

# Fuktforhold i kjellervegger av betong under grunnvannstand

**Tuva Jakobsen Rønnes**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Stig Geving, BAT

Medveileder: Sverre Smeplass, Skanska Norge AS

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





Oppgavens tittel:	Dato: 9. Juni 2015		
Fuktforhold i kjellervegger av betong under grunnvannstand	Antall sider (inkl. bilag): 177		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn:	Tuva Jakobsen Rønnes		
Faglærer/veileder:	Prof. Stig Geving (Institutt for bygg, anlegg og transport)		
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere:	Sverre Smeplass (Skanska Norge AS)		

Ekstrakt:

I denne oppgaven er betongens tetthetsparametere studert, med hensikt å få bedre innsikt i fuktforholdene i kjellervegger under grunnvannstand mot klimatiserte rom.

Betongsammensetninger med B35M45- og B45MF40 SV40-kvaliteter, med Cemex Miljøsement og Norcem Standardsement FA ble undersøkt i laboratorium. Det ble utført sorpsjonstester, test av betongens kapillære sugesevne og porøsitet, prøving av vanddamppermeans og tradisjonelle densitet- og trykkfasthetsundersøkelser. Resultatene viste blant annet at Cemex Miljøsement gir tettere betong enn Norcem Standardsement FA. Undersøkelsene av betongenes tetthetsegenskaper viste at betongens fukthistorikk har stor innvirkning på resultatet. Arbeidet avdekket også flere svakheter med metodene for å teste tetthetsegenskapene til vanntett betong. Disse svakhetene henger sammen med at sorpsjonsisotermen er flatere og fukktransportkoeffisienten er lavere enn for vanlig betong. Det betyr at det er mindre fukt som kan fordampe eller tas opp og det kan være utfordrende å oppnå likevekt mellom prøve og omgivelser. Det bør vurderes om det er andre tester som kan egne seg bedre, eller om prosedyrene som brukes i dag bør justeres.

Det er gjort beregninger av fukttilstanden i ulike kjellervegger i analyseprogrammet WUFI. Disse beregningene omfatter et parameterstudium og beregninger der betongegenskapene som ble kartlagt ved laboratorieundersøkelsene ble brukt. Resultatene viste at det i betongvegger under grunnvannstand kun bør benyttes isolasjon på utsiden, at den innvendige kledningen må være dampåpen og at måten betongenes kapillære egenskaper blir definert har svært stor innvirkning på sluttresultatet.

WUFI-beregningene viste at det etter fem år var flere centimetertykke partier midt i betongene med MF40-kvalitet som var helt uberørte av omgivelsene, og etter ti år var fremdeles ikke tilstanden stasjonær i noen av betongene. Betongens initiale RF og mulighet for tørking innover er vist å være de faktorene som har størst påvirkning på det langsiktige fuktnivået i konstruksjonen.

Det er konkludert med at WUFI overdimensjonerer betongens kapillære egenskaper i beregninger der konstruksjonen er påført vanntrykk. På bakgrunn av teorien om kapillær brytning i betongen anbefales det derfor å dele betongsjiktet i to ved beregninger, slik at kun den ytterste delen av betongen (50-70 mm) har kapillære egenskaper som tilsvarer de som er målt i laboratoriet. I resten av tverrsnittet er vandampdiffusjonen den styrende mekanismen for fukktransport. I denne oppgaven er det antatt at det ikke foregår kapillær transport i det innerste sjiktet og væsketransportkoeffisienten er derfor satt til null for alle RF-verdier her.

Stikkord:

1. Fukktransport i betong
2. Kapillær brytning
3. WUFI
4. Kjellervegg

*Tuva Rønnes*

(sign.)





# FORORD

---

Denne masteroppgaven er skrevet ved Norges teknisk- naturvitenskaplige universitet. Oppgaven avslutter sivilingeniørstudiet ved Institutt for bygg, anlegg og transport med fordypning i bygnings- og materialteknikk. Oppgaven bygger videre på prosjektoppgaven skrevet i emnet TBA 4521. Arbeidet er utført i samarbeid med Skanska Norge AS.

Den største utfordringen med denne oppgaven har vært det praktiske knyttet opp mot laboratoriearbeidet. Arbeidet er utført på to forskjellige laboratorier, på to ulike institutter ved NTNU (Institutt for konstruksjonsteknikk og Institutt for bygg, anlegg og transport). For en relativt uerfaren student har det vært både utfordrende og lærerikt og lede arbeidet mellom de to instituttene. Flere av undersøkelsene tok også svært lang tid, dette har gitt mindre tid enn ønskelig til slutføringen av arbeidet.

Stadig nye oppdagelser av analyseprogrammet WUFIs muligheter og begrensninger, har foranlediget mye improvisering og eksperimentering for å finne fremgangsmåten som gir riktigst resultat, innenfor rammer som ligner virkelige forhold.

Flere av disse utfordringene har gjort at problemstillingen har blitt noe endret underveis, i samråd med veilederne.

Jeg er takknemlig for all hjelp og støtte jeg har fått underveis. Spesielt vil jeg takke Sverre Smeplass i Skanska. Han har bidratt med høy faglig kompetanse, og samtidig vært svært motiverende og støttende. Jeg vil også takke Steinar Seehus for veiledning på laboratoriet og Ole Aunrønning for hjelp til å utføre de testene jeg ikke kunne gjøre på egenhånd. Jeg hadde ikke kommet gjennom semesteret med samme gode humør uten jentene på kontor 2-276 og Bjarne Grimstad. Bente og Ragnvald har også vært viktige underveis. Til slutt vil jeg takke Stig Geving for hans veiledning, tilbakemeldinger og kritiske spørsmål gjennom hele prosjektperioden.

Trondheim, 9. juni 2015



---

Tuva Jakobsen Rønnes



# SAMMENDRAG

---

Befolkningsvekst og økt urbanisering, blant annet, har gitt behov for bedre arealutnyttelse i byene. Dette har gjort det mer aktuelt å bygge fullklimatiserte arealer under bakkenivå, og tidvis også under grunnvannstand.

I denne oppgaven er betongens tetthetsparametere studert, med hensikt å få bedre innsikt i fuktforholdene i kjellervegger under grunnvannstand mot klimatiserte rom.

## Laboratorieundersøkelser

Betongens tetthetsegenskaper er forsøkt kartlagt ved hjelp av sorpsjonsmålinger, målinger av kapillær sugeevne og porøsitet (etter SINTEFs prosedyre KS70 110) og prøving av vanddamppermeans (etter ISO/DIS 12572). Betongkvalitetene som ble undersøkt er:

- B35M45 med Norcem Standardsement FA
- B35M45 med Cemex Miljøsement
- B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA
- B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement

Resultatene viste at samtlige betongsammensetninger var godt innenfor forventede verdier for vanntett betong. Betongene med Cemex Miljøsement viste seg å være tettere enn betonger med tilsvarende kvalitet med Norcem Standardsement FA. Den tetteste av betongene (B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement) hadde kapillaritetstall på  $0,0058 \text{ [kg/m}^2\text{/s]}$  og motstandstall på  $1,95\text{E}+08 \text{ [s/m}^2\text{]}$ .

Tetthetsegenskapene til betong avhenger av dens fukthistorikk, og det er derfor nødvendig å presentere denne sammen med resultatene av undersøkelsene for at de skal ha noen verdi. Resultatenes avhengighet til fukthistorikken kan gjøre det vanskelig å sammenlikne undersøkelser gjort ved forskjellig tid og/eller sted, siden fukthistorikken sjelden er lik.

Arbeidet avdekket flere svakheter med bruk av de nevnte undersøkelsene på vanntett betong. Sorpsjonsisotermen er flatere og fukttransportkoeffisienten er lavere for vanntett betong enn for vanlig betong. Det betyr at det er mindre fukt som kan fordampe eller tas opp, og det kan være utfordrende å oppnå likevekt mellom prøve og omgivelser. Det bør vurderes om det er andre tester som kan egne seg bedre, eller om prosedyrene som brukes i dag bør justeres.

## Beregninger i analyseprogrammet WUFI

Alle beregninger av fuktinnhold og transport som er gjort i forbindelse med oppgaven er utført i analyseprogrammet WUFI. Det er gjennomført et parameterstudie basert på eksisterende materialdata for å undersøke hvordan ulike byggetekniske løsninger påvirker fukttilstanden i kjellerveggen. Etter at materialdataene fra laboratorieundersøkelsene var klare ble det utført et utvalg nye beregninger hvor disse resultatene ble inkludert. Dette var for å gi mer nøyaktige og realistiske svar på fuktsituasjonen i kjellerveggen. De to rundene med beregninger ga følgende konklusjoner for oppbygning av kjellervegger mot grunnvannstand:

- Det bør kun benyttes isolasjon på veggens utside
- Kledningen må være dampåpen for å gi betongen tørkemuligheter innover
- Dersom maksimalkravet til U-verdi for ytterveggen iht. Byggeteknisk forskrift er tilfredsstillt har ikke uteklimaet vesentlig innvirkning på fuktsituasjonen i ytterveggen
- Betongen ivaretar veggens vanntetthet, samtidig som at den har den største mengden innebygd fukt. Dette gjør det til det materialet med størst innvirkning på fuktsituasjonen i konstruksjonen

Fordampingen fra betongens innvendige overflate ble beregnet til å være mellom 3,5 og -2 g/(m<sup>2</sup>døgn) for den mest åpne betongen, og mellom 2,5 og -1,5 g/(m<sup>2</sup>døgn) for den tetteste av betongene (B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement).

WUFI-beregningene viste at det etter fem år var flere centimetertykke partier midt i betongene med MF40-kvalitet som var helt uberørt av omgivelsene, og etter ti år var fremdeles ikke tilstanden stasjonær i noen av betongene. Betongens initielle RF og mulighet for tørking innover er vist til å være de faktorene som har størst påvirkning på det langsiktige fuktnivået i konstruksjonen.

I WUFI-beregningene er betongens kapillære egenskaper vurdert til å være overdimensjonert for konstruksjoner påført vanntrykk. På bakgrunn av teorien om kapillær brytning anbefales det å dele betongsjiktet i to ved beregninger, slik at kun den ytterste delen av betongen (50-70 mm) har kapillære egenskaper som tilsvarer de som er målt i laboratoriet. I resten av tverrsnittet er vandampdiffusjonen den styrende mekanismen for fukttransport. I denne oppgaven er det antatt at det ikke foregår kapillær transport i det innerste sjiktet og væsketransportkoeffisienten er derfor satt til null for alle RF-verdier her.

Beregningene er utført endimensjonalt, og det er sett på virkningene ulike material- og klimavariasjoner har på fuktsituasjonen kjellerveggen. Det er ikke tatt hensyn til fukttransport som følge av riss eller feil ved konstruksjonen.

# SUMMARY

---

Population growth and urbanisation, among other things, have led to a need for better utilisation of space in the bigger cities. This has made it more relevant to build fully air-conditioned spaces below the ground, and also sometimes under the groundwater level.

Factors influencing the permeability of concrete have been studied, with intent to gain better insight into moisture conditions in basement walls below groundwater level, against air-conditioned rooms.

The calculations are performed one-dimensionally, and the effects of different materials and climates on the moisture conditions in the wall are examined. Moisture transport due to cracks or construction errors are not considered in this thesis.

## Laboratory tests

The concrete properties influencing the permeability were measured by performing sorption tests, measurements of the capillary suction and porosity (after SINTEF's procedure KS70 110), and testing of the water vapour permeance (after ISO/DIS 12572). The concretes that were tested had the following qualities and specifications:

- B35M45 with Norcem Standardsement FA
- B35M45 with Cemex Miljøsement
- B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA
- B45MF40 SV40 with Cemex Miljøsement

The results showed that all the concrete compositions were well within expected values for waterproof concrete. Concrete with Cemex Miljøsement (environmental cement) proved to be the less permeable than concrete with similar quality with Norcem Standardsement FA (standard FA cement). The most watertight of all the different concretes (B45MF40 SV40 with Cemex Miljøsement) had a capillary number of 0,0058 [kg/m<sup>2</sup>√s] and a resistance number of 1,95E+08 [s/m<sup>2</sup>].

The measured properties were highly dependant on the concrete's moisture history. It is therefore necessary to present the moisture history together with the laboratory results for them to have any value. This can make it difficult to compare test results from different times and/or places, since the moisture histories rarely are equal.

This thesis revealed several weaknesses with the methods for testing waterproof concrete. The sorption isotherms are flatter and the moisture transport coefficient is lower than for conventional concrete. This means that there is less moisture that can evaporate or be adsorbed, and it may be challenging to obtain equilibrium between

the sample and the surroundings. It should be considered whether there are other tests that may be more suitable, or if the tests used today should be adjusted.

### **Calculations in WUFI**

All calculations of the moisture situation in this thesis are performed in the computer programme WUFI. It is done a parameter study based on existing material data to examine how different factors affect the moisture content in the basement wall. It was also performed a selection of new calculations where the material data from the laboratory tests were included. This was done to provide more accurate and realistic values for the moisture situation. The two rounds of calculations yielded the following conclusions for construction of basement walls exposed to groundwater:

- Thermal insulation should only be used on the external side of the wall
- The lining must have low vapour resistance to allow the concrete to dry inwards
- Provided that the maximum requirement for the U-value of the exterior wall (according to the Norwegian building code is satisfied), the outdoor climate does not have significant impact on the moisture situation in the wall
- The concrete ensure the wall's water tightness and it has the largest amount of built-in moisture of all the materials in the wall. This makes it the material with the greatest impact on the moisture situation of the construction

The evaporation from the concrete's internal surface was calculated to be between 3,5 and -2 g/(m<sup>2</sup>day) for all the concretes. The WUFI calculations also showed that after five years, there was a several centimetre thick section in both concretes with MF40- quality that was totally unaffected by the environment. After ten years there was still not steady state moisture flow through any of the concretes. The initial relative humidity (RH) in the concrete and the possibility for it to dry inwards are the factors that have the greatest impact on the long-term moisture level in the construction.

The concrete's capillary properties are considered to be exaggerated in the WUFI-calculations for constructions with applied water pressure. It is therefore advised to divide the concrete layer into two when doing calculations of this sort. In doing so, only the outer part of the section (50-70 mm) should have active capillary properties equivalent to those measured in the laboratory. In the rest of the section, the water vapour diffusion is the governing mechanism for moisture transport. In this thesis, it is assumed that there is no capillary transport in the innermost layer, and the liquid transport coefficient is therefore set to zero for all RH here.

# INNHOLDSFORTEGNELSE

---

<b>FORORD</b> .....	<b>I</b>
<b>SAMMENDRAG</b> .....	<b>III</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>V</b>
<b>INNHOLDSFORTEGNELSE</b> .....	<b>VII</b>
<b>FIGURLISTE</b> .....	<b>X</b>
<b>TABELLISTE</b> .....	<b>XIV</b>
<b>SYMBOLLISTE</b> .....	<b>XVI</b>
<b>FORKORTELSER</b> .....	<b>XVI</b>
<b>1 INNLEDNING</b> .....	<b>1</b>
1.1 BAKGRUNN .....	1
1.2 PROBLEMBESKRIVELSE .....	2
1.2.1 Oppgavebeskrivelse .....	2
1.2.2 Målsetning og hensikt.....	3
1.2.3 Deloppgaver.....	3
1.3 OPPGAVENS OPPBYGNING .....	3
<b>2 TEORETISK GRUNNLAG</b> .....	<b>5</b>
2.1 AKTUELL BETONGTEKNOLOGI.....	5
2.1.1 Kombinasjon av damp- og væsketransport i betong .....	5
2.1.2 Kapillær transport .....	7
2.1.3 Vanndamptransport .....	11
2.1.4 Betongens vanntrykkspermeabilitet.....	14
2.1.5 Sorpsjonskurver .....	14
2.1.6 Porøsitet .....	16
2.1.7 Effekt av tilsetningsmaterialer.....	18
2.2 BAKGRUNN FOR FUKTTEKNISK ANALYSE AV KJELLERVEGGER.....	19
2.2.1 Databeregninger for fukttransport.....	19
2.2.2 Forhold som påvirker fukttilstanden i kjellerveggen .....	22
<b>3 MÅLING AV BETONGEGENSKAPER</b> .....	<b>27</b>
3.1 OM TESTBETONGEN .....	27
3.1.1 Resepter .....	27
3.1.2 Produksjon av betong og prøvestykker .....	29
3.1.3 Sementblandinger.....	30
3.2 BESKRIVELSE AV LABORATORIEFORSØK .....	31
3.2.1 Initielt fuktinnhold.....	31

3.2.2	<i>Trykkfasthet</i> .....	32
3.2.3	<i>Kapillær sugsevne og porøsitet</i> .....	33
3.2.4	<i>Bestemmelse av egenskaper ved vanndampgjennomgang</i> .....	35
3.2.5	<i>Sorpsjonsmålinger</i> .....	37
3.3	MÅLTE BETONGEGENSKAPER.....	37
3.3.1	<i>Initielt fuktinnhold</i> .....	38
3.3.2	<i>Trykkfasthet</i> .....	39
3.3.3	<i>Kapillær sugsevne og porøsitet</i> .....	41
3.3.4	<i>Egenskaper ved vanndampgjennomgang</i> .....	51
3.3.5	<i>Sorpsjonskurver</i> .....	53
3.4	VURDERING OG DISKUSJON.....	56
3.4.1	<i>Testmetodene</i> .....	56
3.4.2	<i>Betongene</i> .....	57
<b>4</b>	<b>FUKTBREGNINGER OVER KJELLERVEGGEN</b> .....	<b>59</b>
4.1	FREMGANGSMÅTE.....	59
4.2	PARAMETERVARIASJONER.....	61
4.2.1	<i>Referansevegg</i> .....	61
4.2.2	<i>Termisk isolasjon</i> .....	63
4.2.3	<i>Betong</i> .....	64
4.2.4	<i>Innvendig kledning</i> .....	65
4.2.5	<i>Innvendig klima</i> .....	67
4.2.6	<i>Utvendig temperatur</i> .....	68
4.3	RESULTATER FRA WUFI-BREGNINGENE.....	69
4.3.1	<i>Avklaringer</i> .....	69
4.3.2	<i>Utvendig termisk isolasjon</i> .....	70
4.3.3	<i>Betong</i> .....	70
4.3.4	<i>Innvendig isolasjon</i> .....	73
4.3.5	<i>Innvendig kledning</i> .....	74
4.3.6	<i>Innvendig klima</i> .....	78
4.3.7	<i>Utvendig temperatur</i> .....	79
4.4	VURDERING OG DISKUSJON.....	80
4.4.1	<i>Kjellerveggen</i> .....	80
4.4.2	<i>WUFI som beregningsprogram</i> .....	82
<b>5</b>	<b>FUKTBREGNINGER MED MÅLTE BETONGEGENSKAPER</b> .....	<b>83</b>
5.1	INPUTPARAMETERE.....	83
5.2	BREGNING MED METODE FRA KAPITTEL 4.....	85
5.2.1	<i>Fremgangsmåte</i> .....	85
5.2.2	<i>Resultater fra WUFI-beregningene</i> .....	87



5.3	BREGNINGER MED ALTERNATIV LØSNING FOR KAPILLÆR TRANSPORT .....	93
5.3.1	<i>Kapillær brytning</i> .....	93
5.3.2	<i>Fremgangsmåte</i> .....	93
5.3.3	<i>Parametervariasjoner</i> .....	94
5.3.4	<i>Resultater og vurdering fra WUFI-beregningene</i> .....	95
5.3.5	<i>Vurdering og diskusjon</i> .....	106
<b>6</b>	<b>KONKLUSJON</b> .....	<b>109</b>
6.1	BETONGENS TETTHETSEGENSKAPER.....	109
6.2	METODER FOR Å UNDERSØKE BETONGENS TETTHETSEGENSKAPER .....	110
6.3	KJELLERVEGGER I BETONG UNDER GRUNNVANNSTAND.....	110
6.4	WUFI.....	112
6.5	FORBEHOLD.....	112
<b>7</b>	<b>VIDERE ARBEID</b> .....	<b>113</b>
7.1	BETONGEGNSKAPER.....	113
7.2	WUFI.....	113
7.3	KJELLERVEGGER .....	114
	<b>REFERANSER</b> .....	<b>115</b>
	<b>VEDLEGG</b> .....	<b>119</b>
	<b>VEDLEGG A - OPPGAVETEKST</b> .....	<b>120</b>
	<b>VEDLEGG B – BETONGRESEPTER</b> .....	<b>123</b>
	<b>VEDLEGG C – KORRIGERTE BETONGRESEPTER</b> .....	<b>128</b>
	<b>VEDLEGG D – BREGNING AV DENSITET IHT. POWERS TEORI</b> .....	<b>131</b>
	<b>VEDLEGG E – KAPILLÆRABSORPSJON</b> .....	<b>134</b>
	<b>VEDLEGG F – MASSEENDRING VED BESTEMMELSE AV EGENSKAPER VED VANNDAMPGJENNOMGANG</b> .....	<b>139</b>
	<b>VEDLEGG G – PRØVING AV VANNDAMPGJENNOMGANG ETTER ISO/DIS 12572</b> .....	<b>146</b>
	<b>VEDLEGG H - SORPSJONSDATA</b> .....	<b>151</b>
	<b>VEDLEGG I - MATRISE FOR BREGNINGSVARIASJONER I WUFI</b> .....	<b>156</b>

## FIGURLISTE

---

Figur 1-1 Oppgavens oppbygning .....	4
Figur 2-1 Kombinert fukttransport i et materiale (Hedenblad, 1993).....	6
Figur 2-2 Prinsipiell variasjon mellom koeffisientene for fukttransport ved diffusjon og kapillærsug (Hedenblad, 1993) .....	7
Figur 2-3 Prinsipielt absorpsjonsforløp for en betongprøve med en side i kontakt med vann .....	9
Figur 2-4 Forventet sammenheng mellom motstandstall og v/c-tall (Jacobsen, 2013) .....	10
Figur 2-5 Eksempel på en teoretisk desorpsjonsisoterm, vist ved gel- og kapillærisoterm (Mjörnell, 1994).....	15
Figur 2-6 Prinsipielt forløp hos overgangsisotemer .....	16
Figur 2-7 Materialer med lik porøsitet og forskjellig permeabilitet (Jacobsen, 2013)	17
Figur 2-8 Sammenheng mellom porevolum og v/c-tall etter 28 dagers herding (Jacobsen, 2013) .....	17
Figur 2-9 Mikrostruktur i sementpasta ved a) miksing b) 7 dager c) 28 dager og d) 90 dager ( $v/c < 0,5$ ) (Jacobsen, 2013).....	18
Figur 2-10 Fukttransport i en pore i en massiv yttervegg om vinteren, for variabelt fuktinnhold (Fraunhofer IBP, 2012) .....	20
Figur 2-11 Veggkonstruksjon i WUFI med oversikt over ulik sjikt. Elementstrukturen er vist nederst. ....	21
Figur 2-12 Temperatur i grunnen under et dekke med 200 mm termisk isolasjon og innetemperatur på 20 grader, ved stasjonære forhold (Gundersen et al., 2004) .....	25
Figur 3-1 Bilde av innpakkede prøvesylindre .....	30
Figur 3-2 Prinsipiell visning av fuktmåling i betong (Geving, 2014) .....	32
Figur 3-3 Sammenheng mellom trykkfasthet og alder for ulike betongblandinger (elaty, 2014).....	33
Figur 3-4 Prinsippskisse av prøveapparat for test av kapillær sugsevne .....	34
Figur 3-5 Regresjonslinjer for vannopptak ved absorpsjonsforsøk.....	34

Figur 3-6 Prinsipielt oppsett ved koppmetoden (Hedenblad, 1993) .....	36
Figur 3-7 Bilde av oppsett ved koppmetoden. Betongskiven og prøvekoppen er tettet igjen med voks .....	36
Figur 3-8 Absorpsjonskurve, B35M45 Norcem Standardsement FA .....	43
Figur 3-9 Absorpsjonskurve, B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA .....	43
Figur 3-10 Absorpsjonskurve, B35M45 med Cemex Miljøsement .....	44
Figur 3-11 Absorpsjonskurve, B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement .....	44
Figur 3-12 Sorpsjonskurver ved 23 °C for B34M45 med Norcem Standardsement FA.....	55
Figur 3-13 Sorpsjonskurver ved 23 °C for B45MF40 med Norcem Standardsement FA.....	55
Figur 3-14 Sorpsjonskurver ved 23 °C for B35M45 med Cemex Miljøsement .....	55
Figur 3-15 Sorpsjonskurver ved 23 °C for B45MF40 med Cemex Miljøsement.....	55
Figur 4-1 Metode for fuktteknisk analyse ved hjelp av HAM-modeller.....	60
Figur 4-2 Designkurver for innendørs fukttilskudd i hus (Geving og Holme, 2011) ...	68
Figur 4-3 Fordeling mellom diffusjon og kapillærtransport gjennom referansevegg i oktober.....	71
Figur 4-4 Effekt av variabel vannabsorpsjonskoeffisient, vist ved RF over vegtverrsnittet.....	72
Figur 4-5 Endring i RF på innvendig betongoverflate over tid for betong med ulik initial RF .....	73
Figur 4-6 Effekt av variabel tykkelse på innvendig isolasjon, vist ved RF over tverrsnittet.....	74
Figur 4-7 Prinsipiell oppbygning av veggen uten gipsplate.....	75
Figur 4-8 Prinsipiell oppbygning av veggen med gipsplate.....	75
Figur 4-9 Effekt av variabel dampmotstand i innvendig kledning, vist ved RF over tverrsnittet (uten gipsplate).....	76
Figur 4-10 Effekt av variabel dampmotstand i innvendig kledning, vist ved RF over tverrsnittet (med gipsplate) .....	76
Figur 4-11 Effekt av variabel dampmotstad i dampspærre/ -brems, vist ved RF over tverrsnittet.....	77

Figur 4-12 Fuktstrømninger gjennom et sjikt i veggen to mm fra den innvendige betongoverflaten, vist med vegger med ulik innvendig dampmotstand .....	78
Figur 4-13 Effekt av ulikt inneklime, vist ved RF over tverrsnittet .....	79
Figur 4-14 Effekt av variabel utetemperatur, vist ved RF over tverrsnittet.....	80
Figur 5-1 Prinsipiell skisse av fuktendring over betongtverrsnittet.....	85
Figur 5-2 Sammenlikning av RF over tverrsnittet av referanseveggen med de fire ulike betongene .....	88
Figur 5-3 Fordeling mellom diffusjon og kapillærtransport gjennom referansevegg med Cemex-betong kvalitet SV 40 i oktober .....	89
Figur 5-4 Endring i RF over tid, 2 mm fra den innvendige betongoverflaten, for de fire undersøkte betongene .....	90
Figur 5-5 Endring i RF de første 5000 timene etter påført vanntrykk, 2 mm fra den innvendige betongoverflaten for de fire undersøkte betongene.....	91
Figur 5-6 Fukttransporten de første 5000 timene i B45MF40 SV40- betongen med Cemex Miljøsement, vist ved tre ulike dybder i tverrsnittet. Avstand er gitt fra utvendig overflate.....	92
Figur 5-7 RF over tverrsnittet til referanseveggen etter fem år, med de fire ulike betongtypene.....	96
Figur 5-8 RF over tverrsnittet til referanseveggen etter ti år, med de fire ulike betongtypene.....	97
Figur 5-9 Totalt simulert fuktinnhold i referanseveggen i løpet av ti års eksponering for de fire ulike betongtypene.....	98
Figur 5-10 Fuktavgivelse fra den innvendige betongoverflaten over tid, ved de ulike betongtypene.....	99
Figur 5-11 Fuktavgivelse fra den innvendige betongoverflaten, ved de ulike betongtypene, de første 15000 timene .....	99
Figur 5-12 Effekt av variabel dampmotstand i innvendig kledning, vist ved RF over tverrsnittet med B35M45 Betong med Norcem Standardsement FA.....	100
Figur 5-13 RF over tverrsnittet med innvendig isolasjon og dampsperre, sammenliknet med referanseveggen, for B35M45 med Norcem Standardsement FA etter fem års eksponering .....	102

