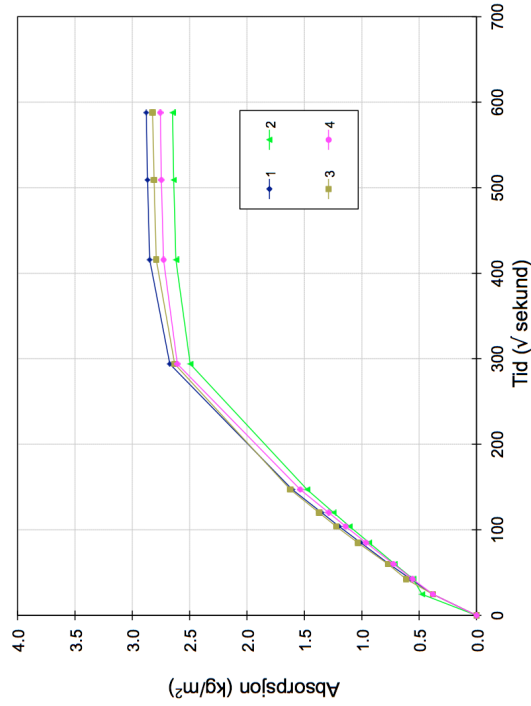
KS 14-05-04-110

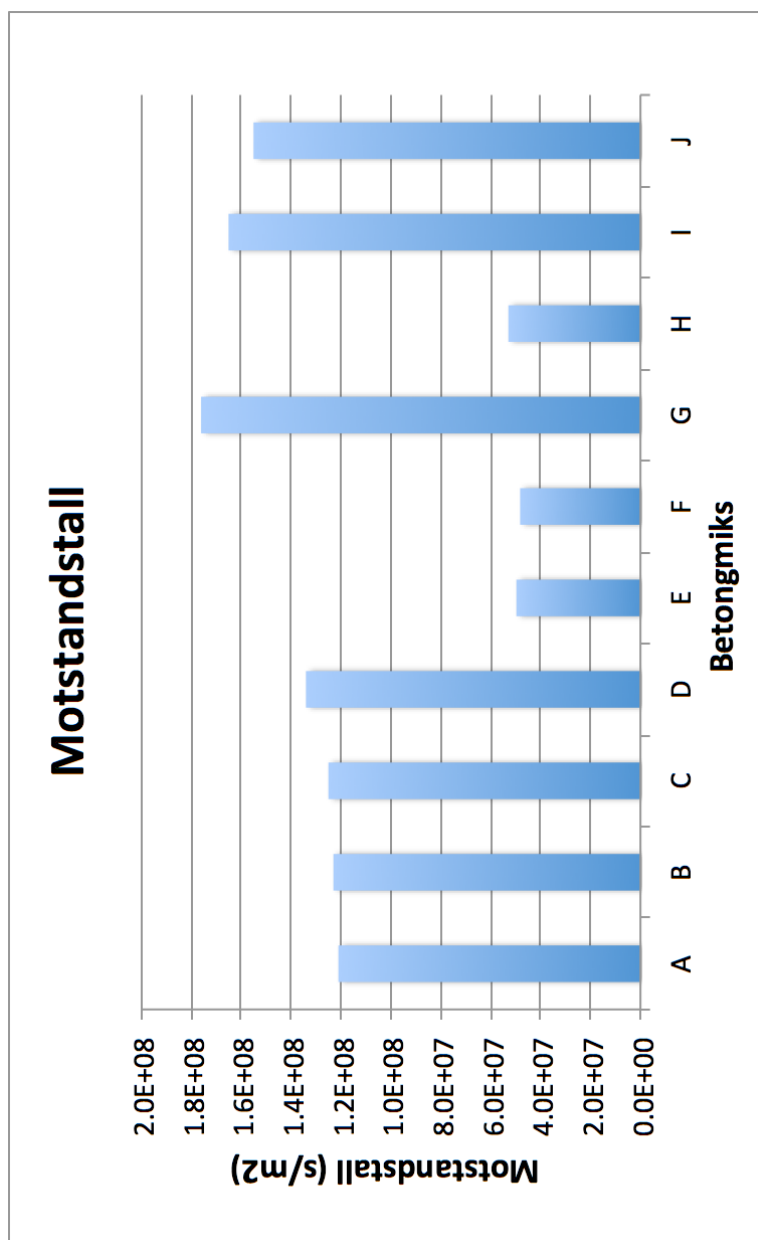
SS 2012-04-26

Betongresept J

Størrelse	Middelverdier	Var. koeff. / std.av.
Moistandstall	1.55E+08 [s/m ²]	20.5 %
Kapillaritetstall	1.03E-02 [kg / m ² s]	8.5 %
Sugporøsitet	13.5 [% vol.]	1.7 %
Åpen makroporøsitet	0.3 [% vol.]	3.8 %
Lukket makroporøsitet	2.9 [% vol.]	6.0 %
PF-verdi (samlet)	0.17	-
Faststoffdensitet	2684 [kg / m ³]	6 [kg / m ³]
Tørrdensitet	2235 [kg / m ³]	15 [kg / m ³]

Antatt bindemiddelmengde	413 [kg/m ³]
Estimert mengde sementlim	312 [l/m ³]
Antatt hydratasjonsgrad	0.70
Antatt possolaninnhold	10 [%]
Estimert masseforhold	0.43





A.6 Betongresepter

Inneholder i følgende rekkefølge:

- Miks A
- Miks B
- Miks C
- Miks D
- Miks E
- Miks F
- Miks G
- Miks H
- Miks I
- Miks J

Proj./id.: A ref-mix: portland-sement, 10% silika, w/b=0.40

Blandevolum:	40 liter
Dato:	28.januar
Tidspunkt for vanntilsetning	8:30
Ansvarlig:	Bjarne Fossum
Utført av:	Bjarne og Steinar

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Ålborg rapid?	381.1	15.2			15.246
Silika	38.1	1.5	0	0.0	1.525
Flyveaske	0.0	0.0	0	0.0	0.000
Fritt vann	167.7	6.7		-0.9	5.798
Absorbert vann	11.8	0.5			0.474
Årdal 0/8 mm nat. vask.	978.3	39.1	1.5	0.6	39.721
Årdal 8/16mm	802.9	32.1	0.5	0.2	32.275
Årdal 16/22 mm	0.0	0.0	0.5	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
Mapei Dynamon SX-N	5.0	0.2	82	0.2	0.198
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
Stålfiber	0.0	0.0			0.000
PP-fiber	0.0	0.0			0.000

6.272

175.2 gram ble brukt

