

Forord

Denne masteroppgåva er eit resultat av det avsluttande prosjektarbeidet på masterstudiet i Byggingteknikk og arkitektur på Noregs miljø- og biovitenskaplege universitet (NMBU) på Ås. Problemstillinga for oppgåva blei aktualisert og foreslått av Bjørn-Erik Andersen under sommarjobb i Asplan Viak. Det har vore spennande og lærerikt å jobbe med ei oppgåve som tek for seg ei dagsaktuell problemstilling i bransjen. Dette har gitt meg mange nyttige erfaringar.

Eg vil rette ein spesiell takk til Bjørn-Erik Andersen i Asplan Viak som har vore fagleg rettleiar for meg i arbeidet med denne oppgåva. Takk for godt samarbeid, interesse og nyttige innspel heile vegen – det har vore inspirerende å samarbeide med ein av landets fremste ekspertar på bygningsfysikk og betongteknologi. Ein stor takk også til rettleiar frå NMBU, Tormod Aurlien på seksjon for bygg- og miljøteknikk, for entusiasme og god dialog gjennom heile prosessen.

Undervegs i forsøksarbeidet har diskusjonar med Noralf Bakken hos SINTEF Byggeforsk i Trondheim vore til stor nytte. Takk for at du tok imot meg på omvisning i laboratoriet og for at du har vore positiv og interessert i å prate kvar gong eg har teke kontakt. Takk også til Sivert Uvsløkk hos SINTEF Byggeforsk for nyttige råd under arbeidet med analyser av forsøksresultata.

Knut O. Kjellsen og Tor Magnus Zachariassen hos Norcem FoU i Brevik har vore positive og hjelpsame heilt frå eg var innoft fabrikken fyrste gongen. Takk for at de stilte arbeidskraft, materialer og lokale til fri disposisjon under arbeidet med støyping av prøvene. Takk også til Magnus Skjeggstad og Marius Amundsen for praktisk hjelp på betonglaben hos Norcem FoU, og til Thormod Busk og labgjengen for eit triveleg arbeidsmiljø i vekene med støypearbeid.

Verkstaden og labmiljøet på instituttet har vore til god hjelp med labrelaterte ting undervegs. Takk til Andreas Flø, Tom Ringstad, Bjørn Brenna og Jon Asper for lån av diverse utstyr og hjelp med bestilling av materiell. Takk til Holte Industri for lån av luftavfuktar under forsøksperioden.

Ein heil gjeng med hjelpsame venner har vore avgjerande for at arbeidet med forsøka har late seg gjennomføre på ein vellykka måte. Ein stor takk til Ole Bjerk, Nikolai Moskvil, Håvard Lien, Hans Jørgen Bjerva, Marlene Sørli, Stephen Westerås, Miriam S. W. Stendal, Olve Stendal og Lars Bogstad for at de har vore så positive og lettvinde å spørje om hjelp til praktiske ting.

Ein stor takk til Torbjørn Friborg for hjelp med statistiske analyser og grundige innspel og tilbakemeldingar i det avsluttande arbeidet med oppgåva. Takk også til Håvard Lien, Reidun Thalseth og Nikolai Moskvil for nyttige bidrag under innspurten. Takk til May L. Bjerk og Ole Bjerk for innbinding av oppgåva og for alltid å vere på tilbodssida. Og takk til alle dykk som har halde meg med selskap på Fløy 5 i haust og gjort tida med skriving til ein triveleg periode.

Til sist ein hjarteleg og stor takk til familien og gode venner for all støtte undervegs i arbeidet!

Ås, 15. desember 2015

Gunleiv Sæland

Samandrag

I bygningar med høge temperaturar og høg fuktbelastning stillast det strenge krav til diffusjonstettleik i ytterkonstruksjonen. Dette er ei særleg aktuell problemstilling i symjehallar og badeanlegg, der ein ofte opererer med høg temperatur og høg luftfuktigheit. Vanlegvis løyser ein behovet for diffusjonstetting ved å lime på ein membran på innsida av betongkonstruksjonen. Mykje tyder på at betongen i seg sjølv er tett nok til å tilfredsstille krava, særleg ved bruk av pozzolantilsetjingar. Dagens dokumentasjon for diffusjonseigenskapar i betong er basert på forholdet mellom vatn og sement som einaste variabel. Dermed fangar ein ikkje opp effekten av pozzolantilsetjingar og korleis dette påverkar vassdamppermeabiliteten. Den tilgjengelege dokumentasjonen som blir brukt i bransjen i dag bør reflektere dei verkelege eigenskapane i betongen, og prøvemetoden bør fange opp dette.

Målet med laboratoriearbeidet i denne oppgåva er å kartlegge diffusjonseigenskapar i betong med pozzolantilsetjingar, og samtidig gjere ei vurdering av metoden som brukast til dette. For å vurdere diffusjonseigenskapar i prøvene opp mot kvarandre er vassdamppermeabiliteten vald som parameter. Forsøksopplegget består i å teste mørtel- og betongprøver med to ulike sementtypar. Innanfor kvar sementtype testast ulike nivå av pozzolantilsetjingar, og dette gir grunnlag for å vurdere forskjell i vassdamppermeabilitet mellom prøveseriane.

Resultata frå forsøket viser ein signifikant reduksjon i vassdamppermeabilitet for prøver med opp til 10 % silikatilsetjing for begge sementtypane. På dette nivået kan ein ut frå forsøka rekne det som realistisk å oppnå inntil 50 % reduksjon i vassdamppermeabilitet. Det er registrert store variasjonar i enkelte prøveresultat, særleg gjeld dette seriane med betongprøver, noko som er tilfelle også for liknande testar i akrediterte laboratorium.

Det er tydeleg at pozzolantilsetjingar i form av silikastøv har stor effekt på vassdamppermeabiliteten. Reduksjonen i permeabilitet har direkte samanheng med reduksjon i konstruksjonstjukkuleik. Dette illustrerer behovet for å oppdatere dagens dokumentasjon på dette området. Prøvemetoden bør leggjast opp slik at ein tydeleg får fram effekten av pozzolantilsetjingar i betongen. På den måten kan ein prosjektere med kunnskap om dei verkelege eigenskapane i betongen, og dermed redusere konstruksjonstjukkuleiken der ein ønskjer å bruke betong som diffusjonssperre. Dette gir grunnlag for store positive verknader både miljømessig og økonomisk i byggeprosjekta.

Abstract

Buildings exposed to high temperatures and high relative humidity poses strict requirements to diffusion tightness in outer construction. This is a particularly important issue at indoor pool facilities, where you will find high temperatures and high relative humidity. A membrane is normally attached to the inside of the concrete construction to assure correct diffusion tightness. Pozzolanic additives in the concrete suggest that the concrete itself satisfies the demands of diffusion tightness. Current documentation for diffusion properties in concrete is only based on the relation between water and cement, meaning that current test-methods are not recording the effect of pozzolanic addition and how pozzolanic addition affects the water vapor permeability. The documentation should reflect the actual properties of the concrete, and so the test-method should record effects of pozzolanic addition.

The aim of this paper is to survey the diffusion properties in concrete with pozzolanic addition, and to assess the method in question. Water vapor permeability is chosen as parameter to compare the diffusion properties of the test samples. The research consists of testing mortar- and concrete samples with two different types of cement. Different levels of pozzolanic addition are tested for each type of cement, which allows assessment of the difference in water vapor permeability between the test series.

The results of the research demonstrate a significant reduction in water vapor permeability for samples with up to 10% silica additives for both types of cement. The research indicate that on this level of silica additives, it is reasonable to expect up to 50% reduction in water vapor permeability. Extensive variations are recorded in some of the samples, this applies especially to the concrete samples, which is also common in similar tests in accredited test laboratories.

It is evident that pozzolanic additives as silica fume greatly affects the water vapor permeability. Reduction in permeability is in direct context with reduction in construction thickness. This illustrates the need to update the current documentation on this aspect. The test-methods should be modified so that it can record the effect of pozzolanic additives in the concrete, which will contribute to reduction of construction thickness where concrete is used as diffusion seal. Reduction of construction thickness will in the long run have a positive impact on both environment and economy.

Innhald

Forord	I
Samandrag	II
Abstract	III
Innhald	IV
Figurliste	V
Tabelliste	VI
Ordforklaringar	VII
1 Innleiing	1
1.1 Bakgrunn for oppgåva	1
1.2 Problemstilling	3
2 Teori	5
2.1 Lovar, forskrifter og anbefalingar	5
2.2 Betong	6
2.3 Sement	6
2.4 Pozzolanar	7
2.4.1 Silika	8
2.4.2 Flygeaske	9
2.5 Hydratiseringsprosessar	9
2.5.1 Hydratisering av sement	9
2.5.2 Pozzolanreaksjonen	11
2.6 Diffusjon av vassdamp	12
2.6.1 Vassdamppermeabilitet	12
2.6.2 Diffusjon i bygningar	13
2.6.3 Diffusjonsmekanismar i betong	15
2.7 Samanheng mellom fuktnivå og fukttransport i betong	16
2.8 Bruk av betong som diffusjonstetting	18
2.8.1 Dagens situasjon	18
2.8.2 Forbetringspotensiale	19
2.8.3 Dokumentasjon av eigenskapar – prøvemetode	19
2.9 Berekningsgrunnlag	20
3 Materiale og metode	21
3.1 NS-EN ISO 12572 – metodegjennomgang	21
3.1.1 Krav til prøver og utstyr	24
3.1.2 Nøyaktigheit	24
3.2 Planlegging og forarbeid til støyping	25
3.3 Støypearbeid hos Norcem FoU	28
3.3.1 Blandeprosedyre	28
3.3.2 Kontrollrutiner for fersk mørtel og betong	29
3.3.3 Utstøypingsprosedyre	31
3.3.4 Herdeprosess	33
3.4 Klargjering av prøver til forsøk	34
3.4.1 Saging av prøvestykke	34
3.4.2 Preparering av prøvestykke	35
3.4.3 Saltløysing av KNO ₃ (kaliumnitrat)	35
3.4.4 Montering av prøver	36
3.4.5 Veging av prøver	38
3.4.6 Avvik under forsøksperioden	39

4	Resultat	40
4.1	Resultat og analyser	40
4.1.1	Mørtelprøver	42
4.1.2	Referanseprøver utan silika	46
5	Diskusjon	50
5.1	Kommentarar til resultatata frå forsøket	50
5.2	Evaluering av forsøket – feilkjelder	52
5.3	Samanlikning med anna forskning	54
5.4	Vurdering av koppmetoden og forbettringspotensiale	56
5.5	Resultat frå oppgåva i ein større samanheng	58
5.6	Vidare arbeid	59
6	Konklusjon	61
7	Litteraturliste	62
	Vedlegg	IX
	Vedlegg A Dokumentasjon av eigenskapar i prøvene	IX
	Vedlegg B Klimarom – bygging og drift	XVII
	Vedlegg C Logg for klimautvikling i klimarom	XX
	Vedlegg D Vegeedata for kvar enkelt prøve	XXII
	Vedlegg E Berekna enkeltverdiar for vassdamppermeabilitet	XXXIII
	Vedlegg F Vektutvikling for dummy-prøver	XXXIV
	Vedlegg G Risikovurdering diamantsag	XXXVI
	Vedlegg H Kalibreringsbevis TinyTag TGP-4500	XXXVII

Figurliste

Figur 1-1 Tromsøbadet er eit døme på eit byggeprosjekt med strenge krav til diffusjonstettleik	3
Figur 2-1 Roteromnen hos Norcem i Brevik er 68 m lang og har ein døgntroduksjon på 3500 tonn klinkar	7
Figur 2-2 Fotografi av ein del av hydratiseringsprosessen av sement sett gjennom eit elektronmikroskop	10
Figur 2-3 Prinsippskisse for diffusjon av vassdamp	13
Figur 2-4 Ulike fuktnivå i eit materiale gir ulike former for lagring og transport av fukt.	17
Figur 3-1 Alternative metodar for montering av prøver	22
Figur 3-2 Døme på montering av prøve i laboratoriet til Sintef i Trondheim	23
Figur 3-3 Sikting av sand. Fraksjonen 0/8 mm (til høgre) blei sikta ned til 0/3 mm (til venstre) til bruk i mørtelprøvene	25
Figur 3-5 Støypeformer laga av 200 mm trykkrør i polyetylen. Tetting med Tec7 og skrueforbinding mot finerplate i botn	26
Figur 3-4 Ventilasjonsendelokk med same diameter som støypeformene	26
Figur 3-7 Kontrollrutine for måling av synk	29
Figur 3-6 Luftmålar av typen FormTest B2020	29
Figur 3-8 Døme på luftpore i ei prøve	31

Figur 3-9 Vibrering av mørtelprøve i flere lag.....	31
Figur 3-10 Kontroll av separasjon i vibrert betongprøve. Tilslaget er framleis jamt fordelt øvst og nedst.....	31
Figur 3-11 Avforma mørtelprøver klare til herding i vatn.....	32
Figur 3-12 Mørtelprøver til kontroll av fastleik.	32
Figur 3-13 Herding i neddykka tilstand i herdebasseng hos Norcem FoU.	33
Figur 3-14 Saging av prøvestykke.....	34
Figur 3-15 Tilpassing av prøvestykke.	35
Figur 3-16 Prinsippskisse for montering av prøver.	35
Figur 3-17 Oversikt over det nødvendige utstyret og materiala til montering av prøver.	36
Figur 3-18 Dummy-prøve med tett glasslokk.	37
Figur 3-19 Ferdig montert prøve klargjort for forsøk.	37
Figur 3-20 Prøvene blei plassert i hylle med tre høgder i klimarommet.	37
Figur 3-21 Enkel løfteanordning for sikker flytting av prøver.	38
Figur 3-22 Prøve med tydeleg saltgjennomtrenging.....	39
Figur 4-1 Vassdamppermeabilitet for mørtelprøver med sementtype Standard FA.	42
Figur 4-2 Vassdamppermeabilitet for mørtelprøver med sementtype Industri.	43
Figur 4-3 Samanlikning av forsøksresultat for Standard FA og Industri.....	45
Figur 4-4 Vassdamppermeabilitet for mørtelprøveseriar utan silikatilsetjing.....	46
Figur 4-5 Vassdamppermeabilitet for betongprøveseriar utan silikatilsetjing.	48
Figur B-1 Frå oppføring av klimarom i kjellaren på TF fløy 5.	XVII

Tabelliste

Tabell 0-1 Ordforklaring og aktuelle forkortingar i oppgåva.....	VII
Tabell 3-1 Oversikt over støypte prøveseriar med mørtel og betongprøver.....	27
Tabell 3-2 Blandeprosedyre for mørtel- og betongprøver.....	28
Tabell 4-1 Nøkkelverdiar for mørtelprøver med sementtype Standard FA.....	42
Tabell 4-2 Nøkkelverdiar for mørtelprøver med sementtype Industri.	43
Tabell 4-3 Nøkkelverdiar for mørtelprøver utan silikatilsetjing.....	46
Tabell 4-4 Nøkkelverdiar for betongprøver utan silikatilsetjing.....	48
Tabell 5-1 Dagens dokumenterte verdiar for vassdamppermeabilitet i betong.	54

Ordforklaringar

Ord	Forklaring
Betong	<i>Betong med grovt tilslag</i>
Bindemiddel	<i>Sement + pozzolanar</i>
Industri (IND)	<i>Norcem Industrisement (CEM I 42,5 R / CEM I-42,5 RR)</i>
Mørtel	<i>Betong med fint tilslag</i>
Norcem FoU	<i>Forskningsavdelinga og betonglaben hos Norcem i Brevik</i>
Pasta	<i>Bindemiddel + vatn</i>
Standard (STD)	<i>Norcem Standardsement (CEM I 42,5 R)</i>
Standard FA (STD FA)	<i>Norcem Standardsement med flygeasketilsetjing (CEM II/A-V 42,5 R)</i>
Tilsetjingsmateriale	<i>Erstatning for bindemiddel i betong, t.d. pozzolanar</i>
Tilsetjingsstoff	<i>Stoff i væskeform som tilsetjast for å påverke bestemte eigenskapar i betong i fersk tilstand</i>
v/(c+k·s)-forhold	<i>Masseforholdet mellom vatn og bindemiddel korrigert med verknadsfaktor k for pozzolantilsetjinga s</i>
v/c-forhold	<i>Masseforholdet mellom vatn og sement i betongen</i>
C ₃ S	<i>3CaO·SiO₂ - trikalsiumsilikat</i>
C ₂ S	<i>2CaO·SiO₂ - dikalsiumsilikat</i>
C ₃ A	<i>3CaO·Al₂O₃ - trikalsiumaluminat</i>
C ₄ AF	<i>4CaO·Al₂O₃·FeO₃ - tetrakalsiumaluminatferitt</i>
SiO ₂	<i>silisiumdioksid (silika)</i>
Ca(OH) ₂	<i>kalsiumhydroksid</i>
C-S-H	<i>CaO·SiO₂·H₂O - kalsiumsilikathydrat</i>

Tabell 0-1 Ordforklaring og aktuelle forkortingar i oppgåva

1 Innleiing

Betong er eit allsidig byggemateriale med mange moglegheiter for tilpassingar både materialteknisk, konstruksjonsmessig og arkitektonisk. Dei gamle romarane var tidleg ute med bruk av betong, og har i nyare tid fått æra for å vere pionerar i den tidlege historia til betongteknologien. I dagens samfunn er bruk av betong ein naturleg del av nær sagt alt som byggast, og det produserast og brukast i enorme mengder over heile verda.

Gjennom fleire år har betong hatt eit stempel som «klimaversting» – noko som ikkje er heilt utan grunn. Betong krev mykje ressursar i fleire ledd av produksjonen; særleg under framstilling av sement er energiforbruket stort. Sementproduksjon står i dag for 5-6 % av menneskeskapte utslepp av karbondioksid på verdsbasis (Rodrigues & Joeke 2010). Eit auka fokus på miljø har likevel gjort at bransjen dei seinare åra har teke innover seg at ein bør ta klimasituasjonen på alvor. Eit viktig tiltak i så måte er å redusere forbruket av betong til det absolutt nødvendige. Breiare og betre kunnskap om materiale eigenskapane i betong vil gi eit godt grunnlag for å kunne optimalisere mengder og forbruk i større grad enn det som blir gjort i mange samanhengar i dag.

1.1 Bakgrunn for oppgåva

Arbeidet med denne oppgåva har som mål å finne ut meir om diffusjonseigenskapane i betong med pozzolantilsetjingar, og sjå på moglegheiter for forbetringar i dokumentasjon av dei verkelege eigenskapane. Dette blir gjort både gjennom teoretiske drøftingar og diskusjon, samt gjennom eit ganske omfattande forsøksopplegg der ein ønskjer å sjå nærmare på, og evaluere, både materiale og prøvemetode.

Både byggebransjen generelt, og betongbransjen spesielt, herunder råvareprodusentar, byggherrar, rådgivingsmiljø og entreprenørar, er interesserte i meir presis kunnskap om materiale eigenskapar i betong. Det er eit ønskje om å sjå nærmare på eigenskapane knytt til vassdamppermeabilitet i betongen, med tanke på å kartlegge diffusjonseigenskapar i betong med eit breiare grunnlag og fleire variablar enn det ein hittil har basert seg på blant dei nemnde interessentane.

Diffusjonstetting mot vassdampgjennomgang er viktig i alle byggkonstruksjonar, men det er spesielt viktig i bygningar der fuktbelastninga er stor. Døme på bygg som stiller strenge krav til diffusjonstettleik er symjehallar og badeanlegg. Her kan ein fort kome

opp i temperaturar på 34°C og relativ luftfuktigheit opp mot 60 % (Andersen 2014), noko som betyr at fuktbelastninga på ytterkonstruksjonen blir svært høg. Normalt brukast plastfolie eller andre typar membranar som diffusjonstetting, for å sikre at vassdamp ikkje trengjer utover i konstruksjonen og fører til skader på byggemateriala lenger ut i konstruksjonen. Ulempene med desse membranane er at dei er sårbare for lekkasjar som følgje av skader og diskontinuitet i overgangar og rundt konstruksjonsdetaljer, samt at det er arbeidsamt å montere og blir eit fordyrande og tidkrevjande ledd i byggeprosessen (Geving & Thue 2002). På denne bakgrunnen har det blitt meir aktuelt å bruke betongkonstruksjonen som diffusjonstettande. I bygningar av denne typen er dei berande konstruksjonane ofte støypt i betong, og betongen er slik sett allereie til stades, så kvifor ikkje bruke denne som diffusjonstetting i ytterkonstruksjonen? Dette gir moglegheiter for ein meir diffusjonstett konstruksjon, og er samtidig ikkje noko hinder mot å bruke ei vanleg dampsperre i tillegg om ein vil det.

Når ein veljer å bruke betongen aleine som diffusjonstetting får ein som prosjekterande straks eit behov for å dokumentere at eigenskapane i betongen tilfredsstillar krav og anbefalingar til diffusjonstettleik. Med dagens dokumenterte diffusjonseigenskapar i betong blir ytterkonstruksjonane svært grove for at ein skal oppnå ein tilstrekkeleg vassdampmotstand (Edwardsen 2004). Verdiane ein tek utgangspunkt i har forholdet mellom vatn og sement i betongen som einaste variabel, men i dei fleste samanhengar i dag, og spesielt i den typen konstruksjonar ein her snakkar om, er det fleire variablar som sannsynlegvis påverkar vassdamppermeabiliteten i betongen.

Tilsetjing av pozzolanar i betong gir ein tettare mikrostruktur, og det er godt dokumentert at pozzolantilsetjing gir auka fastleik i betongen (Wang 2013). Det er grunn til å rekne med at dette har ein sterk innverknad på evna betongen har til å fungere som diffusjonstetting, men dette er ikkje dokumentert ved forsøk i dag. For å kunne fange opp dette treng ein dokumentasjon som er basert på forsøk der ein testar med dei aktuelle variablane, og slik kan skaffe relevante materialdata for den betongen som faktisk er i bruk i konstruksjonar der betong er tenkt å fungere som diffusjonstetting.

Effekten av betre dokumentasjon av materialeigenskapar vil i alle høve vere at ein kan prosjektere med kunnskap om dei faktiske eigenskapane, og på denne måten utnytte ein større del av potensialet i betong som eit allsidig byggemateriale.

1.2 Problemstilling

På bakgrunn av dei bransjeaktuelle tema som er nemnde innleiingsvis i oppgåva, reiser det seg følgjande spørsmål som denne oppgåva søker å finne svar på:

- *Er det mogleg å bruke betong som diffusjonstetting i bygg med strenge krav til diffusjonstettleik?*
- *Korleis påverkar pozzolantilsetjingar diffusjonseigenskapane i betongen?*
- *Er dagens metodar for å vurdere diffusjonseigenskapar i betong eigna?*



Figur 1-1 Tromsøbadet er eit døme på eit byggeprosjekt med strenge krav til diffusjonstettleik. Bilete henta frå <http://www.asplanviak.no/prosjekt/10093/> (05.12.2015)

Som problemstillinga indikerer dreier oppgåva seg fyrst og fremst om materialeigenskapar i betong, og forhold som gjeld byggeprosessen og byggeplassen er dermed mindre vektlagt. Det er forskjell på diffusjonstett *betong* og ein diffusjonstett *konstruksjon* – i denne omgang er det betongen i seg sjølv som er hovudfokuset.

2 Teori

I dette kapitlet vil teorigrunnlaget for oppgåva bli gjennomgått. Relevante hovudtema som blir tekne opp er materialeegenskapar, generell fuktteori og dagens situasjon når det gjeld bruk av betong som diffusjonstetting.

2.1 Lovar, forskrifter og anbefalingar

Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK) seier følgjande om generelle krav til diffusjonstetting i byggkonstruksjonar (Direktoratet for byggkvalitet (DIBK) 2010a):

«Bygningsdeler og konstruksjoner skal prosjekteres og utføres slik at de ikke blir skadelig oppfuktet av kondensert vanndamp fra inneluften.»

I rettleiinga til byggteknisk forskrift er det gitt preaksepterte ytingar og anbefalingar for å forklare kva som meinast med det generelle kravet i TEK. Utdrag frå dette er gitt under (Direktoratet for byggkvalitet (DIBK) 2010b):

«I varmeisolerte yttervegger (...) må det være et luft- og damptett sjikt, normalt en egen dampsperre, på varm side av varmeisolasjonen. Dampsperrrens viktigste oppgave er å hindre at konstruksjonen tilføres fukt fra inneluften ved luftlekkasjer og diffusjon. Dampsperrren må ha en Sd-verdi større eller lik 10 m.»

«I spesielle bygningstyper med høy innendørs luftfuktighet, som f.eks. svømmehaller, må man vie fuktsikringen særlig stor oppmerksomhet.»

Lovverket på området er ganske generelt. I denne samanhengen er det siste avsnittet spesielt relevant, og ein finn anbefalingar for korleis dette kan løysast blant anna i litteratur frå SINTEF Byggforsk. Det anbefalast at dampsperra i ein slik konstruksjon har ein ekvivalent luftlagstjukkuleik (Sd-verdi) på minimum 50 m (Edwardsen 2004). For å oppnå dette stillast det høge krav til materialbruk generelt, og spesielt dersom ein veljer å bruke betong som diffusjonstetting.

Som prosjekterande har ein dokumentasjonsplikt på at den valde løysinga tilfredsstillar det generelle kravet om å hindre fuktskader i bygningen. Ofte blir dette gjort ved simuleringar av fukttransport i materiala. Dette er svært vanleg i til dømes badelanlegg der det er stor fuktbelastning og få standardiserte løysingar. Ved slike berekningar er det derfor viktig at ein har materialdata som stemmer med dei faktiske eigenskapane til dei konstruksjonsdelane ein ønskjer å analysere. Slik er det ikkje i alle høve i dag.

2.2 Betong

Betong er eit svært fleksibelt byggemateriale som ugjer ein betydeleg del av byggeindustrien. I dag er årleg produksjon av betong på verdsbasis anslått til å vere meir enn 10 milliardar tonn (Rodrigues & Joekes 2010), noko som gir eit volum på om lag 4 (km)³. Denne mengda svarer til eit 10 centimeter tjukt betongdekke med like stort areal som heile landarealet til Danmark (Pihl 2015).

Betong består i utgangspunktet av to hovuddelar; pasta og tilslag. Pasta består av bindemiddel og vatn, og fungerer som «lim» mellom dei ulike partiklane i betongen. Som bindemiddel reknast sement og eventuelle tilsetjingsmateriale i form av pozzolanar. Dette blir nærmare gjennomgått i kapittel 2.3 og 2.4. Tilslag brukast for å gjere betongen sterkare, og består av sand og stein i ulike fraksjonar. Ulike tilslagsgraderingar påverkar ulike eigenskapar i betongen, både i fersk og herda tilstand. I tillegg til dei nemnde bestanddelane er også bruk av tilsetjingsstoff (sjå ordforklaring) for å regulere ulike eigenskapar vanleg i betong i dag. Betong består altså av mange delkomponentar som kvar og ein kan regulerast for å oppnå visse ønska eigenskapar. Dette gjer betong til eit svært samansett materiale, og følgjeleg er det vanskeleg å definere eigenskapar som gjeld generelt.

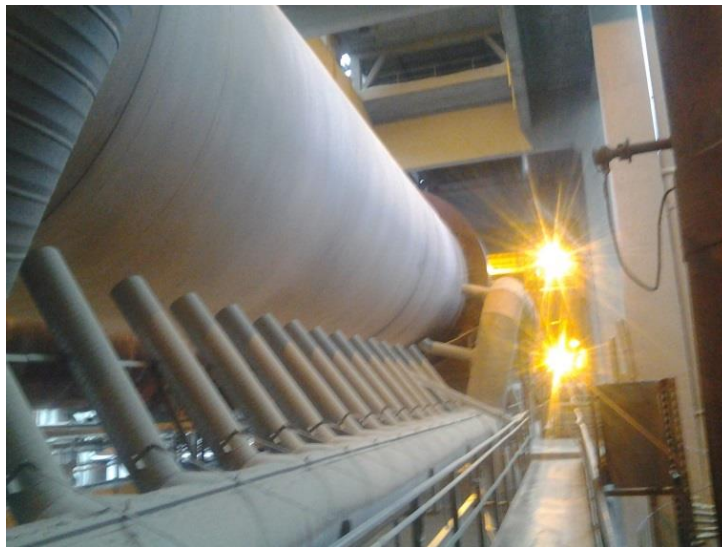
2.3 Sement

Sement er hovudbestanddelen av bindemidlet i betong, og utgjer vanlegvis rundt 20 vektprosent av den ferdige betongen. Råmaterialet i sement består av om lag 90 % kalkstein og 10 % sand, leire og mineral (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) (Kjellsen 2008; Myrdal 2015).

Sement i handelsform produserast ved at råmateriala malast opp og køyrast gjennom ein roterande omn ved høg temperatur. Det er store dimensjonar på denne produksjonen, slik det er illustrert i Figur 2-1. Under oppvarming i roteromnen skjer det ein kjemisk reaksjon som gir sintring av brent kalk og leire. Dette resulterer i danning av små kuler, som kallast sementklinkar. Klinkaren malast opp saman med gips og jernsulfat, samt eventuelle tilsetjingsmateriale som flygeaske, silika eller slag, til det ferdige produktet som kallast sement. Rein sement utan tilsetjingsmateriale av pozzolanar kallast portlandsement. Dette namnet har blitt hengande ved sementen

sidan muraren Joseph Aspdin tok patent på denne sementtypen i 1824 (SNL 2009). Norcem er i dag einaste produsent av sement i Noreg, og har produksjonsanlegg i Brevik i Telemark og Kjøpsvik i Nordland.

Produksjonen av sement er energikrevjande, spesielt på grunn av den høge temperaturen i roteromnen, og dette har bidrege til auka fokus på dei miljømessige sidene ved sementproduksjonen dei seinare åra. Norcem har blant anna CO₂-fangstanlegg og energi frå fyringsanlegg for hushaldsavfall som konkrete miljøtiltak i sementproduksjonen.



Figur 2-1 Roteromnen hos Norcem i Brevik er 68 m lang og har ein døgproduksjon på 3500 tonn klinkar.
Foto: Gunleiv Sæland

2.4 Pozzolanar

Pozzolanar er eit samleomgrep for materiale som dannar stoff med bindeegenskapar når dei reagerer med kalsiumhydroksid frå hydratiseringsprosessen mellom vatn og sement. Pozzolanar finst naturleg i mineral og berggrunn, men til industrielle formål er det mest vanleg å hente pozzolanar i form av biprodukt frå industrien. Silikastøv frå smelteverkindustri, flygeaske frå kolfyrte kraftverk og slagg frå metallindustri er pozzolanar brukt som tilsetjingsmateriale i betong. I Noreg er silika og flygeaske mykje brukte pozzolanar. Hovudforskjellen mellom silika og flygeaske er partikkelstorleik og innhald av silisiumdioksid (SiO₂). Silikastøv har ei spesifikk overflate (per kg) som er rundt 40 gonger så stor som flygeaske. Silikastøv inneheld meir enn 90 % SiO₂, mens flygeaske har rundt 50 % (Sellevoid 1990).

Bruk av pozzolanar påverkar fleire eigenskapar i betongen i tillegg til fastleiken, og effekten av pozzolantilsetjingane blir gjerne oppgitt med ein verknadsfaktor for kvar eigenskap. For å illustrere dette kan ein sjå på pozzolanet silika som har ein verknadsfaktor på 2 for eigenskapen fastleik. Dette betyr at tilsetjing av 1 kg silikastøv erstattar 2 kg sement, utan at fastleiksegenskapane blir endra (Standard Norge 2014 pkt. 5.2). Fastleik er det mest vanlege å rekne verknadsfaktor for, men i tillegg blir bestandigheit, sulfat- og syreangrepsmotstand, diffusjonstettleik og fryse-tine-problematikk påverka av pozzolantilsetjingar (Ganesh & Surya 1995).