Figur 5-14 RF over tverrsnittet med innvendig isolasjon og dampspærre, sammenliknet med referanseveggen, for B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA etter fem års eksponering.....	102
Figur 5-15 RF over tverrsnittet med innvendig isolasjon og dampspærre, sammenliknet med referanseveggen, for B35M45 med Cemex Miljøsement etter fem års eksponering.....	103
Figur 5-16 RF over tverrsnittet med innvendig isolasjon og dampspærre, sammenliknet med referanseveggen, for B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement etter fem års eksponering.....	103
Figur 5-17 RF over tverrsnittet i referanseveggen i ulike byer i Norge, for B35M45 med Norcem Standardsement FA.....	104
Figur 5-18 RF over tverrsnittet i referanseveggen i ulike byer i Norge, for B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA.....	105
Figur 5-19 RF over tverrsnittet i referanseveggen i ulike byer i Norge, for B35M45 med Cemex Miljøsement.....	105
Figur 5-20 RF over tverrsnittet i referanseveggen i ulike byer i Norge, for B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement.....	106

## TABELLISTE

---

Tabell 2-1 Vanndamppermeabilitet og vanndampmotstands faktor for betong med v/c-tall 0,4 og 0,5 (Byggforsk, 2003).....	13
Tabell 2-2 Vanndampmotstand for betong med v/c-tall 0,4 og 0,5, uttrykt ved Z og ekvivalent luftlagstykkelse, basert på data fra Tabell 2-1 (Byggforsk, 2003) .....	13
Tabell 3-1 Oversikt over v/b-tall, sementmengde og andel silikastøv i de ulike betongene .....	28
Tabell 3-2 Krav til Vegvesenbetong SV40 .....	28
Tabell 3-3 Oversikt over synkmål, luftinnhold og densitet til den ferske betongen ...	29
Tabell 3-4 Oversikt over RF og tilhørende salter for de ulike kopptestene.....	36
Tabell 3-5 Oversikt over gjennomsnittlig initiell RF i de fire betongene .....	38
Tabell 3-6 Oversikt over initiell fuktighet i spesifikke betonger med sement fra Norcem.....	39
Tabell 3-7 Prøvenes trykkfasthet .....	40
Tabell 3-8 Tørr- og faststoffdensitet i prøvestykkene.....	42
Tabell 3-9 Prøvenes sugporøsitet .....	46
Tabell 3-10 Prøvenes åpne makroporøsitet .....	47
Tabell 3-11 Teoretisk sugporøsitet, beregnet i henhold til Powers teori .....	48
Tabell 3-12 Prøvenes lukkede makroporøsitet (luftmengde) .....	49
Tabell 3-13 Prøvenes motstandstall .....	50
Tabell 3-14 Prøvenes kapillaritetstall.....	50
Tabell 3-15 Vanndamppermeans og vanndampmotstand for 1 cm tykke prøver av de fire betongene ved $RF \approx 85\%$ .....	52
Tabell 4-1 Oversikt over parametervariasjoner .....	62
Tabell 4-2 Initialbetingelser brukt i WUFI-beregningene.....	63
Tabell 4-3 Oversikt over innvendige kledninger i parameterstudiet.....	66
Tabell 4-4 Vanndampmotstand til AirGuard Smart ved varierende RF-verdier (Thorsrud, 2013).....	67

Tabell 4-5 Gjennomsnittlig årstemperatur (MDRY) for Oslo, Bergen og Karasjok...	68
Tabell 5-1 Oversikt over betongdata for de undersøkte betongene som er lagt inn i WUFI.....	84
Tabell 5-2 Fuktinnhold [kg/m <sup>3</sup> ] ved ulik RF for B35M45 Norcem Standardsement FA.....	86
Tabell 5-3 Fuktinnhold [kg/m <sup>3</sup> ] ved ulik RF for B45MF40 SV40 Norcem Standardsement FA .....	86
Tabell 5-4 Fuktinnhold [kg/m <sup>3</sup> ] ved ulik RF for B35M45 Cemex Miljøsement.....	86
Tabell 5-5 Fuktinnhold [kg/m <sup>3</sup> ] ved ulik RF for B45MF40 SV40 Cemex Miljøsement .....	86
Tabell 5-6 Sorpsjonskurvene til de ulike betongene .....	94
Tabell 5-7 Oversikt over parametervariasjoner i beregninger med kapillære brytning .....	95

## SYMBOLLISTE

---

A	areal	[m <sup>2</sup> ]
d	tykkelse	[m]
G	vanndampstrømning	[kg/s]
k	kapillaritetstall	[(kg/m <sup>2</sup> *vs)]
m	motstandstall	[s/m <sup>2</sup> ]
Q <sub>kap</sub>	totalt insugd vannmengde (	[kg/m <sup>2</sup> ]
S <sub>d</sub>	ekvivalent luftlagstykkelse	[m]
t <sub>kap</sub>	tiden frem til vannfronten har nådd oversiden av et prøvestykke ved undersøkelser av kapillærabsorpsjon	[s]
W	vanndamppermeansen	[kg/(m <sup>2</sup> sPa)]
z	inntrengingsdybde	[m]
Z	vanndampmotstand	[(m <sup>2</sup> sPa)/kg]
δ	vanndamppermeabiliteten til materialet	[kg/(m s Pa)]
δ <sub>luft</sub>	vanndamppermeabiliteten til luft	[kg/(m s Pa)]
Δp <sub>v</sub>	forskjell i vanndamptrykk	[Pa]
μ	vanndampdiffusjonens motstandsfaktor	[-]

## FORKORTELSER

---

RF	Relativ fuktighet
v/c	Vann/sement- forhold
v/b	Vann/bindemiddel-forhold
MDRY	Moisture Design Refernce Year



# 1 INNLEDNING

---

## 1.1 BAKGRUNN

Blant annet befolkningsvekst og økt urbanisering har ført til behov for bedre arealutnyttelse i byene. Dette har gjort det mer aktuelt å bygge fullklimatiserte arealer under bakkenivå, og også tidvis under grunnvannstand. Slike arealer kan blant annet brukes til kinosaler, auditorier, butikker, treningsfasiliteter m.m.

Betongkonstruksjoner under grunnvannstand blir i dag ofte brukt til parkeringskjellere og andre trafikkerte arealer der de primært skal ivareta vanntetthet og der fuktavgivelse på innvendig overflate kan håndteres med avfukting og ventilasjon. I fullklimatiserte soner vil det også være aktuelt å bygge i betong, men med andre løsninger for fukthåndtering og overflatebehandling.

Fukttilstanden i betongvegger under terreng og grunnvannstand er svært kompleks. Fukttilstanden i betongen og i veggene generelt er avhengig av betongens vanntrykkspermeabilitet og vandampdiffusivitet, årstidsvariasjoner i temperatur, betongens geometri og utforming, temperatur, fuktforhold, ventilasjonen i den klimatiserte sonen og veggens dampåpenhet. I tillegg endres betongegenskapene over tid. I praksis vil det derfor ta svært lang tid før fuktsituasjonen blir tilnærmet stasjonær, altså at avdampingen fra den innvendige overflaten er like stor som den ytre vanninntrengingen.

Dagens krav til vanntett betong, i henhold til NS-EN 206, er at den skal ha et vann/semment-forhold mindre enn 0,5. Dette kravet er et enkelt, erfaringsbasert krav til materialsammensetning, men det gir ikke direkte funksjonskrav til betongen. I praksis vil tetthetsegenskapene til betongen kunne spenne over et stort register, også når standardens krav er tilfredsstillt. Det finnes lite ny forskning på dette området. Det er derfor vanskelig å kartlegge de fukttekniske egenskapene til betongen vi bruker i Norge i dag.

Bygningsfysikere bruker ulike dataprogrammer for å regne på fukttransporten i bygningsdeler. Disse programmene tar i varierende grad hensyn til alle de ulike faktorene som påvirker fukttilstanden. På grunn av den manglende informasjonen om betongens fuktegenskaper er det mye usikkerhet knyttet til disse beregningene.

Denne oppgaven tar ikke for seg kjellere som helhet, altså med gulv. Den vil kun diskutere den horisontale fukttransporten gjennom betongvegger, uten hensyn til konstruksjon forøvrig.

## 1.2 PROBLEMBESKRIVELSE

Original oppgavetekst er vedlagt i Vedlegg A. I samråd med begge veiledere er denne problemstillingen justert underveis. Endringene skyldes både en naturlig utvikling som følge av den prosessen et slikt forskningsprosjekt er, samt utfordringer underveis, knyttet til både laboratorieforsøk og analyseprogram. Oppgaven som er forsøkt besvart er gitt i det følgende.

### 1.2.1 Oppgavebeskrivelse

---

#### Forskningsmål

*Målet med oppgaven er å studere tetthetsparameterne til betong, med den hensikt å få bedre innsikt i fuktforholdene i en kjellervegg under grunnvannstand, for å kunne bygge bedre bygninger*

---

I denne oppgaven er det gjort vurderinger av fukttransport gjennom- og fuktbelastning fra betong i ulike kjellerveggkonstruksjoner under grunnvannstand, mot klimatiserte rom. Det er redegjort for hvordan ulike oppbygninger av kjellerveggen påvirker fukttilstanden, basert på beregninger med eksisterende materialdata i analyseprogrammet WUFI. Utformingen av veggkonstruksjonene er valgt i samråd med Skanskas bygningsfysikere.

Det er også forsøkt å kartlegge tetthetsparametere for et utvalg betongsammensetninger. Resultatene er brukt til å etterregne typisk fuktavgivelse fra betongkonstruksjonen.

### **1.2.2 Målsetning og hensikt**

Det er ønsket å kartlegge hvilke egenskaper som må ivaretas for å sikre vanntetthet i en yttervegg om er påført permanent vanntrykk. Samtidig er det gjort vurderinger av hvordan veggen bør bygges opp for å unngå at fuktavgivning fra betongen gir skader på resten av ytterveggen. Målet med denne oppgaven er å få bedre innsikt i fuktforholdene i en kjellervegg under grunnvannstand, mot fullklimatiserte rom.

I dette arbeidet er den mest komplekse faktoren betongen. For å kunne undersøke veggen som helhet er det først nødvendig med en god forståelse av fuktforholdene i betongen, og bedre kunnskap om fukttegenskapene til vanntett betong som brukes i norske bygg i dag.

### **1.2.3 Deloppgaver**

Det er gjort et parameterstudium for å se på de faktorene som påvirker fuktsituasjonen i kjellerveggkonstruksjonen og det er gjort en vurdering av hvilke som har størst betydning for fuktinnholdet, basert på eksisterende data. Vurderingen har gitt grunnlag for anbefalinger om oppbygning av slike konstruksjoner.

For å kunne gjøre gode vurderinger av kjellerveggen som helhet var det nødvendig fremskaffe materialdata for et utvalg norske betonger. Dette ble gjort ved laboratorieundersøkelser av ulike betongsammensetninger. Materialdataene ble lagt inn i analyseprogrammet WUFI og brukt til å etterregne et utvalg av veggkonstruksjonene som ble vurdert parameterstudiet.

Det er også gjort en vurdering av WUFIs egnethet som analyseprogram for slike konstruksjoner.

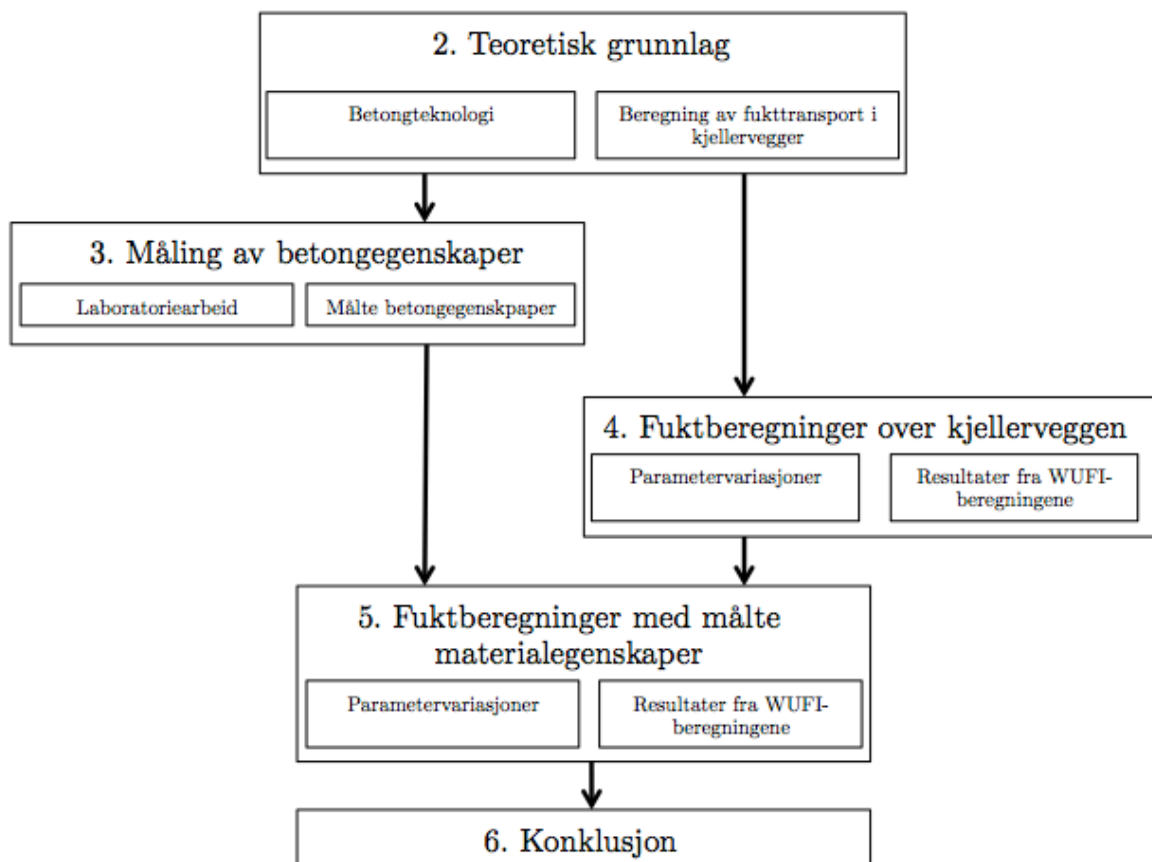
## **1.3 OPPGAVENS OPPBYGNING**

Arbeidet med denne oppgaven er delt i fire deler. Den første delen (kapittel 2) er kartlegging av teorigrunnlaget for oppgaven. Den andre delen (kapittel 3) tar for seg laboratorieundersøkelser av betongens egenskaper. I den tredje delen (kapittel 4) er det gjort et parameterstudium i dataprogrammet WUFI for et utvalg av parametere. Parameterstudiet vurderer ulike faktorer sin innvirkning på fukttilstanden i ytterveggen. Denne delen av oppgaven er undersøkt og skrevet parallelt med laboratorieundersøkelsene av betongen. Det er derfor kun utvalgte resultater fra betongundersøkelsene som er inkludert i disse beregningene.

Til slutt, i del fire (kapittel 5), redegjøres det for nye beregninger i WUFI hvor de parameterne som kom best ut i forstudien kombineres med resultatene fra undersøkelsene av betongen. På denne måten er det gjort mer realistiske beregninger med bedre løsninger i oppgavens siste del.

I hvert kapittel der det er gjort undersøkelser avsluttes det med en kort diskusjon av funnene.

En fremstilling av oppgavens oppsett er vist i Figur 1-1.



Figur 1-1 Oppgavens oppbygning

## 2 TEORETISK GRUNNLAG

---

Dette kapitlet tar for seg den aktuelle teoretiske bakgrunnen for denne oppgaven. Kapittel 2.1 omhandler betongteknologien, mens kapittel 2.2 tar for seg kjellervegger eksponert for vanntrykk og hvordan fuktsituasjonen i slike vegger kan beregnes ved dataprogrammer.

### 2.1 AKTUELL BETONGTEKNOLOGI

Fuktighet kan transporteres til eller fra et materiale, eller fra én del av materialet til en annen ved hjelp av ulike drivkrefter. I hvilken grad de ulike drivkreftene gir utslag i transport av fuktmengder avhenger av materialets egenskaper. Det er mange faktorer som påvirker fukttransport og –tilstanden i betong. Dette kapitlet tar kort for seg de materialeegenskapene som er undersøkt i denne oppgaven og forklarer hvordan variasjoner av disse egenskapene vil påvirke fuktinnholdet i betongen.

#### 2.1.1 Kombinasjon av damp- og væsketransport i betong

Betong er et *hygroskopisk materiale*, altså et materiale som kan ta opp og avgi vann til omgivende luft. Hvor mye vann som kan bindes hygroskopisk i betongen avhenger av den omgivende luftens relative fuktighet (heretter RF).

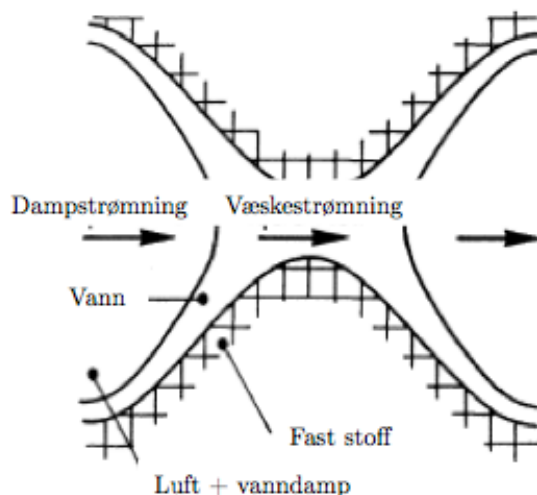
I vanlig betong med normalt tilslag transporteres vannet i sementpastaen. Det er pastaens mengde og kvalitet, sammen med hydratiseringsgraden som i hovedsak avgjør transporthastigheten (Herholdt et al., 1979). Siden den spesifikke overflaten øker med økende hydratiseringsgrad, øker også mengden vann som bindes hygroskopisk til overflaten med tiden (dersom RF er lav).

Vann i betong forekommer i tre forskjellige former (Herholdt et al., 1979):

1. *Kjemisk bundet* i hydratiseringsproduktene
2. *Gelvann* (fordampbart vann) bundet på de indre overflatene i sementgelen (pluss et lite tilskudd av vann bundet på tilslaget)
3. *Kapillært vann* i porene i sementpasta og tilslag og i grove hull i betongen

Forskjellen mellom vann som er kjemisk bundet og gelvannet ligger i mengden energi som skal til for å frigi det. Gelvannet kan fordampe ved vanlige brukstemperaturer og er definert som vann som fordampes ved temperaturer opp til 105 °C. Det kjemiske vannet fjernes ikke fullstendig før glødning ved 1000°C. Det er gelvannet sammen med det kapillære vannet det som utgjør fuktinnholdet i betongen. (Herholdt et al., 1979)

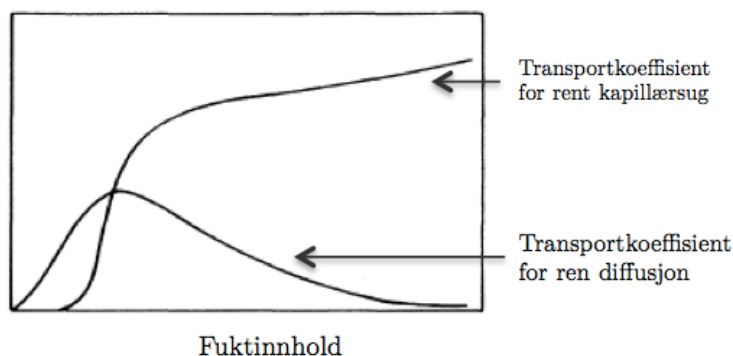
Fukttransport i betong skjer i hovedsak ved at vanndampmolekyler diffunderer gjennom poresystemet ved lav RF, mens det samtidig adsorberes (bindes) molekyler på poreveggene. Ved en bestemt RF har så mye vann adsorbent at det dannes menisker (buede væskeoverflater) i de små porene, se Figur 2-1. Etter dette skjer fukttransporten som en kombinasjon av diffusjon i de store porene, kapillærkondensasjon og fordamping i meniskene. Ved svært høy RF blir væsketransporten dominerende og diffusjonen har liten innvirkning (Ljungkrantz et al., 1994).



**Figur 2-1** Kombinert fukttransport i et materiale (Hedenblad, 1993)

Kapillærsug er den klart mest dominerende transportmekanismen for væsketransport. Væsketransport kan også foregå på grunn av vanntrykk eller trykkforskjeller, men disse mekanismene vil kun ha innvirkning i spesielle tilfeller. Vannttransporten som

følge av temperaturforskjeller er så liten at en blir neglisjert i det meste av litteraturen (Jacobsen, 2013). I hvor stor grad fukten transporteres i form av damp eller væske avhenger av RF i materialet. En prinsipiell fordeling mellom ren diffusjon og kapillærsug ved ulik RF er vist i Figur 2-2.



**Figur 2-2 Prinsipiell variasjon mellom koeffisientene for fukttransport ved diffusjon og kapillærsug (Hedenblad, 1993)**

Det er utarbeidet en rekke teoretiske formler for den totale fuktstrømmen som kombinasjon av damp- og væsketransport. Et av problemene med anvendelse av slike formler er at de to strømmene (vann og damp) ikke kan skilles ved forsøk/eksperimentell bestemmelse av fuktinnholdet. Det gjør at slike beregninger kun blir teoretiske, og vanskelig å verifisere (Johansson og Nilsson, 2006).

I en yttervegg utsatt for et permanent vanntrykk på utvendig side er fuktsituasjonen vanskelig å anslå. Det vil være ulik damppermeabilitet over tverrsnittet, spesielt ved lavt vann/bindemiddel-forhold (v/b-tall). Dersom RF er lav på tørr side (lavere enn 80 prosent) vil hydratasjonen opphøre (hvis den ikke allerede er ferdig), mens det på våt side vil være en kontinuerlig tilførsel av vann slik at all hydratasjon og ”aldring” foregår der (Nilsson, 2002). Dette innebærer at fukttransportegenskapene er forskjellige gjennom tverrsnittet og beregningssituasjonen blir dermed enda mer kompleks. Enkelte av disse aspektene blir presentert nærmere i det følgende.

### **2.1.2 Kapillær transport**

I situasjoner der betongen kommer i kontakt med fritt vann vil det forekomme *kapillærsuging*. Kapillærsug er opptaket av væske i et porøst materiale, som for eksempel vann i hydratisert sementpasta, på grunn adhesjonskreftene mellom materialets poreoverflater og vann (Geving og Thue, 2002). I betongkonstruksjoner forekommer dette primært i fundamenter, i undervannskonstruksjoner og på fasader utsatt for slagregn.

Den kapillære stighøyden, altså høyden et materiale kan suge væske kapillært kan være stor i betong, men stigeastigheten er langsom. Det er i praksis muligheten for uttørking på betongens øvrige overflater som bestemmer hvor langt inn i materialet fuktfronten vil trekke (Herholdt et al., 1979). Under grunnvannstand vil betongen alltid stå med påført vanntrykkslik og det vil ikke være noen uttørking på utsiden. Vannet vil i teorien trenge inn til den dybden der fordampingen på innsiden er i likevekt med det tilførte vannet. Denne likevekten er bestemt av fordampingsforholdene og gjør at en kjellervegg under grunnvannstand kan se tørr ut på overflaten selv om den suger kapillært på utsiden.

Ved horisontal transport er kapillærkreftene så store at tyngdekraften blir neglisjerbar og den teoretiske innsugningsevnen blir uendelig stor. Dette kommer av at porene i betong er svært små, de minste er i størrelsesorden 1-10 nm. Derfor skal alle betongkonstruksjoner som er i kontakt med vann i teorien kunne bli helt vannmettet, hvis fordampingen er forhindret. Fordi poresystemet er langt fra ideelt og porestrukturen også vil kunne blokkeres av luftbobler, vil dette likevel ikke være tilfellet, og oppsugingen i betongen vil være begrenset. (Herholdt et al., 1979).

Den kapillære absorpsjonsevnen er relativt entydig bestemt av porevolum og porestørrelsesfordeling i betongen, i tillegg til at den kan beskrives som en tidsfunksjon (Narum og Relling, 1991).

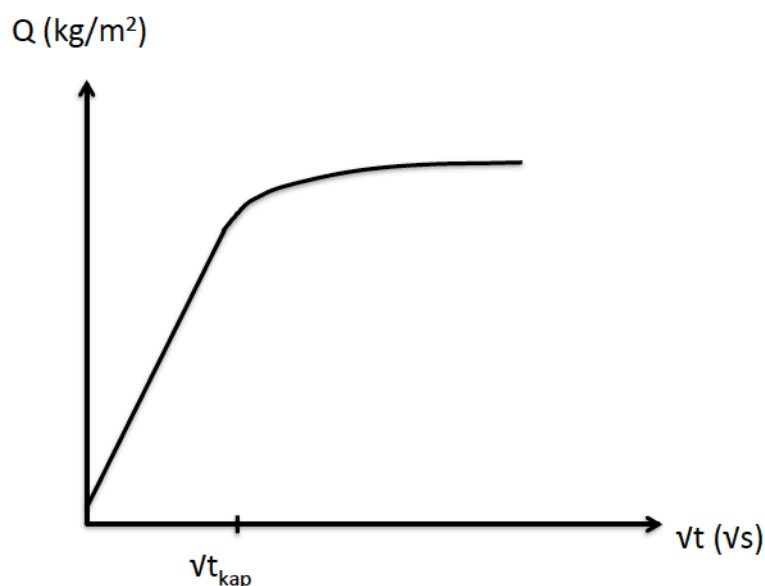
Fukt kan også transporteres gjennom betongen ved *kapillærkondensasjon*. Mengden adsorbent vann, vann som tas opp i betongen og fester seg på poreveggene, avhenger av RF. Ved  $RF \geq 45$  prosent dannes det krummede menisker i porene og vannet vil adsorberes gjennom kapillærkondensasjon (Herholdt et al., 1979). Metningspunktet over en krummet vannmenisk er lavere enn over en plan flate og derfor vil kondensering i poren kunne foregå ved RF som er lavere enn 100 prosent. Hvis RF i luften og dermed damptrykket rundt kapillærporen er større enn *metningstrykket* vil det skje en kondensasjon i kapillærporen, helt til den er vannfylt.

### **Kapillaritetstallet**

Kapillaritetstallet uttrykker hastigheten på vannoppsuget og den relative tiden vannfronten bruker på å nå en gitt høyde,  $z$ .

Kapillaritetstallet finnes ved forsøk. En prøve settes ca. 1 mm ned i vann, for så å veies periodisk, dette etterfølges av at prøven plasseres fullstendig neddykket i vann og til slutt i en trykktank med 50 atm. trykk (se kapittel 3.2.3 for mer omfattende beskrivelse). Figur 2-3 viser en prinsipiell absorpsjonskurve for et slikt prøvestykke, med adsorbent vann [ $\text{kg/m}^2$ ] som funksjon av kvadratroten til tiden.





**Figur 2-3** Prinsipielt absorpsjonsforløp for en betongprøve med en side i kontakt med vann

Kapillaritetstallet er helningen på denne kurven frem til ”knekkpunktet”. Dersom kapillaritetstallet  $k$  [(kg/m<sup>2</sup>\*vs)] er kjent kan den totale innsugde vannmengden  $Q_{kap}$  (kg/m<sup>2</sup>) ved tiden  $t$  beregnes fra likningen:

$$Q_{kap} = k \cdot \sqrt{t} \quad ( 1 )$$

Formelen for  $Q_{kap}$  er empirisk, men kan bevises teoretisk. Kvadratroformelene for vannmengden  $Q_{kap}$  har vist seg å passe godt for de første 10 mm av fukttransporten (Herholdt et al., 1979).