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	15 min	20 min			
Synkmål	21				
Utbredelsesmål					
Luft		1.70%			
Densitet	19292	8002			2.411 kg/dm ³

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger					
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					

A.6. BETONGRESEPTER

Prosj./id.: B CEM3-B (75% slagg), w/b= 0.35

Blandevolum:	40 liter
Dato:	28. januar
Tidspunkt for vanntilsetning	12:30
Ansvarlig:	Bjarne Fossum
Utført av:	Bjarne og Steinar

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
CEM3	480.8	19.2			19.230
Slika	0.0	0.0	0	0.0	0.000
Flyveaske	0.0	0.0	0	0.0	0.000
Fritt vann	168.3	6.7		-0.9	6.806
Absorbent vann	11.2	0.4			0.447
Ardal 0/8 mm nat. vask.	859.2	34.4	1.5	0.5	34.885
Ardal 8/16mm	861.8	34.5	0.5	0.2	34.645
Ardal 16/22 mm	0.0	0.0	0.5	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
Mapei Dynamon SX-N	7.2	0.3	82	0.2	0.288
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
Stålfiber	0.0	0.0			0.000
PP-fiber	0.0	0.0			0.000

6.25

97.5 gram ble brukt

*Se fotnote på delark "Proporsjonering" ** NBI Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong				
Tid etter vanntilsetning	12 min	18 min		
Synkmål	21			
Utbredelsesmål				
Luft		1.20%		
Densitet	19381	8002		2.422 kg/dm ³

Prøvestykker (antall)				
Utstøpningstidspunkt				
Terninger				
150x300 sylindre				
100x200 sylindre				

Prosj./id.: D	CEM3 (75% slagg), 10% silika, w/b= 0.40
----------------------	--

Blandevolum:	40 liter
Dato:	30. januar
Tidspunkt for vanntilsetning	9:35
Ansvarlig:	Bjarne Fossum
Utført av:	Bjarne og Steinar