Fordelane med å bruke pozzolanar i betong er mange. Frå eit teknisk synspunkt oppnår ein fordelar når det gjeld støypeeigenskapar, fastleik, tettleik og bestandigheit. I eit samfunnsmessig perspektiv er gevinstane store når det gjeld miljøet. Ved å bruke pozzolanar i betong blir ein kvitt det som elles ville vore rekna som avfallsstoff. Sidan ein kan erstatte ein del av sementen i betongen med pozzolanar, fører dette også til at forbruket av sement per kubikkmeter ferdig betong blir lågare. Pozzolanar er altså gunstig både fordi ein kvittar seg med eit avfallsproblem og samtidig reduserer sementforbruket. Dette gir i neste omgang eit godt utgangspunkt for rimelegare materialbruk i byggeprosjekt, og generelt økonomiske og miljømessige fordelar i byggebransjen.

2.4.1 Silika

Silikastøv er eit biprodukt frå produksjon av silisium og ferrosilisiumlegeringar. Denne typen produksjon går føre seg på smelteverk under høge temperaturar. Silikastøvet blir danna ved at silisium i gassform frå smelteomnen oksiderer i kontakt med oksygen i lufta og kondenserer til svært små partiklar av silika (SiO_2). Partiklane har ein diameter på rundt 0,1 μm og ei spesifikk overflate i området 18000 til 22000 m^2/kg , noko som svarer til arealet av nesten tre fotballbanar. Til samanlikning har portlandsement ei spesifikk overflate på 300-500 m^2/kg (Lagerblad & Utkin 1993).

Det er spesielt tre eigenskapar som gjer silikastøv godt eigna som tilsetjingsmateriale i betong: høgt innhald av SiO_2 , amorf struktur og svært stor spesifikk overflate. Dette gjer silikastøvet svært reaktivt med kalsiumhydroksid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) som blir produsert under hydratiseringa (sjå kapittel 2.5) av sement (Sellevoid 2008). Dette kallast pozzolanreaksjonen, og det er denne som gjer at det utviklast kraftige bindingar mellom partiklane.

I Noreg har det opp gjennom tidene vore mykje industri med utgangspunkt i smelteverk, blant anna fordi ein har god tilgang på store mengder rimeleg energi frå vasskraft. Elkem ASA var eitt av smelteverkkonserna som starta opp med kommersialisering av silikastøv, og er i dag ein av dei leiande aktørane i internasjonal samanheng når det gjeld produksjon og sal av silikastøv under merkenamnet Elkem Microsilica.

2.4.2 Flygeaske

Ved reinsing av røyken frå kolfyrte kraftverk filtrerast det ut støv som inneheld ubrente karbonpartiklar og SiO_2 , dette støvet kallast flygeaske. Flygeaske har ikkje den same reinleiken som silikastøv med tanke på SiO_2 -innhald, og dermed lågare verknadsgrad, men er likevel eit pozzolan som er mykje brukt i betong. Rein flygeaske er ikkje eit handelsprodukt som er tilgjengeleg, men er tilsett i sementmjølet som ein del av produksjonen på sementfabrikken. Sidan det ikkje er kolkraftverk i Noreg blir flygeaske importert hit frå land sør i Europa.

2.5 Hydratiseringsprosessar

Hydratisering betyr at eit stoff reagerer med vatn og dannar eit nytt produkt. I betongsamanheng er dette omgrepet relevant for reaksjonen som startar når bindemiddelet (sement og pozzolanar) kjem i kontakt med vatn. Resultatet av reaksjonen er at det dannast pasta med kraftige bindeegenskapar som held partiklane i betongen saman. Gjennomgangen på dei neste sidene er gjort med terminologi som er vanleg i betonglitteraturen, og kan derfor avvike frå eit korrekt kjemispråk.

2.5.1 Hydratisering av sement

Sement inneheld komponentar som har ulik reaksjonsfart i kontakt med vatn. Hovudkomponentane er trikalsiumsilikat (C_3S), dikalsiumsilikat (C_2S), trikalsiumaluminat (C_3A) og tetrakalsiumaluminatferitt (C_4AF). C_3S er i hovudsak viktig for tidlegfasteleiken i betongen, mens C_2S reagerer seinare og bidreg i større grad til den seinare fastleiksutviklinga. C_3A reagerer svært raskt i kontakt med vatn, og gir derfor eit stort bidrag til tidlegfasteleiken i betongen. For å bremse hydratiseringa av C_3A blir det tilsett gips i sementen, slik at ein har kontroll på reaksjonen. Utan gips ville betongen størkne alt for fort på grunn av C_3A -hydratiseringa. C_4AF har nokre av dei same eigenskapane som C_3A , men reagerer noko seinare og får derfor ikkje det same

problemet med for rask størkning (Sellevold 1990). Det er C_4AF som i stor grad bidreg til den velkjende grå fargen på sementen.

Hydratiseringsprosessen for sement kan med forenkla symbol skrivast slik:



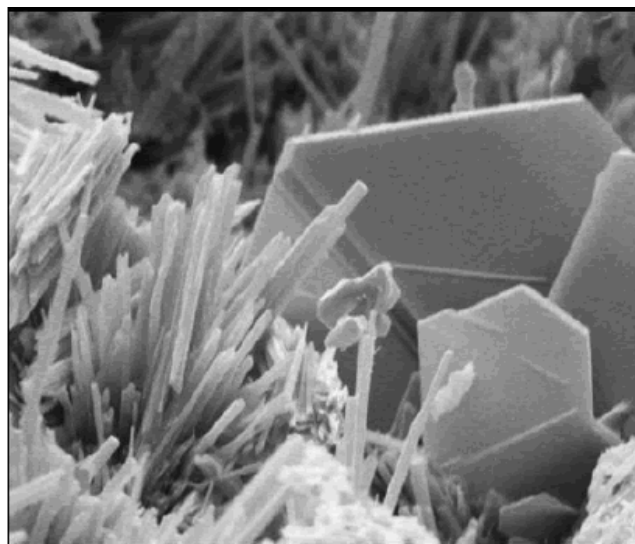
Kalsiumsilikathydrat (C-S-H) er den viktigaste komponenten av hydratiseringsprodukta med tanke på fastleik i betongen. Det er dette som gir styrke til betongen, ved at det dannast silikatutvekstar rundt kvar partikkel. Når desse veks inn i kvarandre utviklast det ein struktur med sterke bindingar.

Gips er som nemnt viktig for å bremse hydratiseringa av C_3A . Det er ikkje gipsen i seg sjølv som forseinkar denne utviklinga, men reaksjonsproduktet ettringitt:



Når all gipsen er hydratisert vil ettringitt bli omdanna til monosulfataluminathydrat. Ettringitt er uønska i herda betong sidan det kan gi store indre spenningar i betongen som igjen gir fare for rissutvikling.

Hydratasjonsproduktet kalsiumhydroksid (sjå Figur 2-2) gir ikkje styrke til betongen, men er viktig med tanke på bestandigheit fordi det har høg pH. I denne oppgåva er kalsiumhydroksid svært aktuelt sidan det også er ein viktig del av pozzolanreaksjonen.



Figur 2-2 Fotografi av ein del av hydratiseringsprosessen av sement sett gjennom eit elektronmikroskop. På biletet ser ein kalsiumhydroksid som dei karakteristiske platene og ettringitt med den typiske stavforma. Bilete henta frå <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/04150/chapt14.cfm> (08.12.2015)

2.5.2 Pozzolanreaksjonen

Når eit pozzolan kjem i kontakt med vatn og kalsiumhydroksid frå hydratiseringsreaksjonen mellom sement og vatn, dannast meir C-S-H slik den forenkla reaksjonslikninga under viser.



Pozzolanreaksjonen gjer at meir bindemiddel blir tilgjengeleg i betongen, og det fører igjen til at ein får ein sterkare, tettare og dermed meir bestandig betong (Myrdal 2015). Ein meir tettpakka struktur som følgje av større mengder C-S-H i betongen vil gjere denne tettare også med tanke på diffusjon av vassdamp. Meir om dette i kapittel 2.6.3.

Under pozzolanreaksjonen omdannast betydelege mengder kalsiumhydroksid til kalsiumsilikathydrat (C-S-H). Kalsiumhydroksid gir i utgangspunktet høgare pH til betongen, men når mengda av dette reduserast, vil ein få eit surare miljø i betongen. Dette kan særleg gi utfordringar med tanke på kloridangrep i betongen, men sidan silika gjer strukturen i betongen tettare, vil også problema med kloridinntrenging bli redusert (Sellevoid 2008 s. 13).

Silika består av nesten rein SiO_2 , og dermed dannast stort sett berre C-S-H under pozzolanreaksjonen med silika. Sidan flygeaske ikkje har den same reinleiken som silikastøv dannast også andre reaksjonsprodukt under pozzolanreaksjonen når flygeaske er med i denne. Reaksjonsprodukta blir meir uoversiktlege med ein del danning av kalsium- og aluminatforbindingar, og ikkje berre rein C-S-H som når silika aleine er reaktant i pozzolanreaksjonen (Kjellsen, 2015).

Pozzolanreaksjonen går sakte, og det tek lang tid før ein har full effekt av pozzolantilsetjinga, særleg gjeld dette flygeaske. Dette vil påverke eigenskapane i betongen den første tida, og følgjeleg er dette noko som kan vere aktuelt å ta omsyn til i ein del samanhengar, blant anna der ein dimensjonerer betong for å verke som diffusjonstetting i ein konstruksjon.

2.6 Diffusjon av vassdamp

Transport av fukt i bygningar går i hovudsak føre seg på to måtar. Anten ved konveksjon (forskjell i lufttrykk) eller ved diffusjon (forskjell i damptrykk). I dette kapitlet ser vi nærmare på fukttransport ved diffusjon.

Lufta i omgivnadene våre inneheld varierende mengder vassdamp, som er vassmolekyl i gassform. Evna til å halde på vassdamp er avhengig av temperaturen i lufta. Ved høgare temperaturar kan lufta halde på meir vassdamp, men når denne lufta kjølast ned vil evna til å halde på vassdamp bli redusert. Når temperaturen kjem under doggpunktet, blir «overskotet» av vassdamp avgitt, og kondenserer til vassdråpar.

Fukttransport ved diffusjon skjer på molekylnivå ved at vassdamp diffunderer (vassdampmolekyla flyttar seg) frå eit område med høg vassdampkonsentrasjon til eit område med lågare vassdampkonsentrasjon (Uvsløkk 2003). Drivkrafta for diffusjonen er potensialforskjellen mellom området med høg vassdampkonsentrasjon og området med låg vassdampkonsentrasjon. I Noreg er det mest vanleg å illustrere konsentrasjonen av vassdamp med damptrykk. Dette er eit fiktivt uttrykk med eininga Pascal (Pa). Høg konsentrasjon av vassdamp gir eit høgt damptrykk. Drivkrafta for diffusjon illustrerast på denne måten ved at vassmolekyla diffunderer frå luft med høgt damptrykk til luft med lågare damptrykk som vist i Figur 2-3.

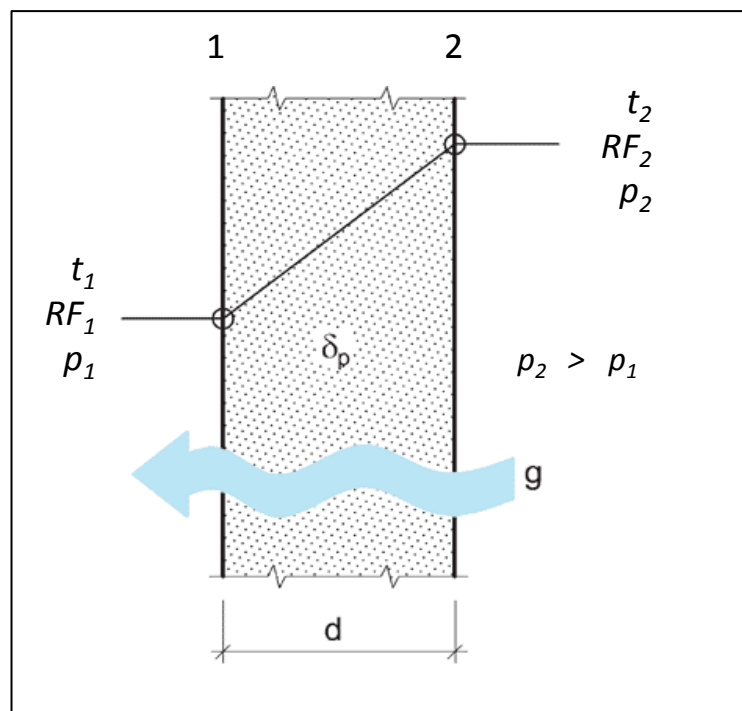
2.6.1 Vassdamppermeabilitet

Permeabiliteten i eit materiale er eit mål for kor stor gjennomtrengingsevne ein gass eller ei væske har i det aktuelle materialet. Vassdamppermeabiliteten i betong er fyrst og fremst påverka av materialeigenskapar (t.d. poreinnhald), men temperatur og luftfuktigheit i det aktuelle miljøet spelar også ei rolle for kor stor permeabiliteten er (Bergheim et al. 1998).

Ei vanleg nemning for vassdamppermeabilitet er $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$, og denne nemninga brukast vidare i oppgåva. Verdien fortel kor mykje vassdamp som diffunderer gjennom 1 m^2 av eit materiale som er 1 m tjukt per sekund, når damptrykkforskjellen er 1 Pa (Thue 2014 s. 6.35).

2.6.2 Diffusjon i bygningar

I ein vanleg ytterveggkonstruksjon har ein ei dampsperre av plastfolie eller ein anna type membran på den varme sida av isolasjonsmaterialet. Denne skal hindre vassdamp i å diffundere ut i kaldare lag av konstruksjonen, og dermed skape kondensproblem lenger ut i konstruksjonen. I betongkonstruksjonar er dette også ein vanleg måte å hindre diffusjonen på. Ein del av problemstillinga i denne oppgåva er å vurdere om ein kan bruke betongkonstruksjonen som einaste diffusjonstetting. For å vite litt meir om kva som ligg til grunn for å kunne gjere ei vurdering av dette må ein sjå nærmare på materialeegenskapane, og korleis dei påverkar diffusjonen.



Figur 2-3 Prinsippkisse for diffusjon av vassdamp
(lett modifisert utgåve henta frå (Geving 2005))

Mengda vassdamp som diffunderer gjennom eit materiale bestemast av to faktorar; forskjellen i damptrykk og vassdamppermeabiliteten i det aktuelle materialet.

Drivkrafta (potensialforskjellen) for diffusjonen er ein vektor som har bestemt storleik og retning, og denne gir retninga på diffusjonen. Vassdamppermeabiliteten i materialet er avhengig av typen materiale, og varierer mykje mellom ulike byggemateriale. Ut frå dette får vi eit uttrykk for transporten av vassdamp (g) gjennom eit materiale (Geving 2005):

$$g = \delta_p \cdot \frac{\Delta p_v}{d} \text{ (kg/(m}^2\text{s))} \quad (4)$$

der

δ_p er vassdamppermeabiliteten i materialet

$\Delta p_v = p_{v2} - p_{v1}$ er forskjellen i damptrykk

d er tjukkleiken på materialet

Ved at ein kjenner materialeegenskapar i konstruksjonen og dei hygrotermiske forholda i miljøet kan ein berekne kor mykje vassdamp som diffunderer ut gjennom til dømes eit materialsjikt i ein yttervegg. Temperatur og luftfuktigheit er forholdsvis enkelt å halde greie på, men utfordringa ligg i å kjenne eigenskapane i det materialet ein er interessert i å gjere fuktberrekningar for.

Mengda vassdamp som diffunderer gjennom ein betongkonstruksjon er avhengig av fleire forhold. I ein rapport om moglegheiter for diffusjonstett betong (Myrland 2008) er det sett saman ei liste med dei viktigaste faktorane som påverkar diffusjonen:

- Porøsitet/permeabilitet
- Rissmengde, rissvidde, rissdjubde
- V/c-forhold, evt. v/(c+k·s)-forhold
- Sementtype og hydratiseringsgrad
- Pozzolaninnhald (type og mengde)
- Eksponeeringstid
- Temperatur og luftfuktigheit (damptrykk)

V/c-forhold og pozzolaninnhald svært sentralt, og er viktige for fleire av dei andre faktorane i lista over.

2.6.3 Diffusjonsmekanismer i betong

Betong er eit materiale med store variasjonar, og derfor vil også diffusjonsmotstanden variere i større grad enn i ei vanleg dampsperre av polyetylen eller tilsvarande membranar. Som ein konsekvens av dette blir usikkerheita større når ein skal vurdere kor eigna betong er som diffusjonstetting. Som nemnd er ikkje omgrepet betong eintydig, sidan det finst mange ulike samansetjingar å gå ut ifrå, både med tanke på masseforhold og bruk av tilsetjingsmateriale. Dette kjem i liten grad fram i dei rapportane og tabellane som er tilgjengelege for byggebransjen i dag. I dei neste avsnitta følgjer ein teoretisk gjennomgang av korleis vassdampdiffusjon går føre seg i betong med rein portlandsement samanlikna med betong der det er brukt pozzolantilsetjingar.

Det er fyrst og fremst pastaen som er ulik når det gjeld å vurdere diffusjonsegenskapar i betong med og utan pozzolanar. Pastaen består av to hovuddelar; ein del med høg permeabilitet beståande av kapillærporer og ein del med låg permeabilitet som består av C-S-H (produsert ved pozzolanreaksjonen), kalsiumhydroksid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) og uhydratiserte sementpartiklar (Song et al. 2010). Eigenskapane i pastaen betyr mykje for diffusjonsegenskapane i betongen, og dette blir derfor hovudfokuset i dei neste avsnitta.

Rein portlandsement

I betong med rein portlandsement som bindemiddel er det i stor grad masseforholdet mellom vatn og sement (v/c-forholdet) som bestemmer diffusjonstettleiken (Myrland 2008). Betong med høgt v/c-forhold får ein meir open struktur. Avstanden mellom sementpartiklane i pastaen blir større, slik at andelen materiale som gir meir diffusjonstettleik blir mindre (jfr. førre avsnitt). Dette gjer at permeabiliteten blir høgare. Ved lågare v/c-forhold blir strukturen tettare, og dermed reduserast permeabiliteten. Ved diffusjon av vassdamp vil damptrykkforskjellen kombinert med låg permeabilitet i betongen gjere at vassmolekylna i større grad blir hindra i å trengje gjennom strukturen. I dagens oppslagsverk over eigenskapar i betong er stort sett v/c-forhold einaste variabel i materialet.

Sement kombinert med pozzolanar

Samanhengen mellom v/c-forhold og permeabilitet er den same også for betong der ein del av sementen er erstatta med pozzolanar. Her snakkar ein gjerne om eit v/(c+k·s)-

forhold, der verknadsgraden (k) til pozzolana (s) er teke med i masseforholdet mellom vatn og bindemiddel (sement + pozzolanar). På denne måten tek ein omsyn til effekten av pozzolantilsetjingar. Pozzolanreaksjonen fører til ein stor produksjon av C-S-H som gir sterkare bindingar mellom partiklane i pastaen. Dette gir ein meir tettpakka struktur i den delen av pastaen som gir vassdampmotstand, og følgjeleg ein lågare permeabilitet i betongen. Ein del av porene (diffusjonsopen del av pastaen) blir fylt med svært små partiklar, dette kallast fillereffekten (Song et al. 2010). Vassmolekyla blir slik hindra i å passere gjennom den tettpakka strukturen som har blitt danna av pozzolanreaksjonen. Pozzolantilsetjingar gir på denne måten moglegheit til å påverke eigenskapane i pastaen i større grad enn berre ved å variere v/c -forholdet, som for rein portlandsement. I ein rapport frå «silikaens barndom» har ein kome fram til at verknadsfaktoren k for silika med omsyn til permeabilitet ligg på 8-10 (Hustad & Løland 1981). Til samanlikning er verknadsfaktoren for silika vanlegvis 2 med omsyn til fastleik. Ein snakkar altså om ein stor auke i vassdampmotstand (reduksjon i permeabilitet) ved bruk av pozzolanar generelt, og silika spesielt, i betongen. Tidlegare forskning har slått fast at reduksjonen i permeabilitet ved bruk av silikastøv i stor grad skuldast ein finare porestruktur (Güneyisi et al. 2012), som gir redusert vassdampdiffusjon gjennom ein konstruksjon av betong.

På grunnlag av dette skal ein kunne forvente at resultata av forsøka seinare i oppgåva vil vise ein lågare vassdamppermeabilitet for dei prøvene som har pozzolantilsetjingar.

2.7 Samanheng mellom fuktnivå og fukttransport i betong

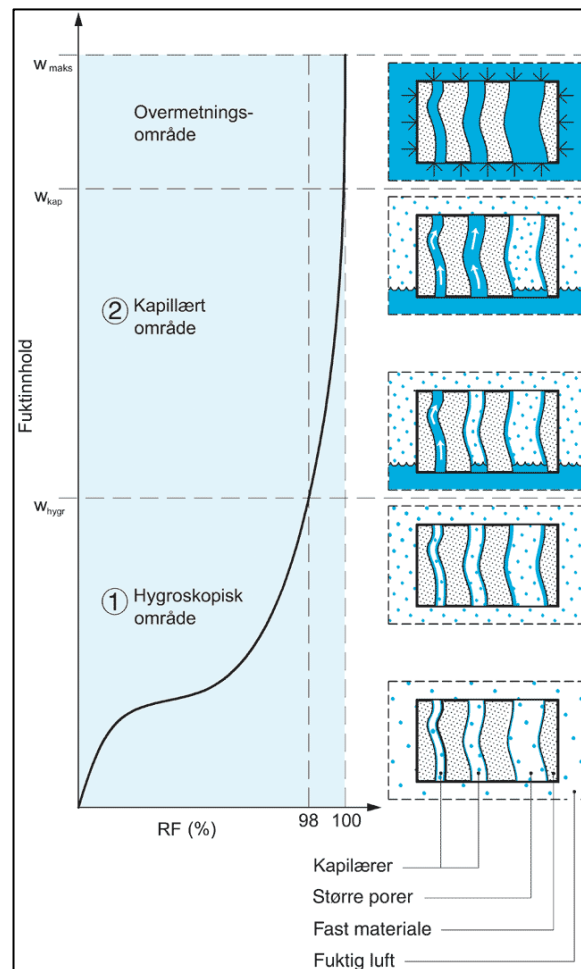
Betong er eit hygroskopisk materiale som har evne til å binde fukt i poresystemet. Fuktnivået i betongen vil over tid stabilisere seg i ei likevekt med omgivnadene. Det hygroskopiske området er det fuktintervallet der fukt kan lagrast som vassdamp i lufta, sjå Figur 2-4 på neste side. Over den øvre hygroskopiske grensa vil ein få vassmolekyl som lagrast i kapillærporer. Øvre hygroskopiske grense ligg normalt på 95-98 % relativ luftfuktigheit (RF), men varierer noko mellom ulike materiale. (Geving & Thue 2002 s. 301).

Så lenge fuktnivået er innanfor det hygroskopiske området vil fukttransporten gå føre seg ved at vassdampmolekyl flyttar seg i materialet. Dette skjer anten ved konveksjon

eller diffusjon. Forsøk har vist at fukttransporten ved vassdampdiffusjon i betong aukar vesentleg når fuktnivået nærmar seg den hygroskopiske grensa (Johansson 2015).

I det hygroskopiske området kan ein teikne opp empiriske sorpsjonskurver for eit gitt materiale. Desse viser korleis fuktnivået ved absorpsjon (fuktopptak) og desorpsjon (uttørking) i til dømes betong endrar seg med relativ luftfuktigheit i omgivnadene. Strukturen i betongen er sterkt førande for korleis sorpsjonskurvene blir, og dermed kan ein ikkje lage ei generell kurve for betong.

I forsøka som er gjort for å teste vassdamppermeabilitet og diffusjonsegenskapar i betong, både hos SINTEF Byggforsk og i denne oppgåva, ønskjer ein å sjå på fukttransport i det hygroskopiske området. Derfor er det i alle høve avgjerande at ein har kontroll på den relative luftfuktigheiten i omgivnadene til prøvene.



Figur 2-4 Ulike fuktnivå i eit materiale gir ulike former for lagring og transport av fukt. Figur henta frå(Geving 2005).

2.8 Bruk av betong som diffusjonstetting

I bygningar der det stillast høge krav til diffusjonstettleik, som til dømes badeanlegg og symjehallar, er det svært viktig at dampettinga blir utført kontinuerleg slik at ein sikrar mot dampgjennomgang, som kan gi kondens utover i konstruksjonen. Dette vil vere lettare å oppnå ved å bruke betong som dampsperrsjikt, sidan ein da unngår utfordringane med å legge ei kontinuerleg dampsperre utanpå betongen (Geving & Thue 2002).

Måten ein løyser dette på i dag er gjerne at ein limar på ei dampsperre på den varme sida av konstruksjonen, og slik hindrar vassdampen i å gjere skade utover konstruksjonen. Alternativet med å bruke betong som diffusjonssperre er mindre aktuelt, sidan ein må opp i store dimensjonar ut frå det som kan dokumenterast av diffusjonseigenskapar i betongen. Eventuelt kan ein også prosjektere med tynnare betongkonstruksjon, og la vassdampen diffundere gjennom denne, men da er ein avhengig av at alt av materiale på utsida av betongkonstruksjonen er av uorganisk materiale og tåler eit høgt fuktnivå over tid.

I praksis er fukttransport ved konveksjon ein større årsak til kondensproblem i ytterkonstruksjonar enn fukttransport ved diffusjon (Thue 2014). Dette er fordi ein lekkasje gjennom eit hol i dampsperra normalt vil gi transport av langt større mengder vassdamp enn det som diffunderer ut gjennom konstruksjonen. Funksjonen til dampsperra er vel så mykje å gi lufttettleik som å gi diffusjonstettleik (Thue 2014). Overført til problemstillinga med bruk av betong som diffusjonstetting kan ein fort tenke seg at ein vil få utfordringar med luftlekkasjar gjennom støypeskøytytar, riss og andre utettheitar, som i neste omgang vil gi fukttransport og kondensproblem lenger ut i konstruksjonen. Denne oppgåva vil fyrst og fremst dreie seg om materialeigenskapane i betongen. Sjølv om luftlekkasjar er eit viktig tema vil det ikkje bli tillagt så mykje merksemd i denne oppgåva, sidan det i større grad går på utførelse enn materialeigenskapar.

2.8.1 Dagens situasjon

Ei stor utfordring med å bruke betong som diffusjonstetting ut frå dagens dokumentasjon er at ein må opp i svært store dimensjonar for å få eit sjikt som er tilstrekkeleg diffusjonstett. Byggebransjen i Noreg baserer seg i stor grad på informasjon

gjennom tabellar frå SINTEF Byggforsk når det gjeld eigenskapar knytt til diffusjonstettleik både i betong og andre byggemateriale. Dermed er desse tala svært førande for kva som skal til for at betong kan brukast som diffusjonstetting. Det er grunn til å rekne med at desse verdiane er gitt for å vere på den sikre sida. Ut frå tabellane kan ein få inntrykk av at v/c -forhold er det einaste som påverkar diffusjonseigenskapane i betong. Dersom ein ønskjer å optimalisere bruken av betong i større grad enn det ein har moglegheit til i dag må ein ha eit litt meir nyansert bilete av kva som påverkar eigenskapane i betongen.

2.8.2 Forbetringspotensiale

Det er to ting som er spesielt interessant, og samtidig utfordrande, når det gjeld å bruke betong som einaste diffusjonstetting i byggkonstruksjonar; ein treng meir presise data om dei faktiske eigenskapane i betongen med tanke på permeabilitet og samtidig ein betong som har større diffusjonstettleik enn konvensjonell betong utan pozzolantilsetjingar. Dette er to viktige kriterium for å kunne redusere forbruket av betong i byggeprosjekt der ein ønskjer å bruke betong som diffusjonstetting.

Materialteknologi og presise målemetodar er viktige middel for å kome nærmare denne situasjonen.

2.8.3 Dokumentasjon av eigenskapar – prøvemetode

Som dei to føregåande delkapitla peikar på er det viktig at dokumentasjonen som finst på området stemmer overeins med dei faktiske forholda som gjeld byggemateriala. Sidan ein i større grad enn tidlegare har moglegheiten til å regulere ønska eigenskapar i betongen er det grunn til å stille spørsmål ved om dagens dokumentasjon fangar opp dette. Grunnlag for verdiane i SINTEF sine tabellar er forsøk som er gjort både på SINTEF sitt eige laboratorium, og resultat som er henta frå andre forskingsmiljø. Det er vanskeleg å seie noko om kva for materialsamansetjingar som er brukt, men det er grunn til å rekne med at SINTEF har gjort eit grundig arbeid når det gjeld innsamling av data som brukast i byggdetaljblada med anbefalingar til byggebransjen.

For å gi grunnlag for ei vurdering av både materialeigenskapar og prøvemetode er det som ein viktig del av oppgåva gjort forsøk med ulike sementtypar og pozzolaninnhald. Ein anerkjent metode for testing av diffusjonseigenskapar er den såkalla koppmetoden, skildra i NS-EN ISO 12572.

2.9 Berekningsgrunnlag

For å vurdere resultatene frå dei ulike prøveseriane opp mot kvarandre blir metoden gitt i NS-EN ISO 12572 brukt. Vassdamppermeabilitet er vald som parameter for berekningane, sidan denne er uavhengig av kor tjukke konstruksjonar ein reknar på, og er ein vanleg parameter i tabellar over materiale eigenskapar. Under følgjer dei viktigaste berekningsformlane frå kapittel 8 som handlar om korleis resultatene skal bereknast og uttrykkast (Standard Norge 2001).

For å bestemme diffusjonsfarten gjennom betongen må ein fyrst finne ut kor fort vekttapet reduserast gjennom forsøksperioden. Dette gjerast ved å ta utgangspunkt i den lineære perioden for vekttapet, altså etter at vassdampdiffusjonen har stabilisert seg. Ved hjelp av Microsoft Excel er det berekna ei regresjonslinje for kvar enkelt prøve, og stigningstalet for denne kurva viser kor fort vekta endrar seg. Stigningstalet på regresjonslinja kallast G og bereknast i kg/s etter følgjande samanheng:

$$G = \Delta m = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \left(\frac{kg}{s} \right) \quad (5)$$

Vidare bereknast masseendring per tid og areal ved å dividere massereduksjonen per tid på arealet av kvart prøvestykke. Det eksponerte arealet bereknast ut frå gjennomsnittleg øvre og nedre areal for kvart prøvestykke, slik at ein får eit tal for vassdampstrauminga gjennom prøver per tid og areal:

$$g = \frac{G}{A} \left(\frac{kg}{s \cdot m^2} \right) \quad (6)$$

Ut frå masseendringa for kvar enkelt prøve kan ein rekne seg fram til ulike verdiar for å skildre diffusjonsegenskapane. Potensialforskjellen i damptrykk reknast som gjennomsnittsverdien for heile måleperioden, og er konstant for alle prøvene sidan både saltløysing i kopp og forhold i klimarom reknast som like for alle prøvene.

$$\Delta p = p_{saltløysing} - p_{klimarom} \text{ (Pa)} \quad (7)$$

Vassdamppermeabiliteten er eit uttrykk for gjennomtrengingsevna til vassdamp gjennom eit materiale. Ein høg damppermeabilitet betyr at materialet er dampopent. Den berekna vassdamppermeabiliteten er avhengig av kva for damptrykk ein har på kvar side av materialet, og den gjennomsnittlege tjukkleiken (d) til prøvestykket:

$$\delta = \frac{G \cdot d}{A \cdot \Delta p} \left(\frac{kg}{m \cdot s \cdot Pa} \right) \quad (8)$$

3 Materiale og metode

Dette kapitlet skal gi innblikk i val av metodar og kva slags vurderingar som er gjort undervegs i det praktiske arbeidet fram mot dei endelege resultatane av forsøket. Kapitlet er sett opp kronologisk for å gi ein grei oversikt over gangen i arbeidet frå start til slutt. Gjennom heile prosessen med laboratoriearbeid har det blitt fokusert på å gjere prosessane mest mogleg på same måten for alle prøvene, slik at ein har moglegheit til å samanlikne prøvene utan å måtte ta omsyn til at dei har blitt behandla ulikt.