Hvor raskt betongen suger vann avhenger av porevolumet og -strukturen til betongen. Den faktoren som har størst innvirkning på disse egenskapene er  $v/b$ -tallet, som dermed også har stor innvirkning på kapillaritetstallet. Kapillaritetstallet øker med økende  $v/b$ -forhold. Silikastøv har også vist seg å ha en positivt effekt på porestrukturen. Betonger med silikastøv har vesentlig lavere kapillaritetstall enn betonger uten (Narum og Relling, 1991).

Kapillaritetstallet avhenger også av initiell fukttilstand i betongen. Kapillaritetstallet øker med økende fuktinnhold, siden fuktinnholdet påvirker det resterende porevolumet som kan fylles med vann. (Ljungkrantz et al., 1994). Når fuktmengden øker er det de små porene som fylles først. Det store spennet i porestørrelser påvirker derfor absorpsjonsevnen.

Når betongen begynner å nærme seg å bli vannmettet vil fuktopptaket avvike fra den lineære sammenhengen med kvadratroten av tiden. Det er funnet mange teoretiske

sammenhenger som brukes for å beskrive væsketransport i porøse materialer ved kapillærsug, men på grunn av betongens strukturelle uregelmessigheter er det fremdeles vanskelig å gjøre nøyaktige beregninger.

## Motstandstallet

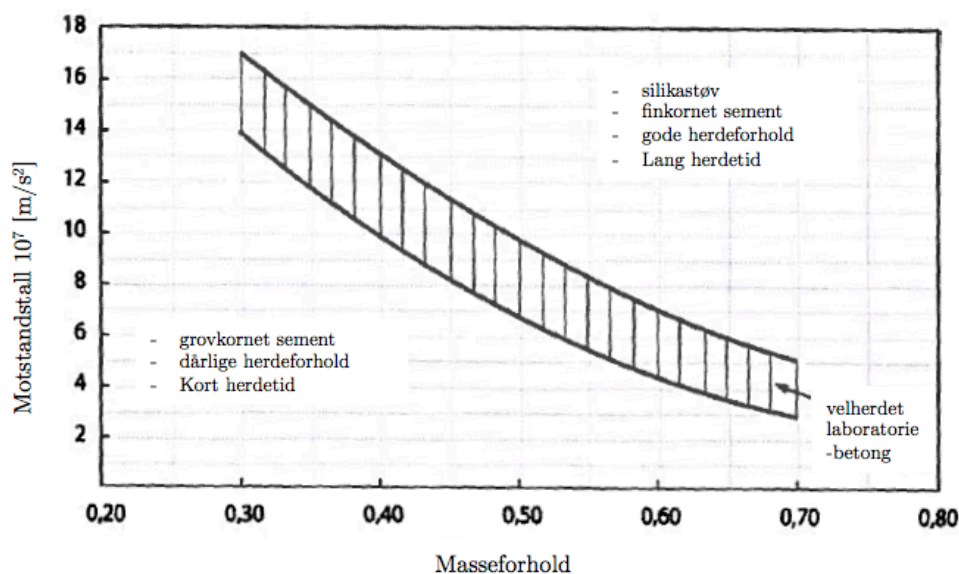
Størrelsen på porene avgjør hvor raskt de suger vann og små kapillærrør suger saktere enn store. Siden betongens sugsevne også avhenger av voluminnholdet av sement i betongen kan ikke kapillaritetstallet brukes for å beskrive finheten til poresystemet, men det kan motstandstallet (Jacobsen, 2013).

Motstandstallet,  $m$  [s/m<sup>2</sup>], forteller om vannfrontens inntrengingshastighet i betongen og er definert som

$$t_{kap} = m \cdot z^2 \quad (2)$$

Der  $t_{kap}$  er tiden frem til absorpsjonskurven ”knekker” (Figur 2-3) og  $z$  er vannets inntrengingsdybde. ”Knekket” inntreffer når inntrengingsfronten når toppen av prøvestykket.

Figur 2-4 viser forventet sammenheng mellom v/b-tall og motstandstall. Figuren er basert på en rekke forsøk utført ved NTNU/SINTEF. Velherdet, laboratoriestøpt betong har motstandstall som skal ligge på oversiden av kurven. Forsøk fra de siste årene viser at betonger med forskjellige bindemiddelblandinger (flyveaske, silikastøv og forskjellige typer sement) vil gi større spredning i verdier. Silikastøv har en entydig positiv effekt på motstandstallet (Narum og Relling, 1991).



Figur 2-4 Forventet sammenheng mellom motstandstall og v/c-tall (Jacobsen, 2013)

Siden kapillaritetstallet er så avhengig av betongens kapillære volum kan det være følsomt for lokale forskjeller som følge av ulik tilslagsfordeling og pastamengde. I praksis vil kapillaritetstallet derfor kunne forventes å variere mer enn motstandstallet, som primært er avhenger av porestørrelsesfordelingen i det kapillære området.

### **2.1.3 Vanndamptransport**

Ren vanndamptransport foregår bare ved lav RF (mindre enn ca. 40 prosent) der det ikke er kapillært vann i porene. Ved tilstrekkelig lav RF vil damptrykkforskjellene gå mot en utjevning ved at det diffunderer vanndampmolekyler fra områder med høy konsentrasjon til områder med lav. Ved høyt damptrykk vil det oppstå kapillærsug. Ved mellomstort damptrykk vil kapillærtransport og vanndampdiffusjon foregå samtidig.

#### **Vanndampdiffusjon**

Vanndampdiffusjon kan uttrykkes ved partialtrykkdifferanse eller med en konsentrasjonsgradient. Diffusjonen avhenger blant annet av mengde vann i betongen, avstand fra overflaten, tiden og temperaturen. For eksempel påvirker dampinnholdet diffusjonen fordi damp som trenger inn i materialet reduserer den frie luftmengden og reduserer dermed muligheten for videre diffusjon.

Det finnes mye litteratur som tar for seg den teoretiske, matematiske bakgrunnen for damptransporten. Dette vil ikke bli presentert i denne oppgaven. Mye av det som er skrevet i litteraturen om fukttransport ved damptrykkforskjeller forutsetter stasjonære forhold. Det vil i virkeligheten ta svært lang tid før forholdene i betongkonstruksjoner er stasjonære, spesielt når det er forskjellig fuktsituasjon på hver side av konstruksjonen. For eksempel vil et 200 mm tykt dekke i et kontorbygg normalt ikke være i fuktlikevekt med omgivelsene fem år etter ferdigstillelse (Smeplass, 2014). Noen prinsipielle uttrykk for materialets diffusjonsegenskaper presenteres likevel i det følgende

#### **Uttrykk for materialets diffusjonsegenskaper**

Det er mange ulike faktorer og koeffisienter som brukes for å uttrykke vanndampdiffusjonen gjennom et materiale. Flere av disse diffusjonsegenskapene kan finnes ved undersøkelser av vanndampgjennomgang gjennom et prøvestykke (se kapittel 3.2.4).

Vanndamppermeansen [ $\text{kg}/(\text{m}^2\text{sPa})$ ] beskriver vanndampgjennomgangen gjennom et materiale og er beskrevet ved

$$W = \frac{G}{A * \Delta p_v} \quad (3)$$

Der  $G$  er vanndampstrømning gjennom prøven [ $\text{kg}/\text{s}$ ],  $A$  er arealet til prøven [ $\text{m}^2$ ] og  $\Delta p_v$  er forskjell i vanndamptrykk over prøven [ $\text{Pa}$ ].

Prøvens vanndampmotstand,  $Z$  [ $(\text{m}^2 \text{ s Pa})/\text{kg}$ ], er definert som den inverse av vanndamppermeansen. Dampmotstanden blir større for tettere betonger (for eksempel med lavt  $v/b$ -tall eller med silikastøv).

$$Z = \frac{1}{W} \quad (4)$$

Et annet mål på vanndampmotstanden i et materiale er ekvivalent luftlagstykkelse,  $S_d$ , [ $\text{m}$ ]. Ekvivalent luftlagstykkelse er tykkelsen til en stillestående luftlag som har samme vanndampmotstand som prøvestykket med tykkelse  $d$ .  $S_d$  finnes ved omregning av vektendringen til et prøvestykke. Den ekvivalente luftlagstykkelsen kan regnes ut ved

$$S_d = \mu * d \quad (5)$$

Eller

$$S_d = \delta_{luft} * Z \quad (6)$$

Der  $\mu$  er vanndampdiffusjonens motstandsfaktor [-], altså vanndamppermeabiliteten til luft ( $\delta_{luft}$ ) [ $\text{kg}/(\text{m s Pa})$ ] dividert med vanndamppermeabiliteten til materialet ( $\delta$ ) [ $\text{kg}/(\text{m s Pa})$ ] og  $d$  er materialets tykkelse [ $\text{m}$ ] (Standard Norge, 2001).

Vanndampmotstandsfaktoren,  $\mu$ , er en betegnelse som brukes mer og mer for materialer som brukes med forskjellige tykkelser. Den er definert som forholdet mellom damppermeabiliteten til luft og til det aktuelle materialet, slik at  $\mu = 100$  betyr at materialet har 100 ganger større motstand mot vanndampdiffusjon enn et stillestående luftsjikt med samme tykkelse (Time et al., 2004). Bruk av vanndampmotstandsfaktoren egner seg bare når et materiale har samme vanndampoverføringshastighet uavhengig av tykkelse.

Vanndamppermeabiliteten,  $\delta$ , til et materiale kan uttrykkes ved

$$\delta = W * d \quad (7)$$

En tett betong (lavt v/b-tall) vil gi lave verdier for vanndamppermeabiliteten. Verdien vil øke med økende mengde sement betongen, siden betongens porevolum er direkte proporsjonalt med sementmengden ved et gitt v/b-forhold. Samtidig gir økende hydratiseringsgrad lavere verdier på grunn av redusert kapillærporøsitet (Ljungkrantz et al., 1994).

Diffusjonsegenskapene endres med RF. Noe litteratur oppgir verdier for dampdiffusjonsegenskapene for en RF-verdi som er en middelvei av luftfuktigheten på begge sider av vegg. Slike verdier bør kun benyttes til overslagsberegninger. For mer nøyaktige beregninger bør diffusjonen beregnes som en funksjon av RF.

Noen veiledende verdier for de ulike faktorene og koeffisientene er gitt i Tabell 2-1 og Tabell 2-2.

**Tabell 2-1 Vanndamppermeabilitet og vanndampmotstandsfaktor for betong med v/c-tall 0,4 og 0,5 (Byggforsk, 2003)**

Materiale	Vanndamppermeabilitet, $\delta$ [10 <sup>-12</sup> kg/msPa]				Vanndampmotstandsfaktor, $\mu$			
	Relativt fuktnivå i materialet (%RF)							
	35-70	70-80	80-90	90-95	35-70	70-80	80-90	90-95
Betong v/c 0,4	1,0-1,4	1,4-2,1	2,1-3,9	3,9-5,2	139-195	94-139	51-94	37-51
Betong v/c 0,5	1,0-1,5	1,5-2,4	2,4-7,4	7,4-21,0	131-195	82-131	27-82	9-27

**Tabell 2-2 Vanndampmotstand for betong med v/c-tall 0,4 og 0,5, uttrykt ved Z og ekvivalent luftlagstykkelse, basert på data fra Tabell 2-1 (Byggforsk, 2003)**

Materiale	Tykkelse [mm]	Vanndampmotstand, Z [10 <sup>9</sup> m <sup>2</sup> sPa/kg]				Ekvivalent luftlagstykkelse, S <sub>d</sub> -verdi [m]			
		Relativt fuktnivå i materialet (% RF)							
		35-70	70-80	80-90	90-95	35-70	70-80	80-90	90-95
Betong v/c 0,4	100	71-100	48-71	26-48	19-26	14-20	9,4-14	5,1-9,4	3,7-5,1
Betong v/c 0,5	100	67-100	42-67	14-42	4,8-14	13-20	8,2-13	2,7-8,2	0,9-2,7

#### 2.1.4 Betongens vanntrykkspermeabilitet

Der det er åpne, sammenhengende porer i et materiale kan vann i væskeform presses gjennom hvis det er forskjellig trykk på to sider av elementet. Væskestrømmen som ledes gjennom betongen avhenger av vanntrykket, væskens viskositet og porenes størrelse, fordeling og kontinuitet. Den aller største årsaken til væskestrøm gjennom betong er riss og sprekker, men det blir ikke behandlet i denne oppgaven.

Når betongen blir eldre vil den også bli tettere som følge av økt hydratisering. Ved lave  $v/b$ -tall kan porene bli så fine at kapillærkreftene helt overstyrer de ytre trykkforskjellene, slik at det i praksis ikke blir noen strømning gjennom betongen. Ved bruk av standard, vanntett betong uten skader, vil det dermed være minimalt med væskegjennomstrømning. Dette er derfor ikke noe fokus i denne oppgaven.

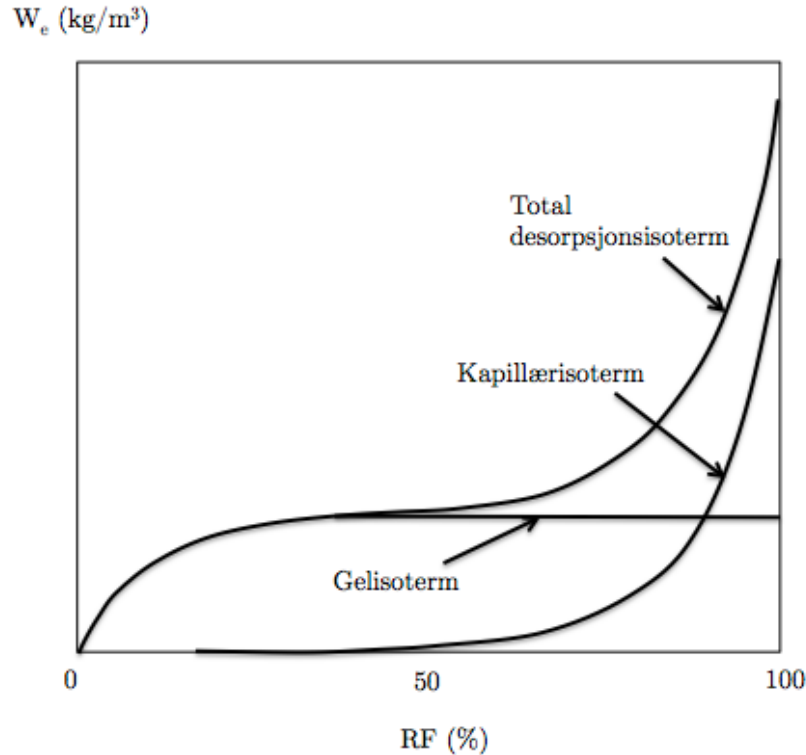
#### 2.1.5 Sorpsjonskurver

Når et materiale avgir fukt til omgivelsene kalles det desorpsjon, mens det motsatte, at materialet tar opp vann, kalles adsorpsjon. (Må ikke forveksles med absorpsjon, som er når et materiale "suger" til seg et stoff så det blir fordelt i det indre volumet til absorbenten). Adsorpsjon innebærer at molekyler av et stoff bindes til overflaten av et annet stoff. Et fellesbegrep for vannopptakelse og -avgivelse er sorpsjon.

Når en vannmettet betong blir eksponert for RF under 100 prosent vil vannet begynne å fordampe fra porene. Dette skyldes at vanndamptrykket i betongens porer er større enn i den omgivende luften (Herholdt et al., 1979). Denne fordampingen fortsetter til det er likevekt mellom damptrykket i kapillærporene og luften. Vannmengden i porene ved likevekt kalles likevektsfuktighet. For  $RF = 0$  i luft er fuktinnholdet i betongen ved likevekt også 0. Likevekt ved  $RF = 100$  prosent tilsvarer i prinsippet at alle porene i materialet er fylt med vann.

Kurvene som angir likevektsfukten ved ulike RF kalles sorpsjonskurver. Disse er temperaturavhengige, slik at hver kurve kun gjelder for en gitt temperatur. Generelt øker likevektsfuktigheten med synkende temperatur. Det betyr at en senkning i temperaturen vil føre til en økning i mengde hygroskopisk bundet vann.

Porestrukturen til betongen kan delvis vurderes ut i fra sorpsjonskurvene. Undersøkelser viser (Relling, 1999) at høykvalitetsbetong og betong med silikastøv har relativt flate isotermer ved de øverste RF. Dette betyr at de små porene binder mer av vannet enn i vanlige betonger. For lave RF-verdier er det gelporene som tar til seg mest fuktighet, mens kapillærporøsiteten ikke får noen innvirkning på vannabsorpsjonen før ved rundt 50 prosent RF, se Figur 2-5 .



Figur 2-5 Eksempel på en teoretisk desorpsjonsisoterm, vist ved gel- og kapillærisoterm (Mjörnell, 1994)

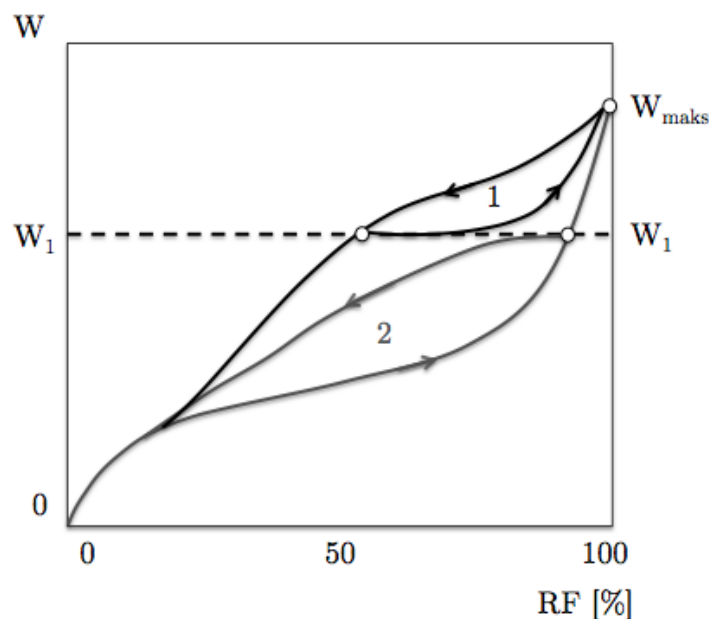
Helningen på sorpsjonskurvene,  $dW/d(RF)$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ], kalles fuktkapasitet. Fuktkapasiteten er en viktig materialegenskap som beskriver et materiales evne til å lagre fukt ved en endring av fukttilstanden (Ljungkrantz et al., 1994). Materialer som har stor fuktkapasitet, som betong, har også stor *fukttreghet* ved klimaendringer, det vil si at fuktinnholdet endres langsomt og bruker lang tid på å stabilisere seg (Herholdt et al., 1979). Denne fuktkapasiteten avhenger av fuktinnholdet i betongen, og ved høyt fuktinnhold er gradienten, og dermed også fuktkapasiteten, stor.

Sorpsjonskurvene er velkjente og brukes mye i datamodeller for fukttransport for å angi fuktkapasiteten til bygningsmaterialer. Kurvene brukes til å angi hvor mye fukt som må adsorberes eller frigis fra et materiale når de utsettes for en endring i RF. I WUFI (og i de fleste andre programmer) angis denne kurven som en enkeltkurve som gir direkte oversikt over forholdet mellom RF og fuktinnhold.

Fuktnivået i betongen ved en gitt RF blir ikke likt ved oppfukting og tørking og det skilles derfor mellom kurver for adsorpsjon og desorpsjon. Adsorpsjonskurvene ligger noe under desorpsjonskurvene på grunn av hysteresis i betongen, altså at virkningen av en ytre påkjenning ikke forsvinner når den fjernes. Dette innebærer at fuktinnholdet ikke går tilbake til sine tidligere verdier når sorpsjonsprosessen reverseres. I stedet blir den nye "veien" avhengig av den tidligere adsorpsjons- og

desorpsjonssekvensen. En må ta hensyn til denne effekten når fuktfordelingen i betong estimeres (Åhs, 2008).

I praksis vil ikke materialet oppfuktes fra fullstendig tørket tilstand, og det tørkes ikke fra fullstendig vannmettet. Derfor vil sorpsjonskurvene i alle tilfeller havne et sted mellom adsorpsjon- og desorpsjonsisotermene. Figur 2-6 viser det prinsipielle utseende til slike overgangskurver (også kaldt scanningkurver). Kurve 1 viser et materiale som først tørkes til nivå  $W_1$  for så å oppfuktes igjen, mens kurve 2 viser et materiale som først fuktes til nivå  $W_1$  og siden tørkes (Ljungkrantz et al., 1994). Overgangskurvene gir en mindre endring i fuktinnhold ved endring av RF enn desorpsjonsisotermen.



Figur 2-6 Prinsipielt forløp hos overgangsisotemer

Det er få av modellene for fuktinnhold og -transport som tar hensyn til hystereseeffekten i betong. Det meste av det som er publisert innen emnet er undersøkelser som er gjort på eldre betong. Nettopp fordi fukthistorikken er en så viktig faktor kan ikke slike resultater brukes for nye konstruksjoner (Åhs, 2008).

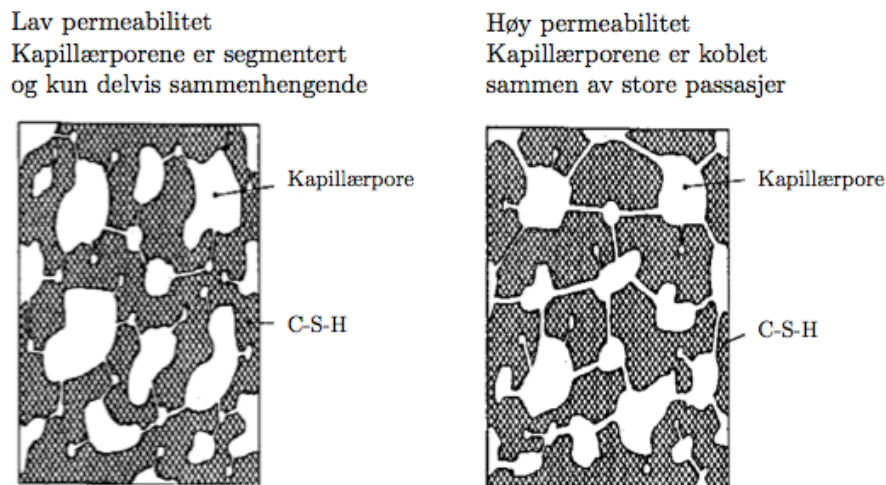
Datagrunnlaget for fuktkapasiteten til norske betonger er relativt dårlig. Dette skyldes blant annet at det er svært tidskrevende å måle.

### 2.1.6 Porøsitet

Tilstedeværelsen av porer påvirker nesten alle betongens egenskaper. Det er viktig å være oppmerksom på at det er ikke bare porevolumet som påvirker betongegenskapene, men også deres form og størrelse. Hvordan poresystemet er

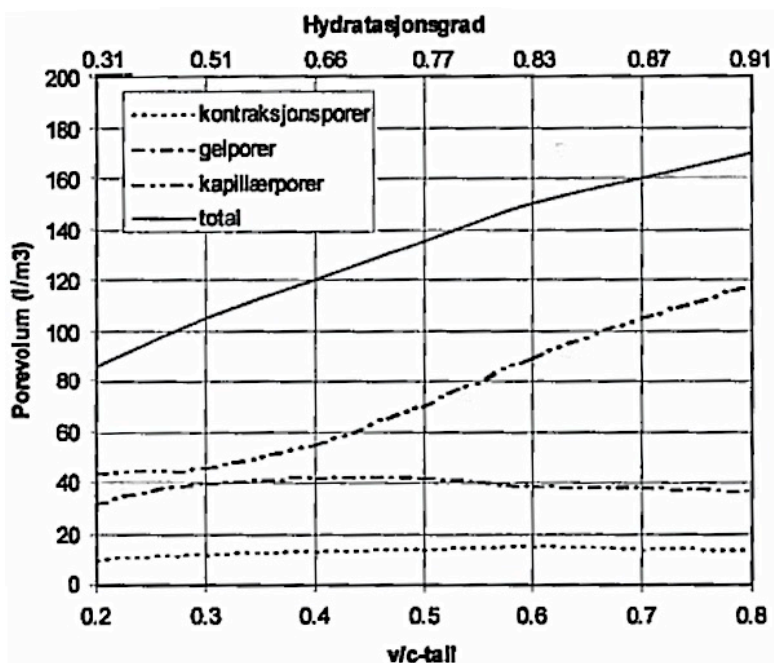


koblet sammen er avgjørende for betongens evne til å transportere fukt. Figur 2-7 viser hvordan to betonger med lik porøsitet kan ha vesentlig forskjellig porestruktur og dermed ulik evne til fukttransport.



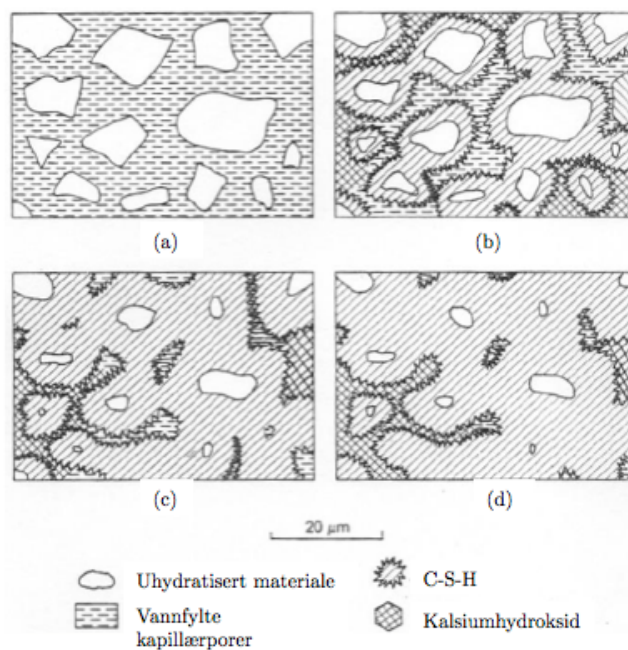
Figur 2-7 Materialer med lik porøsitet og forskjellig permeabilitet (Jacobsen, 2013)

Kapillærporevolumet øker kraftig med økende v/b-tall, mens kontraksjonsporevolumet og gelporevolumet er omtrent uforandret (Figur 2-8). Porestrukturen er vesentlig finere ved lavere v/b-tall.



Figur 2-8 Sammenheng mellom porevolum og v/c-tall etter 28 dagers herding (Jacobsen, 2013)

Betongens porestruktur og porøsitet forandres med tiden, og hydratiseringen gjør at det tar svært lang tid før fukttransporten blir stasjonær. I tillegg vil karbonatisering og utfelling av smuss og støv i overflaten endre forholdene med tiden. For eldre betong er hydreringsgraden omtrent gitt, men fukthistorikken og forbehandlingen påvirker fremdeles permeabiliteten. Figur 2-9 viser hvordan mikrostrukturen i sementen utvikler seg ved herding. Det er synlig hvordan porøsiteten reduseres med økende hydratiseringsgrad.



**Figur 2-9** Mikrostruktur i sementpasta ved a) miksing b) 7 dager c) 28 dager og d) 90 dager ( $v/c < 0,5$ ) (Jacobsen, 2013)

Herding ved høy temperatur vil gi grovere porestruktur, lavere styrke og redusert densitet (Ljungkrantz et al., 1994).

Innblandet luft, store luftporer, er kapillærbrytende og tvinger vannet til å ta omveier rundt porene (Herholdt et al., 1979). Men luftporene gir ingen motstand mot diffusjon, så damptransporten går forttere gjennom disse porene. Dermed vil luftmengden i betongen påvirke både kapillær- og damptransporten, men i motsatt retning av hverandre.

### 2.1.7 Effekt av tilsetningsmaterialer

Kalkstein er hovedråvaren ved produksjon av sement. I sementproduksjonen blandes kalksteinen med andre mindre bestanddeler (blant annet bauxitt, kvarts og gips). Når sementen tilsettes vann dannes reaksjonsproduktene kalsiumsilikahydrat (kalles ofte CSH) og kalk. Det er dette som gjør betongen hard. Denne prosessen har et kjemisk

svinn som kommer av at reaksjonsproduktene har et volum som er litt mindre enn reaktantene (sement og vann).