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
CEM3	374.2	15.0			14.967
Silika	37.4	1.5	0	0.0	1.497
Flyveaske	0.0	0.0	0	0.0	0.000
Fritt vann	164.6	6.6		-1.6	4.974
Absorbert vann	11.8	0.5			0.474
Årdal 0/8 mm nat. vask.	978.3	39.1	3.3	1.3	40.425
Årdal 8/16mm	802.9	32.1	0.5	0.2	32.275
Årdal 16/22 mm	0.0	0.0	0.5	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
Mapei Dynamon SX-N	4.9	0.2	82	0.2	0.195
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
Stålfiber	0.0	0.0			0.000
PP-fiber	0.0	0.0			0.0

5.448

126 gram ble brukt

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	17 min	22 min			
Synkmål	15				
Utbredelsesmål					
Luft		2.60%			
Densitet	19229	8002			2.403 kg/dm ³

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger					
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					

A.6. BETONGRESEPTER

Prosj./id.: C CEM3 (75% slagg), w/b= 0.40					
Blandevolum:	40 liter				
Dato:	30. januar				
Tidspunkt for vanntilsetning	10:00				
Ansvarlig:	Bjarne Fossum				
Utført av:	Bjarne og Steinar				
Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
CEM3	417.6	16.7			16.705
Silika	0.0	0.0	0	0.0	0.000
Flyveaske	0.0	0.0	0	0.0	0.000
Fritt vann	167.0	6.7		-1.6	5.065
Absorbent vann	11.8	0.5			0.474
Ardal 0/8 mm nat. vask.	978.3	39.1	3.3	1.3	40.425
Ardal 8/16mm	802.9	32.1	0.5	0.2	32.275
Ardal 16/22 mm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
Mapei Dynamon SX-N	5.0	0.2	82	0.2	0.200
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
Stålfiber	0.0	0.0			0.000
PP-fiber	0.0	0.0			0.000
*Se fotnote på delark "Proporsjonering" ** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og Tilere					
Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	12 min	21 min			
Synkmål	16				
Utbredelsesmål					
Luft		2%			
Densitet	19248	8002			2.405 kg/dm ³
Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger					
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					

5.539

84.8 gram ble brukt

Prosj./id.: E	FA-sement, w/b=0.35
----------------------	----------------------------

Blandevolum:	40 liter
Dato:	3. februar
Tidspunkt for vanntilsetning	9:45
Ansvarlig:	Bjarne Fossum
Utført av:	Bjarne og Steinar

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Anleggsement	480.8	19.2			19.230
Silika	0.0	0.0	0	0.0	0.000
Flyveaske	0.0	0.0	0	0.0	0.000
Fritt vann	168.3	6.7		-1.3	5.462
Absorbert vann	11.2	0.4			0.447
Ardal 0/8 mm nat. vask.	859.2	34.4	2.5	0.9	35.229
Ardal 8/16mm	861.8	34.5	0.5	0.2	34.645
Ardal 16/22 mm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
Mapei Dynamon SX-N	7.2	0.3	82	0.2	0.288
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
Stålfiber	0.0	0.0			0.000
PP-fiber	0.0	0.0			0.000

5.910

142.3 gram ble brukt

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NBI Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	15 min	20 min			
Synkmål	20				
Utbredelsesmål					
Luft		1.20%			
Densitet	19400	8002			2.424 kg/dm ³

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger					
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					

A.6. BETONGRESEPTER

Prosj./id.: F FA-sement, w/b=0.40

Blandevolum:	40 liter
Dato:	3. februar
Tidspunkt for vanntilsetning	8:30
Ansvarlig:	Bjarne Fossum
Utført av:	Bjarne og Steinar

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Anleggsement	417.6	16.7			16.705
Silika	0.0	0.0	0	0.0	0.000
Flyveaske	0.0	0.0	0	0.0	0.000
Fritt vann	167.0	6.7		-1.3	5.379
Absorbent vann	11.8	0.5			0.474
Ardal 0/8 mm nat. vask.	978.3	39.1	2.5	1.0	40.112
Ardal 8/16mm	802.9	32.1	0.5	0.2	32.275
Ardal 16/22 mm	0.0	0.0	0.5	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
Mapei Dynamon SX-N	5.0	0.2	82	0.2	0.200
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
Stålfiber	0.0	0.0			0.000
PP-fiber	0.0	0.0			0.000