Parallelt med ein del av labarbeidet med sjølve prøvene blei det også bygd eit klimastyrt rom til å utføre forsøka med diffusjonsprøving i. Denne prosessen er skildra kort i vedlegg B. Dette var ikkje ein del av sjølve oppgåva, men var nødvendig for å kunne gjennomføre forsøksopplegget.

3.1 NS-EN ISO 12572 – metodegjennomgang

Metoden som er grunnlag for tabellverdiane frå SINTEF Byggforsk er skildra i NS-EN ISO 12572. Som eit akreditert testlaboratorium må SINTEF halde seg til denne standarden. Hovudpunkta i standarden, samt eventuelle fråvik, blir skildra her.

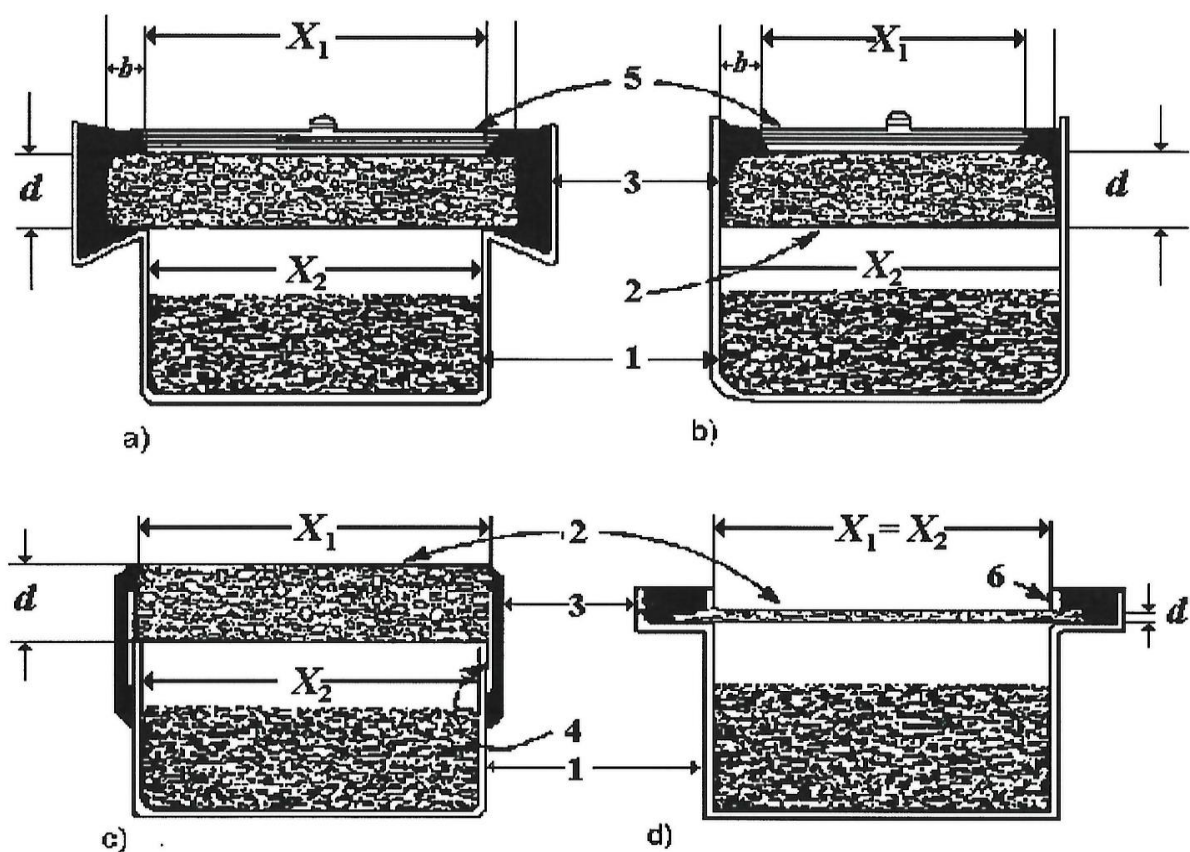
Metoden baserer seg på det som er bakgrunnen for diffusjon av vassdamp; potensialforskjellar i damptrykk. For å måle dette må ein utsette eit prøvestykke for ein kontrollert potensialforskjell, og ein er dermed avhengig av å ha eit fast damptrykk på kvar side av prøvestykket.

Prinsippet er forklart slik i standarden: «Prøvestykket forseglast mot den opne sida av ein testkopp som inneheld enten eit tørkemiddel (tørrkopp) eller ei vassbasert metta løysing (våtkopp). Systemet plasserast deretter i eit temperatur- og fuktkontrollert testrom. På grunn av forskjellen i damptrykk mellom testkoppen og testrommet vil det oppstå ein straum av vassdamp gjennom det permeable prøvestykket. Periodisk veging av systemet blir gjort for å bestemme farta på vassdampgjennomgangen i «steady state» perioden» (Standard Norge 2001 s. 7). Våtkoppmetoden er vald som prøvingsmetode i dei vidare forsøka.

For å regulere damptrykket i koppen gir standarden moglegheit for fleire typar løysingar. Ei metta saltløysing av kaliumnitrat (KNO_3) og destillert vatn er vald som

medium for å halde kontroll på damptrykket i koppen, dette gir ein relativ luftfuktigheit på 94 %. Luftsjiktet mellom saltløysinga og prøvestykket kan vere ei kjelde til reduksjon i målt vassdampgjennomgang. Dampovergangsmotstand for overflater mot luft har normalt liten innverknad på diffusjonsberekningar, og utelatast vanlegvis (Thue 2014 s. 6.39), også i desse berekningane. Sidan ein har å gjere med eit materiale som har ein relativt låg vassdamppermeabilitet vil ikkje dette luftsjiktet påvirke resultatane i stor grad, og det er derfor sett bort frå i berekningane.

Standarden angir som vist i Figur 3-1 fleire ulike alternativ til korleis systemet med kopp og prøvestykke kan monterast. Det er vald ein metode som let seg tilpasse til eit studentlaboratorium der ein ikkje har ressursar til å lage eigne koppar, men må basere seg på produkt som er på marknaden frå før av. Vald metode for montering er forklart i figurteksten til Figur 3-1.



Figur 3-1 Alternative metodar for montering av prøver.

Fig. d) viser metoden som blir brukt hos SINTEF Byggeforsk. Fig. c) er den valde metoden i denne oppgåva. Figur henta frå (Standard Norge 2001s. 20)

Den valde monteringsmetoden i Figur 3-1 gjer det mogleg å studere vassdampgjennomgangen under eindimensjonale forhold. Ved å la tettinga gå opp langs sidene unngår ein todimensjonale forhold langs randsonene. Ved bruk av metoden d) i Figur 3-1 må ein ta omsyn til todimensjonale effektar langs randsonene, kalla «masked edge» i standarden. Fordelen med «masked edge» er at det er enklare å montere desse prøvene (når ein har tilgang til det rette utstyret), og at tettinga mellom kopp og prøvestykke blir sikrare både under monteringsfasen og forsøksperioden. Denne monteringsmetoden blir blant anna brukt i laboratoriet til SINTEF Byggforsk, sjå Figur 3-2.



Figur 3-2 Døme på montering av prøve i laboratoriet til Sintef i Trondheim.
Her ved testing av vindsperreprodukt.
Foto: Gunleiv Sæland

3.1.1 Krav til prøver og utstyr

Følgjande krav frå standarden har vore førande for korleis prøvingsopplegget har blitt lagt opp:

Krav til prøver:

- Eksponert areal: $A > 0,005 \text{ m}^2$ (maks 3 % forskjell på under- og overside)
- Tjukkuleik: Minst tre gonger største tilslagsstorleik
- Form: Helst rund med tanke på tetting langs randsonene
- Tal på prøver: Minst tre i kvar serie når $A > 0,02 \text{ m}^2$

Krav til rom og utstyr:

- Temperatur: $23^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$
- Rel. luftfuktigheit: $50 \% \pm 3 \%$
- Lufthastigheit: Mellom 0,2 m/s og 0,3 m/s
- Loggeutstyr: Kalibrert loggeutstyr for temperatur og luftfuktigheit
- Vekttoppløysing 0,001 g. For tyngre prøver er 0,01 g tilstrekkeleg

Kalibreringsbevis for loggeutstyret er vist i vedlegg H.

3.1.2 Nøyaktigheit

Faktorar som påverkar nøyaktigheiten i prøveresultata:

- Målt areal av prøvestykke (diameter målast med nøyaktigheit på $\pm 0,5 \text{ mm}$)
- Målt prøvetjukkuleik (målast med nøyaktigheit 0,5 % av tjukkuleiken)
- Tetting langs randsoner (lekkasje gir prøver med høgare målt permeabilitet)
- Vektpresisjon
- Variasjon i klimatiske forhold i laboratoriet
- Saltløysing i testkoppen (må vere metta)
- Variasjon i barometrisk trykk (kan påverke oppdrift under veging)

Desse faktorane har blitt teke omsyn til ved planlegging og gjennomføring av forsøka, og forsøka er lagt opp til å bli utført i tråd med dette.

3.2 Planlegging og forarbeid til støyping

Førebuaende laboratoriearbeid til oppgåva blei gjort i samråd med forsknings- og utviklingsavdelinga hos Norcem i Brevik, og praktisk utført både på betonglaboratoriet der (heretter kalla Norcem FoU) og heime i verkstaden til studenten.

For å kunne gjere forsøk mest mogleg i tråd med NS-EN ISO 12572 som skildrar den tidlegare omtalte koppmetoden, var det ein del ting som måtte avklarast tidleg i arbeidet med oppgåva. Dette omfatta storleik og utforming av prøvestykkka, snekring av former som passa med utstyret til forsøka og ikkje minst reseptutvikling både med tanke på sementtypar, tilslagsmateriale og silikainnhald.

Det blei bestemt å kjøre alle prøver med eit konstant $v/(c+k\cdot s)$ -forhold på 0,4. Dette er eit vanleg masseforhold i konstruksjonar der det stillast strenge krav til diffusjonstettleik. Verknadsfaktoren k for silika blei sett lik 1 slik at ein del silika erstatta ein del sement i alle dei ulike reseptane.

For å få ein situasjon som liknar ein realistisk situasjon i ein betongkonstruksjon, blei det vurdert at storleiken på tilslaget bør vere slik at ein ikkje får gjennomgåande partiklar i prøvestykket. Standarden angir at største tilslagspartiklar (d_{\max}) skal vere mindre enn ein tredel av prøvetjukkelen. For å oppnå dette blei det bestemt å støype mørtelprøver med $d_{\max} = 3$ mm. SINTEF kjører vanlegvis betongprøver med grovt tilslag, og for å samtidig få resultat som er samanliknbare med desse blei det bestemt å kjøre parallelle prøveseriar med mørtel (med fint tilslag) og betong (med grovt tilslag).



Figur 3-3 Sikting av sand. Fraksjonen 0/8 mm (til høgre) blei sikta ned til 0/3 mm (til venstre) til bruk i mørtelprøvene.
Foto: Gunleiv Sæland

Kvaliteten på tilslaget er viktig for å få gode prøvestykke, og ikkje minst for at prøvestykkka skal bli jamne med tanke på vidare forsøk og samanlikning. Norcem FoU brukar tilslag frå Norstone i laboratoriearbeidet på betong, og Normsand i mørtelprøver. Sidan det var eit stort volum som skulle brukast, og Normsand leverast i små pakker, blei det vurdert som tilstrekkeleg å sikte sandfraksjonen 0/8 mm frå Norstone ned til 0/3 mm med ein eigen sikt. Det blei sikta opp om lag 600 kg sand til bruk i mørtelprøver. Figur 3-3 viser utstyret som blei brukt under sikteprosessen. I betongprøvene blei det brukt sand 0/8 mm og stein 8/16 mm på same måte som Norcem FoU gjer i laboratoriearbeidet sitt. Siktekurver for dei to typene sand finst i vedlegg A.

Etter inspirasjon frå testlaboratoriet til SINTEF i Trondheim blei det vald å bruke endelokk for ventilasjonsrør som «kopp» for å halde på saltløysinga under forsøket. Dei valde ventilasjonsendelokka var laga av rustfritt stål og hadde ein diameter på 200 mm, sjå Figur 3-5. Det blei vurdert at eit såpass stort areal er hensiktsmessig for å få mest mogleg vassdampgjennomgang gjennom eit stort areal og samtidig gjere prosentandelen med tetting langs kanten så liten som råd.

Neste steg var å finne noko som kunne brukast som former til å støype prøver. Eit parti med trykkrør til kommunal vassforsyning viste seg å ha same innvendig diameter som prøvekoppane, og blei vald som former til støypinga. Formene blei laga med ei høgde på 35 cm og fekk dermed eit volum på om lag 11 liter som vist i Figur 3-4.



Figur 3-5 Ventilasjonsendelokk med same diameter som støypeformene.
Foto: Gunleiv Sæland



Figur 3-4 Støypeformer laga av 200 mm trykkrør i polyetylen. Tetting med Tec7 og skrueforbinding mot finerplate i botn.
Foto: Gunleiv Sæland

Dei endelege prøveseriane er lista opp i ei forenkla utgåve under:

Namn	Type	Tilslag	Sementtype	Silika- mengde	Testa i diffusjonsforsøk
A	Mørtel	Sand 0/3	Standard (referanseprøve)	0 %	Ja
B	Mørtel	Sand 0/3	Standard FA	0 %	Ja
C	Mørtel	Sand 0/3	Standard FA	5 %	Ja
D	Mørtel	Sand 0/3	Standard FA	10 %	Ja
E	Mørtel	Sand 0/3	Standard FA	15 %	Ja
F	Mørtel	Sand 0/3	Industri	0 %	Ja
G	Mørtel	Sand 0/3	Industri	5 %	Ja
H	Mørtel	Sand 0/3	Industri	10 %	Ja
I	Betong	Sand 0/8 Stein 8/16	Standard FA	0 %	Ja
J	Betong	Sand 0/8 Stein 8/16	Industri	0 %	Ja
K	Betong	Sand 0/8 Stein 8/16	Standard FA	5 %	Nei
L	Betong	Sand 0/8 Stein 8/16	Industri	5 %	Nei
M	Betong	Sand 0/8 Stein 8/16	Standard FA	10 %	Nei
N	Betong	Sand 0/8 Stein 8/16	Industri	10 %	Nei

Tabell 3-1 Oversikt over støypte prøveseriar med mørtel og betongprøver.

Under planlegginga av den verkelege støytinga blei det gjort eit relativt omfattande arbeid med utprøving av metodar for å kome fram til gode reseptar, samt ei god blande- og utstøypingprosedyre for både mørtel- og betongprøvene. Komplette reseptar for alle prøvene er å finne i vedlegg A.

3.3 Støypearbeid hos Norcem FoU

Arbeidet med å støype prøver blei gjort på betonglaboratoriet hos Norcem FoU. Utstyr, materiale og arbeidskraft blei stilt til disposisjon for studenten. Sidan formene til prøvene hadde relativt stort volum, blei det vurdert som mest hensiktsmessig å utføre støypearbeidet på betonglaben der utstyret er tilpassa større blandingar enn på mørtellaben. Det var utfordringar knytt til blanding av mørtelprøvene, sidan utstyret var tilpassa blandingar med grovt tilslag, men etter ein innkjøringsperiode med prøving og feiling kom ein fram til ein metode som fungerte tilfredsstillande.

3.3.1 Blandeprosedyre

For å sikre god blanding av sement, silika, vatn, tilslag og tilsetjingsstoff blei det sett opp ei fast blandeprosedyre for mørtel og betong. Det blei teke utgangspunkt i den faste blandeprosedyra hos Norcem FoU, og gjort nokre tilpassingar for å kome fram til eit tilfredsstillande resultat. På førehand rekna ein med at silikastøvet ville vere utfordrande å få blanda godt saman med resten av tilslaget. Mekanisk bearbeiding i tørr tilstand blei derfor vurdert som viktig (Lagerblad & Utkin 1993). Det viste seg at silikastøvet hadde ein tendens til å klumpe seg, særleg ved blanding av mørtel med fint tilslag, og derfor blei det lagt til litt ekstra tid til tørrblanding av tilslag, sement og silika. Den endelege blandeprosedyra som blei brukt for både mørtel og betong var slik:

Delprosess	Tid
Tørrblanding (tilslag + sement + silika)	3 min
Våtblanding med vatn	1 min
Våtblanding med SP-stoff	2 min
Stopp (med synkkontroll)	2 min
Etterblanding	2 min
Sum	10 min

Tabell 3-2 Blandeprosedyre for mørtel- og betongprøver

Den største utfordringa under blanding av dei ulike prøvene var å få rett konsistens på den ferske mørtelen og betongen. Synkmål blei justert med superplastiserande

tilsetjingsstoff (SP-stoff) av typen ViscoCrete RMC-420 frå Sika under blanding. Det var til tider mange prøveblandingar som måtte til for å få rett konsistens på mørtelen og betongen, særleg for dei reseptane med høgt innhald av silika.

3.3.2 Kontrollrutiner for fersk mørtel og betong

I alt labarbeid er jamne prøver ein føresetnad for eit vellykka resultat i neste runde. Av den grunn blei det kontrollert at mørtelen og betongen var innanfor gitte krav til konsistens før formene blei fylt. For dårleg resultat førte til kassering av prøvene og ein ny runde med justering av konsistensen.

Synk blei kontrollert med ei standard synkkjegle med høgde 300 mm, nedre diameter 200 mm og øvre diameter 100 mm. Målemetoden er vist i Figur 3-6. Planen var å ha synkmål på 200 mm ved kontroll etter siste blanding. Utbreiingsmål blei kontrollert ved å måle diameteren på «kaka» etter at synkkjegla var drege av. For mørtelprøvene låg utbreiingsmålet på om lag 400 mm, og for betongprøvene rundt 350 mm.

Luftmåling blei utført med luftmålaren til Norcem FoU av typen vist i Figur 3-7.

Luftinnhaldet blei målt etter standard prosedyre både for mørtel og betong.

Luftinnhaldet var noko høgare i betongprøvene enn i mørtelprøvene. Under fylling av



Figur 3-7 Luftmålar av typen FormTest B2020.
Foto: Tor M. Zachariassen, Norcem



Figur 3-6 Kontrollrutine for måling av synk.
Foto: Gunleiv Sæland

luftbøtta blei same prosedyre som under utstøyping i dei endelege formene brukt (sjå neste delkapittel). Dette for å sikre eit realistisk bilete av luftinnhaldet i prøvene, med tanke på å ha kontroll på kor mykje luftporer som blei danna i dei verkelege prøvene.

Romvekt blei kontrollert ved å vege luftbøtta før kontroll av luftinnhald. Volumet på bøtta og vekta av denne var kjent, og dermed hadde ein ein fast måte å kontrollere romvekta på.

Fukt i sand er avgjerande for kor mykje vatn som skal tilsetjast under blandinga. Sanden blei blanda i ein eigen sandblandar for kvar dag, og fuktmåling av sanden blei gjort ved å måle vekta av ei sandprøve før og etter fordamping av alt fritt vatn i sanden, og på den måten rekne ut kor mykje vatn det var i sanden.

3.3.3 Utstøypingsprosedyre

Standard prosedyre for utstøyping hos Norcem FoU er tilpassa terningprøver på 10 x 10 x 10 cm, og viste seg å ikkje vere eigna i dette tilfellet, sidan formene hadde ei heilt anna utforming og høgde enn vanleg.

Den endelege utstøypingsprosedyra er eit resultat av mykje prøving og feiling undervegs. Utfordringa i starten var at det blei store mengder luftporer i

prøvene. Figur 3-8 illustrerer dette. For å redusere poreinnhaldet til eit minimum blei det gjort forsøk med å støype ut prøver på ulike måtar, og poreinnhaldet blei kontrollert etter eit døgn ved å skjere opp prøvene med diamantsag hos Strandberg stein i Tjølling. Vibrering viste seg å ha positiv effekt på mengda av luftporer, og blei ein del av den endelege utstøypingsprosedyra for både mørtel- og betongprøvene. Vibreringsbordet hos Norcem FoU gav ikkje tilstrekkeleg vibrering i såpass store former. Ein vanleg stavvibrator for betongbruk (Figur 3-9) blei brukt under vibrering av både mørtel- og betongprøver, noko som såg ut til å gi eit godt resultat.



Figur 3-8 Døme på luftpore i ei prøve.
Foto: Gunleiv Sæland



Figur 3-9 Vibrering av mørtelprøve i fleire lag.
Foto: Gunleiv Sæland



Figur 3-10 Kontroll av separasjon i vibrert betongprøve. Tilslaget er framleis jamt fordelt øvst og nedst.
Foto: Gunleiv Sæland

Utstøyping i former blei gjort i tre lag med vibrering i kvart lag for å få ut mest mogleg luftporer undervegs. Staking blei vurdert til å ha liten effekt samanlikna med vibreringa, og blei derfor kutta ut. Etter utstøyping og vibrering av alle tre laga blei det kjørt gjennom prøva ein rask gong til botn med vibratoren, og til slutt blei forma banka 30 gonger med hammar for at innhaldet skulle sette seg skikkeleg.

Ved vurdering av mengde vibrering gjeld det å finne ein middelveg der ein vibrerer ut mest mogleg luftporer, samtidig som ein ikkje vibrerer så lenge at ein får separasjon. Mørtelen med fint tilslag viste seg å vere mykje mindre utsett for separasjon enn betongen med grovt tilslag. Av denne grunnen blei betongprøvene vibrert i kortare tid enn mørtelprøvene, og fekk eit noko høgare luftinnhald. Under vibreringa nærmast kokte det av luftbobler i overflata, og vibreringa slo også positivt ut ved måling av luftinnhald i fersk mørtel og betong. Kontroll av vibreringsrutine med tanke på separasjon blei gjort ved å skjere opp ei prøve slik at ein kunne sjå tilslagsfordelinga i heile høgda av prøva som vist i Figur 3-10.

For kvar resepttype blei det støypt ut ei form tilpassa dei seinare forsøka (Figur 3-11), og seks terningprøver for å kontrollere fastleiken for kvar resept (Figur 3-12). Til terningprøvene blei standard prosedyre hos Norcem FoU nytta med staking og banking av prøvene. Herdetiltak blei gjort på same måte som for dei store prøvene.



Figur 3-11 Avforma mørtelprøver klare til herding i vatn. Desse brukast i dei seinare diffusjonsforsøka.
Foto Gunleiv Sæland



Figur 3-12 Mørtelprøver til kontroll av fastleik. Biletet viser terningprøver tilhørande sylindertestene på biletet til venstre.
Foto Gunleiv Sæland

3.3.4 Herdeprosess

Hydratiseringsprosessen i betong startar umiddelbart etter at bindemiddelet har kome i kontakt med vatn. Størkningsfasen er den fyrste delen av ein lengre herdeprosess som varar fram til betongen har fått ein gitt fastleik. Etter at betongen er størkna kan ein ta av forskalinga/forma, før vidare herdetiltak setjast i verk for å sikre ønska kvalitet på den ferdige betongen.

Umiddelbart etter utstøyping blei formene plassert i eit vasskar med temperatur 20°C. Toppen av prøva blei dekt til for å hindre uttørking. Etter eit døgn blei formene tekne av, og prøvene plassert neddykka i vasskar som det går fram av Figur 3-13, med same temperatur som under størkningsfasen.



Figur 3-13 Herding i neddykka tilstand i herdebasseng hos Norcem FoU.
Foto: Gunleiv Sæland

Fastleik på terningane for kvar resept blei kontrollert etter 7, 28 og 91 døgn. Resultat frå desse målingane finst i vedlegg A.

Prøvene som skulle brukast i dei vidare forsøka blei tekne opp av vatnet etter om lag 28 døgn (nokre dagar lenger for dei prøvene som blei støypst fyrst), og sett til vidare herding i luft fram til vidare preparering før forsøk med koppmetoden. Sidan ein del av prøvene inneheldt pozzolanar blei det teke høgde for at prøvene måtte stå lenger enn vanleg for å oppnå både fastleik og permeabilitetsegenskapar som er representative for ein verkeleg situasjon. Dette fordi pozzolanreaksjonen går over lang tid, og ein ønskjer å sjå på effekten av dette. Den totale herdetida frå støyping til forsøksstart blei derfor om lag fem månader.

3.4 Klargjering av prøver til forsøk

3.4.1 Saging av prøvestykke

Prøvestykke av mørtel og betong til testing av diffusjonsegenskapane måtte lagast ved at dei støypte sylindrane blei kutta opp i tynne skiver. Dette blei gjort på ei betongsag av typen Gölz med skjerekapasitet på 220 mm. Sagingssopplegget er vist i Figur 3-14. Det blei gjort ei risikovurdering i forkant der ein prøva å kartlegge faktorar som kunne føre til farlege situasjonar under arbeidet, dette er teke med i vedlegg G. Under saginga var det alltid to personar til stades slik det blei anbefalt i risikovurdringa.



Figur 3-14 Saging av prøvestykke.
Sugekopp blei brukt for å halde skiva fast etter gjennomskjering. Av praktiske årsakar og tryggleikssyn var det alltid to personar til stades under saginga.
Foto: Hans Jørgen Bjerva

Det var utfordrande å skjere skiver som var heilt jamntjukke, men etter ein innkjøringsperiode for å finne ein god teknikk gjekk dette bra. Skivene blei kutta med tjukkelek 10 mm +/- 1,0 mm, og alle skiver som var utanfor dette kravet blei forkasta. Dei fleste av skivene låg likevel innanfor 10 mm +/- 0,5 mm. Skiver som er så tynne tåler veldig lite av mekaniske påkjenningar, og derfor var det viktig at skiva ikkje blei utstett for dette etter å ha blitt kutta. Eit problem var at skivene datt ned mellom spilene i vogga på saga. Derfor blei det bruka ein sugekopp for å halde prøvestykket fast fram til det var ferdig kutta og kunne leggast fint ned.

Frå dei ti seriane av mørtel- og betongprøver blei det teke vare på sju skiver frå kvar serie. Totalt 70 skiver blei lagt i klimarommet for aklimatisering og vidare herding/pozzolanverknad fram til montering av diffusjonsprøvene. Aklimatiserings-

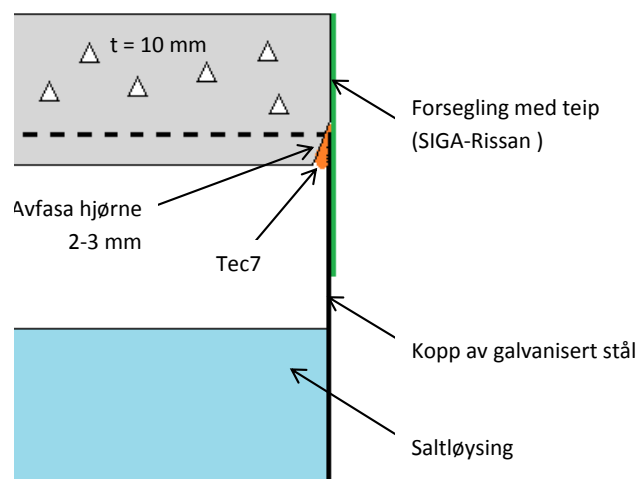
perioden på nesten tre måneder blei kombinert med innkjøring av klimarommet, og forholda var tilnærma dei same som under dei verkelege forsøka også i denne perioden. Vekta av skivene blei registrert fram til eit stabilt nivå var nådd for alle skivene.

3.4.2 Preparering av prøvestykke

Prøvestykkja og koppene hadde same diameter, og det viste seg at ei tilpassing av prøvestykket mot koppen var nødvendig for å gjere prøva stabil under monteringsfasen. Tilpassing av prøvestykkja blei gjort etter prinsippsskissa i Figur 3-16. Det blei laga ein rigg med prøvehaldarar for å kunne «dreie» av nøyaktig like mykje på kvar prøve ved hjelp av ein fast montert vinkelslipar med diamantblad som vist i Figur 3-15.



Figur 3-15 Tilpassing av prøvestykke.
Foto: Gunleiv Sæland



Figur 3-16 Prinsippsskisse for montering av prøver.

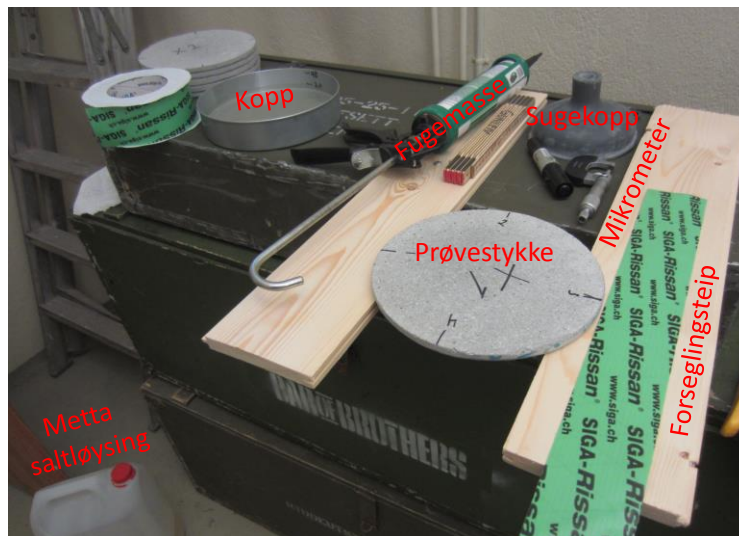
3.4.3 Saltløsning av KNO_3 (kaliumnitrat)

For å oppnå ein konstant relativ luftfuktigheit, og dermed eit konstant damptrykk, på undersida av prøvestykket blei det brukt ei metta løysing av kaliumnitrat og destillert vatn. Saltløysinga gir ein relativ luftfuktigheit på 94 % (Standard Norge 2001). Dermed vil ein ikkje nå metningspunktet i lufta under prøva, og unngår problem med kondensering av vassdamp. Kondensert vassdamp ville gjort at ein får kapillæreffektar med vatn i væskeform, det er ikkje dette ein er interessert i å måle her.

For å løyse kaliumnitrat i vatnet blei det brukt ein magnetrørrar med oppvarming til ca. 70°C under konstant omrøring. Deretter blei løysinga nedkjølt til romtemperatur før montering av prøvene. Det blei brukt om lag 450 gram kaliumnitrat per liter destillert vatn. Saltløysinga er metta når det ligg eit lag med uløyst kaliumnitrat i botn av prøva.

3.4.4 Montering av prøver

Før montering av prøvene blei det målt diameter og tjukkleik på alle mørtel- og betongskivene. Tjukkleik blei målt med mikrometer på fire stader rundt kanten av prøva med ein nøyaktigheit på 0,05 mm. Diameter blei målt med skyvelær på under- og oversida av skiva på to stader med nøyaktigheit på 0,1 mm. Middelerdi for målingane av tjukkleik og diameter blei brukt som utgangspunkt for dei vidare berekningane. Det nødvendige utstyret for montering er vist i Figur 3-17.