Det er vanlig å tilsette pozzolaner, som silikastøv eller flyveaske, i betongen. Når disse stoffene reagerer med kalk dannes etter hvert CSH. Denne reaksjonen har dobbelt så stort kjemisk svinn som hydratisering av sement. Dette gjør at tilsetning av pozzolaner gir noe økt kontraksjonsporevolum (Smeplass, 2014). Pozzolanreaksjonen binder heller ikke vann på samme måte som sementhydratiseringen. Ved å erstatte en mengde sement med tilsvarende mengde pozzolaner får man derfor også en økning i kapillærporøsiteten.

Den totale porøsiteten til betongen blir altså større ved bruk av silikastøv eller flyveaske enn ved bruk av vanlig portlandsement, men siden porestrukturen i pozzolansementer er finere enn ved portlandsement er ikke dette nødvendigvis en negativ bieffekt (Smeplass, 2014). Finere porestruktur betyr at materialet er tettere. Den positive effekten på porestrukturen er ofte så stor at den overskygger den negative effekten av økt porevolum.

Slagg (hydraulisk tilsetningsmateriale) kan også brukes til å erstatte deler av sementen. Det gir omtrent det samme kjemiske svinnet som portlandsement, og det bidrar til å forbedre porestrukturen og dermed en tettere betong.

## **2.2 BAKGRUNN FOR FUKTTEKNISK ANALYSE AV KJELLERVEGGER**

Fuktsituasjonen i betongvegger under grunnvannstand, mot klimatiserte rom, er svært kompleks. Kapittel 2.2 tar kort for seg prinsippene bak fukttransport i analyseprogrammet WUFI. Det blir også diskutert hvilke faktorer som kan påvirke resultatene, og hva det er som gjør at disse har en innvirkning på fuktsituasjonen.

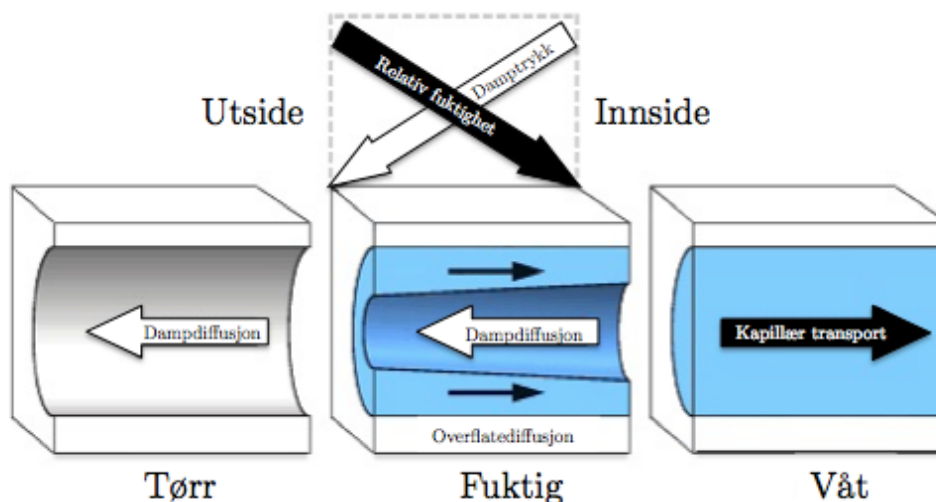
### **2.2.1 Databeregninger for fukttransport**

For å få realistiske verdier for fukttransporten og endringen av fuktinnholdet i kjellervegger med påført vanntrykk over tid er det nødvendig med datasimuleringer/analyseprogrammer.

I denne oppgaven er WUFI 1D brukt som beregningsprogram. WUFI 1D (Wärme und Feuchte instationär (transient varme- og fukttransport)). Det er et endimensjonalt dataprogram for beregninger av kombinert varme- og fukttransport i bygningselementer. Programmet utfører beregninger av ikke-stasjonære, hygroskopiske forhold i bygningskomponenter ved naturlige klimabetingelser over tid.

## Beregninger av fukttransport i WUFI

Damp- og væsketransport oppfører seg ikke alltid likt. Dampdiffusjonen går fra varm til kald side og væsketransporten går fra vått til tørt, det er ikke alltid den kalde og den tørre siden er den samme (som vist i Figur 2-10). For å skille mellom transport av gass- og væske i porøse materialer bruker WUFI to ulike drivende potensialer for fukttransporten; damptrykk og RF.



Figur 2-10 Fukttransport i en pore i en massiv yttervegg om vinteren, for variabelt fuktinnhold (Fraunhofer IBP, 2012)

Både damptrykket og RF er kjente parametere som det er lett å måle, og som ofte kan hentes ut fra oversikter over standard materialdata, dersom det ikke er nødvendig med helt nøyaktige beregninger. En annen fordel med å bruke damptrykk og RF som drivende potensialer er at de begge er kontinuerlige over hele tverrsnittet. Et er altså ingen diskontinuitet ved grensesnitt mellom materialer.

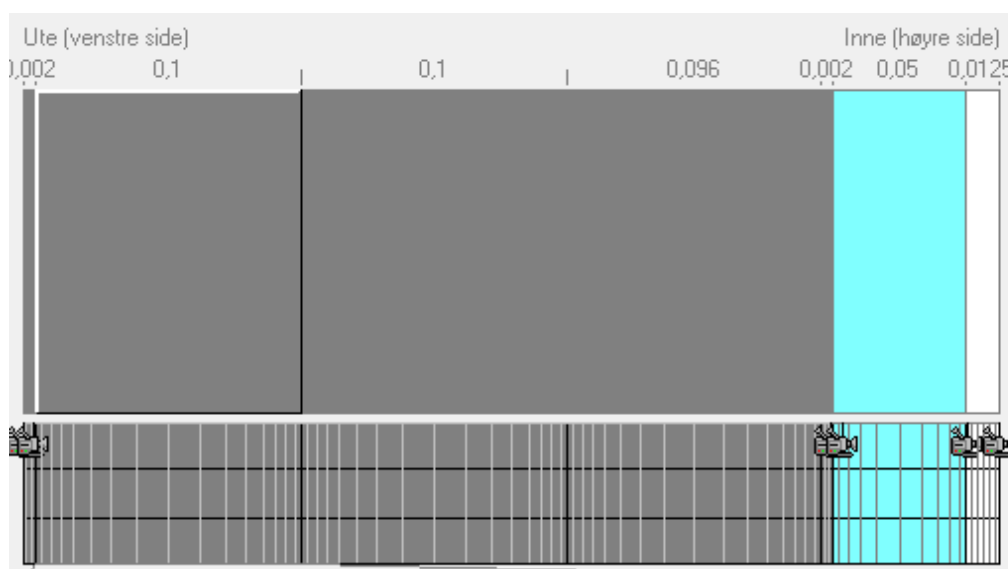
Den totale fukttransporten er en kombinasjon av damp- og væsketransport i poresystemet. Siden porevanntrykket er en funksjon av dampinnholdet, hvis temperaturen er konstant, kan væsketransporten beskrives med en dampgradient. Derfor regner WUFI den totale fukttransporten ved at kapillær transport omregnes til en tilsynelatende diffusjonsprosess som legges til den rene vanndampdiffusjonen.

### Nøyaktighet i den numeriske løsningen

For å løse transportlikningene bruker WUFI en iterativ metode (WUFI, 2012). Nøyaktigheten til den numeriske løsningen avhenger av hvilke termineringskriterier som er satt for iterasjonen. I tillegg har også lengden på tidsintervallene og størrelsen på elementene i den numeriske strukturen betydning.

Termineringskriteriene for itereringene er i de fleste tilfeller at maksimalendring ved to etterfølgende itereringssteg er mindre enn én tusendel av én prosent i RF, og én tusendel av én grad i temperatur (Künzel, 1995).

Elementstørrelsen i den numeriske strukturen avhenger av de forventede fukt- og temperaturområdene i bygningsdelen. Der det er store fukt- og temperaturgradienter, og i grensesnitt mot andre sjikt, er det nødvendig å regne på elementstørrelser på bare noen få millimeter, mens avstandene mellom elementene i tilfeller med liten gradient kan være opp til flere centimeter. For å spare lagringskapasitet og beregningstid, uten å tape nøyaktighet, er det nødvendig å lage en numerisk struktur med varierende elementstørrelser. Figur 2-11 viser en av veggkonstruksjonene i denne oppgaven med tilhørende elementstruktur. Elementene er mindre mot andre sjikt, og de er mindre i gipslaget (helt til høyre) enn i de øvrige sjiktene (i denne figuren er betongen delt inn i flere sjikt for å bedre kunne kartlegge fukttransporten gjennom tverrsnittet. Dette oppsettet har ingen betydning for resultatet av beregningene).



**Figur 2-11** Veggkonstruksjon i WUFI med oversikt over ulike sjikt. Elementstrukturen er vist nederst.

En veldig viktig faktor knyttet til nøyaktigheten til den numeriske løsningen er kvaliteten på input-dataene. Er ikke kvaliteten på disse gode, vil ikke sluttresultatet bli nøyaktig. For mange materialer er ikke de nødvendige parameterne tilstrekkelig kartlagt, og dette kan gi en stor usikkerhet i resultatene. Dette gjør at WUFI i mange tilfeller egner seg bedre til å vurdere tendenser enn direkte resultater og tallverdier.

Det er skrevet mer om den praktiske bruken av WUFI og andre analyseprogrammer i kapittel 4.1.

### 2.2.2 Forhold som påvirker fukttilstanden i kjellerveggen

Ved fukteregninger er det ikke alltid nødvendig at alle inputparameterne er like nøyaktige for å få et godt resultat. Det kan derfor være hensiktsmessig å kartlegge hvilke materialer og omgivelsesfaktorer som er viktigst slik at mest tid og ressurser kan legges i å undersøke disse tilstrekkelig.

I denne oppgaven er hovedtyngden i forbindelse med beregningene lagt på kartlegge betongegenskapene (kapittel 3). Det er like vel viktig å gjøre noen enkle vurderinger av de øvrige parameterne også, for å sikre at øvrige inputparametere holder tilfredsstillende kvalitet. I slike vurderinger kan en støte på en rekke vanlige problemer forbundet med materialparametere (Geving og Thue, 2002), blant annet at:

- Målinger finnes ikke for det aktuelle materialet
- Målinger finnes bare for noen få parametere. En må da vurdere om parameterne som mangler kan hentes fra liknende materialer
- Avhengighet av temperatur eller fuktinnhold er ikke, eller bare delvis, målt
- Egenskapene til et produkt alltid vil ha en statistisk variasjon, mens vi normalt bare kjenner middelverdiene
- Materialeegenskapene til en type produkt kan variere mye avhengig av produksjonsmetode, overflatebehandlinger osv.

Fuktinnholdet og -transporten i en betongvegg under bakken avhenger av betongens sammensetning og herdeforhold, det ytre vanntrykket, årstidsvariasjoner i utetemperatur, temperatur og fuktforhold i den klimatiserte sonen, samt konstruksjonens geometri og utforming. Innvirkningene konstruksjonens utforming har på fuktforholdene er presentert i det følgende.

#### **Termisk isolasjon**

Termisk isolasjonen i ytterveggen hindrer varmetap fra bygget til grunnen, men den er også viktig i et fuktteknisk perspektiv. Isolasjon på utsiden øker temperaturen i resten av konstruksjonen, og reduserer med det RF og derfor også faren for kondens og fuktskader innover i veggen. Ved å kun ha utvendig isolering av betongvegger reduseres fargen for fuktskader i veggen betraktelig (Geving og Thue, 2002).

Dersom en yttervegg mot terreng like vel skal isoleres på innsiden bør minst 1/3 av isolasjonen plasseres utvendig. (Geving og Thue, 2002). Ved innvendig isolasjon anbefales det å ha et lag isolasjon mellom betongen og stenderne/bunnsvillen for å unngå direkte kontakt mellom stendere/sviller og den fuktige betongen.

Det er ikke uvanlig å bruke bortimot like mye isolasjon i vegger under bakken som over. Dette gjøres for å forenkle arbeidet i byggefasen. Det er også en lett måte å bedre det totale U-verdiregnskapet til bygget på. Den positive isolasjonseffekten til grunnmassene brukes for å kunne godta høyere U-verdier andre steder i bygget (Bakkejord, 2015).

Dimensjonerende varmemotstand må tradisjonelt korrigeres for fuktinnholdet i den termiske isolasjonen. Hvor mye varmemotstanden reduseres av økt fuktinnhold avhenger av isolasjonstype (SINTEF Byggforsk, 2004).

## **Betong**

I en kjellervegg påført vanntrykk er det betongen som sikrer konstruksjonens vanntetthet. I Norge er vanntett betong klassifisert som betong med vann-  
sementforhold på mindre enn 0,5. En slik klassifisering kan gi et stort spenn i materialegenskaper for betongen. For å gjøre gode beregninger er det derfor nødvendig med mer materialinformasjon.

Betongen er helt essensiell for konstruksjonens funksjonalitet, men den er også kilde til stor usikkerhet ved beregning av fukt i og gjennom veggen.

Fukttransport og -innhold i betong er diskutert mer utfyllende i kapittel 2.1.

## **Innvendig kledning**

Det er naturlig å tenke seg at en vegg i et klimatisert rom vil ha innvendig kledning. En eksponert, ubehandlet betongvegg vil ha dårlig innvirkning på innklimaet på grunn av til blant annet akustikk i tillegg til at den ofte oppfattes som mørk, kald og lite pen. Den mest hensiktsmessige måten ikle veggen på er å lekte ut veggen på innsiden. Dette gir mulighet for å trekke ledninger og rør langs veggen, og en unngår at kledningen blir plassert direkte mot den fuktige betongveggen.

I tradisjonelle yttervegger er det vanlig å bruke dampsperre for å hindre oppfukning på grunn av luftlekkasjer og vandampdiffusjon fra inneluften. Dette er annerledes for vegger under grunnen, der det frarådes bruk av innvendig dampsperre dersom oppfyllingen er mer enn en halve vegghøyden (Geving og Thue, 2002). Dette skyldes at et konstant fuktig klima på utsiden gjør at den eneste uttørkingsretningen er innover. I tillegg til fukten utenfra har vegger med plasstøpt betong en stor andel innebygd fukt. For å kunne tørke ut dette raskere vil det være en fordel med en dampåpen konstruksjon.

Dersom betongen er påført en konstant trykk på en side og det er gode uttørkingsmuligheter på motsatt side er det grunnlag for store fuktstrømninger

gjennom materialet. Dersom veggen er ikledd fuktfølsomme materialer på innvendig side kan denne fuktstrømmen bidra til store fuktskader. Den ensidige uttørkingen vil også påvirke inneklimaet i rommet der uttørkingen finner sted.

Tradisjonelt gjelder det at lav dampmotstand i innvendig kledning øker risikoen for kondens bak kledningen, på grunn av fukt fra inneluften. I dette tilfellet, der det ikke er noen uttørkingsmuligheter utover, må det vurderes hva som er mest hensiktsmessig; å la fukten fra betongen og eventuelt utenfra tørke innover, eller å unngå fukt fra inneluften å slippe inn i konstruksjonen. Den standardiserte løsning for dette tilfellet er det førstnevnte.

### **Innvendig klima**

For å kunne beskrive inneklimaet i et bygg rett, trenger man informasjon om temperatur, RF, strålingstemperatur, lufttrykk, fuktproduksjon, ventilasjon, infiltrasjon og brukermønstre. Innvendig luftfuktighet er ofte enkeltfaktoren som har størst betydning for kondensfaren (Geving og Thue, 2002), spesielt i konstruksjoner der dampsperre ikke benyttes. Generelt bør innendørs luftfuktighet holdes relativt lav, samtidig som ventilasjonen må være god for at dampåpne konstruksjoner skal fungere. Størrelse og retning på damptrykkgradienten vil avhenge av fuktinnholdet i inneluften. I en viss dybde under terrengnivå kan en ha betingelser for diffusjon innover en periode om vinteren og utover en periode om sommeren (Geving og Thue, 2002).

### **Utvendig klima**

Temperaturen på utsiden av en vegg under grunnen vil avhenge av flere forhold, blant annet;

- Isolasjonstykkelse
- Type grunn/jordsmonn
- Dybde
- Fuktinnhold i grunnen
- Temperaturen over bakken

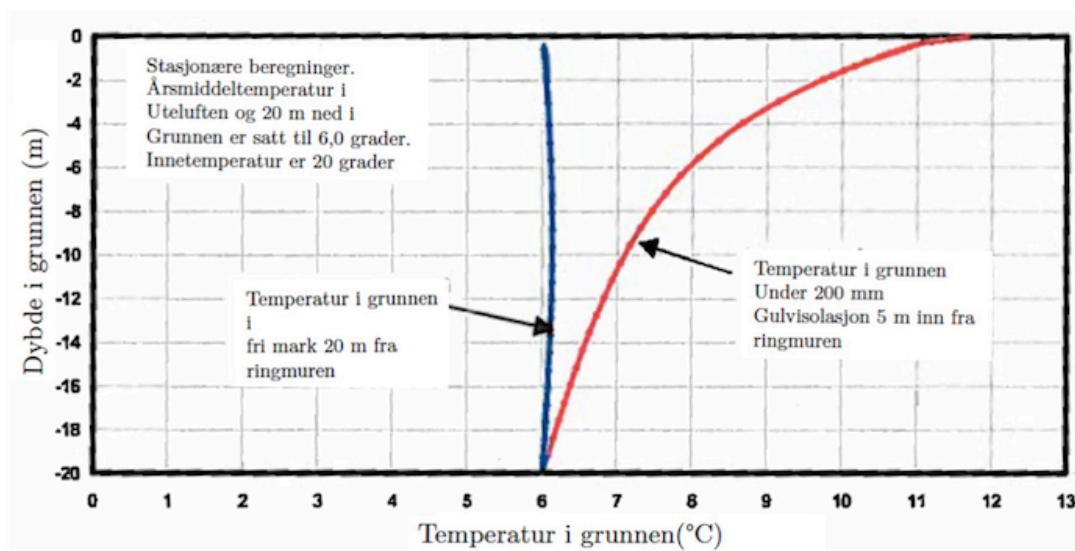
Grunnen har høy varmekapasitet, og gir en demping og tidsforsinkelse av temperaturpåkjenningene på markoverflaten. Dempingen øker med økende dybde, slik at kjellervegger 4- 5 meter under overflaten kun vil ha små temperatursvingninger. Dette innebærer at utvendig temperatur på kjellerveggen er høyere enn ved overflaten om vinteren og kaldere om sommeren. Dersom kjelleren er "uendelig godt isolert" vil temperaturen på veggens utvendige overflate være uavhengig av varmeproduksjonen inne i bygget (Geving og Thue, 2002) og temperaturen i grunnen



vil bevege seg mot årsmiddeltemperaturen for markoverflaten. Dersom veggen er endelig isolert vil temperaturen påvirkes av innetemperaturen. Denne påvirkningen øker med økende dybde under overflaten, altså vil temperaturen i grunnen bli mer lik innetemperaturen for økende dybde.

For yttervegger i rom som oppvarmes til vanlig innetemperatur er nødvendig varmeisolasjon mellom 100 og 200 mm. Nøyaktig isolasjonstykkelse vil avhenge av hvor langt under grunnen veggen ligger.

15- 20 meter nede i grunnen vil jordtemperaturen i fri mark være tilnærmet konstant over året og lik årsmiddeltemperaturen på overflaten (Gundersen et al., 2004). Figur 2-12 viser temperaturen under et gulvdekke på grunnen med 200 mm isolasjon. Det er antatt at temperaturen 20 meter under overflaten er lik årsgjennomsnittet for markoverflaten, i dette tilfellet 6 °C. Selv om konstruksjonen i Figur 2-12 er ikke er lik den som vurderes i denne oppgaven vil temperaturutviklingene i grunnen ha flere fellestrekk. En viktig forskjell mellom de to er at bygget, og dermed varmekilden, i Figur 2-12 ligger på markoverflaten, mens kjellerveggen som vurderes i denne oppgaven er antatt å ligge på fire til fem meters dybde. Siden varmekilden (bygget) ligger lavere vil også temperaturene ligge noe høyere for de enkelte dybdene. Det er derfor naturlig at temperaturene i grunnen vil være noe høyere i tilfellet med kjellerveggen enn i tilfellet i Figur 2-12.



Figur 2-12 Temperatur i grunnen under et dekke med 200 mm termisk isolasjon og innetemperatur på 20 grader, ved stasjonære forhold (Gundersen et al., 2004)

I hvor stor grad grunnvannet påvirker temperaturen avhenger blant annet av dybden under overflaten og strømningshastigheten til vannet.



## 3 MÅLING AV BETONGEGENSKAPER

---

I alle beregninger er nøyaktigheten og kvaliteten på inputparameterne avgjørende for kvaliteten på sluttresultatene. Ved beregninger av fysiske prosesser i konstruksjonsmaterialer er det derfor viktig å ha tilstrekkelig gode materialdata og god informasjon om randbetingelsene og om prosessene i seg selv.

I kjellerkonstruksjoner mot grunnvann er det betongen som sikrer vanntetthet, og om dermed er det viktigste materialet, i et fuktteknisk perspektiv. Dette kapitlet tar derfor for seg undersøkelser av fuktegenskapene til fire utvalgte betonger.

### 3.1 OM TESTBETONGEN

Det er undersøkt fire ulike betongblandinger. Valg av betongtyper og produksjon av prøvestykker er presentert i dette delkapitlet.

#### 3.1.1 Resepter

Kravet til vanntett betong er at den skal ha et vann/bindemiddel-forhold som er mindre enn 0,5. Den bestandighetsklassen som er nærmest og innenfor dette kravet er M45, og den blir derfor brukt som standard for vanntett betong av betongleverandørene. I denne oppgaven er det ønsket å undersøke fuktegenskapene til betong som blir brukt i Norge, så to av betongene er valgt med M45-kvalitet. Det er også undersøkt en bedre betongkvalitet, M40, men det er valgt en "Vegvesenbetong", som ofte blir brukt i anlegg utsatt for vanntrykk; SV40, som også er frostsikker. I tillegg til å undersøke to forskjellige bestandighetsklasser er det også undersøkt to helt ulike bindemiddeltyper (i form av flyveaskesement og slaggsement). På bakgrunn av de gitte klassifiseringene ble reseptene utarbeidet ved hjelp av et internt proporsjoneringsverktøy fra Skanska.

Informasjon om v/b-tall, sementmengde, andel silikastøv og matriksvolum er angitt i Tabell 3-1. Blandereseptene er gitt i Vedlegg B, mens reseptene korrigert for målt luftinnhold og densitet er angitt i Vedlegg C.

**Tabell 3-1 Oversikt over v/b-tall, sementmengde og andel silikastøv i de ulike betongene**

Betong	v/b-tall	Sementmengde [kg/m <sup>3</sup> ]	Silikastøv	Matriksvolum [l/m <sup>3</sup> ]
B35M45 med Norcem Standardsement FA	0,45	386	-	320
B45MF40 SV 40 med Norcem Standardsement FA	0,40	390	5 %	330
B35M45 med Cemex Miljøsement	0,45	386	-	320
B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement	0,40	389	5 %	330

SV40 klassifiseringen beskriver Statens vegvesens krav til betongegenskaper og den ble innført for å gjøre det lettere for kunder/entreprenører å bestemme betongkvalitet i Statens Vegvesens prosjekter. Det har bidratt til at flere entreprenører og leverandører bruker betong med like egenskaper. Vegvesenbetong SV40 skal ha et masseforhold på  $\leq 0,4$  har ellers krav og spesifikasjoner som angitt i Tabell 3-2.

**Tabell 3-2 Krav til Vegvesenbetong SV40**

Bestandighetsklasse (NS-EN 206-1)	Nedre grenseverdi for sementinnhold (c)	Grenseverdier for silikadosering (% av sement)		Virkningsfaktor for silikastøv (både CEM I og CEM II) (k-faktor)
		CEM I	CEM II	
MF40	350 kg/m <sup>3</sup>	4-6	3-5	2

I dag brukes nesten bare CEM II i SV-betong

### 3.1.2 Produksjon av betong og prøvestykker

Alle prøvene ble støpt i uke 41, 2014. De ble støpt spesifikt til denne masteroppgaven, så herdeforhold, -tid og resepter er tilpasset dette formålet.

Det ble blandet 50 liter betong og støpt seks sylindere og seks terninger for hver resept. Sylindrene var PVC-rør med diameter 100 mm og høyde ca. 400 mm. Terningene hadde sideflater på 100 mm.

I SV40-betongene ble det brukt luftinnførende middel. Det er vanskelig å estimere nødvendig mengde, så det ble nødvendig å tilsette noe mer enn det som var planlagt. I disse tilfellene var det følgelig nødvendig med noe ekstra blandetid. Superplastiserende stoff ble tilsatt for å sikre god komprimering og bearbeidelighet. Endelig mengde superplastiserende stoff ble vurdert ved blanding og ble bestemt basert på synkmålene og på erfaring hos de ansatte på laboratoriet.

Etter blanding ble det målt synk, densitet og luftinnhold for alle reseptene. Synkmålet er gjort etter NS-EN 12350-2 (2009a), densitetsmålinger etter NS-EN 12350-6 (2009) , mens luftmålingene er gjort etter retningslinjene i NS-EN 12350-7 (2009b) Endelig synkmål og luftinnhold umiddelbart etter blanding i prøvene er presentert i Tabell 3-3.

Tabell 3-3 Oversikt over synkmål, luftinnhold og densitet til den ferske betongen

	Synkmål [mm]	Luftinnhold [%]	Fersk densitet [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>B35M45 med Standard FA sement</b>	145	1,8	19205
<b>B45MF40 SV40 med Standard FA sement</b>	175	6,5	18407
<b>B35M45 med Cemex Miljøsement</b>	230	1	19387
<b>B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement</b>	220	8	18074

Ved støping var formene smurt med olje før de ble fylt med betong. Prøvene ble deretter komprimert med komprimeringsstav og vibratorbord frem til det ikke lenger kom store luftbobler opp til betongoverflaten og overflaten var relativt glatt, etter NS-EN 12350-6 (2009). De første tre døgnene var prøvene dekket med plast og lokk, før terningene ble lagt i vannbad (20 °C ±2 °C) og sylindrene ble pakket inn, som

vist i Figur 3-1. I tillegg til den individuelle innpakningen ble samtlige prøver pakket inn i plast ved lagring, for å minimere mulighetene for luftlekkasjer.



**Figur 3-1** Bilde av innpakkede prøvesylindre

Etter ca. fem måneder ble sylindrene våtkuttet i skiver med tykkelse som aktuelt for de spesifikke testene.

### **3.1.3 Sementblandinger**

Betongene inneholder enten flyveaske (Norcem Standardsement FA) eller slagg (Cemex Miljøsement). De to tilsetningsmaterialene har noe forskjellige egenskaper; flyveaske har pozzolane egenskaper, mens slagg er et hydraulisk tilsetningsmateriale. En pozzolanreaksjon er en reaksjon mellom kalkhydrat og vann, som danner et liknende produkt som mellom sement og vann (CSH). Hydrauliske bindemidler herder kjemisk ved utblanding i vann.

Både flyveaske og slagg erstatter deler av sementen og har store tekniske og miljømessige fordeler. Den reduserte sementmengden gir lavere varmeutvikling, som igjen gir mindre risiko for rissdannelser. Samtidig gir det god støpelighet, og økt motstand mot kloridinntrengning.

#### **Norcem Standardsement FA**

- CEM II/A-V 42,5 R

Norcem Standard FA er en av de vanligste sementene i Norge i dag. Den er anvendelig og kan benyttes til betong i alle eksponerings-, bestandighets- og fasthetsklasser. Sementen består av 20 prosent flyveaske. All flyveaske som brukes i betong i Norge er importert, hovedsakelig fra Danmark. Som nevnt i kapittel 2.1.7

gir flyveaske noe større total porøsitet enn ved bruk av vanlig portlandsement, men det gir også en finere porefordeling, som er hensiktsmessig for betongen.