5.852

106.6 gram ble brukt

*Se fotnote på delark "Proporsjonering" ** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og Tilere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	14 min		23		
Synkmål		21			
Utbredelsesmål					
Luft			1.40%		
Densitet	19308		8002		2.413 kg/dm ³

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger					
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					

Prosj./id.: G	FA-sement, +silika, w/b=0.40
----------------------	-------------------------------------

Blandevolum:	40 liter
Dato:	5. februar
Tidspunkt for vanntilsetning	10:03
Ansvarlig:	Bjarne Fossum
Utført av:	Bjarne og Steinar

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Anleggsement	374.2	15.0			14.967
Silika	37.4	1.5	0	0.0	1.497
Flyveaske	0.0	0.0	0	0.0	0.000
Fritt vann	164.6	6.6		-1.3	5.307
Absorbert vann	11.8	0.5			0.474
Årdal 0/8 mm nat. vask.	978.3	39.1	2.5	1.0	40.093
Årdal 8/16mm	802.9	32.1	0.5	0.2	32.275
Årdal 16/22 mm	0.0	0.0	0.5	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
Mapei Dynamon SX-N	4.9	0.2	82	0.2	0.195
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
Stålfiber	0.0	0.0			0.000
PP-fiber	0.0	0.0			0.000

5.780

126.6 gram ble brukt

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NBI Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	12 min	17 min			
Synkmål	16				
Utbredelsesmål					
Luft		ca 1.8%			
Densitet	19162	8002			2.395 kg/dm ³

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger					
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					

A.6. BETONGRESEPTER

Prosj./id.: H FA-sement, +10% ekstra FA, w/b=0.4

Blandevolum:	40 liter
Dato:	5. februar
Tidspunkt for vanntilsetning	0:40
Ansvarlig:	Bjarne Fossum
Utført av:	Bjarne og Steinar

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Anleggsement	374.2	15.0			14.967
Silika	0.0	0.0	0	0.0	0.000
Flyveaske	37.4	1.5	0	0.0	1.497
Fritt vann	164.6	6.6		-1.3	5.307
Absorbent vann	11.8	0.5			0.474
Ardal 0/8 mm nat. vask.	978.3	39.1	2.5	1.0	40.093
Ardal 8/16mm	802.9	32.1	0.5	0.2	32.275
Ardal 16/22 mm	0.0	0.0	0.5	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
Mapei Dynamon SX-N	4.9	0.2	82	0.2	0.195
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
Stålfiber	0.0	0.0			0.000
PP-fiber	0.0	0.0			0.000

5.780

94.7 gram ble brukt

*Se fotnote på delark "Proporsjonering" ** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	10 min	14 min			
Synkmål	20 cm				
Utbredelsesmål					
Luft		1.40%			
Densitet	19244	8002			2.405 kg/dm ³

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger					
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					

Prosj./id.: I	FA-sement, +silika og FA, w/b=0.40
---------------	------------------------------------

Blandevolum:	40 liter
Dato:	11. februar
Tidspunkt for vanntilsetning	13:17
Ansvarlig:	Bjarne Fossum
Utført av:	Bjarne og Steinar

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Anleggsement	338.9	13.6			13.557
Silika	33.9	1.4	0	0.0	1.356
Flyveaske	33.9	1.4	0	0.0	1.356
Fritt vann	162.7	6.5		-1.1	5.416
Absorbert vann	11.8	0.5			0.474
Årdal 0/8 mm nat. vask.	978.3	39.1	2.0	0.8	39.909
Årdal 8/16mm	802.9	32.1	0.5	0.2	32.275
Årdal 16/22 mm	0.0	0.0	0.5	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
Mapei Dynamon SX-N	4.7	0.2	82	0.2	0.190
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
Stålfiber	0.0	0.0			0.000
PP-fiber	0.0	0.0			0.000

5.890

120 gram ble brukt

*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	13.30 min	18 min			
Synkmål	20				
Utbredelsesmål					
Luft		1.70%			
Densitet	19170	8002			2.396 kg/dm ³