Figur 3-17 Oversikt over det nødvendige utstyret og materiala til montering av prøver.
Foto: Gunleiv Sæland

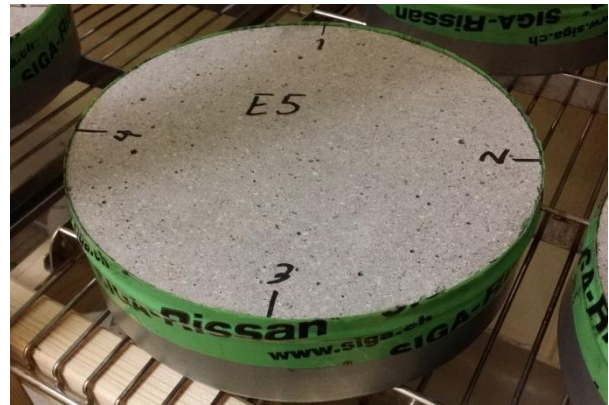
Montering av dei ferdig preparerte prøvestykkka blei gjort ved at metta saltløsning med kaliumnitrat fyrst blei fylt med ei djubde på ca. 20 mm i ventilasjonsendelokket. På den avfasa kanten av prøvestykket blei det lagt ei tynn stripe med fugemasse (Tec7) både for tetting og for stabilisering ved monteringa. Deretter blei skiva lagt forsiktig ned på koppen ved hjelp av sugekopp. Avstand mellom saltløsning og prøvestykke blei da 15-20 mm, som er maks av det standarden tillet. Som forsegling rundt kanten blei det brukt teip av typen SIGA-Rissan. Denne er laga for tetting av skøytear og gjennomføringar i dampsperrer, og har ein dokumentert Sd-verdi på 40 m (langt meir enn det 10 mm tjukke prøvestykket). Deretter blei heile systemet med kopp, saltløsning, prøvestykke og tettemateriale vege før det blei sett inn i det klimatiserte rommet.

I tillegg til dei vanlege prøvene blei det montert sju såkalla «dummy-prøver» med eit tett glasslokk over mørtelskiva for å kunne følgje med på eventuelle lekkasjar i sjølve tettematerialet. Tetting blei gjort på tilsvarande måte som for dei andre prøvene, men her blei teipen trekt heilt opp til glasslokket. Einaste moglege lekkasjeveg var da ut

gjennom tettinga langs kanten, og dette ville ein få god kontroll på med dummy-prøvene. Ferdig monterte prøver er vist i Figur 3-18 og Figur 3-19.



Figur 3-18 Dummy-prøve med tett glasslokk.
Foto: Gunleiv Sæland



Figur 3-19 Ferdig monterte prøve klargjort for forsøk.
Foto: Gunleiv Sæland

Som det går fram av Figur 3-20 var det eit ganske stort omfang med prøver som blei montert. Det blei montert fem enkeltprøver i kvar serie, sjølv om det var sju skiver som var tilgjengelege etter aklimatiseringa. Dette blei gjort for at prøveomfanget ikkje skulle bli alt for stort. Totalt blei det montert 40 mørtelprøver og 10 betongprøver, i tillegg til sju dummy-prøver med glasslokk, slik at det samla omfanget var 57 prøver som skulle vegast utover i forsøksperioden.



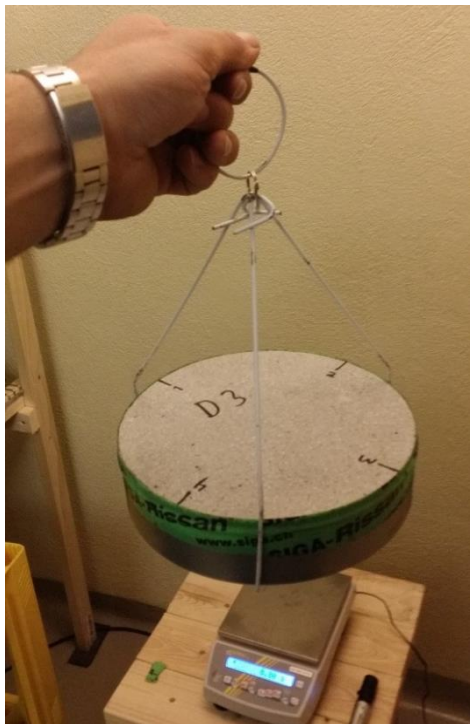
Figur 3-20 Prøvene blei plassert i hylle med tre høgder i klimarommet. På bildet visast også styre- og loggeutstyr for temperatur og fuktnivå i rommet.
Foto: Gunleiv Sæland

3.4.5 Veging av prøver

For å følgje med på kor mykje vassdamp som diffunderer ut gjennom kvar prøve blei det gjort veging av prøvene gjennom heile forsøksperioden. For å bli kjent med korleis prøvene endra seg i vekt blei det i starten gjort hyppige vegingar. Etter kvart som ein såg korleis vekta utvikla seg var det ikkje nødvendig å vege prøvene like ofte.

Vektregistrering blei derfor gjort sjeldnare utover i forsøksperioden. Veging blei utført med ei vekt med nøyaktigheit 0,01 gram som var plassert på stabilt underlag inne i klimarommet.

Flytting av prøvene under veginga måtte utførast med stor forsiktighet, slik at saltløysinga ikkje kom i kontakt med prøvestykket. Sidan avstanden mellom saltløysinga og prøvestykket berre var 15-20 mm, ville ei kvar vinkelendring ut frå horisontal stilling medføre fare for kontakt. Ved flytting mellom hylle og vekt ville faren for at dette skulle skje vere stor. For å unngå dette problemet blei det laga ein eigen løfteanordning for å flytte prøvene, slik det går fram av Figur 3-21. Tre metallstenger med diameter 3 mm blei bøygd til med krokar i enden og eit felles opphengspunkt i toppen. Tyngdekrafta gjorde da at prøva alltid ville henge rett ned uansett korleis ein flytta på handa. Dette gjorde det mykje enklare å plassere prøva trygt i hylla enn om ein skulle prøva å gjort det same med berre hendene.



Figur 3-21 Enkel løfteanordning for sikker flytting av prøver.
Foto: Gunleiv Sæland

3.4.6 Avvik under forsøksperioden

Til tross for ein innkjøringsperiode med regulering i forkant av sjølve forsøket, blei det utfordringar med fuktnivået i rommet utover i forsøksperioden. Antakeleg hadde dette samanheng med at forsøket starta på forsommaren og gjekk utover sommaren, noko som førte til høgare fuktinnhald i utelufta. I ein temperert kjellar slo dette ut som auka relativ luftfuktigheit. For å kompensere for dette blei det installert ein luftavfuktar for å halde kontroll på situasjonen, og fuktnivået var etter dette på eit stabilt nivå.

Sjølv om det blei utvist forsiktigheit under handtering av prøvene ved veging, var det fleire av prøvene ein hadde mistanke om at hadde vore i kontakt med saltløysinga undervegs. Dette blei synleg ved saltgjennomtrenging i fleire prøver seint i forsøksperioden. Døme på dette er vist i Figur 3-22.

Behandling av desse prøvene, samt andre potensielle feilkjelder i forsøket, er skildra i diskusjonskapitlet.



Figur 3-22 Prøve med tydeleg saltgjennomtrenging.
Biletet er teke to månader etter avslutta forsøk.
Foto: Gunleiv Sæland

4 Resultat

På dei neste sidene presenterast den berekna vassdamppermeabiliteten for dei utvalde prøvene som blei testa i laboratoriet. I Vedlegg D finst den målte vektutviklinga for kvar prøveserie, og med det berekningsgrunnlaget for vassdamppermeabiliteten.

Grafisk framstilling av resultatata er gjort ved bruk av Microsoft Excel. Programmet Minitab 16 er brukt til statistiske analyser av resultatata.

4.1 Resultat og analyser

Enkeltverdi for kvar prøve er vist som forklart på figurane. Middelerdi for kvar prøveserie er illustrert med eit grønt punkt for kvar serie. For mørtelprøvene er det trekt opp ei linje mellom punkta for middelerdiar. Etter kvar figur er det vist ein tabell med nøkkeldata for den aktuelle prøvetypen.

Resultata er testa for normalfordeling. Verdiane for vassdamppermeabilitet for alle seriane, bortsett frå to, er normalfordelte med ein p-verdi større enn 0,05. Dei to seriane som ikkje har normalfordelte resultat er mørtelprøver frå serien med sementtype Standard FA og 5 % silika og serien med sementtype Standard FA med 15 % silika. Desse har fire tette verdiar og ein som ligg langt ut. Ein antar likevel at for eit større utval ville resultatata frå alle prøveseriane vere normalfordelte rundt den verkelege verdien for vassdamppermeabiliteten til prøvene.

Dette er vanleg når det bereknast til dømes fastleiksegenskapar for betong. Dersom ein hadde gjort mange forsøk, ville 95 % av prøveresultatata ligge innanfor eit intervall på to standardavvik rundt middelerdien til kvar serie. I den grafiske framstillinga er to standardavvik ut frå middelerdien av prøveresultatata vist med grøne strekar. Ein observerer at alle enkeltverdiane ligg innanfor dette intervallet.

Følgjande terminologi er gjeldande i resultat- og analysekapitlet, samt i vidare diskusjon av resultatata:

Enkeltverdi/enkeltprøve: Resultat frå ei bestemt prøve innanfor ein prøveserie

Prøveserie: Fleire identiske enkeltprøver med same sementtype og silikainnhald

Gruppe: Fleire prøveseriar som er gruppert etter ein eigenskap, t.d. sementtype

Grunnlag for berekningane

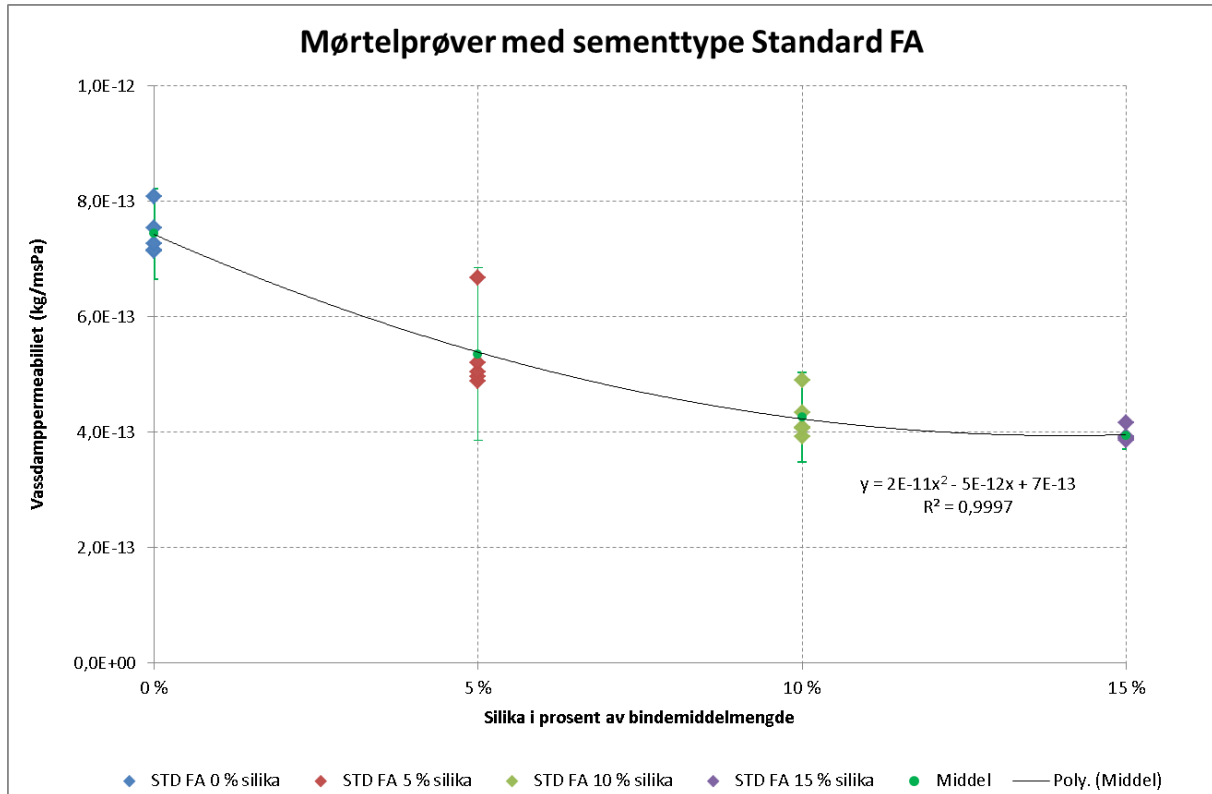
Som nemnt i metodekapitlet skal vassdamppermeabiliteten bereknast med verdiar frå den perioden der ein har stabile forhold i forsøket. Denne perioden er rekna frå vegetidspunkt 11. juli til 26. august for samtlege prøver. Den aktuelle delen av forsøket strekkjer seg altså over ein periode på 46 døgn, sjå vedlegg D. Som det går fram av diagramma i vedlegget er dette om lag halvparten av perioden som prøvene har stått i det klimastyrte rommet. For kvar enkeltprøve er det lagt inn ei regresjonslinje basert på enkeltverdiane frå kvar veging av prøvene i den stabile perioden. Linja følgjer ein lineær funksjon som kan skildrast med likninga $y = a \cdot x + b$. Konstanten a i denne samanhengen gir vekttauet per døgn, og dette er brukt i berekningane av vassdampdiffusjon som visast i figurane og tabellane i kapittel 4.1.1 og 4.1.2.

Tilpassinga til regresjonslinja på figurane i vedlegg D seier noko om kor stabilt vekttauet for prøvene har vore under forsøket. For alle prøvene ligg korrelasjonskoeffisienten R^2 på over 0,99. Dette indikerer at vekttauet har vore stabilt gjennom perioden for alle prøvene, men det seier ikkje noko om kva som er mekanismen bak vektreduksjonen. Om det er rein luftlekkasje eller diffusjon gjennom prøvestykket kan ein ikkje fastslå ut frå vektregistreringa.

Resultata frå vektregistreringa er brukt til å rekne ut vassdamppermeabiliteten etter metoden skildra i kapittel 2.9. Enkeltverdiar for berekna vassdamppermeabilitet er vist i vedlegg E.

4.1.1 Mørtelprøver

Resultata for mørtelprøvene viser ein søkkande verdi for vassdamppermeabilitet med aukande silikainnhald. Resultata for mørtelprøver med Standard FA-sement er vist i Figur 4-1 og Tabell 4-1.

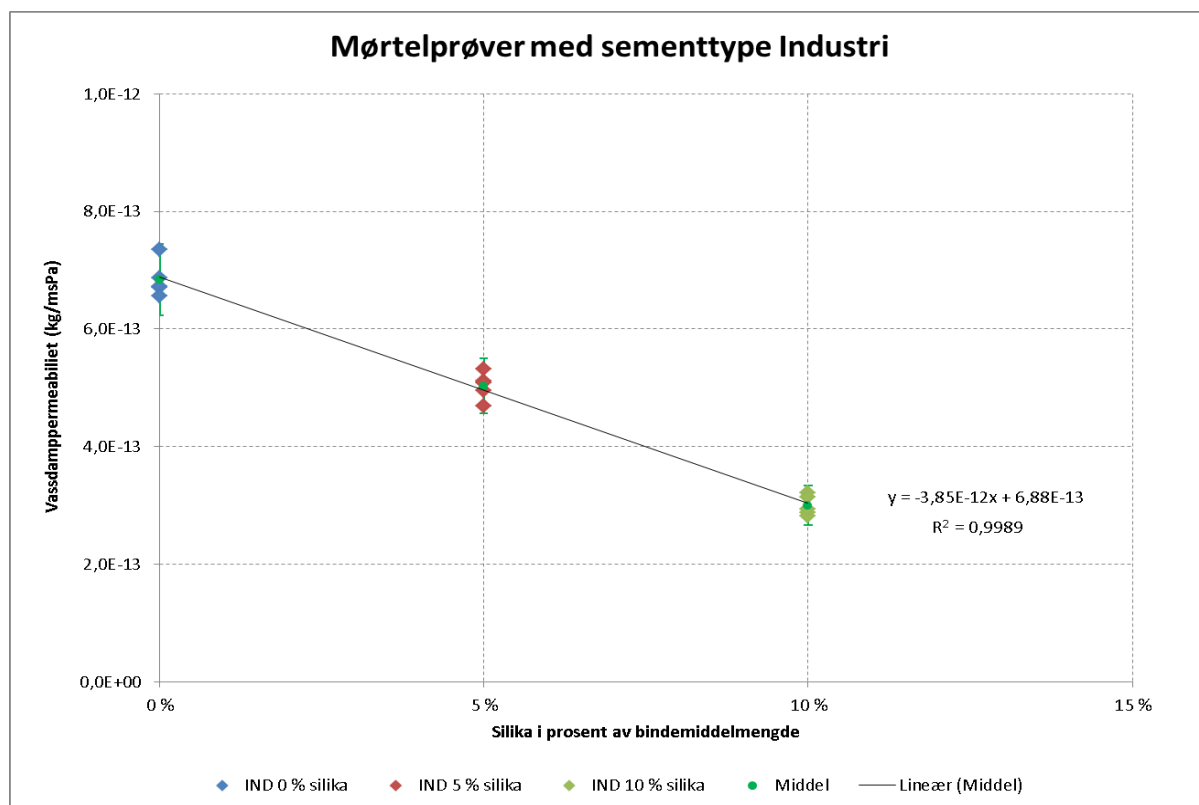


Figur 4-1 Vassdamppermeabilitet for mørtelprøver med sementtype Standard FA. Silikatilsetjing er vist på x-aksen og vassdamppermeabilitet på y-aksen. Det er fem enkeltprøver i kvar serie, desse er vist med kvar si indikatorfarge på diagrammet. Dei grønne linjene viser to standardavvik ut frå middelveidien for kvar prøveserie. Middelveidi er vist med grønt punkt for kvar serie.

Prøvetype (mørtel)	Middelveidi δp (10^{-12} kg/msPa)	Std. avvik δp (10^{-15} kg/msPa)	Std. avvik i prosent av middelveidi	Reduksjon i permeabilitet
STD FA 0 % silika	0,74	39	5,3 %	(referanseprøve)
STD FA 5 % silika	0,54	75	14 %	28 %
STD FA 10 % silika	0,43	39	9,0 %	43 %
STD FA 15 % silika	0,39	12	3,1 %	47 %

Tabell 4-1 Nøkkelveidiar for mørtelprøver med sementtype Standard FA. Prøveserien utan silikatilsetjing er brukt som referanseprøve.

Som for mørtelprøver med sementtype Standard FA er det også for Industrisement funne reduksjon i vassdamppermeabilitet som følge av aukande silikainnhald. Som det går fram av Figur 4-2 og Tabell 4-2 er variasjonen i prøveresultat mindre for seriane med denne sementtypen enn for Standard FA.



Figur 4-2 Vassdamppermeabilitet for mørtelprøver med sementtype Industri. Silikatilsetjing er vist på x-aksen og vassdamppermeabilitet på y-aksen. Det er fem enkeltprøver i kvar serie, desse er vist med kvar si indikatorfarge på diagrammet. Dei grønne linjene viser to standardavvik ut frå middelveidien for kvar prøveserie. Middelveidi er vist med grønt punkt for kvar serie.

Prøvetype (mørtel)	Middelveidi δp (10^{-12} kg/msPa)	Std. avvik δp (10^{-15} kg/msPa)	Std. avvik i prosent av middelveidi	Reduksjon i permeabilitet
IND 0 % silika	0,68	30	4,4 %	(referanseprøve)
IND 5 % silika	0,50	23	4,6 %	26 %
IND 10 % silika	0,30	17	5,6 %	56 %

Tabell 4-2 Nøkkelveidiar for mørtelprøver med sementtype Industri. Prøveserien utan silikatilsetjing er brukt som referanseprøve.

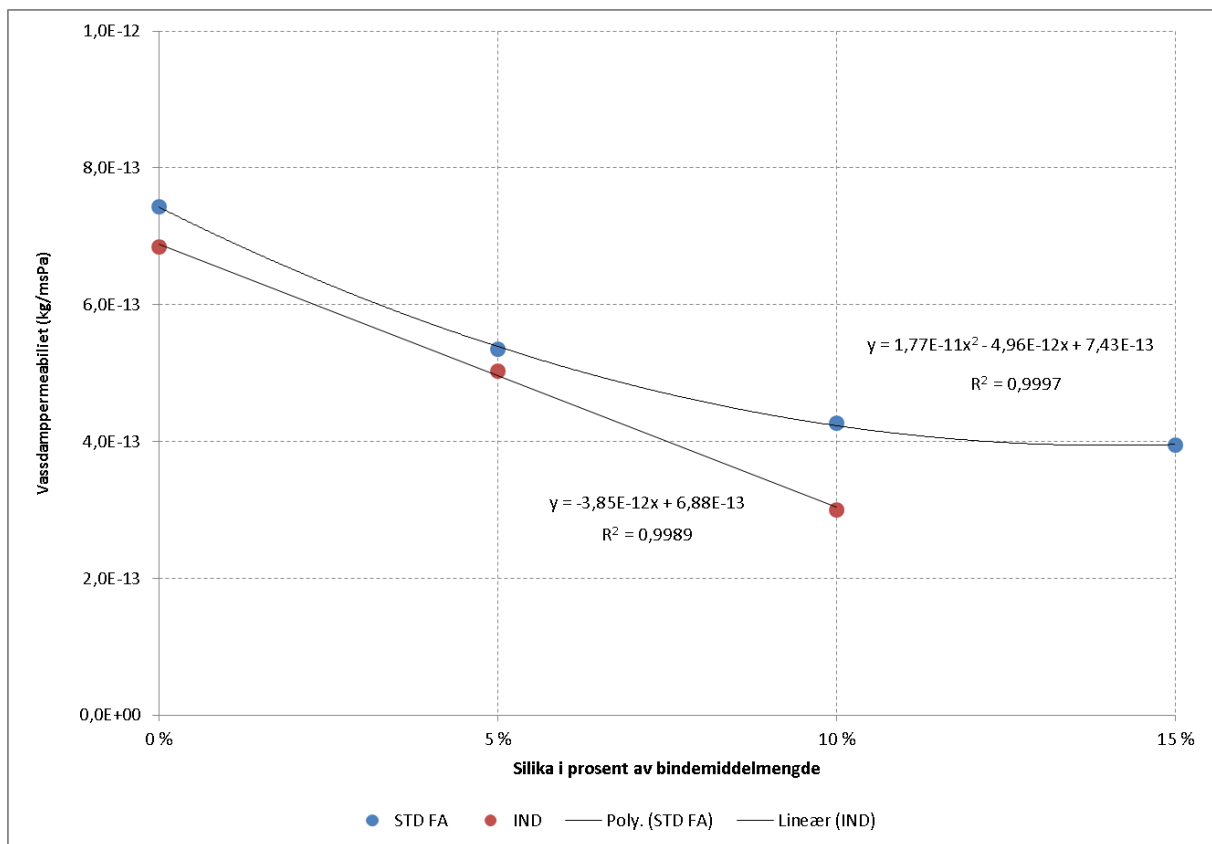
Kommentar til mørtelprøver med sementtype Standard FA og Industri

Prøveresultata for mørtel med sementtype Standard FA er presentert i Figur 4-1 og for Industrisement i Figur 4-2. Variasjonen er størst i prøveserien med Standard FA sement. Her opererer ein med eit standardavvik på $75 \cdot 10^{-15}$ kg/msPa (14 % av middelveidien) i det mest ekstreme tilfellet, samanlikna med $23 \cdot 10^{-15}$ kg/msPa (4,6 % av middelveidien) for Industrisement. Standardavviket er altså om lag tre gonger så stort for mørtelprøver med Standard FA samanlikna med Industrisement.

Resultata viser ein signifikant reduksjon i permeabilitet for mørtelprøver med sementtype Standard FA og Industri ved tilsetjing av silikastøv opp til 10 % av bindemiddelmengda. Ein t-test med nullhypotese om at det ikkje er forskjell i permeabilitet mellom prøveseriane gir ein p-verdi lågare enn 0,001 i begge tilfelle. Dette betyr at ein på eit 95 % konfidensnivå kan forkaste nullhypotesa. Dermed er vassdamppermeabiliteten signifikant lågare for prøveseriane med 10 % silikastøv samanlikna med referanseprøva utan silikatilsetjing.

For prøveserien med Standard FA-sement viser ein t-test at reduksjonen i permeabilitet ikkje er signifikant når silikainnhaldet aukast frå 10 % til 15 %. P-verdien i t-testen er her 0,078, og ein kan dermed ikkje seie at vassdamppermeabiliteten er signifikant lågare på eit 95 % konfidensnivå.

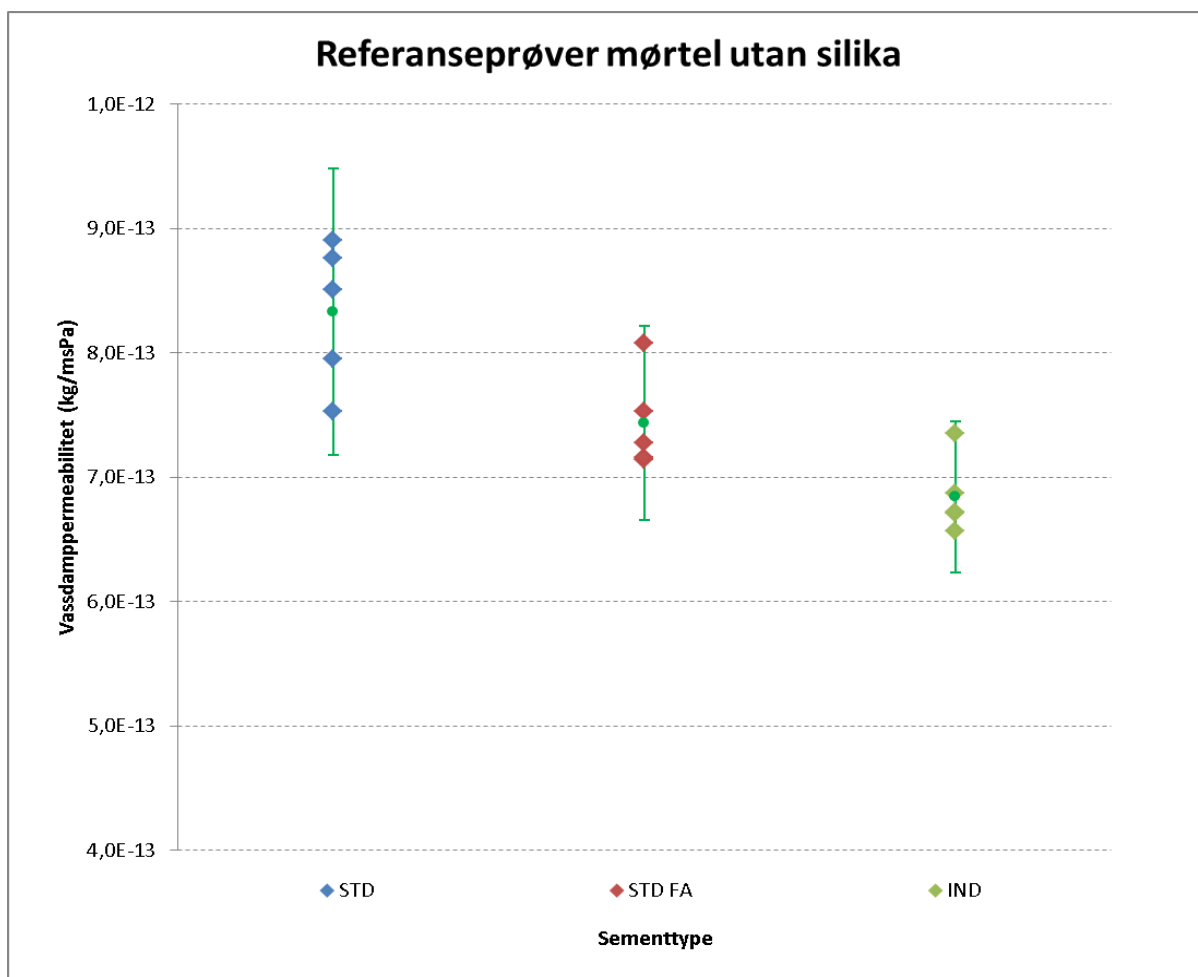
Basert på middelveidiar i Tabell 4-1 og Tabell 4-2 er det funne ein reduksjon i permeabilitet på 43 % for sementtype Standard FA og 56 % for Industrisement ved tilsetjing av 10 % silikastøv i forhold til referanseprøvene utan silikastøv. For Standard FA er effekten noko avtakande ved aukande silikainnhald, mens ein for Industrisement observerer ein meir lineær samanheng. Figur 4-3 illustrerer forskjellen i utvikling i vassdamppermeabilitet når silikastøvinnhaldet aukar for dei to typane sement i mørtelprøvene. Her er det berre vist linjer mellom dei silikanivåa ein har gjort målingar for, og ikkje nokon prognose utover dette.



Figur 4-3 Samanlikning av forsøksresultat for Standard FA og Industri. Diagrammet er basert på middelveidiar henta frå Tabell 4-1 og Tabell 4-2.

4.1.2 Referanseprøver utan silika

Det blei testa reine referanseprøver av mørtel med tre ulike typar sement for å sjå på korleis sementtype påverkar diffusjonsegenskapane. Seriane som blei testa utan silikatilsetjing var mørtelprøver med Standardsement, Standardsement FA og Industrisement. Resultata er presentert i Figur 4-4 og Tabell 4-3.



Figur 4-4 Vassdamppermeabilitet for mørtelprøveseriar utan silikatilsetjing. Langs x-aksen visast seriane med kvar sementtype og på y-aksen visast vassdamppermeabiliteten. Det er fem enkelprøver i kvar prøveserie. Standardavvik er vist med to nivå ut frå middelverdien som er vist med eit grønt punkt for kvar serie.

Prøvetype (mørtel)	Middelverdi δp (10^{-12} kg/msPa)	Std. avvik δp (10^{-15} kg/msPa)	Std. avvik i prosent av middelverdi	Reduksjon i permeabilitet
STD 0 % silika	0,83	58	6,9 %	(referanseprøve)
STD FA 0 % silika	0,74	39	5,3 %	11 %
IND 0 % silika	0,68	30	4,4 %	18 %

Tabell 4-3 Nøkkelverdiar for mørtelprøver utan silikatilsetjing. Prøveserie med rein Standardsement er brukt som referanseprøve for å vurdere kor mykje sementtype betyr for vassdamppermeabiliteten.