### **Cemex Miljøsement**

- CEM II/B-S 52,5 N

Cemex sin Miljøsement er en ny sement der ca. 30 prosent av klinkeren er erstattet med slagg. Slagg er et biprodukt fra stålindustrien og har, med unntak av bruk i betong, liten annen nytte enn som fyllmasse. Det er derfor en god miljøgevinst å kunne ta i bruk slikt overskuddsmateriale i betongen.

Denne sementen produseres ved Cemex Rüdersdorf i Tyskland, de bruker ca. 70 prosent alternativ brensel (biomasse, beinmel fra dyr, "fluff"-papir, tekstiler m.m.) i sin produksjon (Eldegard, 2013), som bidrar ytterligere til mindre utslipp av klimagasser.

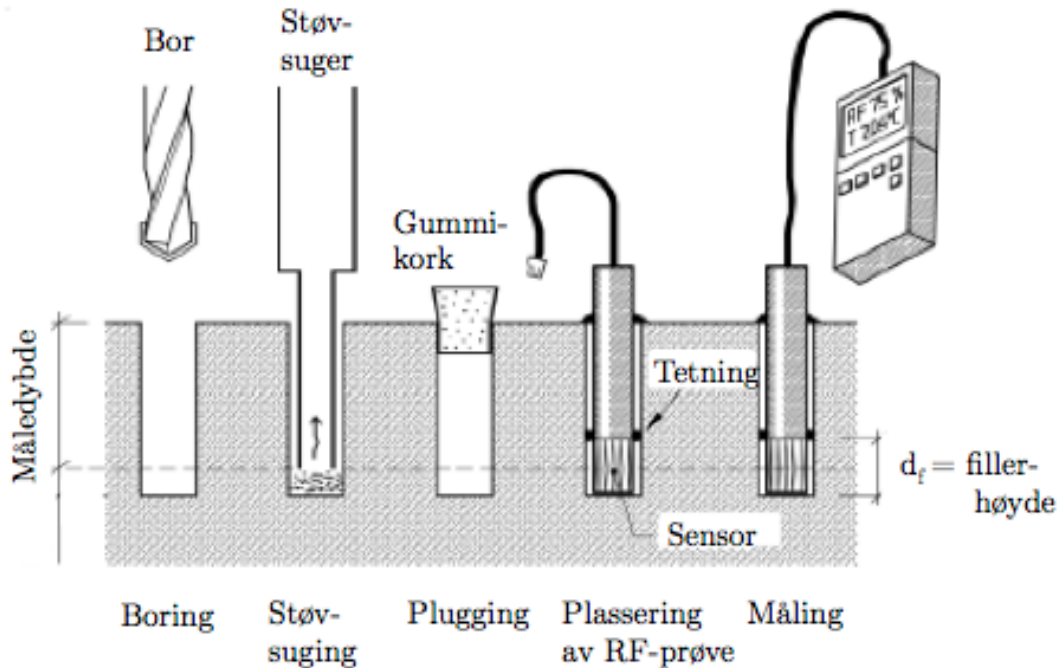
Slagg er forventet å gi omtrent samme porøsitet som ved bruk av portlandsement, men det vil gi en finere porestruktur og er derfor positivt for tetthetsegenskapene til betongen.

## **3.2 BESKRIVELSE AV LABORATORIEFORSØK**

Dette delkapittelet beskriver kort laboratorieundersøkelsene som er utført på de fire testbetongene. Målet har vært å kartlegge tetthetsegenskapene, men noen utfyllende undersøkelser er også gjort for å sikre at betongen holdt ønsket kvalitet.

### **3.2.1 Initielt fuktinnhold**

RF i betongen måles ved å plassere prober for avlesning i borede hull i betongen. Fuktinnholdet avleses etter oppnådd likevekt mellom fuktigheten i betongen og luften i hullet. Fremgangsmåten er vist i Figur 3-2.



Figur 3-2 Prinsipiell visning av fuktmåling i betong (Geving, 2014)

Dersom borehullet holdes tett vil luften inni komme i likevekt med betongen en stund etter tettingen, slik at luftfuktigheten inne i hullet blir et mål på fuktigheten i betongen (Instrument Companiet AS, 2001). Probene har vanligvis en nøyaktighet på  $\pm 2$  % RF ved målinger utført ved 20 grader. For fullstendig prosedyre, se NS 3511 *Måling av relativ fuktighet (RF) i betong*.

Selvuttørkingsnivået til betongen ble målt 20 uker etter støping. Prøvene hadde herdet i lukket rom, og var godt pakket inn, slik at det ikke var noe fukt som var tilført eller fordampet.

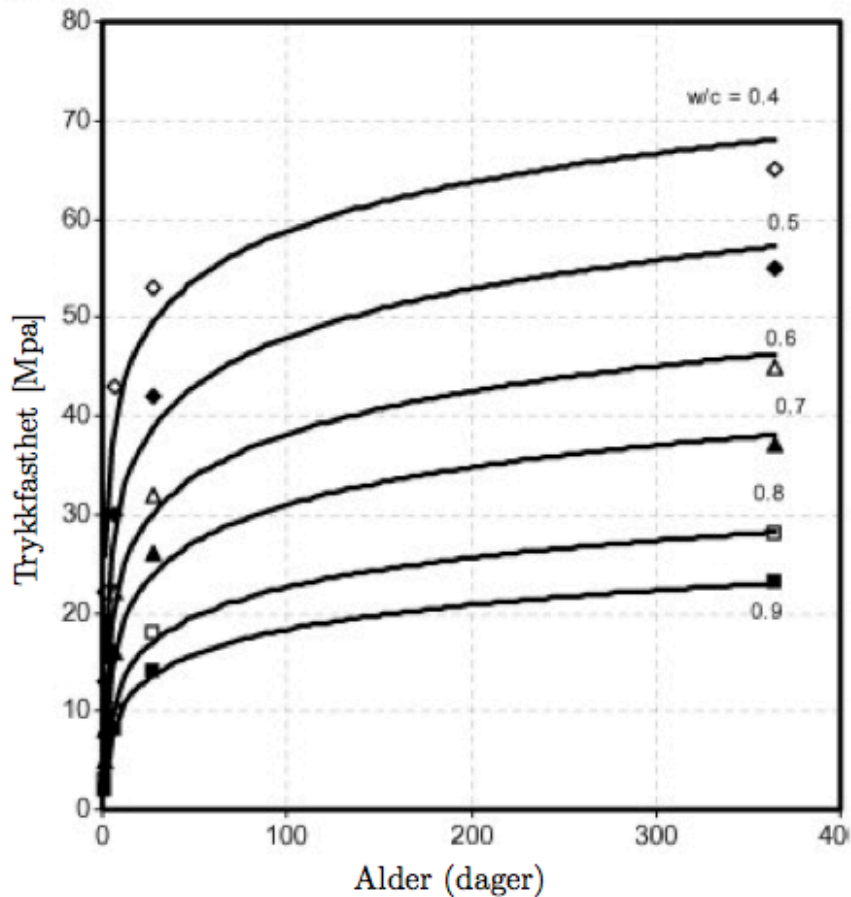
Protimeteret som ble brukt i disse undersøkelsene var ikke kalibrert på en stund, så ble utført flere undersøkelser med flere forskjellige prober for å redusere faren for feil på grunn av mangelfull kalibrering.

### 3.2.2 Trykkfasthet

Betongens trykkfasthet ble målt i henhold til *NS 12390 Prøving av herdet betong. Del 3: Prøvelegemers trykkfasthet*. Prøvestykkene var terninger med dimensjoner 100 mm x 100 mm som hadde herdet i vannbad ved 20 °C i henholdsvis 28 dager og fem måneder. Tre prøvestykker av hver betongtype ble testet ved de to tidspunktene.

Figur 3-3 viser en forventet sammenheng mellom trykkfasthet og alder for betong med ulikt  $v/c$ -tall.





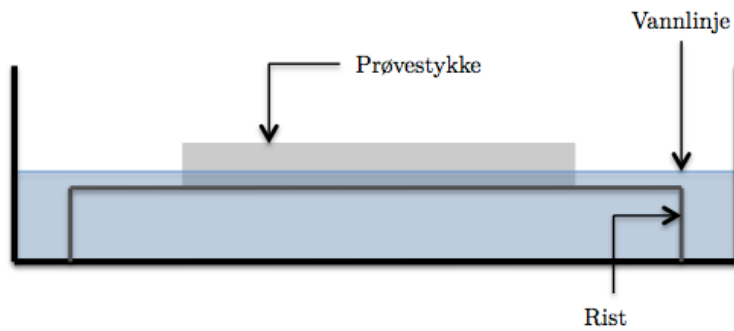
Figur 3-3 Sammenheng mellom trykkfasthet og alder for ulike betongblandinger (elaty, 2014)

Det er 28 dagers trykkfasthet som brukes for å karakterisere betongen, men trykkfastheten fortsetter å utvikle seg også etter dette. Målingene etter fem måneder er gjort for å kartlegge betongegenskapene ved det tidspunktet de øvrige undersøkelsene er utført.

### 3.2.3 Kapillær sugesevne og porøsitet

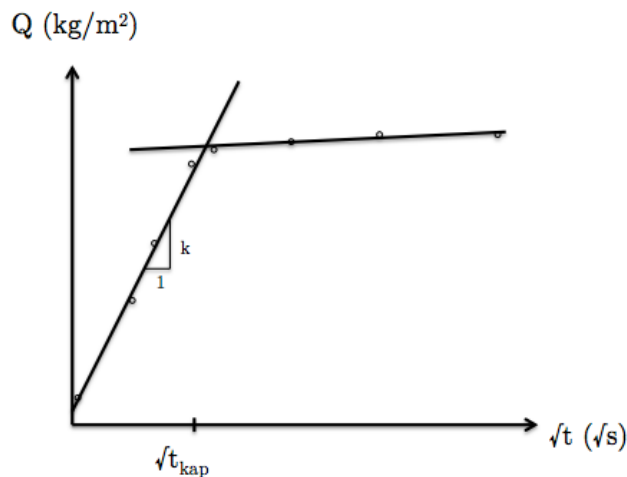
Undersøkelse av betongens kapillære sugesevne og porøsitet ble utført etter SINTEF's prosedyre for *Kapillær sugesevne og porøsitet (KS 70110)* (1996). Se denne for fullstendig fremgangsmåte. Prøvene gir porøsitets- og denistetsverdier, og tetthetsparameterne motstandstall og kapillaritetstall.

Testen går ut på å plassere prøveskiver på en rist med vann ca. én millimeter opp på prøven, som på Figur 3-4, for deretter å veie dem etter gitte tidsintervaller. Etter fire døgn senkes prøvene fullstendig i vann i tre døgn før de til slutt plasseres i et trykkammer med vann og 50 atm. trykk i et døgn. Fuktopptaket måles med veiing også etter nedsenkning i vann og i trykktank.



Figur 3-4 Prinsippskisse av prøveapparat for test av kapillær sugsevne

Fuktopptaket registreres som vist ved punktene i Figur 3-5, og for videre beregninger legges det inn to forskjellige regresjonslinjer (se kapittel 2.1.2 om kapillærsug). Regresjonslinjen frem til  $\sqrt{t}_{\text{kap}}$  viser vannopptaket frem til fuktfronten når prøveskivens overflate, mens den for tiden etter  $\sqrt{t}_{\text{kap}}$  viser fuktopptaket ved nedsenkning i vann.



Figur 3-5 Regresjonslinjer for vannopptak ved absorpsjonsforsøk

Absorpsjonsegenskapene til betongen avhenger av en rekke parametere som alle kan påvirke prøveresultatet; materialsammensetning, støpeteknikk, herdebetingelser, eksponeringsbetingelser og fukthistorikk. Siden alle prøvene i denne rapporten ble støpt samtidig og herdet under like forhold kan prøvene sammenliknes direkte.

Det er vanlig å tørke prøvene ved 105 °C før prøvestart, men tørking ved så høy temperatur gir en viss opprissing av betongen. Dette har en innvirkning på sugeforløpet (og med det en innvirkning på kapillaritetstall og motstandstall). Porøsitetsverdiene blir ikke spesielt påvirket av dette. En mer forsiktig uttørking (for

eksempel ved 50 °C, (Smeplass og Skjølvold, 1996)) vil representere bruksegenskapene til betongen bedre, men det vil ta svært lang tid å tørke betongen.

En viktig feilkilde ved denne undersøkelsen er at fuktstrømmen ikke blir fullstendig endimensjonal. De vertikale sidene av prøveskrivene ble ikke dekket til. Uavhengig av tildekking vil det være en indre omfordeling av fuktkonsentrasjonen som ikke er endimensjonal (Hedenblad, 1993).

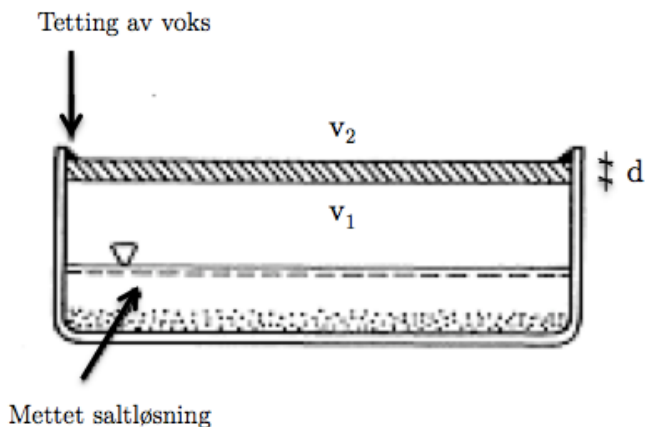
### 3.2.4 Bestemmelse av egenskaper ved vanndampgjennomgang

Betongens diffusjonsegenskaper er målt etter *NS-EN ISO 12572 Byggematerialers og –produkters hygroteermiske egenskaper. Bestemmelse av egenskaper ved vanndampgjennomgang*. Metoden er en av de mest utbredte for å måle diffusjon i bygningsmaterialer og kalles ofte for ”koppmetoden”. Målet med undersøkelsene er å finne vanndampgjennomgangstallet, også kjent som ekvivalent luftlagstykkelse ( $S_d$ -verdi [m]).

Undersøkelsene utføres ved at prøvestykkene plasseres som lokk på en kopp, som vist i Figur 3-6, med en mettet saltløsning i bunnen. Saltløsningen gir en konstant RF i koppen som er forskjellig fra den utenfor. Når betongskiven plasseres mellom to ulike miljøer med samme temperatur og forskjellig RF vil det gå fukt gjennom prøven. Prøvens diffusivitet bestemmes av den stasjonære fukttransporten gjennom prøvestykket.

Bestemmelsen av materialeegenskapene skjer ved at masseendringen til skålen måles med hensyn til tiden. Dersom RF er høyest inni koppen vil fukt diffundere ut, slik at vekten av koppen reduseres, og omvendt om RF er høyest på utsiden; da vil koppen ta til seg fukt. Ved stasjonære forhold vil det, i teorien, gå en konstant vanndampstrøm gjennom prøven på grunn av konsentrasjonsforskjellene på hver side av prøven.

I testene som er utført i dette arbeidet ble det benyttet våtkopper. Det er da et luftlag mellom prøvestykkene og det fuktavgivende stoffet, som vist i Figur 3-6. Et bilde av hvordan dette er gjort i praksis i laboratoriet er vist i Figur 3-7.



Figur 3-6 Prinsipielt oppsett ved koppmetoden (Hedenblad, 1993)



Figur 3-7 Bilde av oppsett ved koppmetoden. Betongskiven og prøvekoppen er tettet igjen med voks

Dampmotstanden som regnes ut er representativ for et RF-nivå midt i mellom det i skålen og det i rommet, og den vil ikke være helt riktig for øvrige RF-nivåer.

For å få mer realistiske verdier for dampmotstanden over tverrsnittet av veggen, ble det testet tre forskjellige RF-verdier. De gitte prøvetilfellene er beskrevet i Tabell 3-4

Tabell 3-4 Oversikt over RF og tilhørende salter for de ulike kopptestene

Gjennomsnittlig RF	RF i omgivende rom	RF i luft over saltblanding	Type salt
84,5 %	75 %	94 %	KNO <sub>3</sub>
54 %	75 %	33 %	MgCl <sub>2</sub>
30,5 %	50 %	11 %	LiCl

Skålene med KNO<sub>3</sub> (med gjennomsnittlig RF lik 84,5 prosent) forventes å ha en vektreduksjon, mens fukt var forventet å trenge inn i skålene med MgCl<sub>2</sub> og LiCl (gjennomsnittlig RF på 54 og 30,5 prosent) slik at det ble en vektøkning i skålene.

I begynnelsen av testperioden er det naturlig at vekten til prøven varierer noe. Ved stasjonær tilstand vil prøvens gjennomsnittlige RF ligge et sted mellom RF inne i koppen og i omgivende rom. Hvor mye vekten av prøvene endrer seg før stasjonære forhold inntreffer avhenger av dens initielle RF. Når prøven har stabilisert seg vil masseendringen i prøvekoppen være lineær med tiden. Det kan ta flere måneder før likevekt inntreffer i betongprøver (Baroghel-Bouny, 2006a).

Vanndamppermeans og vanndampmotstand ble regnet ut gjennom et eget dataprogram for slike tester om er utviklet av SINTEF. Beregningene samsvarer med de som formlene i kapittel 2.1.3.

### 3.2.5 Sorpsjonsmålinger

Sorpsjonsisotermene ble bestemt ved å lagre prøver av hver betongtype i klimarom eller bokser med strengt regulert temperatur og RF. Prøvene ble veid jevnlig frem til likevekt ble oppnådd. Likevekt er vurdert til å være en vektendring på mindre enn 0,1 % av total masse, over 24 timer. Dette tok mellom én og to måneder for prøvene.

Siden sorpsjonsegenskapene skal uttrykkes som funksjon av RF ble det målt likevektsfukt ved fire ulike relative fuktigheter;

- 33 % RF
- 50 % RF
- 75 % RF
- 94 % RF

Det er gjort undersøkelser av både adsorpsjon og desorpsjon. Halvparten av prøvene er tørket og halvparten er fuktet opp før de er plassert i de fire ulike klimaene.

En av usikkerhetene knyttet til slike tester er at forsinkede hydrauliske eller pozzolane reaksjoner (spesielt ved tilstedeværelse av silikastøv) kan endre mikrostrukturen under testing og dermed påvirke sorpsjonskurvene (Baroghel-Bouny, 2006b). For eksempel når prøver av fersk betong blir utsatt for tørking (desorpsjon) og deretter høy RF kan slike forsinkede kjemiske reaksjoner forårsake irreversible endringer med tilhørende konsekvenser. Det kan da oppstå en sorpsjonskurve som i betydelig grad avviker fra den "originale", og det blir en forstørret hysteresse mellom adsorpsjon og desorpsjon.

Baroghel- Bouny anbefaler at betongen får herde mellom seks måneder og ett år før sorpsjonstestene utføres, for å unngå at pågående kjemiske reaksjoner påvirker resultatene. Prøvene som er testet i denne oppgaven hadde herdet i ca. seks måneder.

## 3.3 MÅLTE BETONGEGENSKAPER

I det følgende blir resultatene fra undersøkelsene som ble beskrevet i kapittel 3.2 presentert. Det er forsøkt å gi et helhetlig bilde av de fire betongtypens fuktegenskaper.

### 3.3.1 Initielt fuktinnhold

Måling av det initielle fuktinnholdet til de ulike betongene ble gjort på fem måneder gammel betong og resultatene er presentert i Tabell 3-5. Det ble gjort fire målinger fra hver prøve med fire forskjellige prober. Det er presentert gjennomsnittsverdier for de ulike RF

Tabell 3-5 Oversikt over gjennomsnittlig initiell RF i de fire betongene

	<b>B35M45 Norcem Standardsement FA</b>	<b>B35M45 Cemex Miljøsement</b>	<b>B45MF40 SV40 Norcem Standardsement FA</b>	<b>B45MF40 SV40 Cemex Miljøsement</b>
RF [%]	64,5	64,9	73,9	62,9
$\pm\Delta\text{RF}$ [%]	1,3	0,6	0,52	1,12

Der  $\pm\Delta\text{RF}=\Delta x$

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} / \sqrt{N} \quad (8)$$

De målte verdiene til samtlige betongtyper er veldig lave. Det anslås at betong med v/b-tall 0,40 sjelden vil komme under 85 prosent RF etter tre måneder (Kvalvik et al., 2009), og for betonger med silikastøv tar det enda lenger tid å nå denne verdien. Dette gir grunn til å vurdere de målte resultatene som urealistiske.

Det er flere feilkilder til målingene som er utført:

- Probene som ble brukt har ikke vært kalibrert på lang tid, og på tross av at de ulike sensorene viste relativt like verdier er det mulig at det har blitt vesentlige feil i målingene.
- En annen, mer sannsynlig forklaring på de lave verdiene er at hullene som ble boret til sensorene er boret tørt. Ved tørrboring av betong blir det veldig varmt, slik at betongen tørker ut i umiddelbar nærhet av borehullet. På tross av at målingene ble gjort etter prosedyre, med god tid mellom boring og måling, er det mulig at det likevel gikk for kort tid slik at betongen ikke fikk innstilt seg i likevekt. Dette kan også sees ved at B35M45 med Standard FA sement, som har vist seg å være den klart mest åpne betongen (se kapittel 3.3.3) har høyeste RF. Denne betongen er også vurdert til å være mest åpen, og dermed den som trenger minst tid på å innstille seg i likevekt med omgivelsene.

- Den vanligste feilkilden ved RF-målinger er at det kan være lekkasje mellom hylsen som puttes ned i det borede hullet og gummistopperen som er festet i proben (Hedenblad, 1993). Ved en slik lekkasje vil RF målingene bli lavere enn de skal.

På bakgrunn av resultatene og usikkerhetene velges det å se bort i fra disse verdiene videre i oppgaven og i beregninger.

For å gi noen referansepunkter til betongens fuktighet presenteres noen verdier for RF i betong i Tabell 3-6. Resultatene er hentet fra et forskningsprosjekt utført av Skanska Norge AS. Resultatene er ikke publisert, men vil bli det i løpet av 2015.

**Tabell 3-6 Oversikt over initiell fuktighet i spesifikke betonger med sement fra Norcem**

	<b>RF etter 11 uker [%]</b>	<b>RF etter 1 år [%]</b>
Norcem Standardsement FA v/b = 0,39 c = 450 kg/m <sup>3</sup>	85	78
Norcem Anleggsement FA v/b = 0,39 c = 395 kg/m <sup>3</sup>	89	73
Norcem Anleggsement FA med 4 % silikastøv v/b = 0,39 c = 350 kg/m <sup>3</sup>	88	71

Cemex Miljøsement ble ikke undersøkt i Skanskas, det er derfor ikke presentert noen verdier for dette. Betongene i Tabell 3-6 er ikke helt like de som er undersøkt i denne oppgaven, med det forventes at RF ligger i det samme område som de som er presentert. Betongen med Norcem Anleggsement fra Skanskas undersøkelser er inkludert for å kunne vise virkningen av silikastøvet, da Standardsement FA ikke ble testet i kombinasjon med silikastøv i Skanskas prosjekt, slik som det er gjort i denne oppgaven.

### **3.3.2 Trykkfasthet**

Målt trykkfasthet for de fire betongene er presentert i Tabell 3-7.

I henhold til NS-EN 206-1, tabell NA.2 skal betong med B35-kvalitet ha en karakteristisk terningfasthet på 45 MPa etter 28 dager, mens B45-kvalitetene skal ha en fasthet på 55 MPa. I tillegg er det et krav at trykkfasthet være minimum 5 MPa høyere enn karakteristisk terningfasthet i den innledende produksjonen, og 1,48 \*

standardavviket for kontinuerlig produksjon. I praksis er det derfor vanlig å sikte på en trykkfasthet som er 8- 10 MPa høyere enn den karakteristiske trykkfastheten (Jacobsen, 2013). Tabell 3-7 viser at de undersøkte prøvene ligger god innenfor dette kravet. Resultatene viser også en relativt stor fasthetsutvikling i perioden etter 28 døgn.

**Tabell 3-7 Prøvenes trykkfasthet**

Betongtype	Trykkfasthet [MPa]		Lukket makroporøsitet (luft)		Trykkfasthet justert for luftinnhold [MPa]	
	28 dager	5 måneder	Totalt luftvolum	Andel av luftvolumet > 2 %	28 dager	5 måneder
B35M45 med Standard FA sement	62,02	82,02	1,6 %	-	62,02	82,02
B45MF40 SV40 med Standard FA sement	86,45	103,29	5,2 %	3,2 %	102,92	122,96
B35M45 med Cemex Miljøsement	94,46	108,34	1,4 %	-	94,46	108,34
B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement	77,51	94,71	4,8 %	2,8 %	90,13	110,13

SV40-betongene (begge sementtyper) er tilsatt luftinnførende stoffer, og har høyere luftinnhold enn de med M45-kvalitet. Betongen taper ca. 5 prosent fastet per 1 prosent ekstra luft i betongen (Smeplass, 2015) (luftinnholdet er nærmere beskrevet i kapittel 3.3.3). For å kunne sammenlikne trykkfastheten til betongene er det i de to siste kolonnene i Tabell 3-7 regnet teoretisk tilsvarende trykkfasthet korrigert for luftinnhold. Det er rundt to prosent luft i "vanlig" betong. Det er derfor bare kompensert for den andelen luft som går over det som er "normalt". Altså er trykkfastheten økt med fem prosent for hver prosent luft over to prosent. Trykkfastheten er derfor kun korrigert for betongene med kvalitet B45MF40 SV40.

M45- betongene skal ha dårligere trykkfasthet enn de med MF40-kvalitet, på grunn av større masseforhold mellom vann og bindemiddel. Dette er ikke tilfellet for



betongene med Cemex Miljøsement. Øvrige tester av andre materialeegenskaper tilfredsstiller forventede resultater, så det er ingen grunn til å tro det har skjedd noe feil med blandningene. Resultatene fra trykkfasthetsprøvingen kan være grunn til å så tvil om utføringen av testene er blitt gjort riktig. Et alternativ kan være at prøveseriene med Cemex-sement har blitt byttet om.

### **3.3.3 Kapillær sugsevne og porøsitet**

Det ble testet fire prøveskiver for hver av de aktuelle betongene. Prøvene ble støpt i sylindre, herdet tørt, uten fukttilførsel eller fordampning, og ble til slutt kuttet til skiver. Prøvene ble eksponert for vann ved kutting. Før testingen ble igangsatt ble prøvene tørket en uke ved 105 °C. Hvert prøvestykke hadde en diameter på 100 mm ( $\pm 3$  mm) og tykkelse på 20 mm ( $\pm 0,5$  mm).

I det følgende er betongenes densitet, porøsitet, motstandstall og kapillaritetstall presentert.

Resultatene fra beregningene og undersøkelsene er gitt i Vedlegg E.

#### **Densitet**

Det finnes flere måter å angi densitet på. Tabell 3-8 angir tørrdensitet, faststoffdensitet og densitet etter herding i vann. De to førstnevnte er funnet som en del av undersøkelsene av kapillærabsorpsjon og porøsitet, mens densiteten etter vannlagring er testet på terninger etter 28 dager. Resultatene som er presentert er gjennomsnitt av tre prøver for hver serie.