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger					
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					

A.6. BETONGRESEPTER

Prosj./id.: J FA-sement, +silika, 5% luft, w/b=0.40

Blandevolum:	50 liter
Dato:	11. februar
Tidspunkt for vanntilsetning	10:35
Ansvarlig:	Bjarne Fossum
Utført av:	Bjarne og Steinar

Materialer	Resept kg/m ³	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Anleggsement	375.4	18.8			18.771
Silika	37.5	1.9	0	0.0	1.877
Flyveaske	0.0	0.0	0	0.0	0.000
Fritt vann	165.2	8.3		-1.3	6.944
Absorbent vann	11.3	0.6			0.565
Årdal 0/8 mm nat. vask.	933.2	46.7	1.98	0.9	47.583
Årdal 8/16mm	765.8	38.3	0.5	0.2	38.481
Årdal 16/22 mm	0.0	0.0	0.5	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000
Mapei Dynamon SX-N	4.9	0.2	82	0.2	0.244
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
	0.0	0.0	100	0.0	0.000
Stålfiber	0.0	0.0			0.000
PP-fiber	0.0	0.0			0.000

7.508

151.5 gram ble brukt

*Se fotnote på delark "Proporsjonering" ** NB! Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

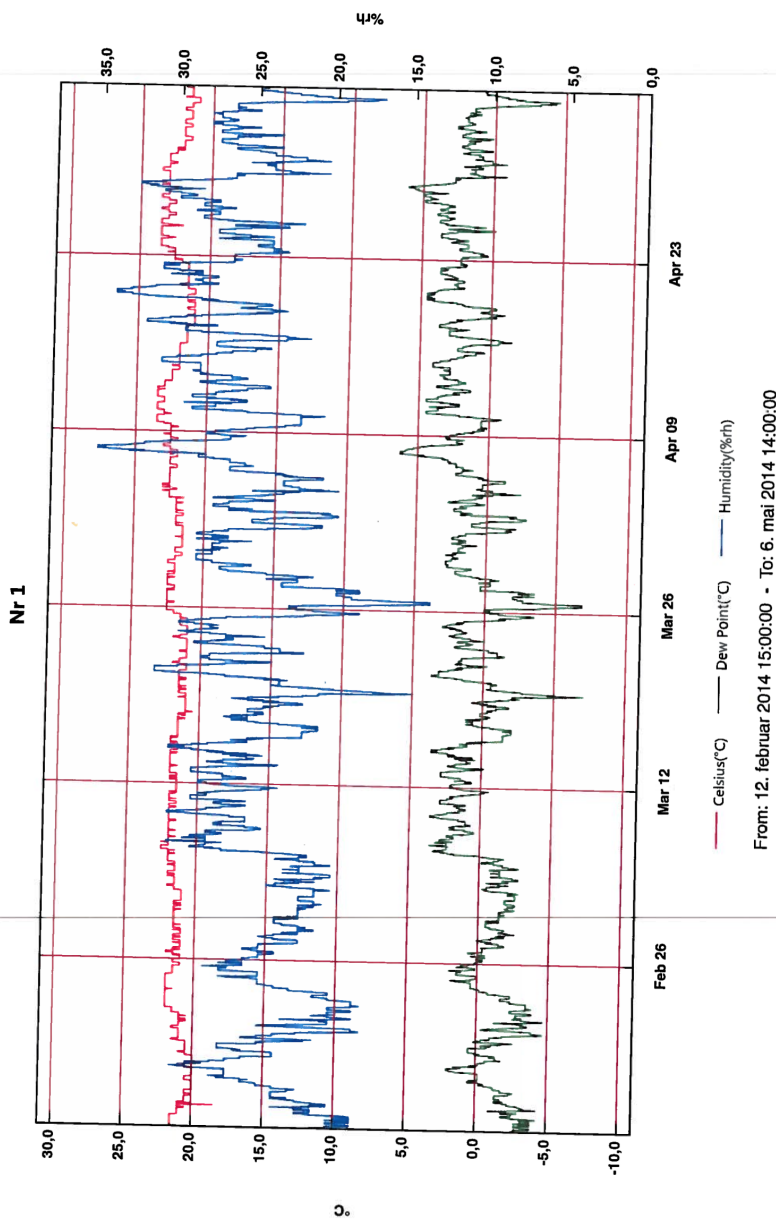
Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	10 min	19 min 30			
Synkmål		20			
Utbredelsesmål					
Luft	4.70%				
Densitet	18547	8002			2.318 kg/dm ³