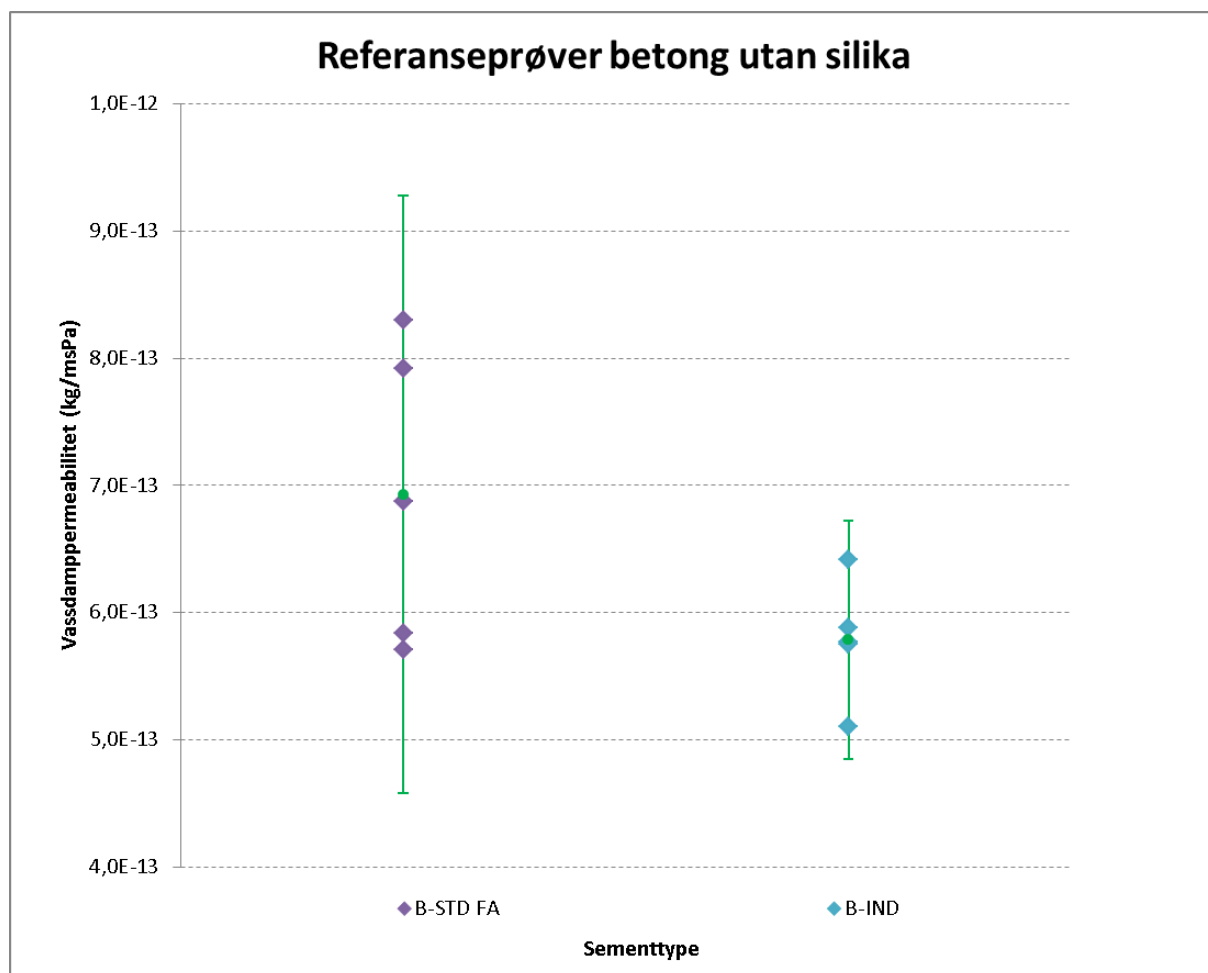
Kommentar til mørtelprøver utan silikatilsetjing

Ut frå resultatane presentert i Figur 4-4 på førre side ser permeabiliteten ut til å vere lågare for mørtelprøver med Standard FA og Industrisement enn for rein Standardsement.

For å vurdere om det faktisk er forskjell blei det gjort ein ANOVA-test for vassdamppermeabiliteten til referanseprøvene utan silikatilsetjing. Ein testar her med ei nullhypotese om at det ikkje er forskjell mellom dei ulike sementtypene. P-verdien blir i dette tilfellet 0,001, noko som viser at det er 0,1 % sannsynleg at nullhypotesa er sann. Dermed viser testen at det er signifikant forskjell mellom dei tre sementtypene som blei brukt i forsøket, på 95 % signifikansnivå.

Middelverdiane i Tabell 4-3 viser at nedgangen i permeabilitet er om lag 10 % for Standard FA og nesten 20 % for Industrisement samanlikna med rein Standardsement.

På same måten som for mørtelprøvene (med fint tilslag) blei det også kjørt prøveseriar med betong (med grovt tilslag) utan silikatilsetjing. Dei to seriane som blei testa er vist i Figur 4-5 og Tabell 4-4 under. Det blei ikkje kjørt testar for betongprøver med silikatilsetjing da det blei vurdert at dette ville gi eit for stort omfang av prøver.



Figur 4-5 Vassdamppermeabilitet for betongprøveseriar utan silikatilsetjing. Langs x-aksen visast seriane med kvar sementtype og på y-aksen visast vassdamppermeabiliteten. Det er fem enkelprøver i kvar prøveserie. Standardavvik er vist med to nivå ut frå middelvearden som er vist med grønt punkt for kvar serie.

Prøvetype (betong)	Middelveardi δp (10^{-12} kg/msPa)	Std. avvik δp (10^{-15} kg/msPa)	Std. avvik i prosent av middelveardi	Reduksjon i permeabilitet
B-STD FA 0 % silika	0,69	117	17 %	(referanseprøve)
B-IND 0 % silika	0,58	47	8,1 %	16 %

Tabell 4-4 Nøkkelveardi for betongprøver utan silikatilsetjing. Prøveserien med sementtype Standard FA er brukt som referanseprøve for å samanlikne med Industrisement.

Kommentar til betongprøver utan silikatilsetjing

Variasjonen internt i prøveseriane er presentert i Figur 4-5 på førre side er stor. Særleg gjeld dette serien med Standard FA-sement, der standardavviket er $117 \cdot 10^{-15}$ kg/msPa (17 % av middelveidien). Sjølv om middelveidien for betongprøver med Industrisement er lågare enn middelveidien for prøvene med Standard FA så må ein legge merke til at standardavviket også er stort for denne serien slik det går fram av Tabell 4-4. På figuren er det indikert to standardavvik ut frå middelveidien for Standard FA, og dette overlappar to standardavvik ut frå middelveidien for Industrisement. Dette varslar om at ein har med store variasjonar i prøveresultat å gjere. Ein t-test med resultatata frå dei to prøveseriane for betongprøver viser at det ikkje er signifikant forskjell i vassdamppermeabiliteten til dei to seriane med betongprøver på 95 % signifikansnivå (p-verdi 0,099 som er større enn 0,05).

5 Diskusjon

Resultata frå forsøka gjort i denne oppgåva understrekar at betong er eit materiale med store variasjonar. Dette må ein ta med i vurderinga når ein skal ta stilling til om betongen i seg sjølv kan brukast som diffusjonstetting. Samtidig viser resultata at det er mogleg å påverke eigenskapane i betongen, til dømes ved å tilsetje pozzolanar.

5.1 Kommenterarar til resultata frå forsøket

Forsøka som blei utført i denne oppgåva viser at permeabiliteten reduserast når andelen pozzolanar i mørtelen aukast, sjå Figur 4-1 og Figur 4-2. Dette er i samsvar med det som blei diskutert i teorikapitlet. Pozzolanreaksjonen gir ein meir tettpakka mikrostruktur i pastaen, og dette fører til at færre vassdampmolekyl trengjer gjennom. For begge sementtypene måler ein stor effekt av silikatilsetjing i mørtelprøvene. For Standard FA reduserast permeabiliteten betydeleg med aukande silikainnhald opp til 15 % silika, men effekten av å auke innhaldet av silika minkar jo høgare innhaldet er. Frå 10 % til 15 % silikatilsetjing har ein for denne sementtypen ikkje grunnlag for å seie at permeabiliteten er signifikant lågare. Industrisement viser ein lineær reduksjon i vassdamppermeabilitet opp til 10 % silika. Det er ikkje vald å vise nokon prognose for utviklinga for Industrisement utover dette, da ein skal vere forsiktig med å trekke for raske slutningar om utviklinga utover dei silikamengdene ein har gjort målingar for.

Det er interessant å sjå av referanseprøvene i Figur 4-4 og Figur 4-5, samt samanlikninga av gruppene i Figur 4-3, at prøveseriane med Industrisement har signifikant lågare permeabilitet enn prøveseriane med Standard FA-sement. Standard FA-sementen som blei brukt i forsøket inneheld 20 % flygeaske, og har slik sett eit høgare innhald av pozzolanar enn Industrisementen. Dette skulle i utgangspunktet gjort at ein måler lågare permeabilitet i prøvene med Standard FA, jfr. argumentasjonen i kapittel 2.6.3. Forklaringa på at ein likevel ikkje får desse resultata kan ligge i at flygeaske reagerer svært langsamt med hydratiseringsprodukta frå vatn-sementreaksjonen. Tidlegare forsøk med måling av kloridtettleik i betong har vist at ein stor del av flygeaskemengda ikkje har reagert i løpet av eit halvt år. Sjølv etter fem og ti år ser ein aukande tettleik som følgje av pozzolanreaksjonen med flygeaske. Skal ein sjå den fulle effekten av flygeaske må ein altså vente svært lenge før ein gjer målingar. For

silikatilsetjing, derimot, er det aller meste av pozzolanreaksjonen ferdig etter ein til to månader (Kjellsen 2015). Dette resonnementet er i tråd med det ein observerer i forsøket.

Med bakgrunn i argumentasjonen i førre avsnitt blir samanlikninga av prøvene med sementtypane Standard FA og Industri meir ei rein samanlikning av sementtype. Resultata vist i Figur 4-3 støttast av at ein ut frå t-testen av dei tre referanseprøvene med mørtel utan silikatilsetjing finn ein signifikant reduksjon i permeabilitet for Industrisement samanlikna med Standard FA. Ein veit ikkje kor stor del av flygeasken som har reagert, men antakeleg er det langt frå alt. Industrisement har ei høgare finmalingsgrad enn Standard FA (jfr. Vedlegg A). Dermed er det ei større overflate som er tilgjengeleg for å danne bindingar mellom partiklane. Dette kan vere medverkande årsak til at ein registrerer ein lågare vassdamppermeabilitet for Industrisement for alle nivåa av silikatilsetjing. Betongprøver med Industrisement har ein høgare dokumentert fastleik i den første tida enn prøver med Standard FA-sement (Vedlegg A). Fastleik er ofte brukt som eit mål på bestandigheit i betong, og det kan derfor gi ein indikasjon på at trenden vil vere liknande når ein ser på permeabilitet i ein tidleg fase av forløpet til reaksjonen med flygeaske.

Som det går fram av Figur 4-3 har kurvene mellom middelveidiane for vassdamppermeabilitet forskjellig form (lineær og andregrads) for dei to sementtypane som er testa som mørtelprøver med ulike silikamengder. Når ein kjem opp i store mengder pozzolanar reduserast andelen sement i pastaen betydeleg. Reaksjonen mellom sement og vatn er viktig for at det skal dannast kalsiumhydroksid som er grunnlaget for pozzolanreaksjonen. Dersom det er lite tilgjengeleg kalsiumhydroksid vil mengda C-S-H som dannast også bli redusert, jfr. kapittel 2.5. C-S-H utgjør som kjent dei kraftige bindingane mellom partiklane. Når det ikkje dannast meir C-S-H vil heller ikkje permeabiliteten reduserast ytterlegare, og betongen blir ikkje stort tettare sjølv om ein tilfører meir pozzolanar. Dette kan vere med å forklare den avtakande effekten av silikatilsetjing i prøvene med sementtype Standard FA, der ein ikkje finn ein signifikant reduksjon i permeabilitet når silikainnhaldet aukast frå 10 % til 15 %.

Sidan det blei testa med silikamengder opp til 15 % for den eine sementtypen, og berre opp til 10 % for den andre, kan det vere skummelt å framstille verdiane i same diagram slik det er gjort i Figur 4-3 med to ulike modellar som viser utviklinga. Ein veit ikkje

sikkert om sammenhengen egentleg er avtakande også for Industrisement. Det er mogleg at resultata i ein eller fleire av prøveseriane for Industrisement meir eller mindre tilfeldig får ein middelvei som gir ein tilsynelatande meir lineær samanheng for denne sementtypen. Dette blir spekulasjonar, men det viser at val av modell påverkar kva ein forventar av resultat for høgare nivå av silikatilsetjing.

Det har blitt diskutert om ein skal ta med alle prøvene i resultatkapitlet, eller om ein skal utelate dei mest ekstreme verdiane. Til dømes kunne dette grunngjevast med at dei mest ekstreme verdiane er prøver som kan ha blitt utsett for avvik under forsøket, anten under montering, veging eller ved lekkasjar i tettemateriale eller gjennom store porer i prøvestykket. Det har likevel blitt vurdert at dette er variasjon som er nyttig å ta med, sidan ein både er ute etter å fange opp materialeegenskapar, og samtidig kunne uttale seg om kva resultat ein egentleg får ved å bruke metoden som er gitt i NS-EN ISO 12572. Dermed er alle resultata for alle prøvene tekne med når dei endelege resultata presenterast.

Forskjellane mellom dei ulike prøveseriane understrekar at det er fleire variablar som styrer vassdamppermeabiliteten i betong. Derfor er forskjellane også relevante når resultata skal samanliknast med tidlegare forskning på området.

5.2 Evaluering av forsøket – feilkjelder

Forsøket gav resultat som var i tråd med det ein kunne forvente av effekten av silikatilsetjing. Som det går fram av resultata var det eit stort standardavvik i nokre av prøveseriane. Under er det lista opp nokre moglege faktorar som kan ha vore med på å bidra til at ein observerer stor variasjon i resultata.

Sjølv ved god utstøyping og vibrering vil makroporer vere ulikt fordelt i mørtel og betong både i forsøk og ein verkeleg situasjon. Poreinnhald, porestorleik og fordeling av porer vil variere mellom prøvene, og vil på den måten vere ei kjelde til variasjon i diffundert vassdampmengde og dermed den målte permeabiliteten.

For å ha kontroll på eventuelle lekkasjar i tettematerialet i randsona mellom prøvestykket og koppen blei det montert nokre dummy-prøver med tett glasslokk over. I løpet av forsøksperioden blei vekta av desse kontrollert på same tidspunkt som resten

av prøvene. Det blei registrert vekttap på to av dei i alt sju prøvene, noko som indikerer ein lekkasje ut gjennom tettinga. Ein kan dermed ikkje utelukke at noko av variasjonen i dei verkelege prøvene skuldast at tettinga ikkje har vore tilstrekkeleg, sjølv om det blei lagt mykje arbeid i å gjere dette nøyaktig for alle prøvene. Vegeresultata for dummy-prøvene finst i vedlegg F.

Som nemnt tidlegare var det gjennom forsøksperioden nokre variasjonar i fuktigheit og temperatur i klimarommet. Dei registrerte variasjonane er like for alle prøvene, men ein kan ikkje sjå bort frå at det har vore interne variasjonar lokalt i rommet. Slike variasjonar vil kunne gi ulike resultat alt etter kor prøvene er plasserte i rommet.

Lufttrykket i omgivnadene våre varierer i takt med dei store versystema. Dette påverkar densiteten til lufta, og dermed også oppdrifta til gjenstandar som er omgitt av luft (lova til Arkimedes). Ved måling av vekt vil ein få ulike verdiar alt etter som korleis lufttrykket (og dermed densiteten og oppdrifta i lufta) er. Dei tidlegare omtalte dummy-prøvene blei vege til verdiar som låg både under og over startvekta. Dette indikerer at ein kanskje har å gjere med ein variasjon knytt til oppdrift. Likevel var desse variasjonane svært små samanlikna med massetapet i form av vassdampdiffusjon gjennom prøvestykket. Dermed kan ein sjå bort frå variasjonane i vekt grunna variasjon i det barometriske trykket. Dette er også noko som varierer likt for alle prøvene, og slår dermed ikkje ut som ein forskjell mellom dei enkelte prøvene. Ein graf som viser det barometriske trykket i forsøksperioden er å finne i vedlegg C.

Ein kan heller ikkje sjå bort frå at vekta har vore unøyaktig og dermed gitt variasjonar i vektregistreringa, sjølv om denne var nyinnkjøpt og skulle vere kalibrert. Ein anna moglegheit er at vassdamp har diffundert inn i prøvene. Dersom dette hadde vore tilfelle skulle damptrykket inne i koppen vore lågare enn på utsida, og i så fall måtte saltløysinga vore diffundert bort. Dette var ikkje tilfelle for nokon av prøvene.

Under veging av prøvene blei det i løpet av forsøksperioden registrert nokre tilfelle der ein hadde mistanke om at saltløysinga hadde kome i kontakt med prøvestykket. Dette fordi ein var usikker på om brå bevegelsar eller anna uønska handtering av prøvene gjorde at ein fekk skvalping i saltløysinga. Der det hadde vore kontakt med prøvestykket viste dette seg seinare som saltgjennomtrenging gjennom prøvestykket. I utgangspunktet rekna ein med at dette ville slå ut tydeleg på vekttapet på prøva, og at ein ville få kapillærtransport av vatn i staden for vassdampdiffusjon. Ut frå resultata kan

ein likevel ikkje sjå nokon eintydig samanheng mellom dei prøvene som er registrert med saltgjennomtrenging og dei med høgast vekttaf i forsøksperioden. Det er derfor eit spørsmål om kor mykje dette har å seie for resultatet.

Desse hovudpunkta i evaluering av forsøket vitnar om at ein arbeider med ein metode som inneheld mange faktorar som kan påverke resultatet av forsøket, og dermed også dei anbefalingane som blir gitt på grunnlag av resultatata.

5.3 Samanlikning med anna forskning

Direkte samanlikning av resultat frå forsøka gjort i denne oppgåva og materialdata frå SINTEF Byggforsk sine tabellar gir ikkje utan vidare gode svar. Det er vanskeleg å bruke rådata frå forsøka i ei direkte samanlikning med tabellverdiar frå andre sine forsøk. Ein kjenner ikkje til kva som brukast av sikkerheitsmarginar i SINTEF sine tabellar, verdiane er henta frå fleire ulike kjelder, prøvene er forskjellige både med tanke på tilsetjingsmateriale og bruk av tilslag (mørtel- kontra betongprøver) og prøvingsriggen er ikkje lik i denne oppgåva og i SINTEF sitt laboratorium. I Tabell 5-1 er det vist verdiar for vassdamppermeabilitet som er henta frå eitt av SINTEF Byggforsk sine

Materiale	Densitet kg/m ³	Vanndamppermeabilitet, δ_p (10 ⁻¹² kg/msPa)			
		Relativt fuktnivå i materialene (% RF)			
		35-70	70-80	80-90	90-95
Betong og mur					
Betong, v/c 0,4		1,0-1,4	1,4-2,1	2,1-3,9	3,9-5,2
Betong, v/c 0,5		1,0-1,5	1,5-2,4	2,4-7,4	7,4-21,0
Betong, v/c 0,6		1,3-1,8	1,8-2,8	2,8-11,0	11,0-56,0
Betong, v/c 0,7		1,3-1,8	1,8-2,8	2,8-11,0	11,0-56,0

Tabell 5-1 Dagens dokumenterte verdiar for vassdamppermeabilitet i betong. Tabellen viser vassdamppermeabilitet for ulike v/c-forhold ved varierende fuktnivå i materiala. Tabellutdraget er henta frå (Uvsløkk 2003).

byggdetaljblad.

Resultata frå forsøka i denne oppgåva viser ein betydeleg lågare vassdamppermeabilitet enn det som SINTEF har dokumentert for betong med tilsvarande v/c-forhold. I tillegg til at ein i utgangspunktet reknar med at ein del av prøveseriane i dette forsøket verkeleg har ein lågare verdi enn det som går fram av Tabell 5-1, kan også faktorane nemnde i

førre avsnitt om ulempene med å samanlikne rådata og tabellverdiar vere noko av grunnen til at ein i forsøka i denne oppgåva opererer med lågare verdiar. Av denne grunnen er det ikkje vurdert som hensiktsmessig å samanlikne tal direkte. Det mest interessante med resultata i denne omgang er likevel å sjå om det er forskjellar ved bruk av pozzolanar i betongen. Det er grunn for å anta at den prosentvise reduksjonen i permeabilitet i dei prøvene som har pozzolantilsetjingar er gjeldande også for andre betongreseptar etter at dei er korrigert med sikkerheitsmarginar.

Forsøka har vist at metoden gir stor variasjon i prøveresultata. Dette kan som nemnt kome av at metoden ikkje er utført i eit akreditert laboratorium der alle faktorar skal vere under kontroll. Samtidig treng det ikkje berre å vere studentarbeidet som er grunnen til variasjonane – det er sannsynleg at ein også får store variasjonar i eit akreditert laboratorium ved bruk av same prinsippet for testing. At ein jobbar med eit materiale med store variasjonar kjem også fram i fleire typar litteratur, til dømes når ein ser på fukttransport og mekanismar for dette i betong (Geving & Thue 2002). Slik sett verkar resultata fornuftige samanlikna med anna forskning på området.

Sjølv om ein ikkje samanliknar data direkte så kan ein ved å ta utgangspunkt i den prosentvise reduksjonen i permeabilitet vise at tilsetjing av pozzolanar har ein stor effekt på korleis betong kan brukast i praksis, og dermed også at dagens tilgjengelege materialdata bør oppdaterast på dette området. Sidan ein ser ein så klar samanheng mellom pozzolaninnhald og vassdamppermeabilitet i desse forsøka bør det fokuserast meir på dette også i generelle anbefalingar til byggebransjen. SINTEF Byggforsk sine anbefalingar er i stor grad førande for kva som vurderast som god prosjektering, og nettopp derfor er det viktig at data frå SINTEF Byggforsk stemmer godt med verkelege materialeegenskapar. Dette er i seg sjølv eit godt argument for å utvide tabellane til å gjelde for betong med eigenskapar som er styrt av fleire variablar enn v/c-forholdet aleine.

5.4 Vurdering av koppmetoden og forbedringspotensiale

Den tidlegare omtalte koppmetoden skildra i NS-EN ISO 12572 er så langt den mest anerkjente metoden for testing av diffusjonsegenskapar i byggemateriale. Metoden brukast ofte med tynne prøvestykke med tjukkeleik rundt 10 mm for at ein skal kunne måle ein viss vassdampgjennomgang innanfor eit rimeleg tidsperspektiv. I denne oppgåva har mørtelprøver vore testa med ulike mengder pozzolanar i blandinga. Kor eigna denne metoden er for å teste vassdamppermeabilitet i betong med grovt tilslag kan ein ikkje svare eintydig på ut frå forsøka i denne oppgåva, sidan det berre er to prøveseriar som er testa med betongprøver, men ein kan stille spørsmål ved om metoden gir eit realistisk bilete av eigenskapane i ein verkeleg situasjon.

Ved testing av vanlege betongprøver med grovt tilslag har ein gjennomgåande stein i ein stor andel av prøvearealet, og det er grunn til å tru at dette påverkar den målte permeabiliteten i og med at tilslaget har lågare permeabilitet enn pastaen rundt. Samtidig veit ein heller ikkje sikkert kva som skjer i randsonene mellom pasta og tilslag, og dette vil antakeleg også vere med å bidra til at ein får ein stor variasjon i prøvingsresultat. Det er sannsynleg at heftsona mellom pasta og tilslag vil vere utsett for riss når ein får svinn i pastaen. Pastaen trekkjer seg saman, mens tilslaget framleis er uendra. Med denne bakgrunnen kan ein sjå for seg at tynne skiver av mørtelprøver med fint tilslag ($d_{\max} < 1/3$ av prøvetjukkeleiken) gir eit meir realistisk bilete av forholdet mellom pasta og tilslag i ein verkeleg situasjon. Dette blir ei vurdering av fordelar med tanke på tidsbruk opp mot kor realistiske verdiar ein faktisk får ved å bruke mørtelprøver med fint tilslag. Ei utfordring med å bruke mørtelprøver er at ein ikkje kan bruke ein vanleg betongresept, og dermed er det også eit spørsmål om ein greier å lage ei mørtelblanding som representerer eigenskapane i betongen som blir brukt på byggeplassen.

Porar i prøvene (makroporer/luftporer) vil også kunne påverke resultatet i større grad når ein arbeider med tynne skiver. Ei pore med diameter 5 mm vil ikkje påverke permeabiliteten i ein vanleg betongkonstruksjon i nokon særleg grad, men i ei 10 mm tjukk prøve vil dette naturlegvis slå ut i mykje større omfang. Porar vil vere ei utfordring så lenge ein jobbar med så tynne skiver, anten det dreier seg om mørtel- eller betongprøver.

Metoden har også den ulempa at ein treng svært lang tid både til herding av prøvene, aklimatisering av prøvestykka og gjennomføring av sjølv forsøket med vassdampgjennomgang. I denne oppgåva strekte perioden frå støyping av prøver til avslutta forsøk seg over sju månader. I eit akreditert laboratorium der prosedyrene er meir innarbeidde kan ein rekne med å bruke noko kortare tid, men betong i seg sjølv er eit svært tregt materiale, og ein må derfor rekne med at forsøk av denne typen vil ta lang tid. Metoden krev også at mange prosedyrer må gjerast mange gonger, og blir på den måten meir utsett for feil under utføring av forsøket. Ein metode som krev mindre tid vil vere meir aktuell å bruke, og terskelen for å teste eigenskapar i betong ville bli lågare. På den måten kunne ein få kartlagt eigenskapar i langt fleire betongtypar med fleire variablar, og skaffe meir kunnskap om korleis endringar i betongreseptar påverkar diffusjonseigenskapane, utan at ein treng å vente meir enn eit halvt år på resultatata. Det presiserast likevel at raskare metodar må baserast på sikker kunnskap om eigenskapane i materiala, elles vil resultatata frå slike testar vere verdilause.

Greier ein å kombinere kortare tid og færre operasjonar i ein annan metode vil det vere eit stort framsteg i metodeutviklinga. Det er utvikla forskjellige matematiske modellar for å sjå på fukttransport i betong, til dømes metoden General Effective Media (GEM) som har blitt brukt til å sjå på vasstransport i det kapillære området (Song et al. 2010). Det er grunn til å tru at liknande modellar kunne utviklast også for å studere vassdamppermeabilitet og diffusjonseigenskapar. Andre moglegheiter er å utvikle ei prosedyre for å studere mikrostrukturen i betongen med tanke på vassdamppermeabiliteten, til dømes ved bruk av elektronmikroskop. Dette blir gjort for å studere andre eigenskapar i dag, men ein kan sjå for seg at modellar for å vurdere vassdamppermeabilitet ved hjelp av mikrostrukturanalyser også kan utviklast på liknande vis, med grunnlag i kunnskap om dei verkelege eigenskapane i betongen.

5.5 Resultat frå oppgåva i ein større samanheng

Med dagens dokumenterte verdiar (frå blant anna SINTEF Byggforsk) for diffusjonstettleik i betong blir konstruksjonane svært grove for å tilfredsstille anbefalingane frå SINTEF. Anbefalingane er ikkje absolutte krav, men dei er sterkt førande for korleis bygningar med strenge krav til diffusjonstettleik blir prosjektert. Betongen som brukast i til dømes bade- og symjeanlegg er av høg kvalitet med lågt v/c-forhold (ofte M40) og bruk av pozzolanar (5-8 % silika, gjerne i kombinasjon med flygeaskesement). Dette gir ein betong med høg fastleik, normalt 50-60 MPa i terningfastleik, og dermed god kapasitet med tanke på berande konstruksjonar. Berekningsmessig er det fullt mogleg å oppnå tilstrekkeleg diffusjonstettleik i betongen med desse verdiane, men ein får da fort ein konstruksjonstjukkheit på 350-400 mm (Edvardsen 2004). Dette er svært tjukke konstruksjonar som oftast er unødvendig med tanke på bering. Fordi ein i fagmiljøet reknar med at betong av denne typen med pozzolantilsetjingar har langt betre diffusjonsegenskapar er dette uønskeleg. Dei materialdata ein baserer seg på gir dermed eit unødvendig stort betongforbruk, med alt det fører med seg av kostnader både for byggherre og miljø. Dette illustrerer behovet for å vurdere fleire variablar enn berre v/c-forholdet i betongen når ein skal fastslå diffusjonsegenskapar.

Ei stor utfordring med å bruke betong som diffusjonstetting er at det stiller høge krav til arbeidet på byggeplass. Ved støyping av til dømes lange ytterveggkonstruksjonar i ein symjehall er ein utsett for rissutvikling, og herdeteknologi blir da ein viktig faktor for å oppnå tettleik i konstruksjonen. På same måte er fuger, støypeskøytar og alle overgangar mellom konstruksjonsdelar kritiske punkt med tanke på luftlekkasjar. Det er forskjell på diffusjonstett *betong* og ein diffusjonstett *konstruksjon*. I denne oppgåva er det materialeegenskapane i betongen som har vore fokuset, og derfor er det dette som blir diskutert her

Pålitelege og relevante materialdata er viktig for å fastslå eigenskapar i betongen. Det at ein gjerne baserer seg på konservative data er kanskje ein del av den tradisjonelle «ingeniørmetoden»; ein vil vere på den sikre sida i ein kvar situasjon. Dette er til ein viss grad bra, men det kan også gjere at ein brukar unødvendig mykje ressursar. Derfor er det nyttig at ein del av fagmiljøet, til dømes representert ved fagansvarleg for bygningsfysikk i Asplan Viak, nå ønskjer ei breiare kartlegging av eigenskapane i

betongen. På den måten kan ein i større grad prosjektere med materialdata basert på dei verkelege eigenskapane i betongen, og dermed utnytte potensialet i betongen på ein betre måte.

Ifølgje resultatane gir tilsetjing av 10 % silikastøv (av total bindemiddelmengde) ein signifikant reduksjon i permeabilitet på 40-50 % samanlikna med permeabiliteten i prøver utan silikatilsetjing. Dette er ein formidabel reduksjon. Det er realistisk å rekne med at dette kan vere tilfelle også for vanleg betong med grovt tilslag og tilsvarande silikatilsetjing i ein verkeleg situasjon. Denne reduksjonen i permeabilitet slår direkte ut på reduksjon i veggtykkleik. Dersom ein brukar dagens data frå SINTEF Byggeforsk og trekkjer frå denne reduksjonen, kjem ein ned på ein veggtykkleik på rundt 200-250 mm med same diffusjonsegenskapar som 350-400 mm betong utan silikatilsetjing.

Konstruksjonstykkeleik på rundt 250 mm er normalt det som er nødvendig med tanke på fastleik og bering i større bygg der ein ikkje har spesielle krav til diffusjonstettleik i betongen. Dersom denne tykkleiken kan innførast også ved bruk av betong som diffusjonstetting i bygningar med strenge krav til diffusjonstettleik er det heilt klart store gevinstar å hente. Dette vil slå positivt ut for alle involverte i byggeprosjekta, både med tanke på økonomi, ressursbruk og miljø.

Resultatane kan summerast opp i to viktige forhold: det er mogleg å påverke diffusjonsegenskapane i betong ved bruk av pozzolanar og det trengs meir tilgjengelege materialdata som tek omsyn til varierende mengder av pozzolantilsetjingar. Dette peikar på høgst relevante faktorar for byggebransjen i dag, og bør derfor få større merksemd både i litteraturen og i praksis i tida framover.

5.6 Vidare arbeid

For å gjere forsøket meir påliteleg ville det vere nyttig å utføre tilsvarande forsøk med ein såkalla tørrkoppmetode, som nemnt innleiingsvis i metodekapitlet. Ved å bruke ein slik metode kan ein få verifisert at effekten av pozzolantilsetjing er den same. Ein vil også unngå problematikken med at saltløysinga skvalpar under flytting av prøvene, noko som gir fare for kapillæreffektar som følgje av at saltløysinga kjem i kontakt med prøvestykket.

Forsøk der ein vurderer korleis diffusjonsegenskapane påverkast av varierende mengder flygeaske ville også vere av interesse. Dette har ein ikkje fått testa i forsøka i denne oppgåva, sidan prøveregimet blei lagt opp med ein sementtype der flygeaskeinnhaldet var konstant. Slike forsøk ville ein kunne legge opp på tilsvarande vis som det som har blitt gjort med silikatilsetjing i dette høvet, men med lenger tid til herding for å få fram effekten av flygeasketilsetjing. Ein skal likevel vere klar over at flygeaske ikkje er tilgjengeleg for tilsetjing på blandeverk, men berre som tilsetjingsmateriale i sement. Dermed er antakeleg nytteverdien av slike forsøk lågare, med mindre resultat er så oppsiktsvekkande at sementprodusentane set i gang produksjon av sement med ulike mengder flygeaske.