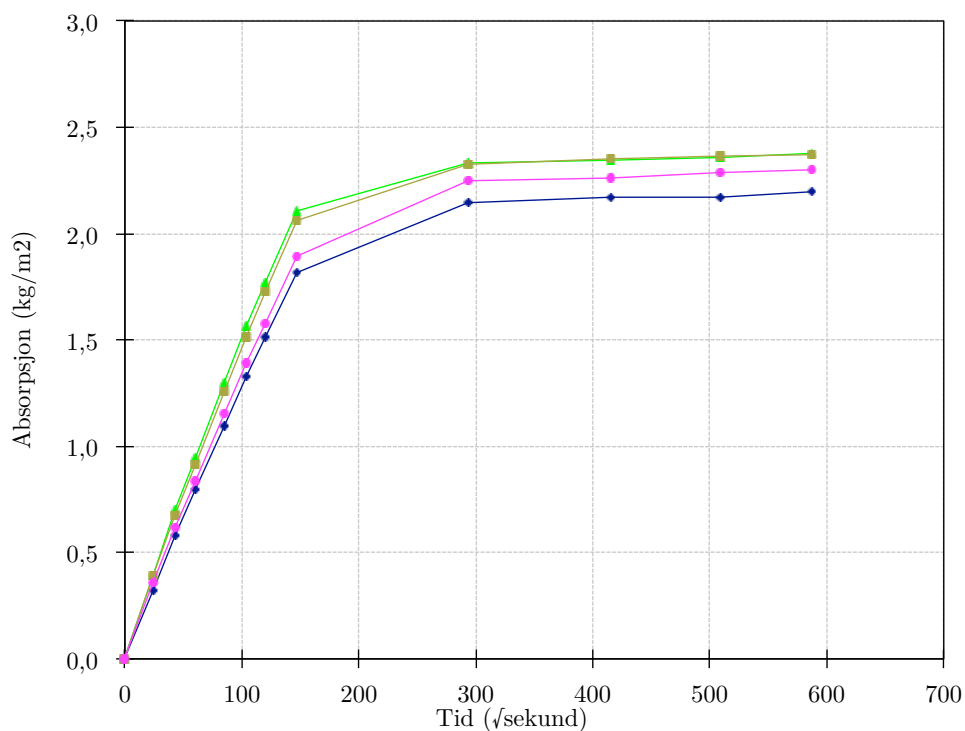
Tabell 3-8 Tørr- og faststoffdensitet i prøvestykkene

Betongtype	Tørrdensitet [kg/m <sup>3</sup> ] (Ved prøvetaking etter 5 mnd. Herdet tørt)		Faststoffdensitet [kg/m <sup>3</sup> ] (Ved prøvetaking etter 5 mnd. Herdet tørt)		Densitet etter vannlagring [kg/m <sup>3</sup> ] (Etter 28 dager herding i vannbad)	
	Densitet	Standard-avvik	Densitet	Standard-avvik	Densitet	Standard-avvik
B35M45 med Standard FA sement	2336	12	2695	7	2440	6
B45MF40 SV40 med Standard FA sement	2253	10	2709	8	2391	2
B35M45 med Cemex Miljøsement	2357	9	2711	8	2477	4
B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement	2234	16	2657	12	2352	4

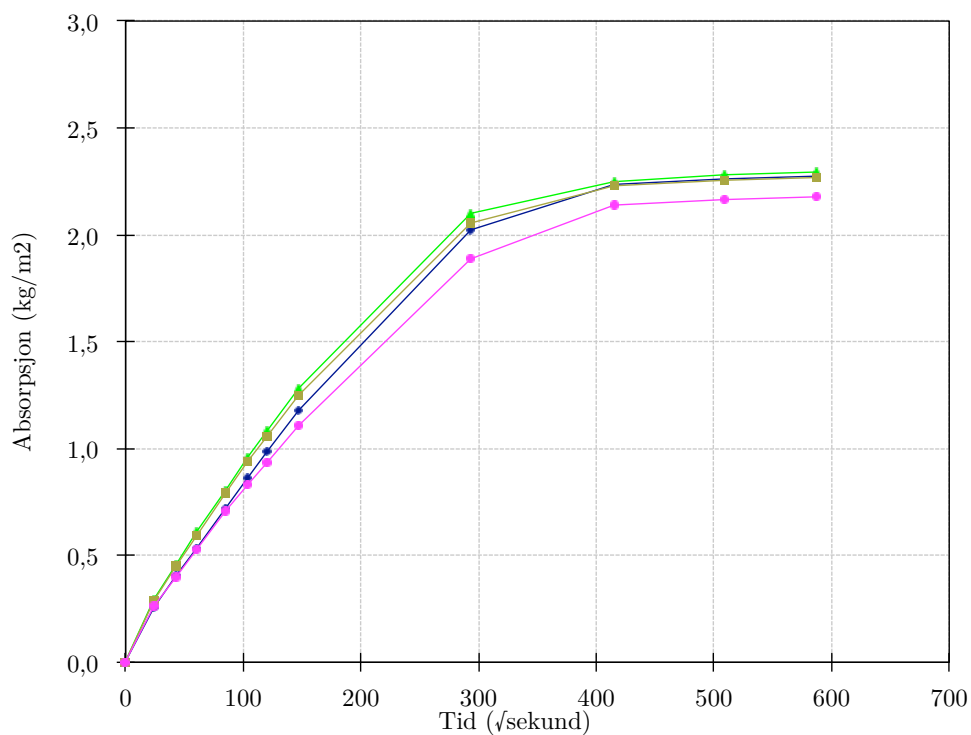
Densitet blir ofte brukt som et kvalitetskriterium for bestandighet og andre betongegenskaper. Normalbetong der det ikke er benyttet spesielt tunge delmaterialer skal ha tørrdensitet større enn 2000 kg/m<sup>3</sup> og lavere enn 2600 kg/m<sup>3</sup>, og faststoffdensitet i området mellom 2670 og 2720 kg/m<sup>3</sup> (Smeplass og Skjølvold, 1996). I følge SINTEFs prosedyre (KS 70110) for porøsitetstesting av betong skal den interne spredningen (standardavvik) i faststoffdenisteteten innenfor en prøveserie ikke overstige 10 kg/m<sup>3</sup>. Alle prøvene, med unntak av B45MF40 SV40 med Cemex miljøsement ligger innenfor dette området. At denne betongen skiller seg ut (både i med lav faststoffdensitet og større spredning) skyldes at den er veldig tett, og at den ikke har oppnådd full metning, selv etter å ha blitt utsatt for 50 atm. Ttrykk. Dette gjør at densitetsberegningene blir feil og standardavviket stort. Den lille spredningen i resultatene kan vurderes som en indikasjon på at utstøpingen er tilfredsstillende utført, uten separasjon eller uønsket stort luftinnhold.

## Absorpsjonskurver

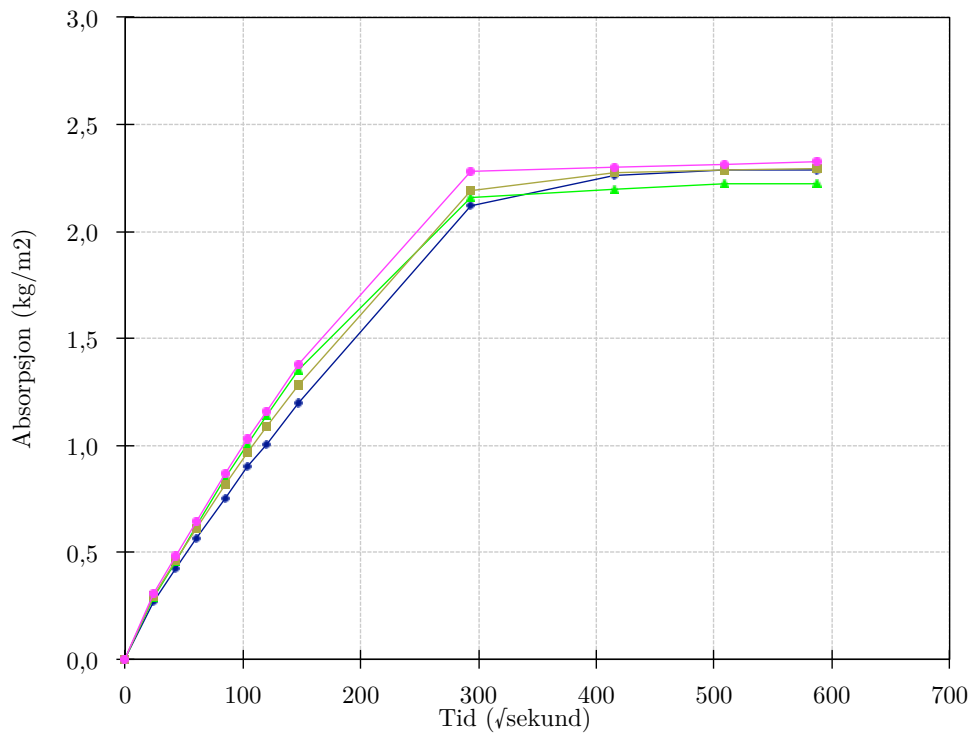
Det er testet fire prøvestykker av hver betongtype, og kurvene i Figur 3-8 til Figur 3-11 viser vannabsorpsjonen til de forskjellige prøveseriene.



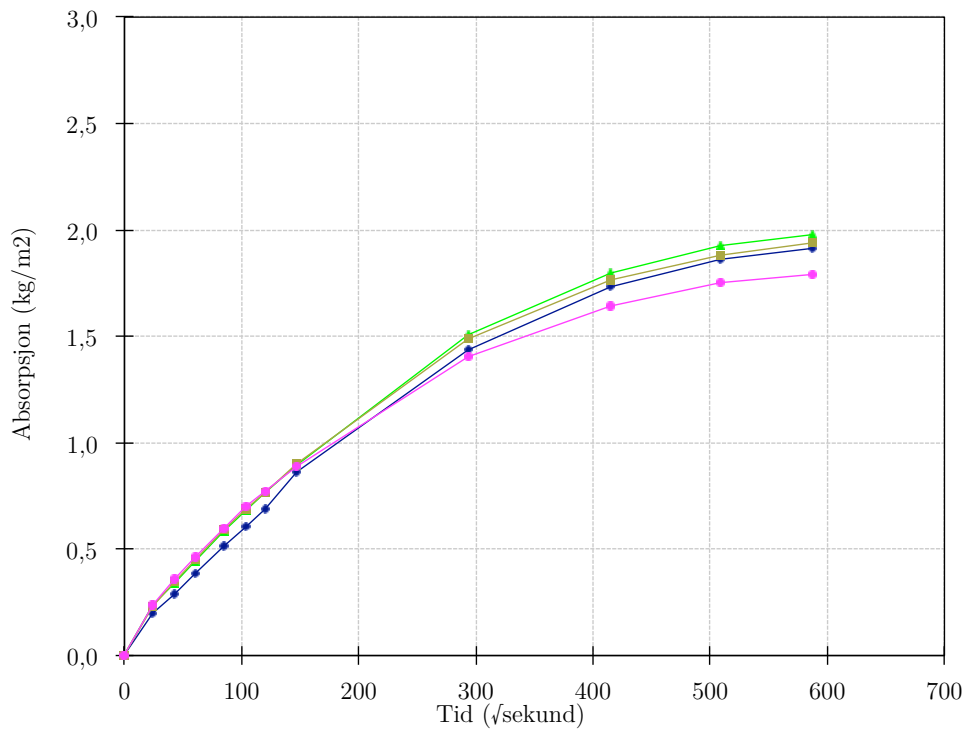
Figur 3-8 Absorpsjonskurve, B35M45 Norcem Standardsement FA



Figur 3-9 Absorpsjonskurve, B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA



Figur 3-10 Absorpsjonskurve, B35M45 med Cemex Miljøsement



Figur 3-11 Absorpsjonskurve, B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement

Betong med Cemex Miljøsement er tettere og suger dermed saktere enn betong med Norcem Standardsement FA. Dette er blant annet synlig på at helningen på kurvene til betongene med førstnevnte sement er vesentlig slakere. Betongene med Cemex Miljøsement har følgelig også lavere kapillaritetstall enn de tilsvarende med Norcem Miljøsement.

Figur 3-8 viser at betong B35M45 med Norcem Standardsement FA har et tradisjonelt absorpsjonsforløp med lineær stigning i det kapillærugende området. Dette gjør at regresjonslinjene som brukes for å finne kapillær- og motstandstall vil passe godt.

En svakhet ved denne metoden er at den ikke ser ut til å fungere godt for så tett betong som enkelte av de som er testet her. Betongene i Figur 3-9- Figur 3-11 følger ikke en helt lineær sammenheng mellom vannopptaket og kvadratroten av tiden. Helningen på kurvene indikerer at alle disse tre betongene er tettere enn B35M45 med Norcem Standardsement FA. B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement er en vesentlig tettere betong enn de andre i testen. I Figur 3-11 er det spesielt tydelig at sammenhengen med kvadratroten av tiden ikke passer for denne betongen, siden kurven er buet og ikke lineær. Når absorpsjonskurvene ikke blir rette blir heller ikke utregningene av kapillaritetstall og motstandstall korrekte.

Årsaken til den ikke-lineære sammenhengen med kvadratroten av tiden er at vannabsorpsjonen går saktere enn ved andre betongkvaliteter. Betongen er ikke ferdig med å absorbere vann (vannfronten har ikke nådd overflaten) innen prøvene nedsenkes i vann. Dette gjør at kurven heller ikke får det "knekkpunktet" som danner grunnlaget for beregninger av motstandstallet. Siden kapillærsuget ikke følger en lineær utvikling vil stigningstallet (og dermed kapillaritetstallet) kun være veiledende.

Det ikke-lineære absorpsjonsforløpet gir grunn til å vurdere hvor godt egnet denne metoden, og dermed også kapillaritets- og motstandstallene, er som kvalitetskriterium for vanntett betong.

## Sugporøsitet og åpen makroporøsitet

Sugporøsiteten,  $p_s$ , er definert i henhold til formel ( 9 ):

$$p_s = \frac{g_2 - g_1}{V \cdot \rho_w} \quad ( 9 )$$

Der  $g_1$  er vekt etter tørking i tørkeskap i en uke,  $g_2$  er prøvestykkets vekt etter tre døgn helt under vann,  $V$  er prøvestykkets volum og  $\rho_w$  er vannets densitet (1000 kg/m<sup>3</sup>). Resultatene fra laboratorietestene er listet i Tabell 3-9.

**Tabell 3-9 Prøvenes sugporøsitet**

Betongtype	Sugporøsitet [vol-%]	Standardavvik [%]
B35M45 med Norcem Standardsement FA	11,6	3,4
B45MF40 SV 40 med Norcem Standardsement FA	11,3	2,7
B35M45 med Cemex Miljøsement	11,5	2,0
B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement	9,6 (11,2)	4,0

Det er små forskjeller mellom de fire betongenes sugporøsitet. Det er kjent at dersom en mengde av sementen erstattes med pozzolaner vil kapillærporøsiteten øke. Betongene med Norcem-sement inneholder flyveaske og disse har så vidt høyere sugporøsitet enn de med slaggsment.

Vannopptaket fra slutt av sug fra vannspeil til endt neddykking (åpen makroporøsitet) utgjør normalt ca. 0,5 volumprosent (Smeplass og Skjølsvold, 1996). Verdier som er større en 0,5 volumprosent indikerer som oftest at det er kontinuerlige makroporer i prøven, for eksempel på grunn av dårlig komprimering. En økt andel makroporer har betydning for betongens permeabilitet. Den åpne makroporøsiteten til de fire betongene er listet i Tabell 3-10.

**Tabell 3-10 Prøvenes åpne makroporøsitet**

Betongtype	Åpen makroporøsitet [vol-%]	Standardavvik [%]
B35M45 med Norcem Standardsement FA	0,1	22,5
B45MF40 SV 40 med Norcem Standardsement FA	0,3	15,6
B35M45 med Cemex Miljøsement	0,2	13,6
B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement	1,6	32,9

B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement har en høy andel åpen makroporøsitet. Dette skyldes trolig at absorpsjonen fra vannspeilet skjedde så sakte at prøven ikke rakk å bli mettet før den ble neddykket i vann, og at den fortsatte å suge etter den ble neddykket. Det er rimelig å anta at sugporøsiteten til betongen B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement er nærmere 11,2 %, altså summen av målt sugporøsitet og åpen makroporøsitet, som angitt i parentes i Tabell 3-9. Dette er igjen en indikasjon på at metoden ikke egner seg for så tette betonger. Den åpne makroporøsiteten er regnet ut basert på vannabsorpsjonen, og når prøvene ikke følger det absorpsjonsmønsteret metoden er estimert for, vil resultatene heller ikke bli helt riktige.

Målt sugporøsitet bør sammenliknes med teoretisk sugporøsitet i henhold til forskningsresultatene til Powers (Smeplass, 2014). Målt og beregnet porøsitet kan sammenliknes for å sikre kvaliteten av målingene. Dersom det ikke er overenstemmelse mellom de to må det gjøres en vurdering av mulige årsaker (feil i angitt blandeforhold, separasjon, vannsugende tilslag, usikkerhet i estimert hydratasjonsgrad osv.). Tabell 3-11 viser oversikten over den beregnede porøsiteten der det er regnet med en hydratiseringsgrad på 0,6. Denne er ikke inkludert luftporer. En oversikt over utregningene er angitt i Vedlegg D.

**Tabell 3-11 Teoretisk sugporøsitet, beregnet i henhold til Powers teori**

	<b>Hydratiseringsgrad</b>	<b>Total beregnet porøsitet</b>
B35M45 med Norcem Standardsement FA	0,6	13,28 %
B45MF40 SV 40 med Norcem Standardsement FA	0,6	13,56 %
B35M45 med Cemex Miljøsement	0,6	13,66 %
B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement	0,6	13,24 %

Beregningene tar utgangspunkt i fire av Powers funn (Smeplass, 2014):

1. Massen av det kjemisk bundne vannet er 23 prosent av den hydratiserte sementens masse
2. Det kjemiske svinnet utgjør 25,4 prosent av det kjemisk bundne vannets opprinnelige volum
3. Det fysisk bundne vannet utgjør 18 prosent av den hydratiserte sementens masse
4. Det ytre volumet endrer seg ikke når sementlimet hydratiserer

Det beregnede porevolumet er større enn det målte, men forskjellene er ikke større enn at de fremdeles viser et visst samsvar med de målte resultatene. Det er antatt en hydratiseringsgrad på 0,6. Dersom denne er høyere vil porøsiteten bli lavere. Det er viktig å være klar over at Powers forsøk og resultater er basert på betong med ren portlandsement. Ingen av disse betongene har dette, det er derfor ikke naturlig å forvente 100 prosent samsvar mellom den teoretiske og den målte porøsiteten.

### **Lukket makroporøsitet (luftporer)**

Den lukkede makroporøsiteten er et direkte mål på den herdede betongens luftporeinnhold (Smeplass og Skjølvold, 1996). Vegvesenbetongene er tilsatt luftinnførende middel for å oppnå tilstrekkelig sikkerhet mot frostskafer, og de har følgelig derfor et høyere luftinnhold enn de to andre betongene.



**Tabell 3-12 Prøvenes lukkede makroporøsitet (luftmengde)**

Betongtype	Lukket makroporøsitet [vol-%]	Standardavvik [%]
B35M45 med Norcem Standardsement FA	1,6	7,7
B45MF40 SV 40 med Norcem Standardsement FA	5,2	2,6
B35M45 med Cemex Miljøsement	1,4	5,9
B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement	4,8	7,6

Statens vegvesen sitt krav til luftinnhold i betong med MF40- kvalitet er 5 prosent  $\pm 1,5$  prosent, mens "vanlig" betong har et luftinnhold på ca. 2 prosent. Samtlige betonger er derfor godt innenfor kravene.

### **Motstandstall**

Det er en relativt stor spredning i resultatene for motstandstallet til de forskjellige betongene. Spesielt B35M45 med Norcem Standardsement FA kommer vesentlig dårligere ut enn den andre med tilsvarende klassifisering, selv om motstandstallet er vesentlig høyere enn det som er antydnet som minsteverdi for vanntett betong i SINTEFs prosedyre for kapillær sugesevne og porøsitet (Smeplass og Skjølvold, 1996) (nevnt i kapittel 3.2.3). De øvrige resultatene kan vurderes som spesielt høye. Betongene med B45MF40 SV40-kvalitet er så høye at de ligger utenfor figuren med oversikt over erfaringsverdier for motstandstall (Figur 2-4). B45MF40 med Cemex Miljøsement skiller seg ut som ekstremt tett.

**Tabell 3-13 Prøvenes motstandstall**

Betongtype	Motstandstall [s/m <sup>2</sup> ]	Standardavvik [%]
B35M45 med Norcem Standardsement FA	6,65E+7	7,7
B45MF40 SV 40 med Norcem Standardsement FA	1,85E+8	10,2
B35M45 med Cemex Miljøsement	1,66E+8	15,4
B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement	1,95E+8	8,8

Som forventet har betongene med lavere v/b-tall høyere motstandstall enn de med høyt (med samme type sement).

Det er viktig å være oppmerksom på usikkerheten knyttet til motstandstallet, som ble diskutert i forbindelse med absorpsjonskurvene; metoden som blir brukt til å presentere de kapillære egenskapene ser ikke ut til å passe for alle typer betong, slik at de angitte motstandstallene kan være mindre beskrivende for en tette betongen.

### Kapillaritetstall

Oversikten over kapillaritetstallene i Tabell 3-14 viser de samme tendensene som for motstandstallet. B35M45 med Norcem Standardsement FA er vesentlig mindre tett enn de andre (den er likevel vurdert som en tett betong) og B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement er den tetteste av de undersøkte betongtypene.

**Tabell 3-14 Prøvenes kapillaritetstall**

Betongtype	Kapillaritetstall [kg/m <sup>2</sup> vs]	Standardavvik [%]
B35M45 med Norcem Standardsement FA	1,37E-2	7,3
B45MF40 SV 40 med Norcem Standardsement FA	7,94E-3	6,7
B35M45 med Cemex Miljøsement	8,68E-3	6,8
B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement	5,75E-3	2,4

Målingene av kapillaritetstall viser større relative forskjeller mellom betongene enn motstandstallene. Dette kan være en indikasjon på det som ble beskrevet i kapittel

2.1.2, at kapillaritetstallet vil variere mer enn motstandstallene på grunn av avhengigheten til porevolumet, og at det derfor er mer følsomt for lokale forskjeller knyttet til tilslagsfordeling og pastamengde. På tross av dette er forskjellene mellom hvert enkelt prøvestykke innad i seriene mindre for kapillaritetstallet enn for motstandstallet (kan ses av standardavviket).

Siden prøvestykkene er tørket ved 105 °C er prøvene litt mer permeable enn de var før de ble tørket. De gitte kapillaritetstallene er derfor noe for høye enn de ville vært for jomfruelig betong. På tross av dette er betongen svært tett.

### **3.3.4 Egenskaper ved vanndampgjennomgang**

Undersøkelsene av betongenes vanndampgjennomgang ga ikke entydige resultater. En oversikt over de ulike betongenes vektendring ved de ulike fluktsituasjonene er gitt i vedlegg F.

Prøvene ble støpt i sylindre og herdet tørt, uten fukttilførsel eller fordampning. Sylinderne ble kuttet til skiver, og ble i denne prosessen eksponert for vann. Etter kutting ble de lagret omtrent to uker ubeskyttet ved romtemperatur i vanlig oppholdsrom. Før teststart ble prøvene klimatisert i to uker i de aktuelle klimarommene (50 og 75 prosent RF). Det er utført fem prøver av hvert RF-nivå, pr betong; altså er det 15 prøvestykker per betongtype. Hvert prøvestykke hadde en diameter på 100 mm ( $\pm 3$  mm) og tykkelse på 10 mm ( $\pm 0,5$  mm). Prøveperioden var ca. en måned. Forsøkene ble kjørt frem til vektendringen var mindre enn kravet angitt i prøveprosedyren ( $<0,1$  vekt-% endring pr døgn) (Standard Norge, 2001).

### **Resultatene**

Den eneste av prøveseriene som har fulgt forventet oppførsel og gitt godkjente resultater er serien der RF var 94 prosent i prøvekoppen og 75 prosent i rommet rundt (84,5 prosent i gjennomsnitt). Vanndamppermeans og vanndampmotstand for de ulike betongene i dette tilfellet er gitt i Tabell 3-15 (rapportene er lagt ved i Vedlegg G). Resultatene fra de andre undersøkelsene er vurdert som ikke gyldige, og kan derfor ikke brukes i videre beregninger.

**Tabell 3-15 Vanndamppermeans og vanndampmotstand for 1 cm tykke prøver av de fire betongene ved RF≈85 %**

Betongtype	Vanndamp- permeans [kg/m <sup>2</sup> sPa]	Vanndamp- permeabilitet [kg/msPa]	Vanndampmotstand	
			[m]	[m <sup>2</sup> sPa/kg]
B34M45 med Norcem Standardsement FA	6,41E-11	6,41E-13	3,14	1,56E+10
B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA	3,33E-11	3,33E-13	5,94	3,00E+10
B34M45 med Cemex Miljøsement	4,88E-11	4,88E-13	4,12	2,08E+10
B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement	2,18E-11	2,18E-13	9,10	4,60E+10

Resultatene viser at vanndampmotstanden øker vesentlig med lavere v/b-tall. Betongtypene med v/b-tall 0,4 har opp mot dobbelt så høy vanndampmotstand som de med v/b-tall 0,45 (og samme sementtype). Og igjen vises det at Cemex Miljøsement er vesentlig tettere enn Norcem Standardsement FA, spesielt for betongene med SV40-kvalitet. Samtlige resultater indikerer svært tette betonger.

I en veggkonstruksjon eksponert for konstant vanntrykk vil fuktinnholdet være relativt høyt over store deler av tverrsnittet. Verdiene for RF på omtrent 85 prosent vil derfor være de mest riktige å bruke av de som er testet. Disse verdiene tas derfor med i videre beregningene, selv om resultatene ville vært vesentlig bedre og riktigere dersom dampmotstanden var gitt som en funksjon av RF.

### **Vurdering av resultatene**

Det er store forskjeller mellom hvordan de ulike seriene og betongene oppførte seg, men det er viktig å være klar over at den totale fuktransporten for alle prøvene er veldig liten (se Vedlegg F for oversikt over de ulike prøvenes fuktopptak). Det er derfor snakk om små absolutte forskjeller mellom prøvestykkene.

Det er ikke klart hvorfor så mange av prøvene ikke oppførte seg som forventet. En forklaring kan være at variasjonen i fuktopptak og -avgivelse i prøvene skyldes hysteresese i betongen. Dette kan forklares med overgangskurver og at betongen stabiliserer seg et sted mellom adsorpsjons- og desorpsjonskurven. Siden betongene har vært både oppfuktet og tørket vil de befinne seg på en overgangskurve og kan

derfor innstille seg i likevekt til det nye klimaet uten at fuktinnholdet endrer seg vesentlig (se Figur 2-6).

En annen viktig usikkerhetsfaktor er den initielle RF til prøvene. Fukthistorikken til prøvene er noe uklar, og det er ikke sikkert at fuktinnholdet ved start var helt likt for alle prøver i samme på tross av forkondisjoneringen. Det er viktig å ta hensyn til at prøven vil ta opp eller avgi fukt for å komme i likevekt med omgivelsene før fukttransporten blir stasjonær. Dersom fuktinnholdet i betongprøven endres vil det føre til at prøvekopps vekt reduseres (væske fordampes ut i rommet fra prøven), forblir uendret (betongen tar kun opp fukt fra koppen slik at den totale vekten blir den samme) eller at en totale vekten øker (betongen tar opp vann fra omgivelsene). Dette kan forklare at prøvekoppe kan skifte fra å ta opp til og avgi fukt. Basert på antatt initiell RF i betongene (anslått til 80- 90 prosent) er ikke dette en spesielt troverdig forklaring på at resultatene avviker fra forventet oppførsel. Årsaken til dette er at fortegnet på vektendringene gjennomgående er motsatt av det det skulle vært om dette var tilfellet.

De gitte argumentene kan heller ikke forklare at prøver som bør ta opp fukt ser ut til å gå ned i vekt, mens noen av de som skal avgi fukt har en vektøkning. I flere av tilfelle ser det ut til at tilstanden er stasjonær, men fuktendringen samsvarer altså ikke med randvilkårene.