Prøvestykker (antall)					
Utstøpningstidspunkt					
Terninger					
150x300 sylindre					
100x200 sylindre					

A.7 Tilleggsinformasjon

Inneholder i følgende rekkefølge:

- Temperatur og RF i betonglaboratorie
- Produktdatablad for elektrisk ledende gummi
- Siktekurve agg. 0-2 mm
- Siktekurve agg. 8-16 mm



ZOFLEX® CD45.1 Conductive Rubber Sheets

ZOFLEX® CD45.1 is highly conductive with a Shore A hardness of 45. Compared to our pressure-activated conductive rubber, it is highly conductive without applying any pressure. It can be used as flexible electrical contacts, RFI/EMI shielding and antistatic materials.

Characteristic	Data	Conditions
Operating Voltage Range	0-15V	DC, AC
Volume Resistivity	0.1 ohm·cm	25°C, 1cm cube, opposite faces
Resistance	1 ohm	25°C, 1cm square, 1mm thick, opposite sides 1cm apart
Maximum current	0.5A @ 15V	1cm ² , 1mm thick
Shore A Hardness	45	25°C
Density	1.70 g/cm ³	25°C
% Elongation	50%	25°C

Application notes:

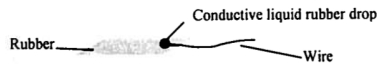
1. Attaching CD45.1 to plastics, rubber, wood or metal:

RTV silicone adhesive/sealant can be used to perform the task.

1. Make sure the surfaces are clean.
2. Apply a thin bead of silicone
3. Cure at 25°C for ~1-2 hrs
4. Cure at 45°C for ~4-5 hrs

2. Wire Attachment:

Method 1: Use our Zoflex® FL conductive liquid rubber (sold separately). Please make sure to apply enough liquid conductive rubber to achieve thickness (after cure) of at least 1mm.



Method 2: Set a brass or copper eyelet in a conductive rubber sheet (see picture below), and then solder wires to the eyelet.



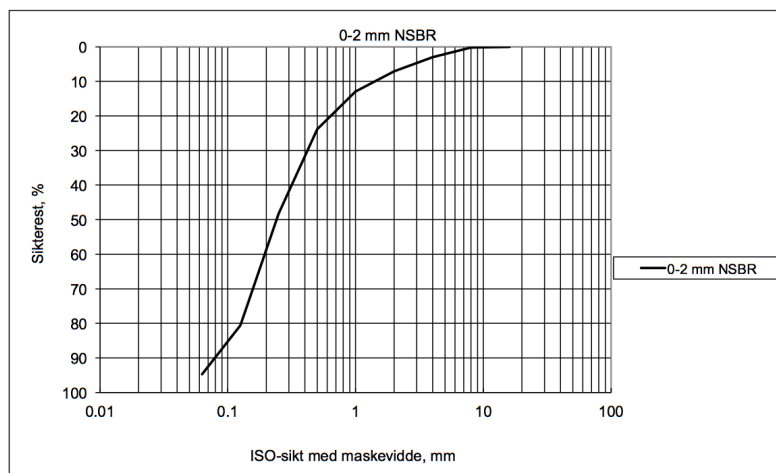


Laboratorietilslag
NorStone Årdal
Ankom November 2012
A-3995

Bestilt til COIN P3.1

TILSLAGSGRADERING

Vårt merke	Sikterest i % på sikt maskevidde, mm										
	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	32	
0-2 mm NSBR	94.7	80.6	48.2	23.8	12.9	7.1	3	0.2	0		





Laboratorietilslag
NorStone Årdal
Ankom November 2012
A-3995

Bestilt til COIN P3.1

TILSLAGSGRADERING

Vårt merke	Sikterest i % på sikt maskevidde, mm										
	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	11.2	16	20
8-16 mm							99.8	98.9	83.7	19.5	0