Vidare bør tabellane frå SINTEF Byggforsk, som i dag er rådgivande for korleis eigenskapane i betong vurderast, oppdaterast med variablar som er aktuelle for dei betongtypane som blir brukt i byggebransjen. I tillegg til v/c-forhold bør ein i fyrste omgang ta med tabellverdiar som viser korleis tilsetjing av silikastøv påverkar vassdamppermeabiliteten i betongen. Ei utviding med fleire pozzolan- og sementtypar kan også vere aktuell, men ut frå resultat frå forsøka i denne oppgåva er det silikatilsetjing som verkeleg har stor effekt på vassdamppermeabiliteten. Relevante materialdata kan på denne måten bli tilgjengelege for bransjen, og fleire parametrar kan leggest inn ved simulering av fukttransport i byggemateriale, til dømes med simuleringsprogram som WUFI og tilsvarande programvare.

Prøvemethoden bør vere under kontinuerleg forbetring, og det bør satsast på utvikling av ein metode som gir raskare svar på korleis eigenskapane i betongen er. Dette er likevel svært utfordrande, sidan betong i seg sjølv er eit materiale med prosessar som går over lang tid. Akselererte metodar kan i tillegg til dei forslaga som allereie er nemnt vere eit spennande område å prøve ut. Ved vurdering av nye metodar må ein sjå på kor relevante dei faktisk er med tanke på å fange opp dei eigenskapane ein er interessert i. Ein skal vere forsiktig med å gå for langt inn i teoretiske betrakningar til dømes etter studier av mikrostruktur i betongen – da kan ein fort kome langt bort frå det eigentlege behovet ein har for å vite meir om korleis eigenskapane faktisk er – i praksis.

6 Konklusjon

Frå eit materialteknisk synspunkt er det mogleg å bruke betong som diffusjonstetting i bygg med strenge krav til diffusjonstettleik. Med dagens dokumentasjon, basert på v/c-forhold som variabel i betongen, gir dette grove konstruksjonar med stor tjukkeleik, noko som er uønskeleg både ut frå eit miljømessig og økonomisk perspektiv.

Pozzolantilsetjingar er ein viktig bestanddel i betong i dag, og brukast mykje i konstruksjonar som kan vere aktuelle å bruke som diffusjonstetting. Med materialdata basert på dei verkelege eigenskapane i betongen kan ein ut frå forsøksresultata i denne oppgåva konkludere med at det er mogleg å bruke betong som diffusjonstetting, og også redusere tjukkeleiken på konstruksjonane ved bruk av pozzolantilsetjingar.

Pozzolantilsetjingar gir ein tettare mikrostruktur og sterkare bindingar i betongen, noko som fører til at vassdamppermeabiliteten blir redusert. Forsøka viser ein tydeleg samanheng mellom silikainnhald og vassdamppermeabilitet i betongen. Det er funne ein signifikant reduksjon i vassdamppermeabilitet for begge sementtypane ved auka innhald av silikastøv i prøveseriar opp til 10 % silika. Ved dette nivået er det realistisk å rekne med ein reduksjon i vassdamppermeabilitet på 40-50 %. Det er grunn til å anta at denne reduksjonen også gjeld i ein verkeleg konstruksjon. Det er likevel viktig å ta omsyn til at ein jobbar med eit materiale og ein metode som gir store variasjonar.

Dagens metodar for å vurdere diffusjonseigenskapar i betong baserer seg på v/c-forhold som einaste variabel. Forsøka i denne oppgåva viser at dette gir eit for snevert bilete av dei verkelege eigenskapane i betong som blir brukt i dag, der pozzolantilsetjingar gir eit viktig bidrag til diffusjonseigenskapane i betongen. Ut frå forsøka gjort i oppgåva har ein ikkje grunnlag for å seie at metoden i seg sjølv er ueigna til formålet, men det er kartlagt fleire punkt som kan føre til at ein får usikre resultat ved bruk av metoden.

For å kunne gi meir presise anbefalingar til byggebransjen i framtida, bør ein ta omsyn til fleire variablar i betong enn det som blir gjort i dag. Slik kan ein dokumentere diffusjonseigenskapar ut frå kunnskap om dei verkelege materialeigenskapane. Det bør satsast på ei kontinuerleg forbetring både av prøvemetode og materialeigenskapar. Pozzolantilsetjingar vil sannsynlegvis vere ein viktig del av betongmarknaden også i framtida. Ein kan rekne med at det er store miljømessige og økonomiske gevinstar å hente på å utnytte ein større del av potensialet i betong som byggemateriale.

7 Litteraturliste

- Andersen, B. E. (2014). *Måling av vanddampsmostand, Zp eller ekvivalent luftlagtykkelse, Sd* (Epost til Stig Geving 09.10.2014).
- Bergheim, E., Geving, S. & Time, B. (1998). Hygroscopic material properties. *Project report 234*. 19 s.
- Direktoratet for byggkvalitet (DIBK). (2010a). *TEK 10 Forskrift om tekniske krav til byggverk*: Lovdata.
- Direktoratet for byggkvalitet (DIBK). (2010b). *Veiledning om tekniske krav til byggverk*: Direktoratet for byggkvalitet. Tilgjengelig fra: <http://dibk.no/no/BYGGEREGLER/Gjeldende-byggeregler/Veiledning-om-tekniske-krav-til-byggverk/?dpx=/dpx/content/tekniskekrav/13/18/> (lest 23.11.2015).
- Edvardsen, K. I. (2004). *Håndbok 52. Bade- og svømmeanlegg*. Oslo: SINTEF Byggforsk. 252 s.
- Ganesh, K. B. & Surya, P. P. V. (1995). Efficiency of silica fume in concrete. *Cement and Concrete Research*: 1273-1283.
- Geving, S. & Thue, J. V. (2002). *Håndbok 50. Fukt i bygninger*. Oslo: SINTEF Byggforsk. 465 s.
- Geving, S. (2005). 421.132 Fukt i bygninger - teorigrunnlag. *Byggforskserien*, 2005:2. 8 s.
- Güneyisi, E., Gesoglu, M., Karaoglu, S. & Mermerdaş, K. (2012). Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. *Construction and Building Materials*, 34: 120-130.
- Hustad, T. & Løland, K. E. (1981). Delrapport nr. 4, Permeabilitet. *Silika i betong*. Trondheim.
- Johansson, P. (2015, 26.11.2015). *Betong med mineralska tillsatser*. Fuktcentrums informationsdag, Lunds tekniska högskola, Sverige.
- Kjellsen, K. O. (2008). Cement. I: *TKT 4215 Concrete technology 1*, s. 5.1-5.15. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- Kjellsen, K. O. (2015). *Telefonsamtale med forskningssjef Knut Kjellsen hos Norcem FoU* (11.12.2015).
- Lagerblad, B. & Utkin, P. (1993). Silica granulates in concrete - dispersion and durability aspects. 44 s.
- Myrdal, R. (2015). Betongkjemi - bindemidler og tilsetningsstoffer. I: *Åpent faglig møte, Norsk betongforening, Stavanger, 08.09.15*. Stavanger: Tekna/Normet.
- Myrland, T. J. (2008). Diffusion tight concrete - preliminary study. *COIN P3 Innovative construction concepts*. 54 s.
- Pihl, R. (2015). *Danmark*: Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/Danmark> (lest 23.11.2015).
- Rodrigues, F. A. & Joekes, I. (2010). Cement industry: sustainability, challenges and perspectives. *Environmental Chemistry Letters*: 151-166.
- Sellevoid, E. (1990). Hydration. I: *TKT 4215 Concrete Technology 1*, s. 6.1-6.13. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.

- Sellevoid, E. (2008). Pozzolana. I: *TKT4215 Concrete Technology 1*, s. 7.1-7.16. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- SNL. (2009). *Portlandsement*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/portlandsement> (lest 19.11.2015).
- Song, H.-W., Pack, S.-W., Nam, S.-H., Jang, J.-C. & Saraswathy, V. (2010). Estimation of the permeability of silica fume cement concrete. *Construction and Building Materials*: 315-321.
- Standard Norge. (2001). *NS-EN ISO 12572 Byggematerialers og -produkters hygrotekniske egenskaper. Bestemmelse av egenskaper ved vanndampgjennomgang*. 32 s.
- Standard Norge. (2014). *NS-EN 206 Betong. Spesifikasjon, egenskaper, framstilling og samsvar*. 111 s.
- Thue, J. V. (2014). *Bygningsfysikk - grunnlag*. Trondheim: NTNU Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Uvsløkk, S. (2003). 573.121 Materialer til luft- og damptetting. *Byggforskserien*, 2003:1. 6 s.
- Wang, X.-Y. (2013). Evaluation of compressive strength of hardening silica fume blended concrete. *Journal of Materials Science*: 5953-5961.

Vedlegg

Vedlegg A Dokumentasjon av eigenskapar i prøvene

Reseptar (samansetjing av prøver)

Reseptane under er sett opp ved hjelp av Norcem sitt proporsjoneringsprogram for betong. Det er teke utgangspunkt i at ein held pastavolumet konstant, og dermed blir også mengdene med sand og stein konstante. Desse endrar seg når ein korrigerer for vassmengda som er i sanden (sjå neste vedlegg).

		Reseptmengder (kg/m ³)					
Resept	Sementtype	Sement	Vatn	Sand 0/3	Sand 0/8	Stein 8/16	Silika
A	Standard	597,1	238,9	1474			0
B	Standard FA	583,4	233,3	1474			0
C	Standard FA	549,6	231,5	1474			29,1
D	Standard FA	516,8	229,7	1474			57,4
E	Standard FA	483,5	227,8	1474			86,1
F	Industri	596,2	238,5	1474			0
G	Industri	560,3	236,0	1474			29,7
H	Industri	526,2	233,9	1474			58,4
I	Standard FA	459,4	183,8		907,4	807,1	0
J	Industri	468,9	187,6		907,4	807,1	0
K	Standard FA	434,1	182,3		907,4	807,1	21,7
L	Industri	442,6	185,9		907,4	807,1	22,1
M	Standard FA	411,5	181,1		907,4	807,1	41,2
N	Industri	419,2	184,4		907,4	807,1	41,9

Blandeskjema for kvar resept

Korrigererte mengder 30 liter blanding

		Reseptmengder (kg)									
Resept	Sementtype	Sement	Vatn	Sand 0/3	Sand 0/8	Vatn i sand (av tørrvekt)	Stein 8/16	Silika	Silika av bindem.	SP-stoff	SP-stoff av bindem.
A	Standard	17,91	5,340	46,05		4,1 %		0	0 %	0,187	1,0 %
B	Standard FA	17,50	5,196	46,02		4,1 %		0	0 %	0,164	0,9 %
C	Standard FA	16,49	5,142	46,02		4,1 %		0,873	5 %	0,211	1,2 %
D	Standard FA	15,50	5,056	46,05		4,1 %		1,722	10 %	0,252	1,5 %
E	Standard FA	14,51	5,039	46,01		4,1 %		2,583	15 %	0,303	1,8 %
F	Industri	17,89	5,305	46,07		4,2 %		0	0 %	0,242	1,4 %
G	Industri	16,81	5,141	46,16		4,4 %		0,891	5 %	0,278	1,6 %
H	Industri	15,79	4,852	46,38		4,9 %		1,752	10 %	0,351	2,0 %
I	Standard FA	13,78	4,478		28,26	3,8 %	24,21	0	0 %	0,138	1,0 %
J	Industri	14,07	4,728		28,12	3,3 %	24,21	0	0 %	0,169	1,2 %
K	Standard FA	13,02	4,569		28,12	3,3 %	24,21	0,651	5 %	0,140	1,0 %
L	Industri	13,28	4,614		28,18	3,5 %	24,21	0,663	5 %	0,183	1,3 %
M	Standard FA	12,35	4,416		28,24	3,7 %	24,21	1,236	9 %	0,183	1,3 %
N	Industri	12,58	4,515		28,24	3,7 %	24,21	1,257	9 %	0,203	1,5 %

Deklarerte data

Norcem Standardsement tilfredsstiller kravene til Portlandsement

EN 197-1-CEM I 42,5R

Kjemiske data		
Egenskap	Deklarerte data	Krav iflg NS-EN 197-1
Finhet (Blaine)	370 m ² /kg ⁱ⁾ / 380m ² /kg ⁱⁱ⁾	
Trikalsiumaluminat C ₃ A	7 %	
Alkali (ekv Na ₂ O, NB21)	1,3% ⁱ⁾ / 1,3% ⁱⁱ⁾	Deklarert verdi iht NB21
Mineralske tilsetninger	4%	≤ 5%
Glødetap	2,5%	≤ 5%
Uløselig rest	1%	≤ 5%
Sulfat (SO ₃)	3-4%	≤ 4%
Klorid	< 0,085%	≤ 0,1%
Vannløselig Cr ⁶⁺	< 2 ppm	≤ 2 ppm *)
Spesifikk vekt	3,15 kg/dm ³	

i) Brevik-produsert

ii) Kjøpsvik-produsert

**) I henhold til Forskrift om vannløselige kromater i sement- og betongrelaterte materialer*

Fysikalske data		
Egenskap	Deklarerte data	Krav iflg NS-EN 197-1
Trykkfasthet 1 døgn	21 MPa	
Trykkfasthet 2 døgn	32 MPa	≥ 20 MPa
Trykkfaasthet 7 døgn	42 MPa	
Trykkfasthet 28 døgn	52 MPa	≥ 42,5 MPa ≤ 62,5 MPa
Begynnende bindetid	130 min ⁱ⁾ / 125 min ⁱⁱ⁾	≥ 60 min
Ekspansjon	1 mm	≤ 10 mm

i) Brevik-produsert

ii) Kjøpsvik-produsert

Tekniske data

Norcem Standardsement FA tilfredsstiller kravene til Portlandflygeaskeosement EN 197-1 -CEM II/A-V 42,5 R

Kjemiske data

Egenskap	Typiske data	Krav ifølge NS-EN 197-1
Finhet (Blaine)	450 m ² /kg	
Alkali (ekv Na ₂ O)	1,25%	
Flygeaskeinnhold	20,0%	6-20%
Glødetap	1,5%	
Sulfat (SO ₃)	3,0%	≤ 4,0%
Klorid	< 0,07%	≤ 0,1%
Vannløselig Cr ⁶⁺	< 2 ppm	≤ 2 ppm
Spesifikk vekt	2,95 kg/dm ³	

Fysikalske data

Egenskap	Typiske data	Krav ifølge NS-EN 197-1*
Trykkfasthet 1 døgn	22 MPa	
Trykkfasthet 2 døgn	31 MPa	≥ 20 MPa
Trykkfasthet 7 døgn	41 MPa	
Trykkfasthet 28 døgn	52 MPa	≥ 42,5 MPa ≤ 62,5 MPa
Begynnende bindetid	130 min	≥ 60 min
Ekspansjon	1 mm	≤ 10 mm

*Karakteristiske verdier

Deklarerte data

Norcem Industrisement tilfredsstiller kravene til Portlandsement

EN 197-1-CEM I 42,5 R og NS 3086-CEM I-42,5 RR

Kjemiske data

Egenskap	Deklarerte data	Krav i følge NS-EN 197-1 og NS 3086
Finhet (Blaine)	550 m ² /kg	
Trikalsiumaluminat C ₃ A	7 %	
Alkali (ekv Na ₂ O)	1,3% (B) & 1,2% (K)	
Mineralske tilsetninger	4 %	≤ 5%
Glødetap	2,5%	≤ 5%
Uløselig rest	1%	≤ 5%
Sulfat (SO ₃)	3 - 4 %	≤ 4%
Klorid	< 0,08%	≤ 0,1%
Vannløselig Cr ⁶⁺	< 2ppm	≤ 2 ppm
Spesifikk vekt (kg/dm ³)	3,13(B) / 3,11 (K)	

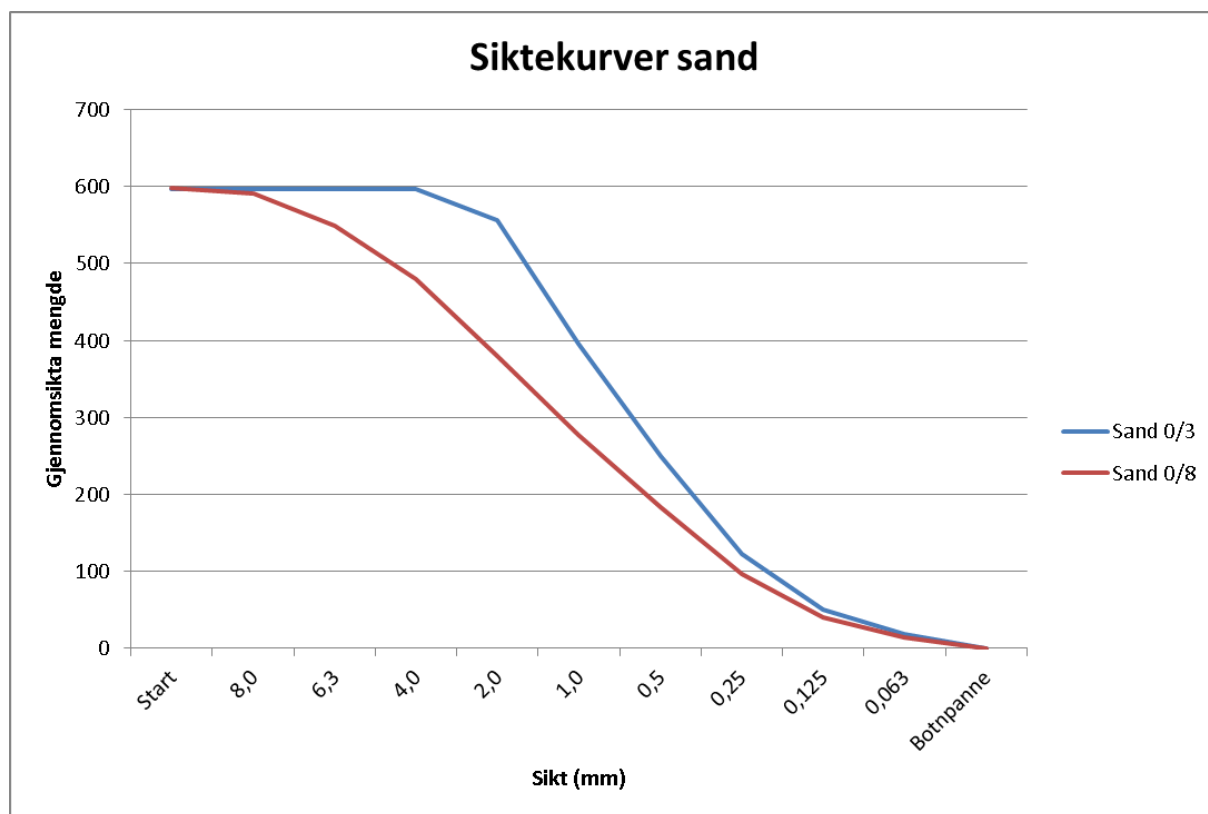
Fysiske data

Egenskaper	Deklarerte data	Krav ifølge NS-EN 197-1 og NS 3086 *
Trykkfasthet 1 døgn	32 MPa	≥ 20 MPa
Trykkfasthet 2 døgn	40 MPa	≥ 30 MPa
Trykkfasthet 7 døgn	49 MPa	
Trykkfasthet 28 døgn	57 MPa	≥ 42,5 MPa ≤ 62,5 MPa
Begynnende bindetid	100 min	≥ 60 min
Ekspansjon	1 mm	≤ 10 mm

*Karakteristiske verdier

Siktekurver sand 0/3 mm og 0/8 mm

Sikting av tørr sand blei utført med siktemaskin av typen Retsch AS 200 hos Norcem FoU. Startvekta var 600 gram for begge typene sand, og siktinga heldt på i 10 minutt.



Sikt (mm)	Sand 0/3 mm			Sand 0/8 mm		
	Sikterest (g)	Gjennom-sikta (g)	Prosent	Sikterest (g)	Gjennom-sikta (g)	Prosent
Start		597,1	100,0 %		598,1	100,0 %
8,0	0	597,1	100,0 %	7,1	591	98,8 %
6,3	0	597,1	100,0 %	41,5	549,5	91,9 %
4,0	0	597,1	100,0 %	70,3	479,2	80,1 %
2,0	41,5	555,6	93,0 %	99,3	379,9	63,5 %
1,0	159,3	396,3	66,4 %	102,1	277,8	46,4 %
0,5	146,6	249,7	41,8 %	94,6	183,2	30,6 %
0,25	127,6	122,1	20,4 %	86,7	96,5	16,1 %
0,125	72,4	49,7	8,3 %	56,3	40,2	6,7 %
0,063	32	17,7	3,0 %	26,5	13,7	2,3 %
Botnpanne	17,7	0	0,0 %	13,7	0	0,0 %

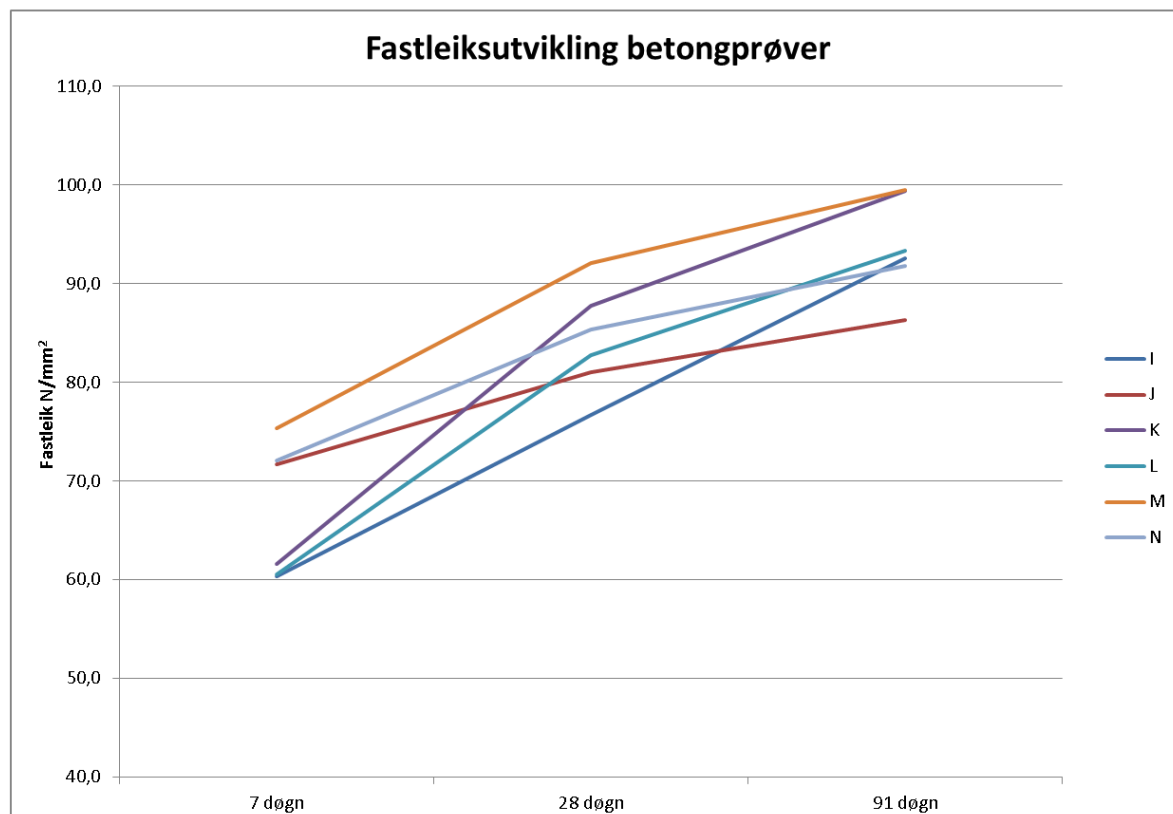
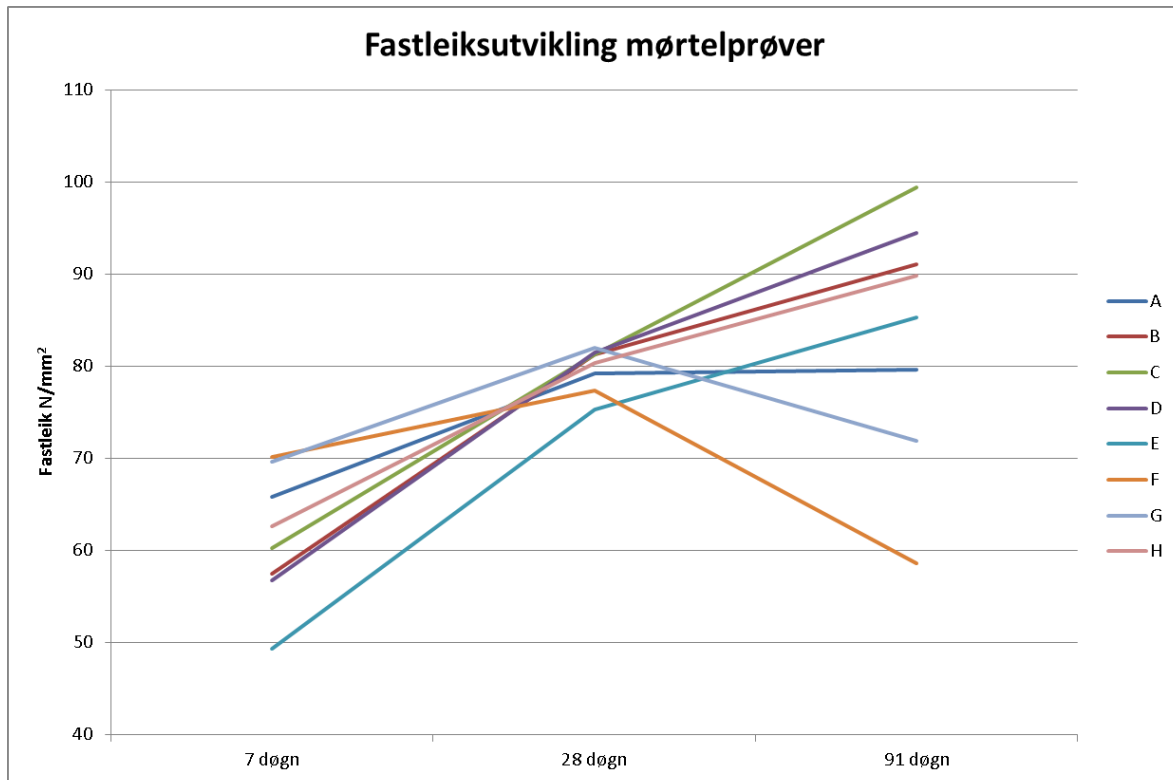
Kontrollresultat i fersk og herda tilstand

Resultata for dei ulike kontrollparametrane under støyping og utover i herdeprosessen er presentert for kvar prøveserie i tabellen under.

Namn	Dato	Sementtype	Luft	Synk (mm)	Utbreiing (mm)	Romvekt (kg/dm ³)	Fastleik 7 døgn	Fastleik 28 døgn	Fastleik 91 døgn
Mørtelprøver									
A	19.01.2015	Standard	0,8 %	180	380	2,363	65,8	79,2	79,7
B	16.01.2015	Standard FA	0,7 %	195	405	2,338	57,5	81,3	91,1
C	16.01.2015	Standard FA	0,5 %	220	415	2,338	60,3	81,3	99,4
D	16.01.2015	Standard FA	0,8 %	205	405	2,326	56,8	81,5	94,5
E	23.01.2015	Standard FA	0,7 %	235	470	2,338	49,3	75,3	85,3
F	15.01.2015	Industri	1,0 %	220	410	2,345	70,2	77,4	58,6
G	14.01.2015	Industri	0,8 %	200	400	2,338	69,6	82	71,9
H	13.01.2015	Industri	0,9 %	200	400	2,338	62,6	80,4	89,9
Betongprøver									
I	21.01.2015	Standard FA	1,0 %	200	345	2,426	60,3	76,7	92,6
J	23.01.2015	Industri	0,9 %	200	360	2,439	71,7	81,1	86,3
K	20.01.2015	Standard FA	1,2 %	190	340	2,401	60,5	82,7	93,4
L	22.01.2015	Industri	1,0 %	185	300	2,439	72,1	85,4	91,8
M	19.01.2015	Standard FA	0,7 %	210	380	2,407	61,7	87,8	99,5
N	22.01.2015	Industri	1,1 %	190	350	2,395	75,4	92,1	99,5

Resultat av fastleikskontroll etter 7, 28 og 91 døgn

Fastleik blei kontrollert på vanleg måte ved trykkbelastning av terningprøvene hos Norcem FoU. Resultata av dette er vist i diagramma under.



Vedlegg B Klimarom – bygging og drift

Til gjennomføring av forsøka var det behov for eit rom der ein kunne styre temperatur og luftfuktigheit med eit relativt høgt presisjonsnivå. Da universitetet ikkje kunne tilby eit slikt lokale, tok studenten hammaren i eiga hand og bygde eit klimarom i kjellaren på eit av undervisningsbygga på campus (TF fløy 5). Rommet var opprinneleg eit utrangert dusjanlegg med grunnflate på omtrent 3 x 3 meter og takhøgde 3,5 meter. Rommet passa godt til formålet fordi det var både elektrisk tilførsel, springvatn og avløp der frå før. Det blei vurdert at eit rom med mindre volum var nødvendig for å halde god kontroll med klimaet, og eit rom på 2 x 3 meter med takhøgde 2,20 meter blei bygd inne i det opprinnelege rommet, sjå Figur B-1.



Figur B-1 Frå oppføring av klimarom i kjellaren på TF fløy 5.
Foto Gunleiv Sæland

Vegg og himling blei sett opp med 36 x 98 mm c/c 600 mm for å ha moglegheiten til å isolere rommet i etterkant. Dampsperre av PE-folie blei lagt på innsida, og tetta omhyggeleg i alle skøytear, samt overgangar mot eksisterande betongveggar. Som kledning blei det vald å bruke rupanel sidan ein rekna med at dette ville kunne fungere som ein buffer mot raske endringar i klimaet ved opning av døra inn til rommet.

Hyller til å plassere prøvene på blei snekra opp i tre høgder. Med tanke på å få god og mest mogleg jamn luftgjennomstrøyming blei det sett krav om at hyllene måtte vere mest mogleg opne. Som hylleelement blei det skaffa utrangerte butikkhyller med stålspiler. Desse blei snudd opp-ned slik at det passa akkurat med to rekker à fire prøver på kvart hylleelement. Totalt var det ti hylleelement i hyllene slik at det var plass til opptil 80 prøver i rommet samtidig.

For å sikre godt og ryddig arbeidsmiljø i rommet blei det montert fast elektrisk anlegg med rikeleg av stikkontaktar, og to LED-lamper for god belysning under labarbeidet utan å tilføre ekstra varme til rommet.

Utstyr i klimarom

Ein del utstyr var nødvendig for å gjennomføre forsøka. Både for å halde forholda i klimarommet stabile, og for å gjennomføre veging av prøvene. Under er det gitt ein liten gjennomgang av utstyret som blei brukt.

Luftfuktar

Type RC 222 frå Nordman Engineering, utlånt frå IMT. Kopla til vassforsyning og straumforsyning. Fordamping av vatn tilfører vassdamp i lufta. Triggerstyrt med ekstern hygrostat plassert i rommet.

Luftavfuktar

Type Remko AMT 40-E utlånt frå Holte Industri på Gvarv i Telemark. Eigen kondensoppsamlar med kapasitet på ca fem liter. Effekt 750 watt. Ekstern hygrostat plassert inne i klimarommet. Luftavfuktaren blei plassert utanfor klimarommet (i det som var igjen av det opprinnelege rommet) for å ikkje tilføre varme som kunne forstyrre forholda i sjølve klimarommet.