En annen usikkerhet ved denne typen tester er tetningen mellom prøve kopp og prøvestykke. Tetningen er utført for hånd, så det er mulig å gjøre feil/ikke tette tilstrekkelig. Ved utettheter vil det oppstå vesentlig større masseendringer i prøvekoppe enn det som er tilfellet her, så det antas at tetningen er utført tilfredsstillende.

Flere har forsket på nøyaktigheten av resultatene fra bruk av koppmetoden, blant annet Roels et al. (2004). De sammenliknet like undersøkelser ved flere forskjellige laboratorier og fant store forskjeller, selv om rammene for undersøkelsene var tilsynelatende like. Dette kan indikere at det er svakheter ved metoden slik den er fremstilt i standarden. Det er mulig at det er noen aspekter som ikke er tilstrekkelig beskrevet, slik at utførelsen ikke blir lik for prøver som tas ved ulike laboratorier.

### **3.3.5 Sorpsjonskurver**

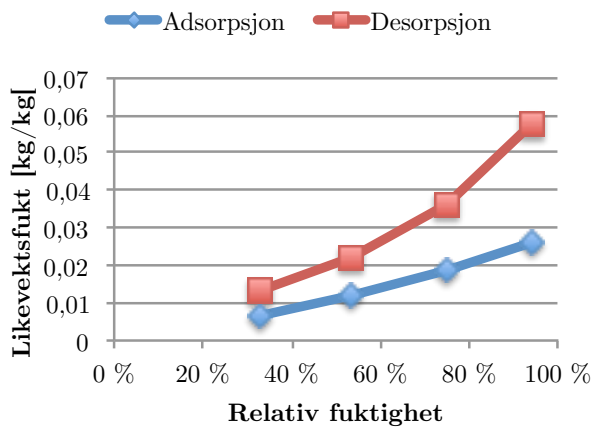
Prøvene ble våtkuttet fra sylindere som var forseglet ved herding. De ble deretter lagret omtrent to uker ubeskyttet ved romtemperatur i vanlig oppholdsrom. Etter dette ble én del av prøvene tørket ved 50 °C og den andre delen ble vannmettet. Dette ble gjort for å få både adsorpsjonskurver og desorpsjonskurver. Siden prøvene

for adsorpsjon var tørket var ikke oppfuktingen for RF opp til selvuttørkingsnivået ”jomfruelig”, men resultatene gir en tilnærming av hvordan kurvene skal se ut.

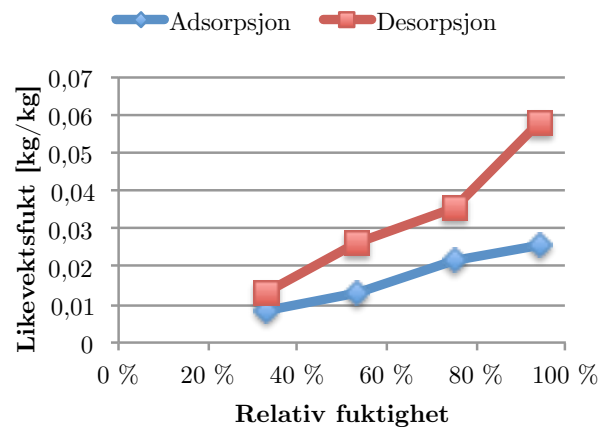
Det er undersøkt fem prøvestykker per fuktnivå for både oppfukting og uttørking (totalt 40 prøver for hver betongtype). Dette reduserer usikkerheten som følger med at målingene blir gjort på forskjellige prøvestykker.

Prøvestykkene hadde diameter på 100 mm ( $\pm 3$  mm) og tykkelse på 10 mm ( $\pm 0,5$  mm), og ble grovknust for å redusere tiden frem til likevekt med omgivelsene (knusing gir større overflateareal)

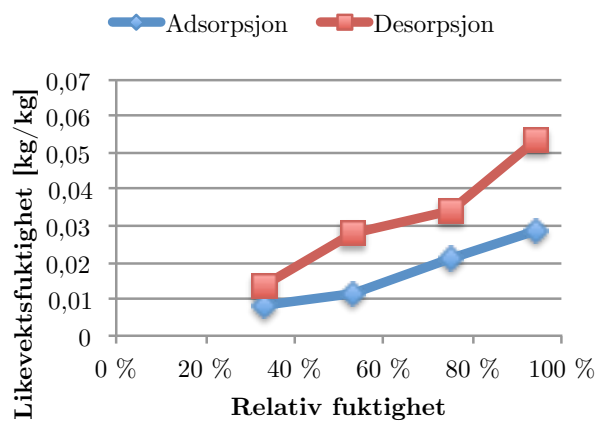
Sorpsjonskurvene til de ulike betongene er vist i Figur 3-12 til Figur 3-15. I figurene er fuktlikevekten oppgitt som kg fukt per kg tørr prøve. Kurvene viser desorpsjon og adsorpsjonskurver for de ulike betongtypene ved 23 °C. Sorpsjonskurvene er laget fra resultatene som er gjengitt i Vedlegg H.



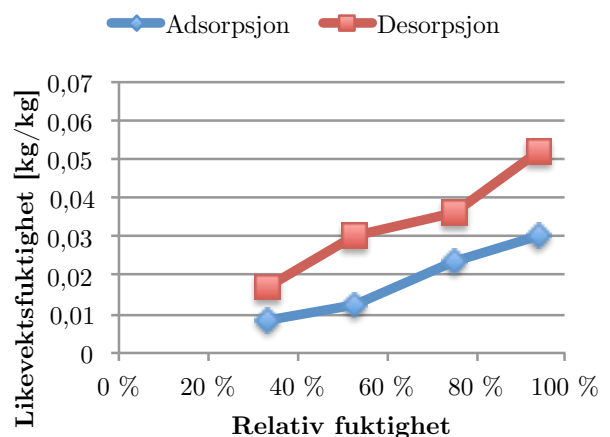
Figur 3-12 Sorpsjonskurver ved 23 °C for B34M45 med Norcem Standardsement FA



Figur 3-13 Sorpsjonskurver ved 23 °C for B45MF40 med Norcem Standardsement FA



Figur 3-14 Sorpsjonskurver ved 23 °C for B35M45 med Cemex Miljøsement



Figur 3-15 Sorpsjonskurver ved 23 °C for B45MF40 med Cemex Miljøsement

Det er en relativt stor forskjell mellom adsorpsjon- og desorpsjonskurven for alle betongene. Det er "vanlig" oppførsel at de adsorpsjons- og desorpsjonskurvene ligger nært hverandre for lave RF, men det ville vært naturlig at de lå enda nærmere hverandre enn de gjør. Det er likevel en synlig tendens til at de nærmer seg hverandre når RF går mot 35 prosent.

Både betong med v/b-tall på 0,4 og 0,45 er tette betonger. Ut i fra sorpsjonskurvene ser det ut som sementtypen er mer avgjørende enn masseforholdet. Dette kan skyldes at fuktendringen i betongen ved varierende RF er så liten for så lave masseforhold, og porøsiteten er så lik for de ulike betongene (se side 46), at sementen er mer avgjørende for porestrukturen enn masseforholdet.

En årsak til de den store forskjellen mellom adsorpsjons- og desorpsjonskurvene kan være at prøvene ikke har nådd fullstendig likevekt ved de ulike fukttilstandene. Prøvene har ligget i de respektive klimaene i én til to måneder. Selv om kravet for fuktlikevekt er tilfredsstilt ( $<0,1$  % vektendring/døgn) er det mulig at dette kravet er for høyt for en så tett betong, hvis den avgir fukt vesentlig saktere enn vanlig betong. Dersom dette er tilfellet skulle de to kurvene ligget nærmere hverandre; adsorpsjonskurven skulle ligget høyere, og desorpsjonskurven lavere.

Det er vanlig å oppgi sorpsjonskurvene som DCS (degree of capillary saturation) mot RF. I denne oppgaven er de kapillære egenskapene undersøkt på prøver som er tørket ved  $105$  °C. Slik tørking endrer porestrukturen i betongen, slik at den ikke kan sammenliknes direkte med prøver som er tørket ved  $50$  °C. I sorpsjonsundersøkelsene er det valgt å tørke prøvene ved  $50$  °C nettopp for å ikke endre porestrukturen, selv om dette gjør at de ulike undersøkelsene ikke kan sammenliknes. På grunn av dette er sorpsjonskurvene presentert som vekt av fukten pr vekt av tørket prøve.

## **3.4 VURDERING OG DISKUSJON**

Resultatene og testmetodene er diskutert fortløpende, men i dette delkapittelet er det forsøkt å samle noen av de løse trådene.

### **3.4.1 Testmetodene**

Det er gjennomgående at fukthistorikken er avgjørende for resultatene og dermed er det også svært viktig at denne er vedlagt når resultatene legges frem. Dette er en utfordring ved beregning og estimering av betongegenskaper i praksis, da få konstruksjoner eller komponenter har den samme historikken. Dette er også en utfordring ved sammenlikning av ulike betongtyper eller ved kartlegging av krav til betong; sammenlikningsgrunnlaget blir ofte forskjellig, og vanskelig og etterprøve.

Det oppstår også ytterligere utfordringer når metodene i seg selv kan være destruktive for betongen, for eksempel det å tørke betongen ved over  $100$  °C. Slik tørking endrer porestrukturen til betongen og den blir annerledes enn tilsvarende betong som brukes i bygg og konstruksjoner. Det kan da stilles spørsmål til hvor relevante undersøkelsene faktisk er når testbetongen ikke lenger tilsvarer betongen som brukes i praksis.

Det er også utfordringer knyttet til undersøkelser der betongen er tørket ved lavere temperaturer. Det tar svært lang tid å tørke betongen tilstrekkelig, og uten gode verdier for både tørket og vannmettet betong blir verdiene for prøvene mindre



verdifulle. Spesielt for betongene med v/b-forhold på 0,4 er det vanskelig å få til fullstendig metning og uttørking. For betongene med lavt v/b-tall er det også vanskeligere å måle RF og fuktinnhold siden sorpsjonsisotermen er flatere og fukttransportkapasiteten er lavere enn for vanlig betong. Det betyr at mindre fukt kan fordampe eller tas opp (Relling, 1999).

Hydratiseringen kan også ha hatt en innvirkning på resultatene. Undersøkelsene er utført på relativt ung betong, med lavt vann-ementforhold. I forbindelse med forsøkene er prøvene tilført fukt (både ved kutting av prøveskriver og i selve undersøkelsene), og enkelte av testene er utført over lengre tid. Det er derfor mulig at det har foregått noe hydratisering parallelt med testene.

### **3.4.2 Betongene**

Betongene med Cemex Miljøsement er tettere enn de tilsvarende med Norcem Standardsement FA. Spesielt B45MF40 med Cemex Miljøsement har vist seg å være *ekstremt* tett. Porøsiteten til samtlige betonger er relativt lik, men forskjellene kan skyldes at de ulike bindemiddelblandingene gir ulik porestruktur.

Det eneste kravet til vanntett betong er at v/b-tallet skal være lavere enn 0,5. På grunn av dette er det kartlagt få andre egenskaper for såkalt vanntett betong, og dermed finnes det få verdier å sammenlikne tetthetsparameterne med.

De avklarte usikkerhetene knyttet til de ulike testmetodene påvirker følgelig også kvaliteten på resultatene fra undersøkelsene. Det er viktig å være klar over dette når resultatene brukes til beregning.



## 4 FUKTBREGNINGER OVER KJELLERVEGGEN

---

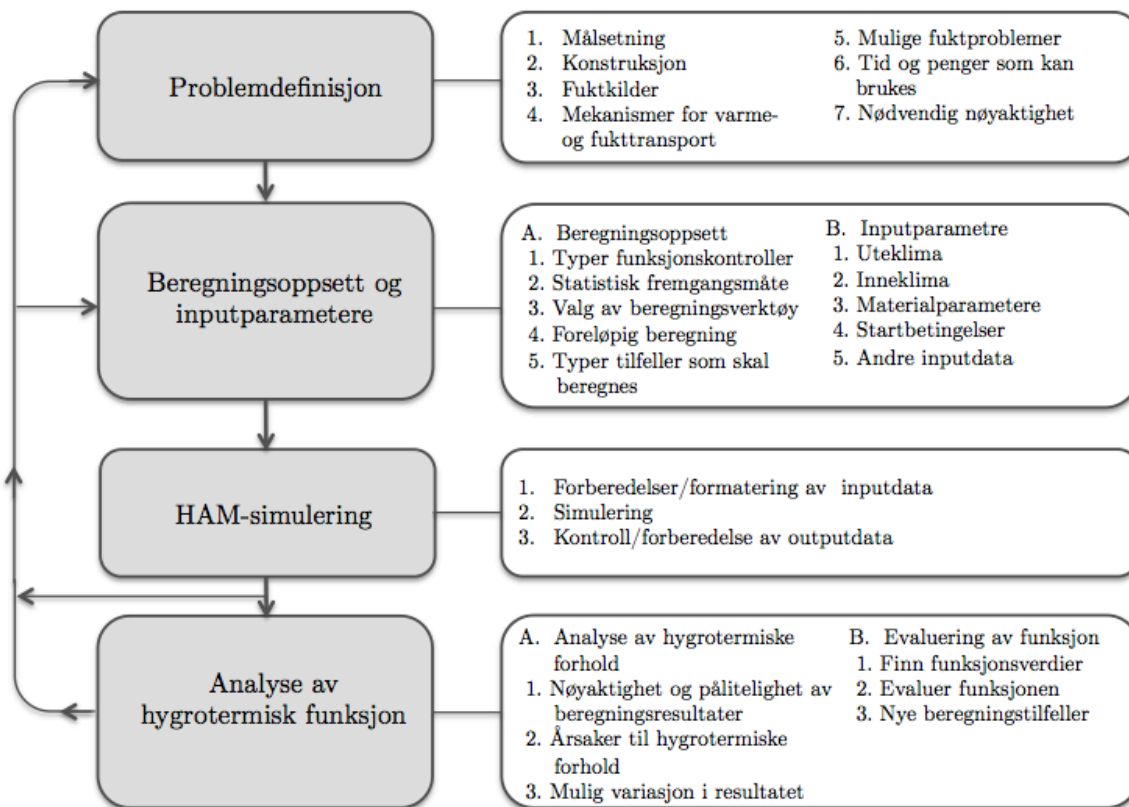
Dette kapitlet tar for seg beregninger av fuktsituasjonen i enkle kjellervegger. Målet er å gi en vurdering av betydningen ulike faktorer har på fuktforholdene. Det er regnet på en rekke forskjellige veggkonstruksjoner. Felles for alle er at de er plassert under grunnvannstand og mot oppvarmede rom.

### 4.1 FREMGANGSMÅTE

Beregningene av fuktinnholdet og  $\mu$ -transporten er utført i WUFI. Bak slike simuleringer ligger det mye arbeid knyttet til alle inputdata og alle resultater, samt valg av beregningsoppsett.

Regneprogrammer for varme- og fukttransport i bygningskonstruksjoner kalles ofte HAM-modeller (Heat, Air, Moisture). De fleste slike programmer baserer seg på samme fremgangsmåte, også analyseprogrammet WUFI. Prosessen består av problemdefinisjon, avklaring av beregningsoppsettet og inputparameterne, simulering og analyse. Metoden som er presentert her er gjengitt fra *Fukt i bygninger* (2002), se denne for en mer detaljert beskrivelse av denne fremgangsmåten.

I hvert enkelt beregningstilfelle må det gjøres avgjørelser knyttet tid ressursbruk, fokusområder og avklaringer, men en generell sjekklister for prosedyre ved HAM-beregninger er gitt i Figur 4-1. Dersom flere av postene blir behandlet nøye vil det endelige resultatet bli bedre og mer nøyaktig. Hovedpunktene i sjekklisten vil bli raskt gjennomgått i det følgende.



Figur 4-1 Metode for fuktteknisk analyse ved hjelp av HAM-modeller

Problemdefinisjonen handler om å definere hva en ønsker å finne ut og hvilken informasjonen som er nødvendig for å kunne gjøre en god analyse. Dette innebærer å avklare formatet på resultatene man vil ha ut av beregningene, hvor nøyaktige svar som er ønskelige og kartlegging av konstruksjonens egenskaper og eksponeringer. I denne oppgaven handlet det om å avklare rammene for et parameterstudie; hvilke parametere som skal undersøkes, og hvordan undersøkelsene skal utføres. Vurderingene som er gjort knyttet til valg av hver enkelt parameter er presentert i kapittel 4.2.

Etter at formålet og bakgrunnen til analysene er klargjort er neste steg å samle alle tilgjengelige data som er nødvendig for å utføre beregningene. Det omfatter materialegenskaper, inkludert bestandighet og egenskapsendringer, fuktkriterier og klimadata. Det kan være lurt å gjøre noen forberegninger i forkant av denne informasjonsinnhenting for å få en grov forståelse av hvilke inputparametere som har størst innvirkning på resultatene. Slike forberegninger kan også hjelpe til med å avklare hvilke tilfeller det er mest aktuelt å gjøre beregninger av. Før simuleringene av kjellerveggen ble satt i gang ble det blant annet gjort grovberegninger på effekten av ulik vannpåkjenning på ytterveggen, for å sikre at denne var tilstrekkelig stor.

Inndataene må produseres i riktig format før simuleringen kan begynne. For eksempel måtte det lages nye klimafilere for å kunne simulere direkte vanntrykk på betongveggen, da dette ikke er en av standardløsningene i WUFI.

Etter HAM-simuleringene er ferdige må resultatene analyseres resultatene. Denne analysen er todelt; første del handler om de tidsavhengige temperatur- og fuktforholdene i konstruksjonen. Den andre delen er en analyse av konstruksjonens bestandighet. Det er nødvendig å analysere både resultatenes nøyaktighet og pålitelighet, i tillegg til å gjøre faglige tolkninger av fuktsituasjonen.

En vurdering av HAM-beregningene av kjellerveggen i denne oppgaven er gitt i kapittel 4.3.

## **4.2 PARAMETERVARIASJONER**

I dette delkapittelet blir variasjonene i de ulike parameterne presentert. I de ulike simuleringstilfellene er det kun den aktuelle parameteren som er vurdert som er endret fra referanseveggen, hvis ikke annet er oppgitt spesielt.

Alle kombinasjoner av forskjellige parametere som er regnet på er listet opp i Vedlegg I.

### **4.2.1 Referansevegg**

Simuleringene er utført endimensjonalt. Det er derfor kun oppbygningen av veggens materialsjikt som er vurdert i denne sammenhengen. I simuleringstilfellene med påføring på innsiden av veggen (med eller uten isolasjon) er stenderne ikke inkludert, verken i beregning eller i analyser. Dersom det skal brukes stendere i tre må det legges et kapillærbrytende sjikt mellom treverket og betongen, eller hvis det brukes stenderverk i stål er det viktig med tiltak for å unngå korrosjon.

I kjellerkonstruksjoner under grunnvannstand er det naturlig at den utvendige isolasjonen blir eksponert for fritt vann. I veggene som er regnet på i denne oppgaven er det ikke benyttet grunnmurplater da de ikke vil ha noen hensikt når konstruksjonen uansett skal dimensjoneres for å tåle konstant vanntrykk (Bakkejord, 2015).

## Oppbygning av referanseveggen

Referanseveggen har 200 mm termisk isolasjon av XPS på utsiden. På innsiden er det en 50 mm tykk påføring med dampmotstand på 0,5 m i den innvendige overflaten.

For beregninger av referanseveggen er et benyttet en konstant utetemperatur på 6 °C og et inneklima som tilsvarer det i Oslo i et rom med lavt fukttilskudd (se kapittel 4.2.5 om inneklimate).

Tykkelsen på betongveggen er i denne oppgaven satt til 300 mm. Teknisk sett er det sjeldent nødvendig med en så tykk vegg i vanlige bygg, hverken med tanke på bæreevne, U-verdi eller vanntetthet. Likevel utføres de fleste plasstøpte vegger i grunnen med den tykkelsen for å kunne oppnå tilfredsstillende utstøping rundt armering og for å spare tid på byggeplassen (Bakkejord, 2015).

I påføringen er det lagt inn et luftlag i WUFI. Dette luftlaget spesialdefinert i programmet, og inkluderer effekten av konveksjon.

De fleste av elementene i referanseveggen er forklart nærmere i det følgende, men en oversikt over referanseveggen er gitt i Tabell 4-1.

**Tabell 4-1 Oversikt over parametervariasjoner**

Utvendig termisk isolasjon	- 200 mm XPS
Betong	- 300 mm tykk - Betong med B45-kvalitet, fra materialbiblioteket til WUFI (med endring av kapillaritetstallet)
Påføring	- 50 mm uten isolasjon
Dampmotstand i innvendig kledning	- 0,5 m
Inneklima	- Oslo - Lavt fukttilskudd
Uteklima	- Konstant temperatur. 6 °C

## Initialbetingelser

I tillegg til parameterne som er nevnt over, er det gjort noen valg i WUFI som gjelder for alle beregningene som er gjort. Disse er oppsummert i Tabell 4-2

**Tabell 4-2 Initialbetingelser brukt i WUFI-beregningene**

Parameter	Verdi
Innvendig overgangsmotstand	0,125 (grunn)
Utvendig overgangsmotstand	- (ingen)
S <sub>a</sub> -verdi på utvendig overflate	- (ingen kledning)
Kortbølget strålingsabsorpsjon	- (ingen stråling under grunnen)
Langbølget trålingsabsorpsjon	- (ingen stråling under grunnen)
Regnvannsabsorpsjonsfaktor	1
Initial RF (i alle materialer med unntak av betongen)	80 %

For å oppnå vanntrykk mot betongen er det laget en klimafil i WUFI med store mengder slagregn. Regnmengden er så stor at den er vurdert til å tilsvare konstant vanntrykk på overflaten. Regnabsorpsjonsfaktoren sier noe om hvor mye av regnet som renner langs veggen og hvor mye som spruter bort når regnet treffer. For å sikre en vannfilm på betongen til en hver tid er denne faktoren satt til 1. Kontrollberegninger med regnmengder i størrelsesorden  $10^3$  ganger større ga ingen endring i fuktinnhold i konstruksjonen og dette er vurdert som en bekreftelse på sjiktet utenfor betongveggen er fullstendig mettet til en hver tid.

#### 4.2.2 Termisk isolasjon

Det varieres med kombinasjoner fra 0 til 200 mm isolasjon på utsiden og 0 til 100 mm på innvendig side. 200 mm termisk isolasjon og 300 mm betong gir en U-verdi i veggen på omtrent  $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , mens 100 mm termisk isolasjon (og tilsvarende betongvegg) gir en U-verdi på  $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Referanseveggen er godt nok isolert til å kunne brukes i et passivhus.

I de tilfellene der det er benyttet innvendig isolasjon er det kombinert med utvendig isolasjon slik at den totale isolasjonstykkelsen alltid er 200 mm. Det er i tillegg gjort et par simuleringer for å se på virkningen av mindre isolasjon (enn 200 mm), i de tilfellene er det kun isolasjon på utsiden.

På tross av at minst  $1/3$  av den totale isolasjonstykkelsen skal plasseres på utsiden er det gjort noen utvalgte simuleringer for å se på konsekvensene når den innvendige isolasjonen overstiger  $2/3$ .

I veggkonstruksjonen er det brukt XPS som termisk isolasjon på utsiden av betongen og mineralull på innsiden. XPS har en lukket porestruktur og gjerne tynn plasthud på overflaten. XPS'ens relative vanddampmotstand endres ikke vesentlig i våt tilstand (Standard Norge, 2007).

Det antas at den utvendige isolasjonen er vannmettet og at den ikke er tett i skjøtene slik at det står vanntrykk direkte på betongen. Det er mulig å legge inn vanntrykk mellom to sjikt i WUFI. Det er mulig å legge inn fuktkilder i konstruksjonen, men det var for mange usikkerheter knyttet til hvordan disse fungerer og hvilke innvirkninger det ville ha på konstruksjonen til at dette ble valgt som et alternativ. For å lage et oversiktlig oppsett av konstruksjonen, med kontroll over alle aktuelle parametere, ble det ikke lagt inn noe sjikt for den utvendige isolasjonen i databeregningene. Temperaturen mellom den utvendige isolasjonen og betongen er regnet ut ved tradisjonelle U-verdiberegninger og disse temperaturene ble deretter lagt direkte som utetemperatur inn i klimafilene som ble brukt. Vanntrykket er som nevnt oppnådd ved å påføre slagregn direkte på betongen.

### 4.2.3 Betong

Da simuleringene ble satt i gang var kun noen få av resultatene fra betongundersøkelsene klare. Som utgangspunkt for simuleringene i WUFI i denne oppgaven blir det derfor brukt betong som allerede lå inne i biblioteket til WUFI.

WUFIs database inneholder flere typer betonger, men det varierer hvilke materialdata som finnes for de ulike typene. Det er heller ikke oppgitt hvordan de gitte materialdataene er funnet (for eksempel om de er funnet ved beregninger eller forsøk). Det er også lite tilgjengelig informasjon om de betongene som ligger inne i standardbiblioteket (blandeforhold, alder osv.), som igjen gjør det vanskelig å vite om betongen som brukes i beregningene vil tilsvare den som planlegges brukt ved bygging.

Siden det er så store forskjeller mellom betongene i WUFI, og samtidig så store usikkerheter knyttet til hva disse forskjellene faktisk skyldes, ble det vurdert som lite hensiktsmessig å sammenlikne forskjellige typer betong som allerede ligger inne i programmet. Det ble derfor tatt utgangspunkt i en betong fra Fraunhofers database som er klassifisert som B45. Denne betongen er brukt som et sammenlikningsgrunnlag frem til aktuelle materialdataene ble tilgjengelige. Ved å gå inn å endre enkelte materialparametere ble det mulig å undersøke innvirkningen til ulike transportkoeffisienter. Resepten til betongen er ikke tilgjengelig, så det måtte gjøres noen antakelser angående betongegenskapene. En betong med B45- kvalitet bør være vanntett (vann-ementforhold på mindre enn 0,5). Dette var den av de tilgjengelige betongene i de ulike databasene som ble vurdert som mest lik de som er undersøkt i denne oppgaven og som samtidig hadde troverdige data for de hygrotermiske egenskapene. De dataene som var ferdige i tide; fuktinnhold og



kapillaritetstall ble lagt til før beregningene ble utført. Disse verdiene er hentet fra undersøkelsene om kapillarabsorpsjon og porøsitet, for B35M45 betong med Norcem Standardsement FA, som er vurdert som den vanligste av de fire betongene som er testet.

Det tar lang tid for fersk betong å tørke ut, både ved selvuttørking og ved aktive tørketiltak på byggeplassen. Det vil derfor være forskjeller i betongens RF på forskjellige prosjekter, avhengig av betongtype og tørkeforhold. I denne oppgaven er 90 prosent RF satt som referanse, da dette er vurdert som den mest realistiske verdien for relativt ny betong med vann-sementforhold på 0,45. I betonger med v/b-tall rundt 0,4 kan denne verdien gå ned til ca. 80 prosent på grunn av selvuttørking. Det er også gjort noen simuleringer med startfukt i betongen ned til 70 prosent, og en der betongen hadde 90 prosent RF i det ytterste sjiktet og 70 prosent RF i det innerste. Dette er for å se på virkningen av det initiale fuktinnholdet i nye konstruksjoner. Dersom fukten gir problemer allerede ett år etter bygging har det ingen nytteverdi å regne på konstruksjonen flere år etter når tilstanden er blitt stasjonær. Betongen som ble brukt har en porøsitet på 18 prosent.

For å se på innvirkningen av både kapillært sug og vanndampdiffusjon gjøres det også simuleringer der dampdiffusjonsmotstanden [-] og væsketransportkoeffisienten [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] endres. Væsketransportkoeffisienten er endret ved å variere på kapillaritetstallet, som er kalt vannabsorpsjonskoeffisient [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{vs}$ ] i WUFI. Kapillaritetstallet er testet i et spekter av verdier som antas realistiske for betong; fra 0,005 til 0,3  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{1/2})$ . Vanndampdiffusjonsmotstanden ble økt med 25 prosent.