Varmeomn styrt med PID-regulator

Type Airmate, effekt 2000 W. Styrt med PID-regulator type Omron E5CN for å halde stabil temperatur i rommet.

Sirkulasjonsvifter, frekvensregulert

Type Otermo, effekt 18 W. To stk, justert for å gi luftfart på maks 0,3 m/s i rommet. Justert til spenning på 150 volt med autotrafo lånt frå energilaben på IMT.

TinyTag dataloggar

TinyTag TGP-4500 loggar for temperatur og relativ luftfuktigheit. Registrering med intervall på 10 minutt. Avlesing av data ved hjelp av programmet TinyTag Explorer.

Vekt

Type KERN CKE 3600-2, oppløysing 0,01 gram. Maks kapasitet 3600 gram.

Psykrometer

For kontroll av dei faktiske forholda i rommet. Temperatur lesast av på to termometer – eitt vått og eit tørt, og relativ luftfuktigheit bereknast deretter ut frå eit Mollier-diagram.

Lufthastigheitsmålar

Berbar målar med ekstern sonde. Type VelociCalc Plus TSI for kontroll av lufthastigheit på ulike stader i rommet.

Baderomsvifte for «topplaster»

Type PAX Passad, hygrostatstyrt med forseinking. Montert for å avlaste rommet under brå endringar i fuktnivå, spesielt ved personopphald i rommet under veging av prøver.

«Siloklypa»

Enkel løfteinnretning for sikker flytting av prøver under veging. Skildra tidlegare i oppgåva.

Innkjøringsfasen i klimarommet

Det var ein del utstyr som skulle justerast for å få klimarommet til å fungere som tenkt. Sidan kvar komponent hadde si eiga styringseining (med ei viss slingring) var det viktig å justere desse i forhold til kvarandre slik at til dømes luftfuktaren ikkje blei ståande å jobbe imot luftavfuktaren. Innkjøringsperioden før forsøket gav rom for å justere drifta av rommet. Det viste seg blant anna at det ikkje hadde vore nødvendig å legge så mykje arbeid i å få rommet tett, men dette kan samtidig vere greitt dersom rommet skal brukast til andre formål i seinare forsøk.

Det er ein kjent sak at kjellarrom ofte opplevast som fuktige om sommaren, men sidan temperaturen var relativt høg i klimarommet (23°C) rekna ein med at dette ikkje ville bli eit stort problem sjølv om fuktkapasiteten i utelufta blei høgare. Dette viste seg å slå ut i større grad enn ein hadde rekna med, og ein luftavfuktar blei derfor montert under forsøksperioden, sjå neste side.

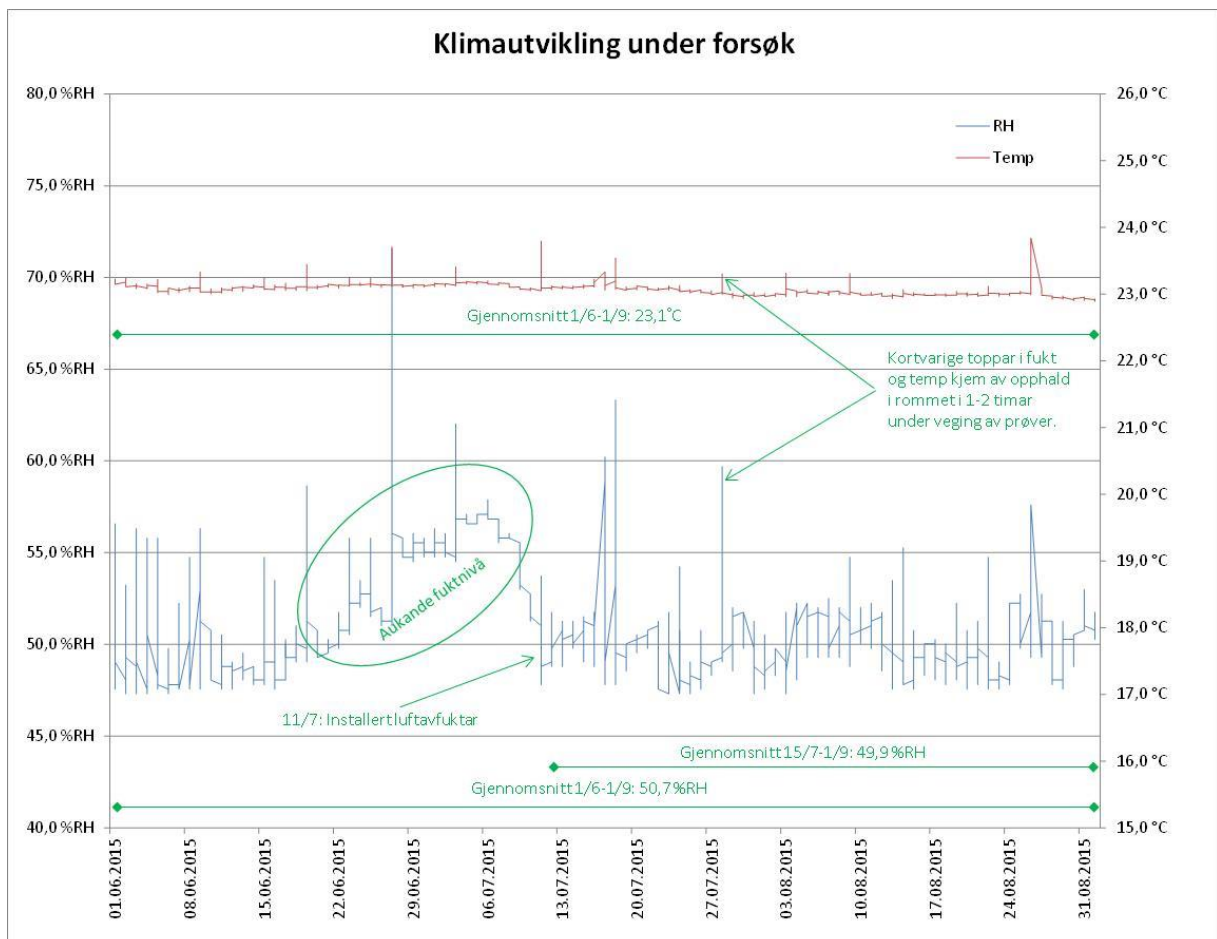
Dersom ein hadde hatt tid og midlar til det ville det vore fordelaktig å ha eit sentralt styringssystem for alle komponentane for klimastyring i rommet. Slik kunne ein finjustere temperatur, luftfuktigheit og lufthastigheit, og på den måten optimalisere drifta av klimarommet. Dette kan vere eit aktuelt prosjekt for neste student som får glede av å bruke klimarommet i forsøkssamanheng.

Vedlegg C Logg for klimautvikling i klimarom

Klimadata frå klimarommet

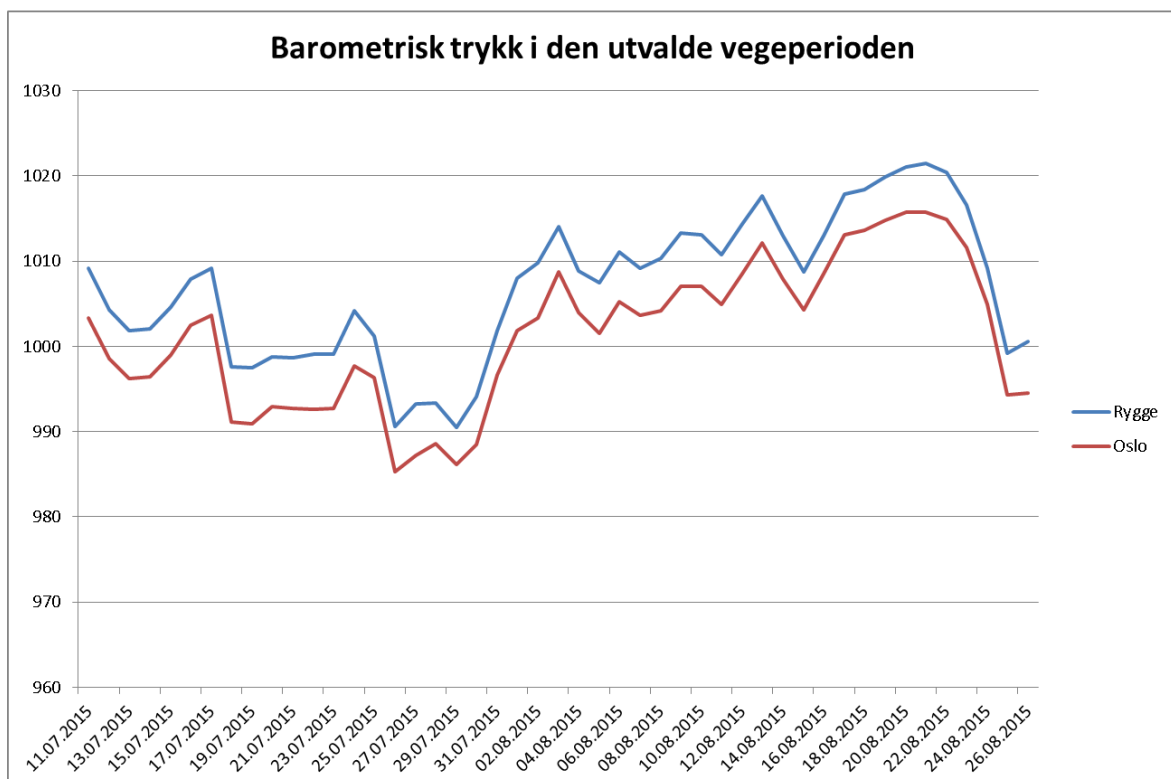
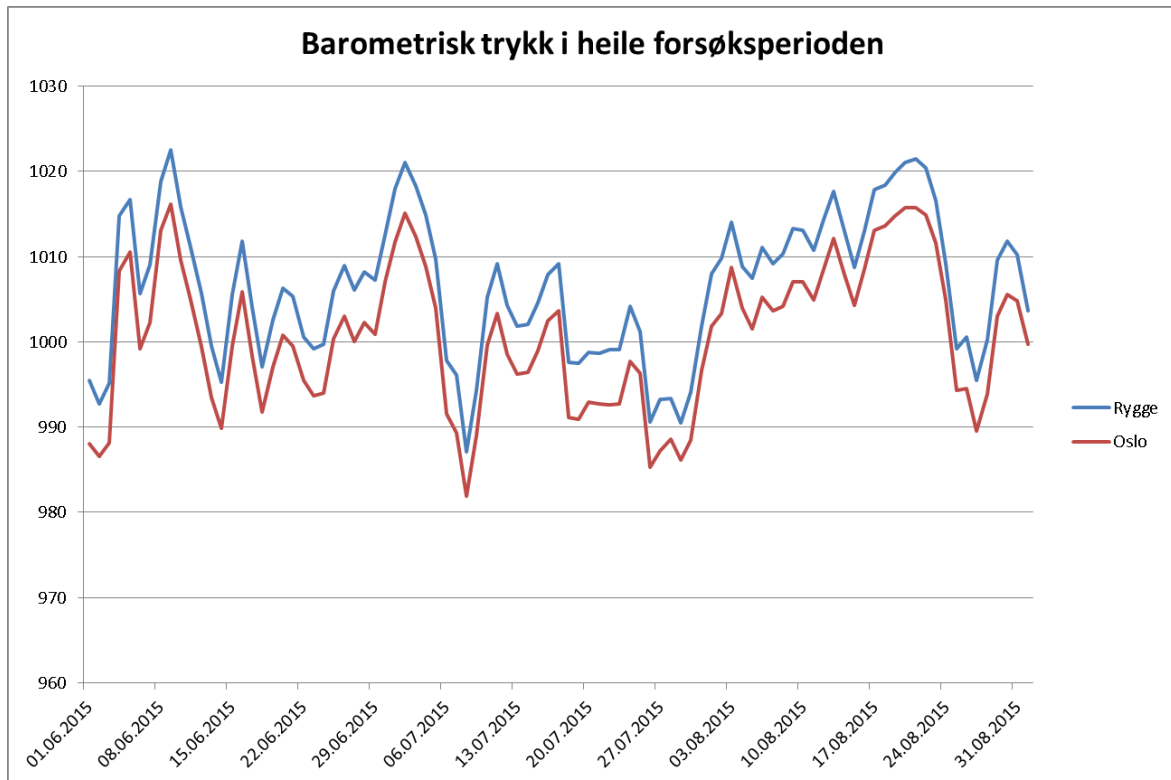
Under er vist ein oversikt over klimautviklinga i rommet der forsøka blei utført. Temperaturen var stabil under heile perioden, men for å halde luftfuktigheiten innanfor akseptable grenseverdier måtte det gjerast tiltak utover i perioden. Det blei installert ein luftavfuktar som blei kjørt inn i løpet av nokre dagar i juli, dette visast tydeleg på grafen. Etter dette blei også luftfuktigheiten stabil.

Dei kortvarige toppane på både temperatur- og fuktigheitsgrafan kjem av opphald i rommet under veking av prøvene. Tidspunkta for desse toppane fell nøyaktig saman med tidspunkta for veking.



Barometrisk trykk i forsøksperioden

Barometriske data for dei nærmaste meteorologiske stasjonane med slike målingar er vist under. Det er grunn til å rekne med at verdiane for Ås følger same utviklinga.

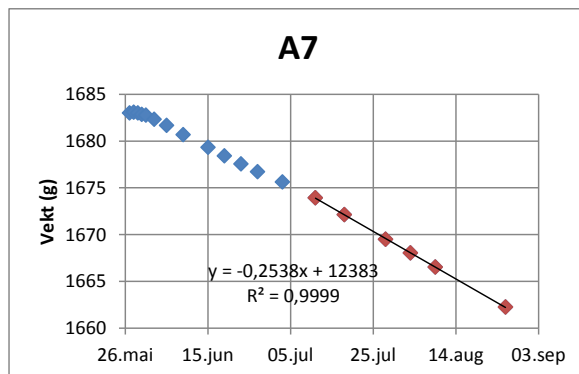
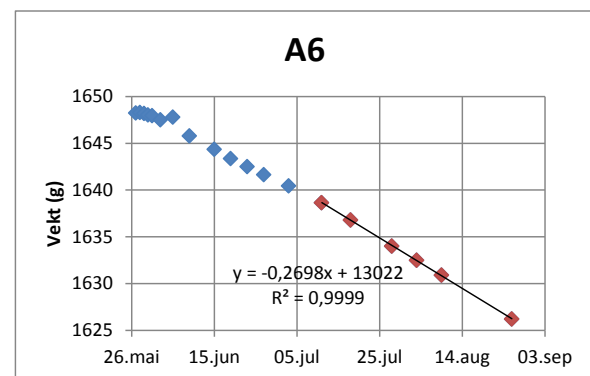
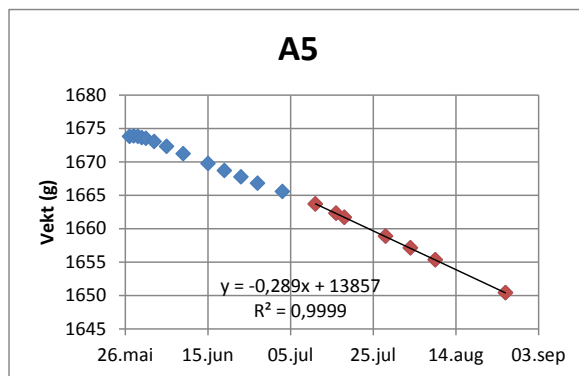
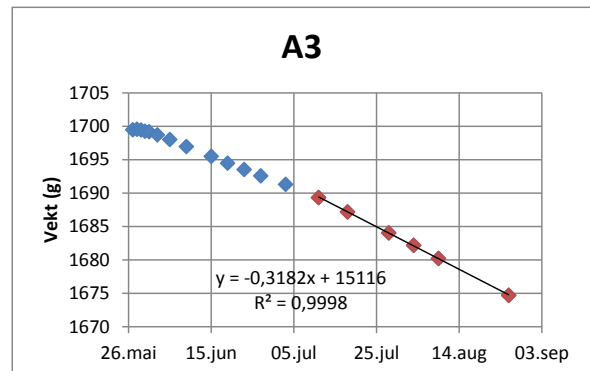
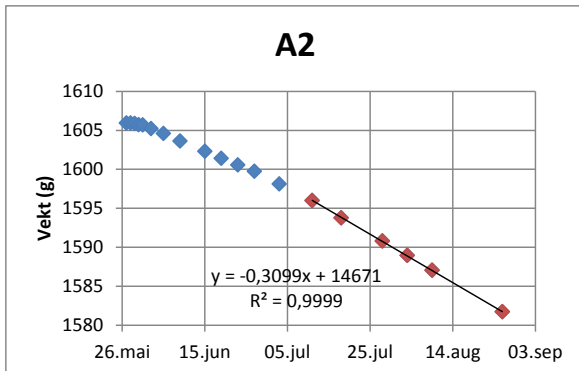


Vedlegg D Vegedata for kvar enkelt prøve

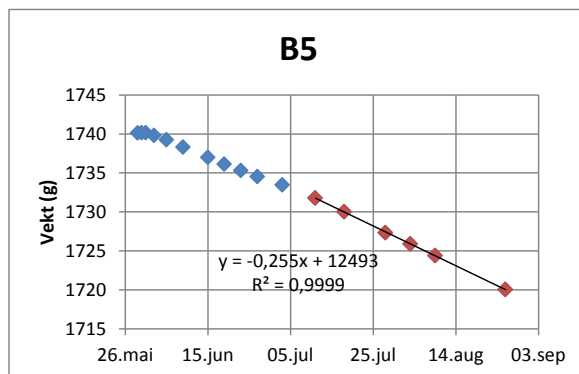
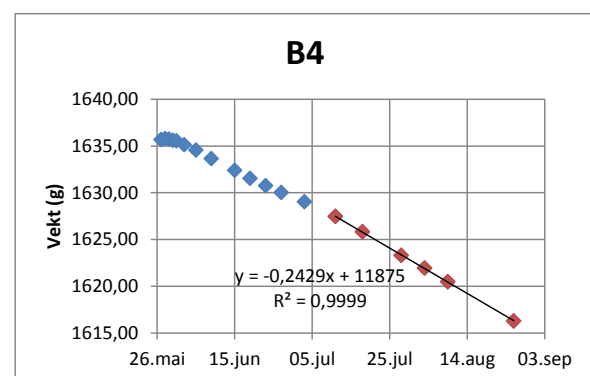
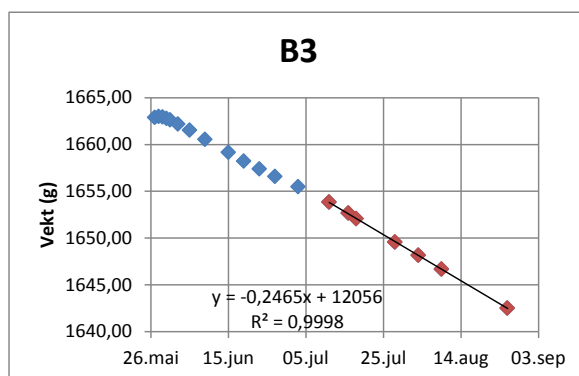
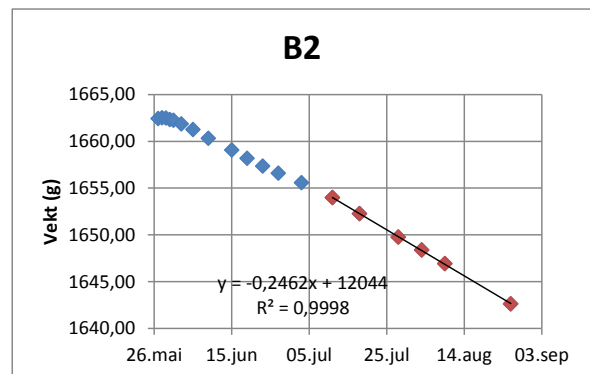
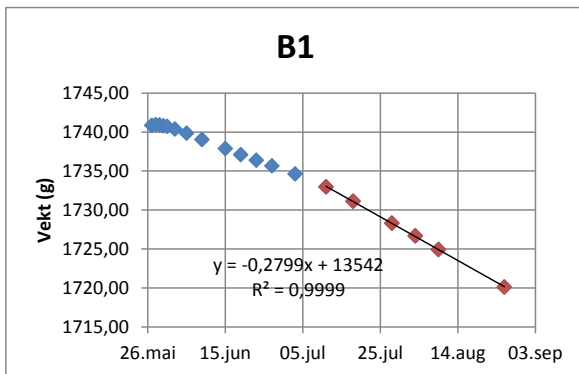
På dei neste sidene visast grunnlagsmateriale for berekninga av vassdamppermeabilitet for prøvene som var med i forsøket. Det er ein graf for kvar enkelt prøve. Kvar serie er samla på ei side. Grafane har ei tidslinje på x-aksen og aktuell prøvevekt på y-aksen. Kvart punkt på grafen indikerer ei vektmåling. Dei blå punkta er frå perioden før vekta har stabilisert seg, og dei raude punkta er frå perioden som dannar grunnlag for berekningane i resultatkapitlet. Regresjonslinja som er lagt på dei raude punkta har eit stigningstal som gir vektreduksjonen per tid. Denne er gitt med ein formel for kvart diagram, og det er også lagt til ein R^2 -verdi som seier noko om kor god tilpassinga på kurva er til dei aktuelle punkta.

Mørtelprøver

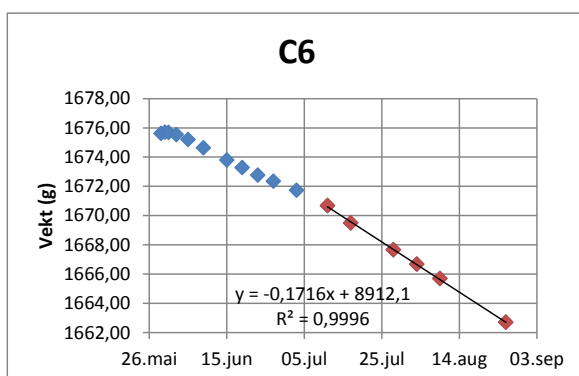
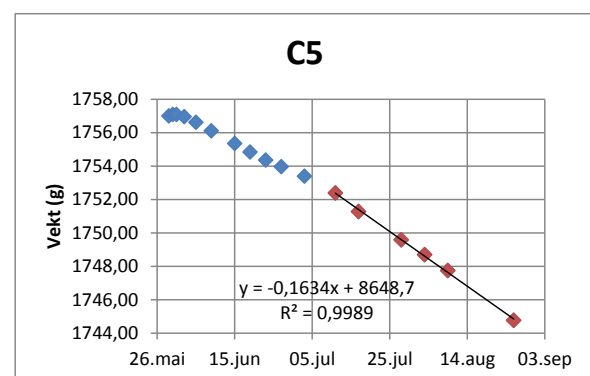
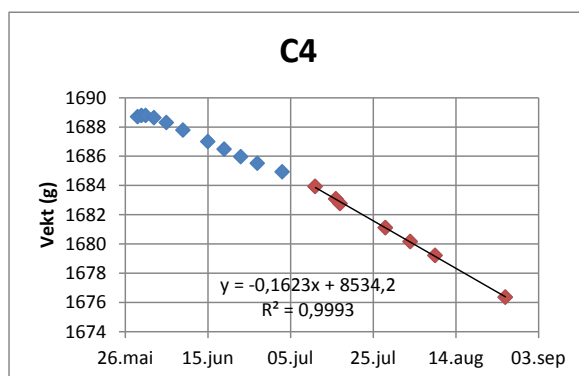
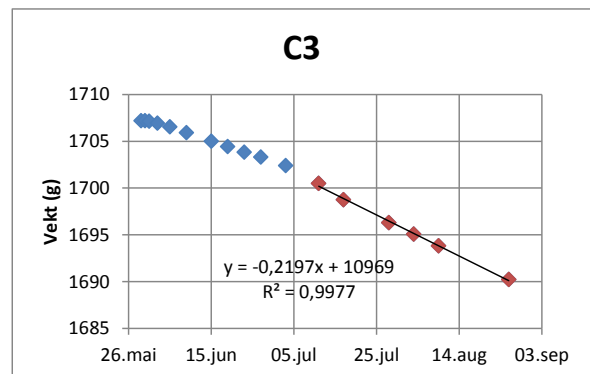
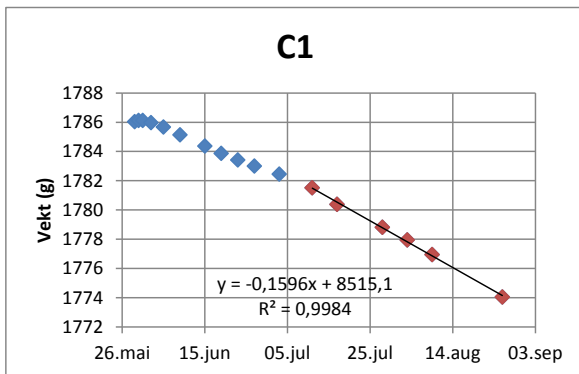
Serie A: Sementtype Standard, utan silika



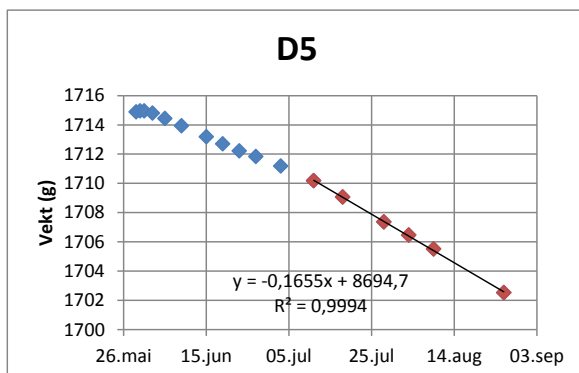
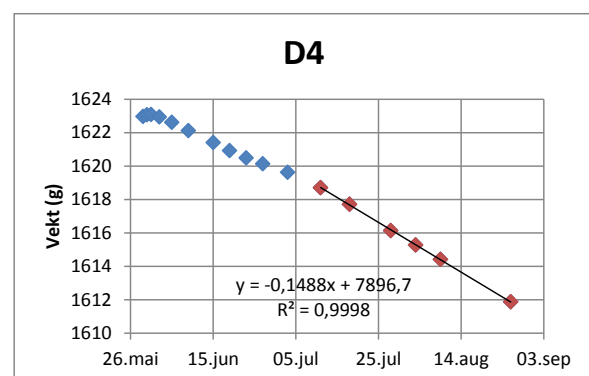
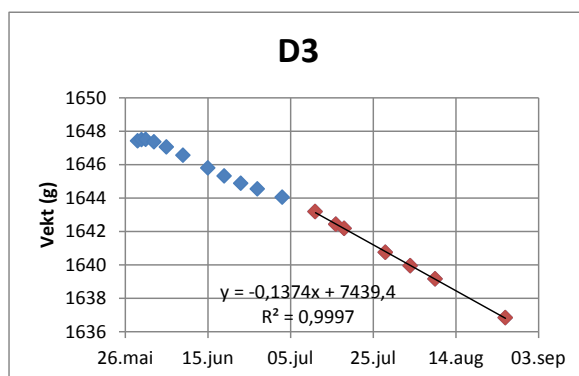
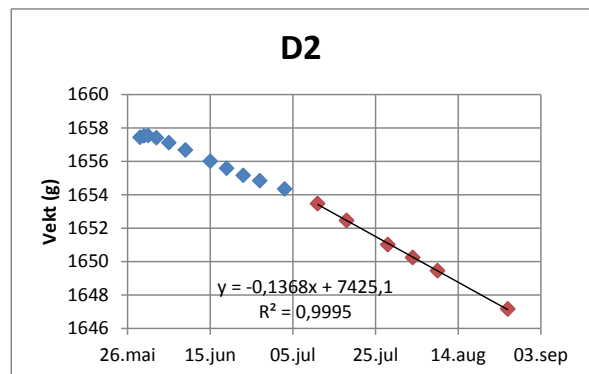
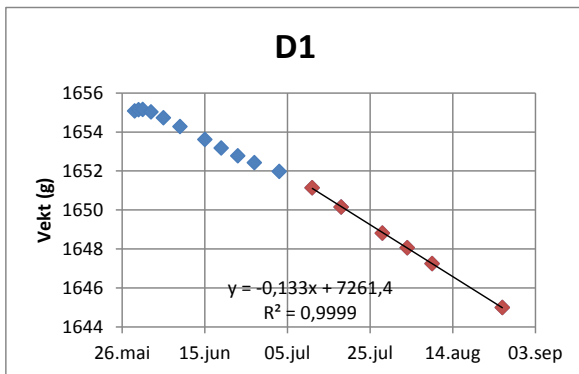
Serie B: Sementtype Standard FA, utan silika



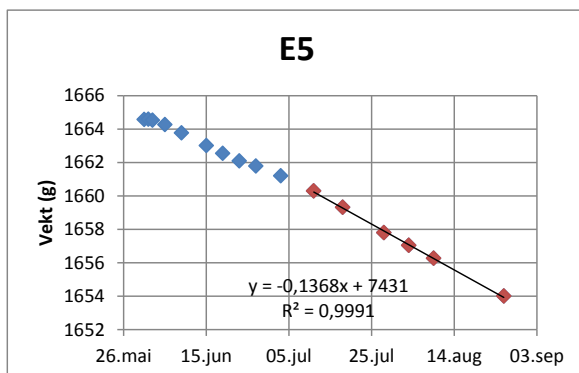
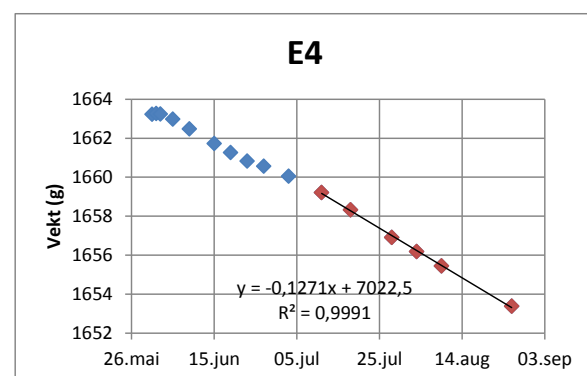
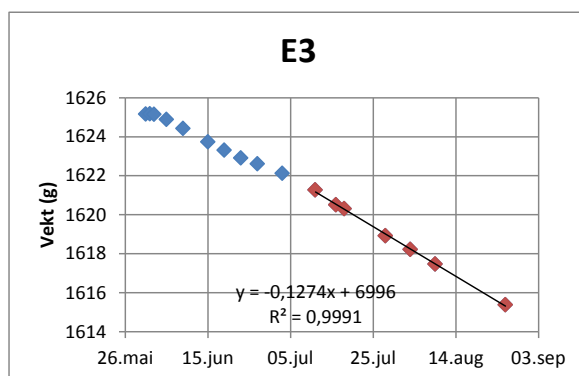
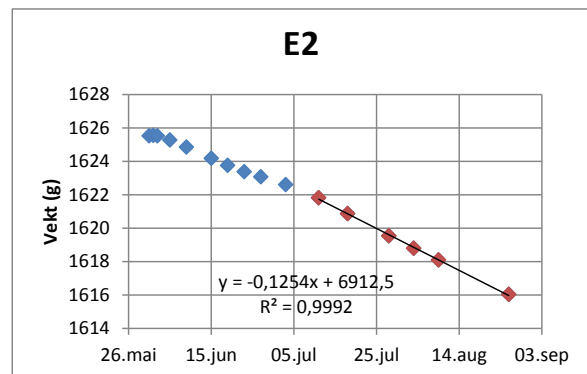
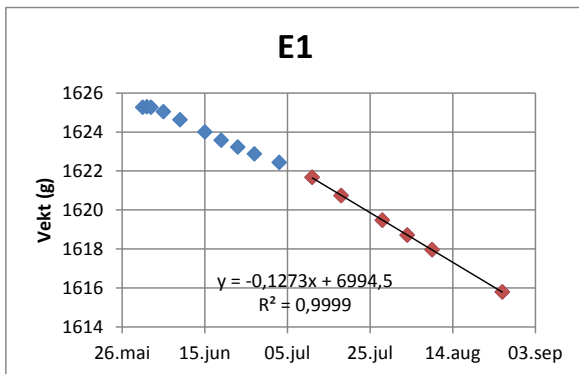
Serie C: Sementtype Standard FA med 5 % silika



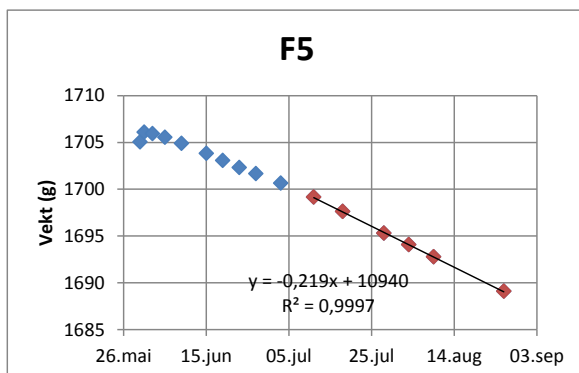
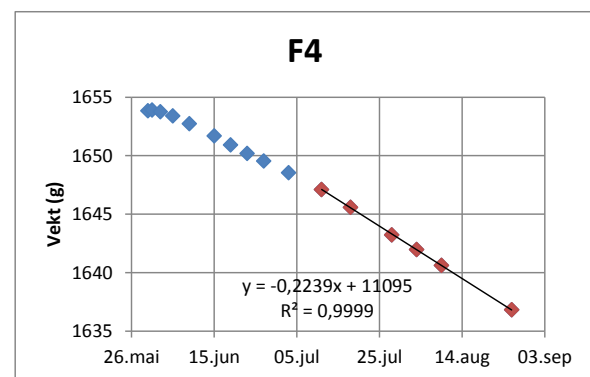
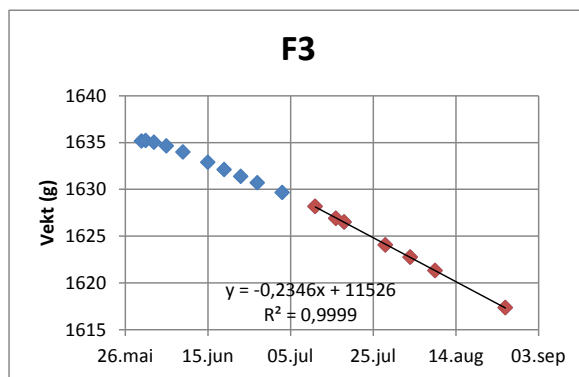
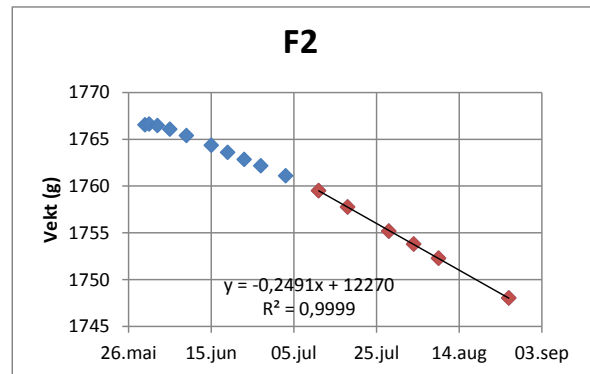
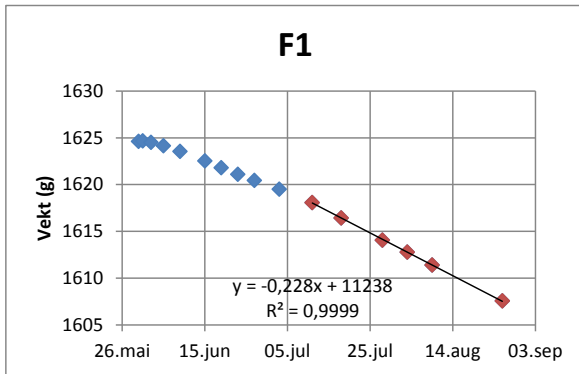
Serie D: Sementtype Standard FA, med 10 % silika



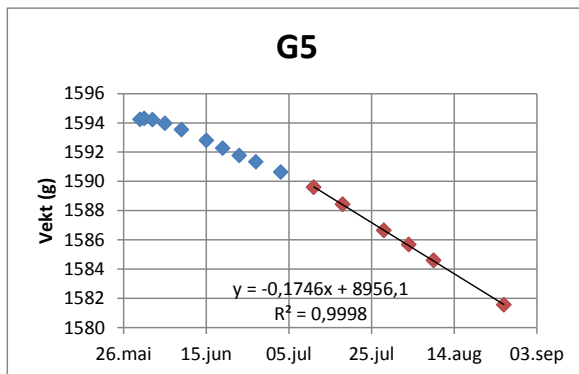
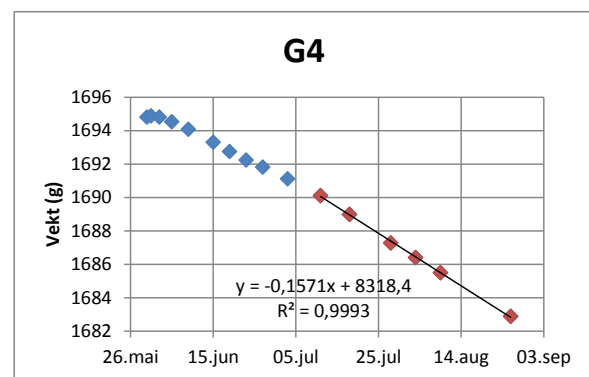
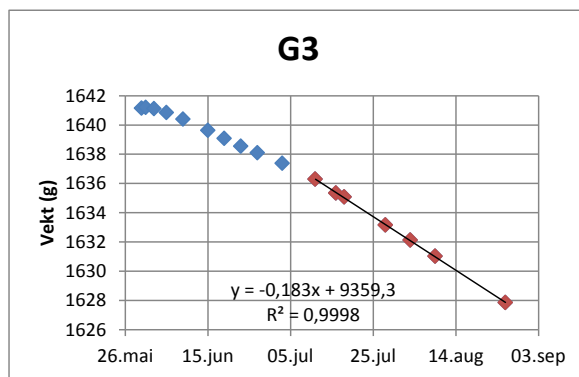
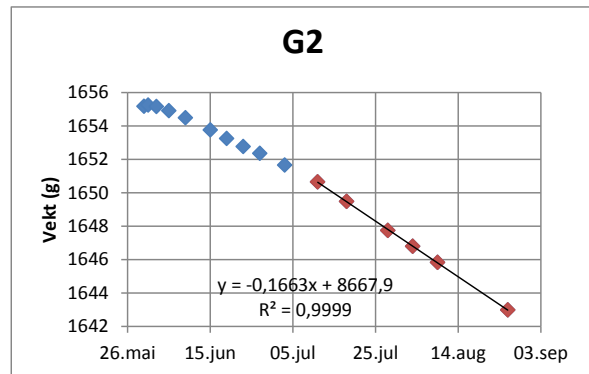
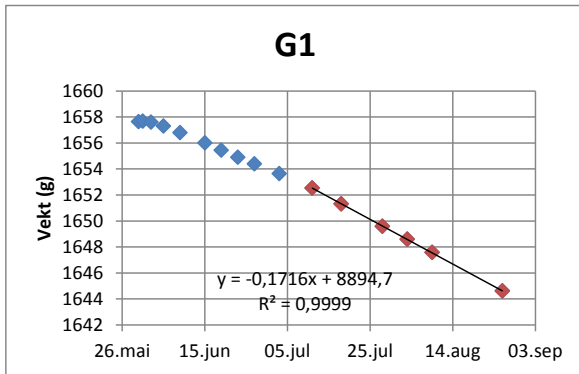
Serie E: Sementtype Standard FA, med 15 % silika



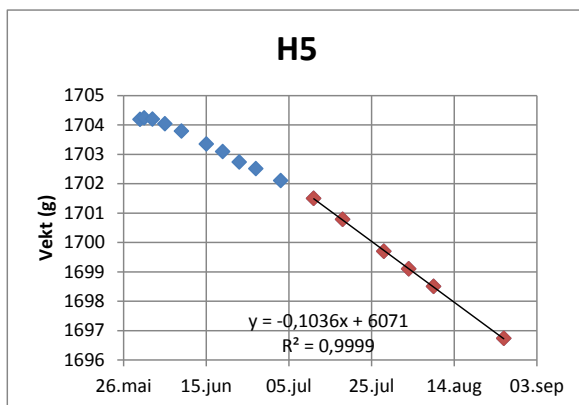
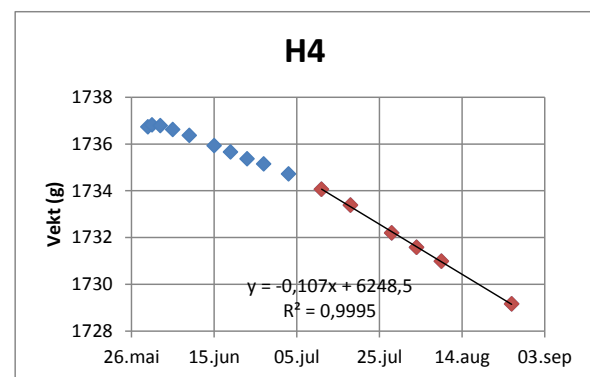
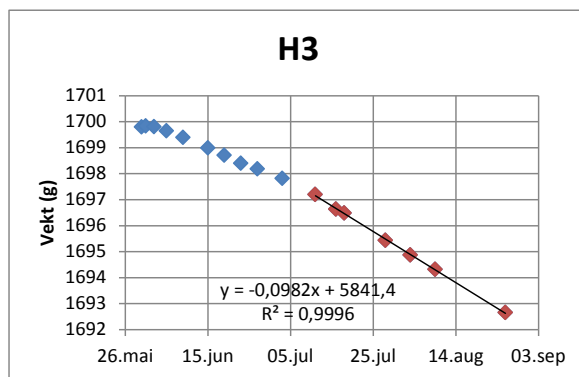
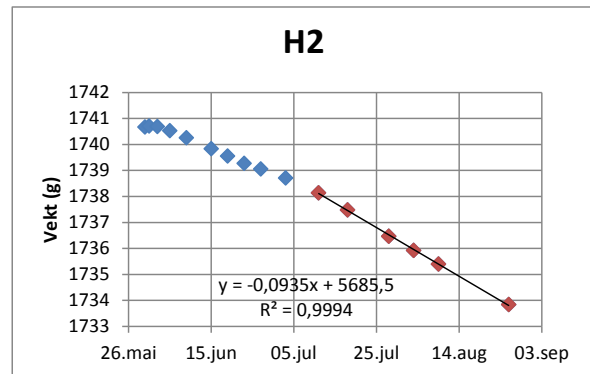
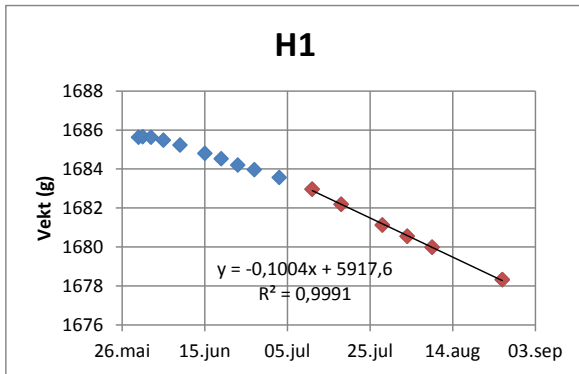
Serie F: Sementtype Industri, utan silika



Serie G: Sementtype Industri, med 5 % silika

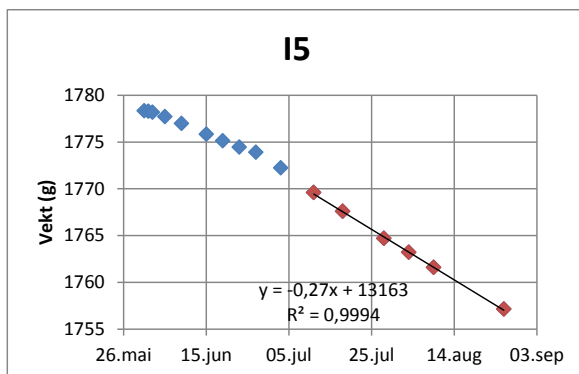
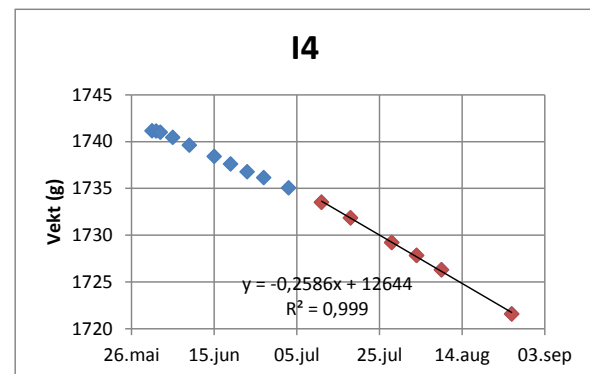
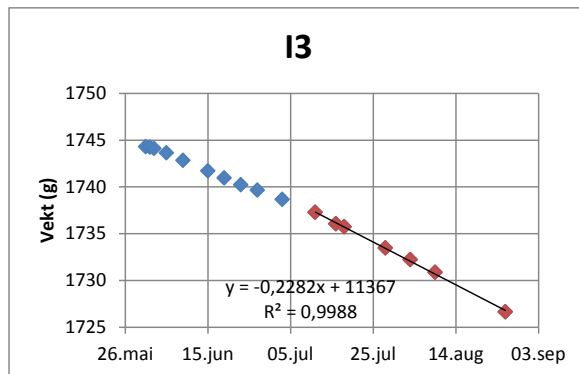
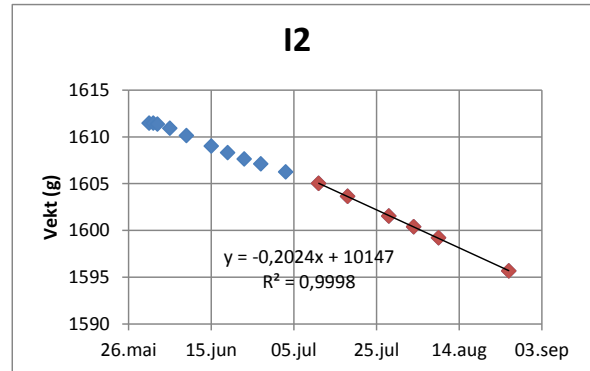
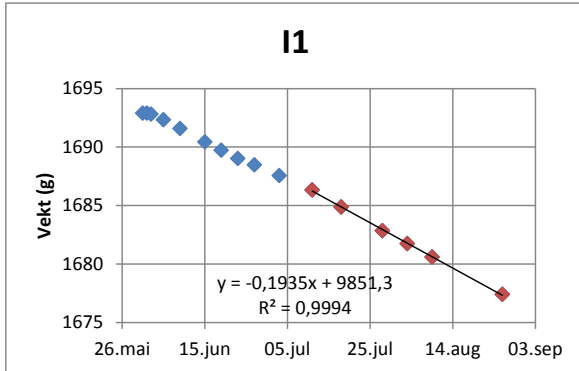


Serie H: Sementtype Industri, med 10 % silika

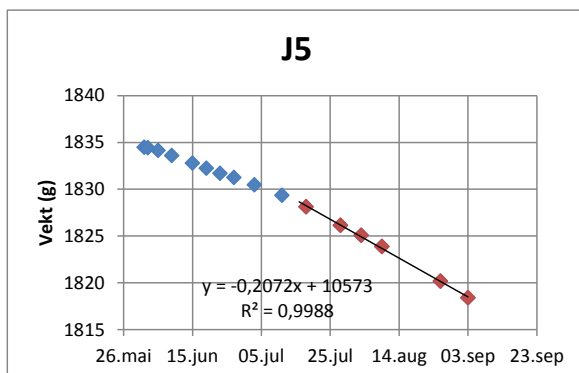
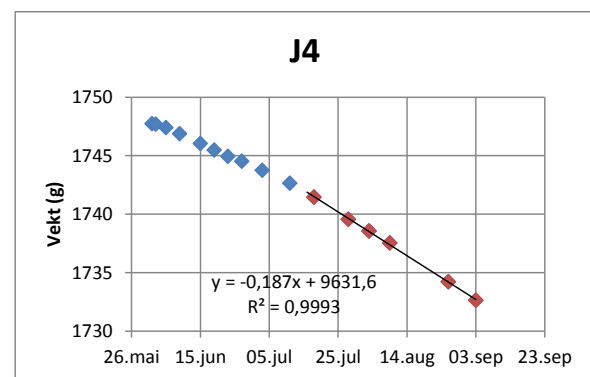
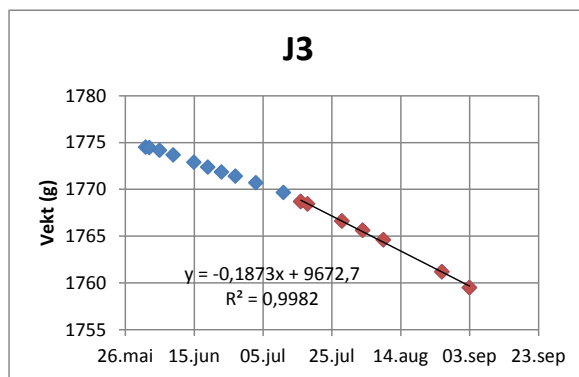
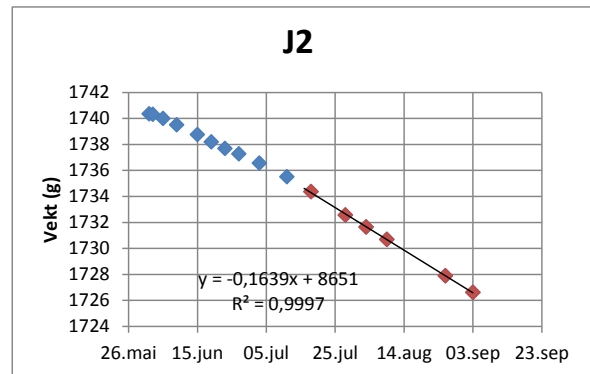
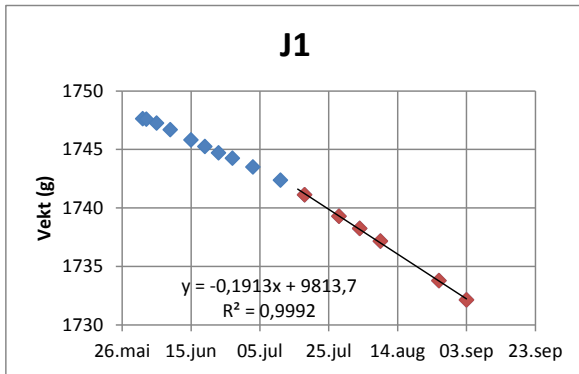


Betongprøver

Serie I: Sementtype Standard FA, utan silika



Serie J: Sementtype Industri, utan silika



Vedlegg E Berekna enkeltverdiar for vassdampperabilitet

Tabellen under viser dei berekna verdiane for vassdamppermeabilitet for kvar enkeltprøve i forsøket. Verdiane er basert på vektregistreringa vist i vedlegg D. Dei gule felta indikerer prøver som har vore i kontakt med saltløysinga av kaliumnitrat i den aktuelle forsøksperioden.

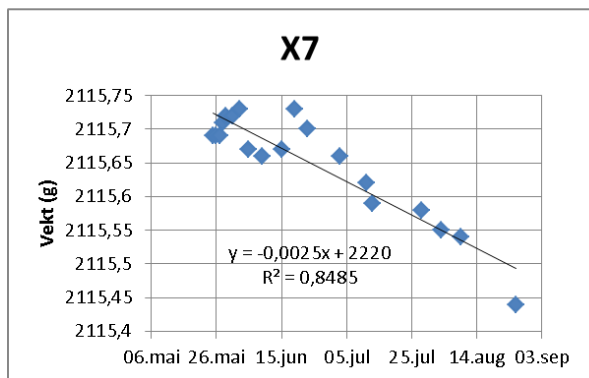
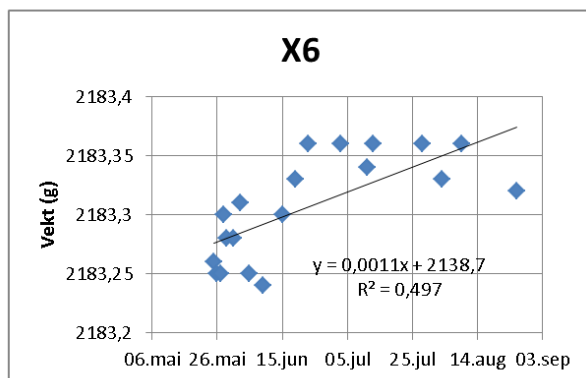
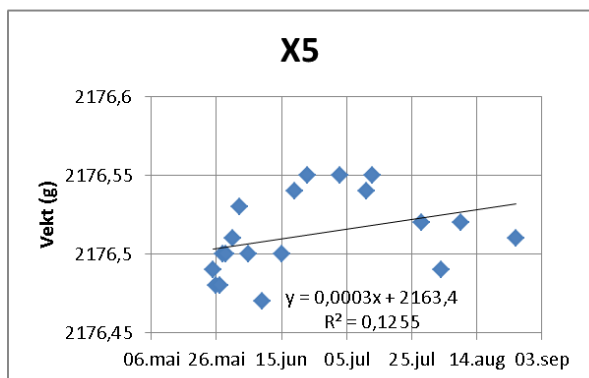
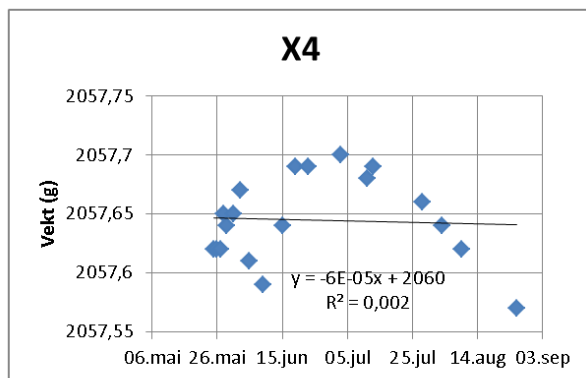
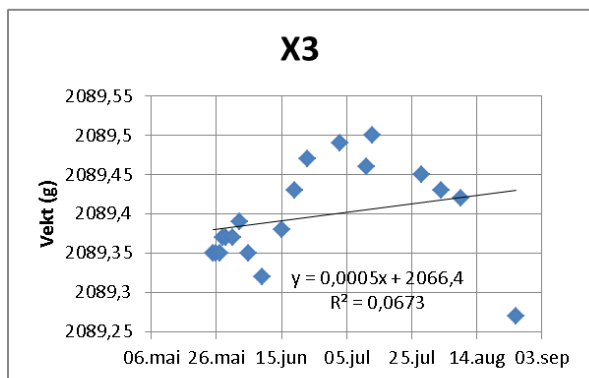
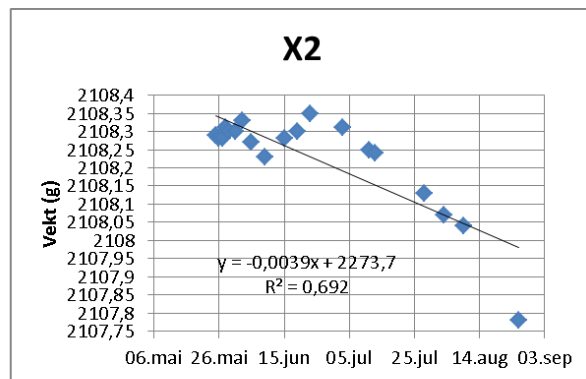
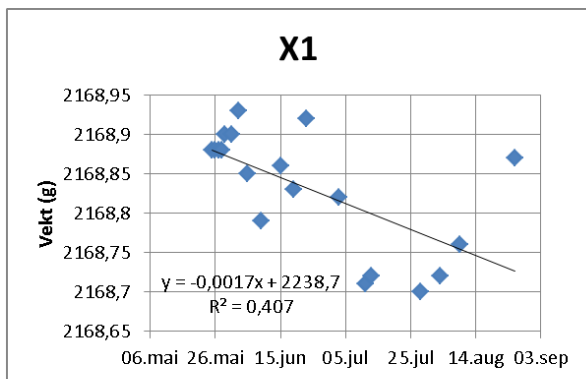
	Mørtelprøver								Betongprøver	
Prøvenamn	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Sementtype	STD	STD FA	STD FA	STD FA	STD FA	IND	IND	IND	STD FA	IND
Silikamengde	0 %	0 %	5 %	10 %	15 %	0 %	5 %	10 %	0 %	0 %
1	8,76E-13	8,08E-13	4,88E-13	3,92E-13	3,90E-13	6,71E-13	5,11E-13	2,88E-13	5,71E-13	5,77E-13
2	8,91E-13	7,14E-13	6,68E-13	4,08E-13	3,86E-13	7,35E-13	4,95E-13	2,82E-13	5,84E-13	5,10E-13
3	8,51E-13	7,16E-13	4,97E-13	4,07E-13	3,92E-13	6,87E-13	5,32E-13	2,94E-13	6,88E-13	5,88E-13
4	7,95E-13	7,27E-13	5,04E-13	4,35E-13	3,89E-13	6,72E-13	4,69E-13	3,21E-13	7,92E-13	5,75E-13
5	7,53E-13	7,53E-13	5,20E-13	4,89E-13	4,16E-13	6,57E-13	5,08E-13	3,14E-13	8,29E-13	6,42E-13
Middelverdi	8,33E-13	7,44E-13	5,36E-13	4,26E-13	3,95E-13	6,84E-13	5,03E-13	3,00E-13	6,93E-13	5,79E-13
Standardavvik	5,77E-14	3,91E-14	7,51E-14	3,86E-14	1,22E-14	3,04E-14	2,32E-14	1,67E-14	1,17E-13	4,68E-14

Vedlegg F Vektutvikling for dummy-prøver

Grafane på neste side viser ein oversikt over vektutviklinga for kvar enkelt dummy-prøve. På x-aksen visast ei tidslinje for forsøksperioden og på y-aksen visast vekt av prøva. Vektaksen er vist med 0,5 gram mellom kvar hjelpelinje for alle enkeltprøvene. For kvar prøve er det ved hjelp av Microsoft Excel teikna opp ei lineær regresjonslinje ut frå kvar vektregistrering. Formelen for denne linja er gitt i kvart diagram, og følgjer likninga $y = ax + b$. Det første leddet i denne likninga gir vekttapet per døgn. Linja har også ein korrelasjonskoeffisient R^2 som viser samanhengen mellom tid og vekt.

Målet med dummy-prøvene er å følgje med på eventuelle lekkasjar i tettematerialet, som skildra i 3.4.4. Vektendring og korrelasjonskoeffisient må sjåast i samanheng for å vurdere tettematerialet i prøvene. Der vekta varierer mykje og fyrste leddet i likninga har låg verdi, tyder det på lågt vekttap og liten korrelasjon mellom vekttap og tid, og dermed at tettematerialet har fungert godt. I motsett fall har ein ein høgare verdi for vekttap per døgn i tillegg til ein høgare korrelasjonskoeffisient. I desse tilfella er det grunn til å rekne med at vektendringa skuldast lekkasjar i tettematerialet.

Studerer ein vektutviklinga nærmare ser ein at det er to enkeltprøver som utmerkar seg med å både ha høg R^2 -verdi og høgt vekttap per døgn samanlikna med resten av prøvene. Dette er prøve X2 og X7. I desse tilfella kan ein rekne med at vekttapet skuldast lekkasje i tettematerialet. Prøve X1 viser noko av den same tendensen, men ein noko mindre tydeleg korrelasjon, samt eit litt lågare vekttap per døgn ifølgje stigningstalet på regresjonslinja. For dei resterande prøvene er både korrelasjonen og vektendringa låg, noko som tyder på at tettematerialet har fungert bra for desse prøvene.



Vedlegg G Risikovurdering diamantsag

HMS-vurdering diamantsag TF fløy 5

Gunleiv Sæland 11.01.2015

Uønska hending	Tiltak
Straumstøt frå transformator 230-400 V	Plasserast i naborom under saging, byggast inn i tett kasse (dette er under arbeid)
Høgt støynivå frå sag	Bruk av hørselvern, begrense støy i bygningen
Sprut/betongbitar frå sagblad	Bruk av vernebriller og hanskar
Uhell under saging (forskyvingar, saga "tek tak" i betongstykket)	Sørge for god fasthalding i sagbenk (vogge på hjul) og tilstrekkeleg storleik på betongprøva
Skader på hender (sagblad i kontakt med fingrar)	Bruk av hanskar, tilstrekkeleg avstand frå hender til sagblad
Kontakt med sagblad etter avslutta saging, mens sagbladet framleis roterer ("fort gjort")	Vent til sagbladet har stoppa heilt før ein tek hendene i nærleiken av sagbladet
Snubling/uforutsette bevegelsar rundt saga	Ryddig og oversiktleg arbeidsplass rundt saga

Kommentar

Alt blir verre når ein er aleine. Det er god førebygging i å vere to personar til stades ved saging.

Vedlegg H Kalibreringsbevis TinyTag TGP-4500

Kalibrering av loggeutstyret blei utført hos Presisjonsteknikk AS i Oslo 26.05.15 før forsøksstart. Loggeutstyret har eit avvik på +3,1 % RH og -0,1°C. Alle verdier som er brukt i oppgåva er justert etter denne kalibreringa.



KALIBRERINGSBEVIS TEMPERATUR, RELATIV LUFTFUKTIGHET

Oppdragsgiver:	Gunleiv Sæland		
Måleobjekt:	Tinytag		
Datalogger:	TGP- 4500		
Identifikasjon:	364800	MRK: INNE A	
Sertifikat nr:	80074-364800		
Kalibreringsdato:	26.05.2015		

Kalibreringsresultat

Laboratoriereferanse TEMP		Prøveobjekt TEMP	
Måleverdier		Avleste verdier °C	
Referanseinstrument °C		Avlest temp °C	Avvik temp °C
30,0		29,9	0,1

Laboratoriereferanse FUKT		Prøveobjekt FUKT	
Måleverdier		Avleste verdier %Rh	
Referanseinstrument %Rh		Avlest fukt %Rh	Avvik fukt %Rh
50,0		53,1	3,1

Referanse:

Klimakammer: Binder KBF-115 - Serie nr: 09-06299

Sporbarhet:

Referanse systemet er sporbart til Scalibra AS Bevisnummer 3491 - 14
Kalibrert 20.08.2014.

Kalibreringsbeviset er gyldig 1 år fra kalibreringsdato.

Miljøparametre ved kalibrering:

Omg forhold: Temp: 20 ±3 °CRh: 50 ± 20%.

Kalibreringsmetode:

Loggere og referanse instrument ble plassert i senter av klimakammer.

Etter endt syklus ble loggerens loggdata sammenlignet med laboratoriets referanse standard.

Målesikkerhet:

Temperatursensoren har en målesikkerhet på ±1°C.

Fuktsensoren har en målesikkerhet på ±5%Rh

Kalibrert av:



Noregs miljø- og
biovitenskaplege
universitet

Postboks 5003
NO-1432 Ås
67 23 00 00
www.nmbu.no