#### **4.2.4 Innvendig kledning**

I simuleringene er det undersøkt følgende kledninger innvendig;

**Tabell 4-3 Oversikt over innvendige kledninger i parameterstudiet**

Materiale	$S_d$ -verdi [m]
Ingen overflatebehandling	0
Platekledning, gipsplate	0,1
Platekledninger, for eksempel gipsplate med silikatmaling	0,2
Platekledninger for eksempel gipsplate med maling	0,5
Platekledninger for eksempel gipsplate med to strøk matt alkydmaling	1,0
Dampbrems og gipsplate, eller, vinyltapet	2,0
Platekledninger, for eksempel gipsplate med maling eller gipsplate med dampbrems	4
Dampsperre	10
Dampsperre	70
Smart dampsperre [AirGuard Smart]+ gipsplate med $S_d = 0,1$ m	-
Smart dampsperre [AirGuard Smart]+ gipsplate med $S_d = 0,5$ m	-

Med unntak av tilfellet uten overflatebehandling er alle versjoner av innvendige kledninger testet på en 50 mm uisolert påføring. I praksis har det liten hensikt å bruke dampsperre dersom det ikke er isolasjon på innsiden av konstruksjonen, men disse undersøkelsene er like vel utført for å vise virkningen av økende dampmotstand i innvendig kledning. For også å teste ”riktig” bruk av dampbrems og dampsperre er det gjort undersøkelser for vegger 100 mm påføring isolert med mineralull for dampsperrerne med 10 og 70 m dampmotstand og for den ”smarte” dampsperreren AirGuard Smart. I disse tilfellene er det kun regnet med 100 mm isolasjon på veggens utside.

Dampsperrer med variable egenskaper, såkalte ”smarte” dampsperrer, er relativt nytt på markedet i Norge. Disse skal fungere som vanlige dampsperrer mesteparten av tiden, altså hindre at vanndamp fra inneluften trenger ut i konstruksjonen. Men dersom fuktigheten på utsiden av dampsperreren blir høy, vil dampmotstanden reduseres, slik at konstruksjonen kan tørke innover.

Vanndampmotstanden til den smarte dampsperreren AirGuard Smart ved forskjellige RF er angitt Tabell 4-4.

Tabell 4-4 Vanndampmotstand til AirGuard Smart ved varierende RF-verdier (Thorsrud, 2013)

RF [%]	S <sub>d</sub> [m]
12,5	102,5
25	43,2
37,5	18,2
41,5	3,4
62,5	1,5
75	0,17
87,5	0,07
95	0,03
97,5	0,02

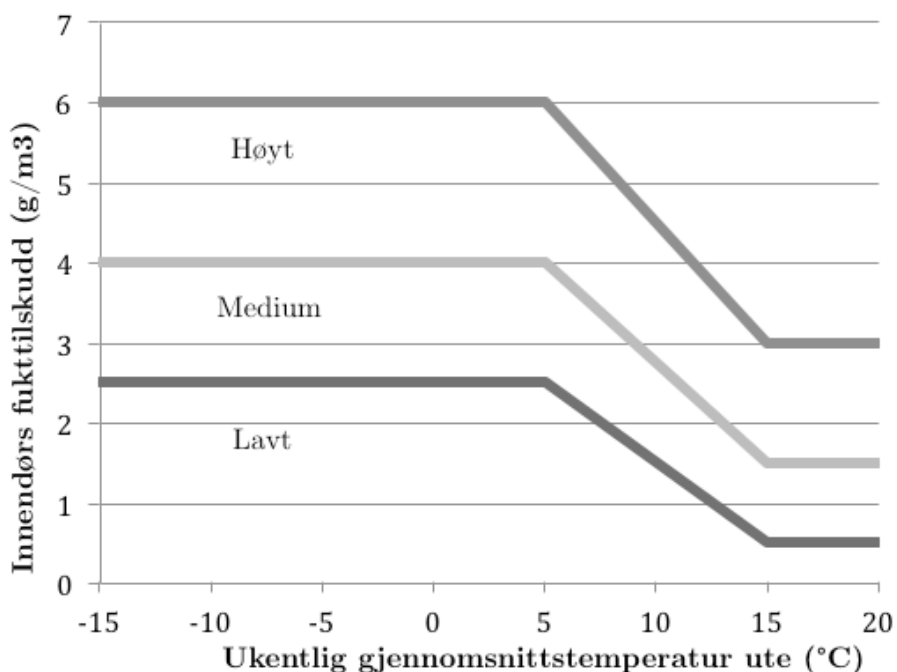
#### 4.2.5 Innvendig klima

Med utgangspunkt i uteforholdene kan man utlede innendørsklimaet basert på algoritmer angitt i NS EN ISO 13788 (Bygningskomponenters og bygningsdelers hydrotermiske egenskaper. Innvendig overflatetemperatur for å unngå kritisk overflatefuktighet og kondensasjon i mellomrom. Beregningsmetoder). WUFI gjør disse beregningene automatisk.

I WUFI er det registrert værdata for flere steder i Europa. Værdataene er generert ut i fra MDRY (Moisture Design Reference Year), som representerer den kritisk fuktbelastningen over et år, som har en returperiode på ti år (WUFI, 2010). Der beregningsperioden er lenger enn ett år gjentas innlesningen av klimafilen automatisk.

Siden inneklimate påvirkes sterkt av uteklimate er det undersøkt hvordan klimaet i tre forskjellige byer i Norge (Oslo, Bergen og Karasjok) påvirker fukttilstanden i ytterveggen.

I tillegg har også bruken av bygget betydning for inneklimate. For alle byene er det også undersøkt virkningen av "lavt" og "høyt" fukttilskudd. I Oslo er det også gjort en vurdering av "middels" fukttilskudd. Verdiene av lavt, medium og høyt fukttilskudd (også omtalt som fuktoverskudd) er vist i Figur 4-2.



Figur 4-2 Designkurver for innendørs fukttilskudd i hus (Geving og Holme, 2011)

Dimensjoneringsverdiene i Figur 4-2 er laget for bolighus. På grunn av mangel på dagslys vil ikke rom under grunnen bli bruk til permanent opphold. Som nevnt innledningsvis kan slike rom bli brukt til for eksempel auditorier, kinosaler og kjøpesentre. På tross av at dette er steder hvor mange mennesker samles er dette også steder som prosjekteres med god ventilasjon og som kun er i bruk deler av døgnet. På grunn av at ventilasjonen i slike rom er god, er det derfor satt et *lavt* fukttilskudd referanse.

#### 4.2.6 Utvendig temperatur

Som nevnt i kapittel 2.2.2 går temperaturen i grunnen mot årsmiddeltemperatur for overflaten dersom grunnen ikke får tilført varme fra omliggende konstruksjoner. Årsmiddeltemperaturene (MDRY) for byene som vurderes i denne oppgaven er gitt i Tabell 4-5 (Geving og Thue, 2002).

Tabell 4-5 Gjennomsnittlig årstemperatur (MDRY) for Oslo, Bergen og Karasjok

By	Gjennomsnittlig årstemperatur ved markoverflaten
Oslo	6,4 °C
Bergen	8,1 °C
Karasjok	-3 °C

Det er gjort en gjennomgang av rapporten *Nasjonalt overvåkningsnett for grunnvann og markvann (Fysiske Parametere)* fra NVE (2015), der ca. 60 målområder for overvåking av grunnvannstand over hele landet er kontrollert. Rapporten viser at lavest målte temperatur i grunnvannet var 3,7 °C, og den høyeste var 9,5 °C. De fleste undersøkelsene i denne rapporten er utført om sommeren.

Det antas at temperaturen så langt under bakken (fire til fem meter) er konstant. Det er uklart hvor mye virkningen av isolasjonstykkelsen, grunnvannet og gjennomsnittlig utetemperatur påvirker konstruksjonen. På bakgrunn av grunnvannstemperaturene og årsmiddeltemperaturene til de byene som er vurdert i denne oppgaven, er det undersøkt virkningen av flere konstante temperaturer; 4 °C , 6 °C, 8 °C og 10 °C.

### **4.3 RESULTATER FRA WUFI-BEREGNINGENE**

I dette delkapittelet blir resultatene fra parameterstudiet presentert og vurdert. Det er først gitt noen avklaringer for presentasjonen av resultatene, deretter er resultatene presentert med utgangspunkt i hver enkelt parameter.

#### **4.3.1 Avklaringer**

Betongen som ble brukt i simuleringene ser ut til å være veldig porøs/sugende. Det har resultert i svært høy RF i alle simuleringer og dermed små forskjeller mellom de ulike alternativene. Nesten alle simuleringene hadde resultater som lå mellom 95 og 100 prosent RF over hele betongtverrsnittet. Det er like vel forsøkt å gjøre noen vurderinger av de enkelte tilfellene. For å vise forskjellene tydelig er de fleste vertikale aksene justert, en må være oppmerksom på dette for å unngå at grafene feiltolkes.

Flere av resultatgrafene er presentert som relativ fuktighet over veggverrsnittet. Samtlige simuleringer er kjørt over tre år, og dataene for RF over tverrsnittet er hentet ved beregningens slutt, 1. oktober.

Det antas at den utvendige isolasjonen er vannmettet (RF = 100 %) og at det står vanntrykk direkte på betongen. Den utvendige isolasjonen er derfor ikke inkludert i resultatgrafene som viser tverrsnittet i denne oppgaven.

I grafene er tverrsnittet av veggen presentert fra betongens utvendige overflate (0 m) til betongens innvendige overflate (ved 0,3 m). I tillegg er det lagt til en påføring på innsiden av betongsjiktet (med eller uten isolasjon) på 0,05 m eller 0,1 m i de fleste tilfellene. Ved avlesing av grafene må en være klar over at ikke alle konstruksjonene

er bygd opp likt (eller har samme totale tykkelse). Avslutningen til en kurve representerer den innvendige overflaten.

I simuleringene i dette kapitlet er det brukt betong der materialsammensetningen ikke er kjent. Den kan derfor ikke direkte sammenliknes med betong som brukes ved byggeprosjekter i Norge. Resultatene som er presentert her må derfor kun brukes til å vurdere tendenser og betydningen til forskjellige parametere, de kan ikke brukes til dimensjonering eller videre beregning.

Alle tallene i parentes i figurene referer til en gitt parametervariasjon. Oversikt over disse er vedlagt i Vedlegg I.

### **4.3.2 Utvendig termisk isolasjon**

En variasjon i tykkelse på utvendig isolasjon vil i dette tilfelle være det samme som en variasjon i utetemperatur. Dette kommer av at isolasjonen ikke er tatt hensyn til i beregningene i noen annen grad enn at de endrer temperaturen i betongveggen. Så langt under bakken, har det lite innvirkning på fukttilstanden i konstruksjonen om det er 100 mm eller 200 mm med isolasjon på utsiden av veggen.

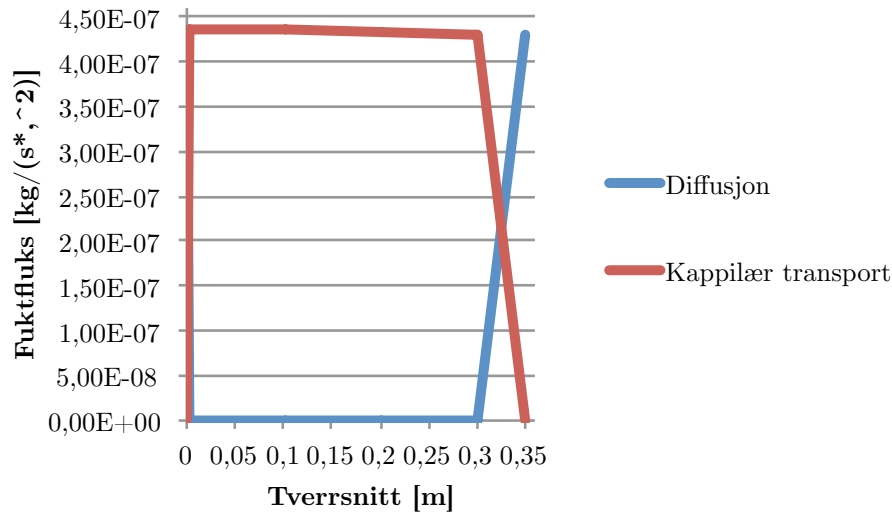
En vurdering av innvirkningen av utvendige temperaturendringer er gjort i 4.3.7.

### **4.3.3 Betong**

Konsekvensene av ulik initiell RF og variasjoner i kapillaritetstall presenteres i det følgende. Det er også gjort en vurdering av forholdet mellom kapillær transport og vanndampdiffusjon gjennom betongen og av hvordan fuktinnholdet i betongen endres over tid.

#### **Innvirkning av diffusjon og kapillærtransport**

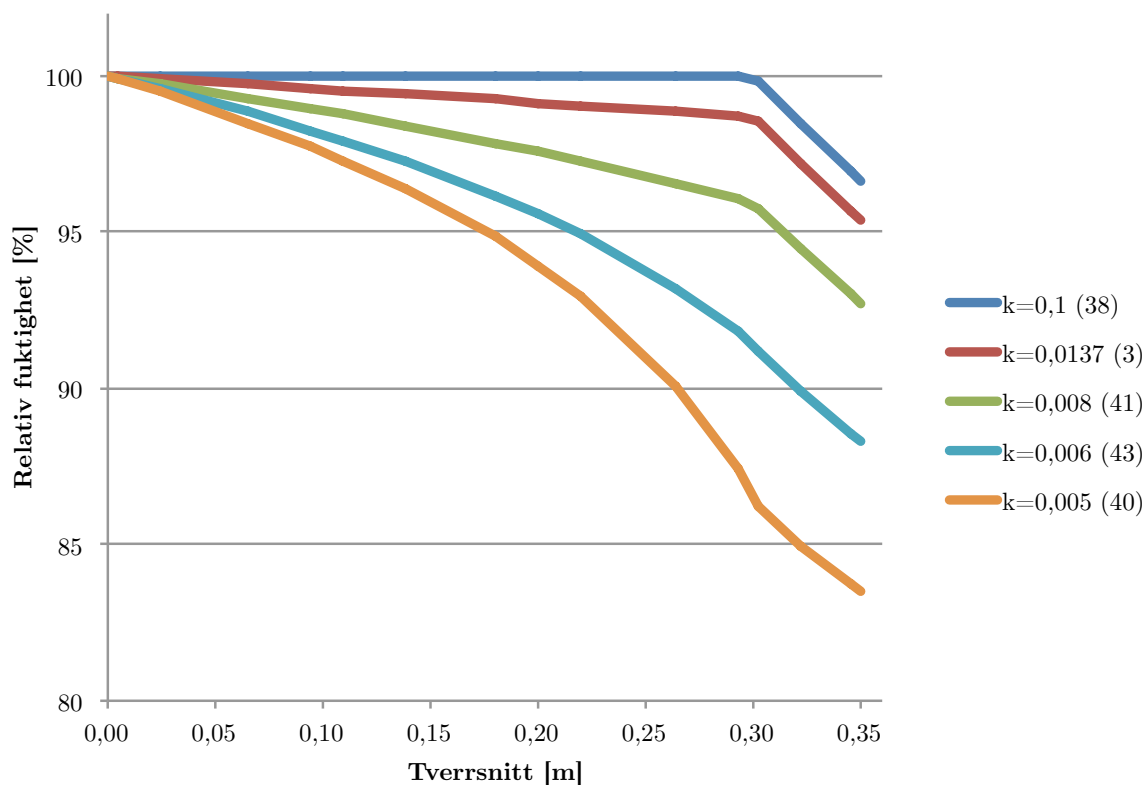
Figur 4-3 viser fordelingen mellom diffusjon og kapillærtransport i referanseveggen i oktober, etter en simuleringsperiode på to år. Det kommer frem av figuren at all fukttransport av betydning foregår kapillært.



**Figur 4-3 Fordeling mellom diffusjon og kapillærtransport gjennom referansevegg i oktober**

Det er noe dampdiffusjon gjennom betongen, men det er svært lite (dampdiffusjonen er i størrelsesordenen  $4\text{-}5 \cdot 10^{-11} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ). Den store mengden kapillærtransport kan skyldes den høye RF i betongen, slik at det meste av den transporterte fukten er væske. Dette medfører også at en endring av vandampdiffusjonsmotstanden (parametervariasjon nummer 15) i betongen har liten innvirkning på den totale fukttransporten. Siden endringen av vandampdiffusjonsmotstanden ikke ga noen endringer i fuktinnhold i forhold til referanseveggen er resultatene ikke presentert grafisk.

Variasjoner av kapillaritetstallet hadde vesentlig større effekt enn endring av vandampdiffusjonen. En oversikt over den endelige fordelingen av RF over veggens tverrsnitt, med ulike kapillaritetstall er angitt i Figur 4-4.



**Figur 4-4 Effekt av variabel vannabsorpsjonskoeffisient, vist ved RF over veggverrsnittet**

For kapillaritetstall på 0,1 er vanngjennomstrømningen så stor at RF er 100 prosent i hele betongsjiktet. Effekten av å redusere kapillaritetstallet blir vesentlig større ved lave verdier. Kapillaritetstall lik 0,005  $\text{kg}/(\text{m}^2 \sqrt{\text{s}})$  gir en vesentlig tørrere betong enn referansebetongen med kapillaritetstall lik 0,0137  $\text{kg}/(\text{m}^2 \sqrt{\text{s}})$ .

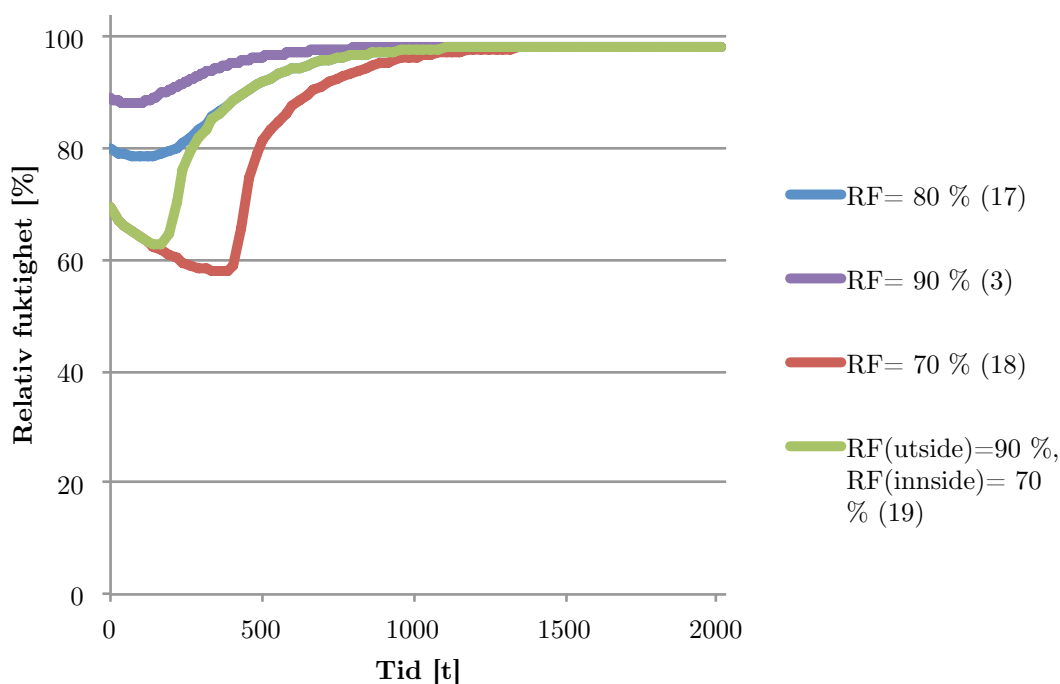
Det er viktig å være oppmerksom på at det i dette tilfellet kun var kapillaritetstallet som ble endret. Betong med kapillaritetstall på 0,005 vil ikke ha de samme øvrige egenskapene som referansebetongen har i dette tilfellet. Egenskapskombinasjonene i disse beregningene er derfor ikke realistiske. De viser like vel at de kapillære egenskapene har svært stor innvirkning når WUFI beregner fuktinnhold i betong.

Betongblandingene som ble testet i laboratoriet (kapittel 3) hadde kapillaritetstall mellom 0,0057 og 0,0137. De andre betongblandingene (alle med unntak av B35M45 med Norcem Standardsement FA, som har samme kapillaritetstall som referansebetongen) vil gi bedre resultater for fuktinnholdet i betongen enn vegg som er beregnet i dette kapittelet.



## Initiell relativ fuktighet

Initiell RF i betongen har innvirkning på fuktforholdet i de første månedene. I undersøkelsene med samme betong og randbetingelser, men ulik initiell RF, var RF ved betongens innvendig overflate lik i alle tilfellene etter kun. 1400 timer (58 døgn). Figur 4-5 viser RF i betongsjiktet, to millimeter fra den innvendige overflaten, de første 2000 timene av simuleringsperioden.



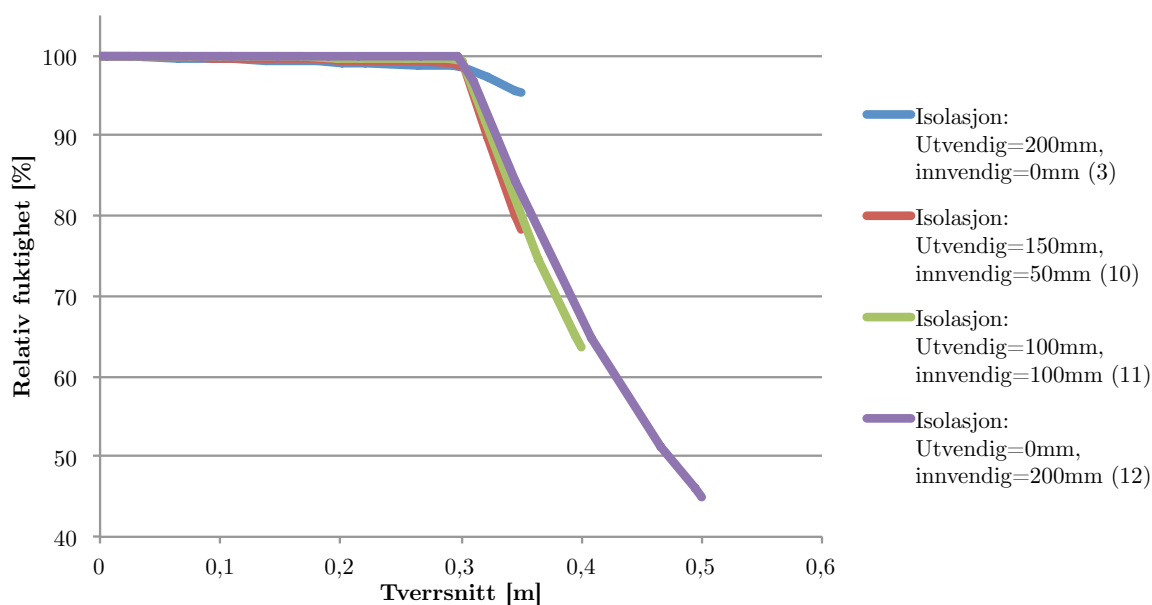
**Figur 4-5 Endring i RF på innvendig betongoverflate over tid for betong med ulik initial RF**

Figur 4-5 viser også inntrengningshastigheten til fukten i betongen. For tilfellet med initiell RF lik 70 prosent tar det omtrent 500 timer (ca. 20 døgn), før fuktfronten når den innvendige overflaten. For betong med startfukt på 90 prosent tar det kun om lag 100 timer (ca. fire døgn). Det tar altså omtrent bare to måneder før fuktstrømmen og dermed metningen er lik for alle tilfellene, ifølge WUFI-beregningene. Dette er svært lite tid for en så tykk betongvegg.

### 4.3.4 Innvendig isolasjon

Det er små marginer som skiller fuktinnholdet i de ulike konstruksjonene, siden fuktigheten i alle er så høy. Dette gjør det vanskelig å vurdere virkningene av de ulike parameterne. Figur 4-6 viser likevel at fuktigheten i betongsjiktet, og dermed også fuktigheten i mineralullen (spesielt i den delen som er i kontakt med betong),

øker med mengde innvendig isolasjonsmengde. Med 200 mm innvendig isolasjon (nr. 12) er RF 100 prosent over hele betongtykkelsen.



**Figur 4-6 Effekt av variabel tykkelse på innvendig isolasjon, vist ved RF over tverrsnittet**

Med isolasjon på innsiden av veggen reduseres temperaturen i betongen, slik at RF øker. I tillegg har isolasjonen en dampmotstand i seg selv, som også vil bidra til å øke fuktigheten i veggen.

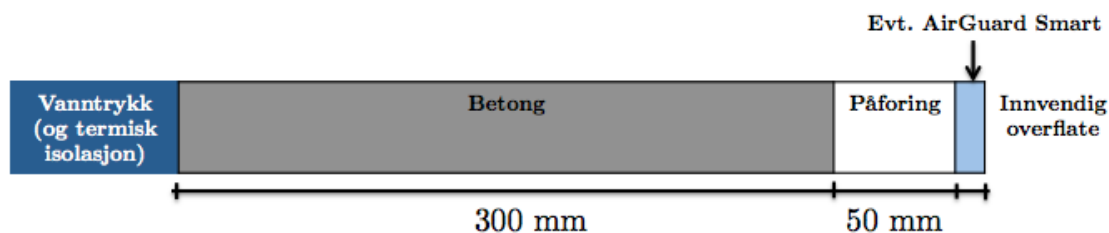
RF ved innvendig overflate reduseres kraftig dersom det er isolasjon i påføringen. Dette skyldes delvis at mineralull har større fuktkapasitet enn luft, slik at fuktinnholdet i mineralullen er stort, selv om RF ikke er det. På tross av lav RF på innvendig overflate er det veldig gode vekstforhold for mugg og råte i mineralullen nærmest betongen på grunn av den forhøyede RF i det området.

Det er små forskjeller mellom de forskjellige isolasjonstykkelene, men teorien om at det er ugunstig med innvendig isolasjon i kjellervegger under bakken bekreftes likevel.

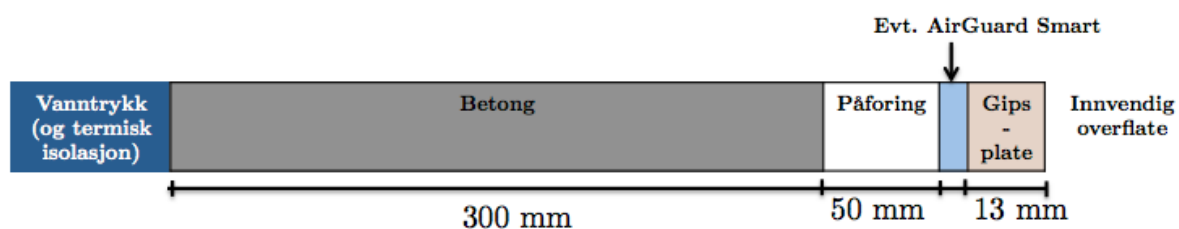
### 4.3.5 Innvendig kledning

I WUFI er det flere måter å legge inn innvendig dampmotstand på. Det er derfor regnet på to serier, med omtrent tilsvarende konstruksjoner. I den første serien (Figur 4-7 og Figur 4-9) er den innvendige dampmotstanden lagt inn som en egen inputparameter i WUFI. Det er i disse tilfellene ikke lagt inn noe eget sjikt for kledningen. Dette er det samme som er gjort i alle andre beregninger i denne oppgaven. I den andre serien (Figur 4-8 og Figur 4-10) er

inputparameteren ”dampmotstand ved innvendig overflate” i WUFI satt til 0 m , mens det er lagt til en gipsplate på innsiden av veggen med ulik dampmotstand for hver beregning.



Figur 4-7 Prinsipiell oppbygning av veggen uten gipsplate



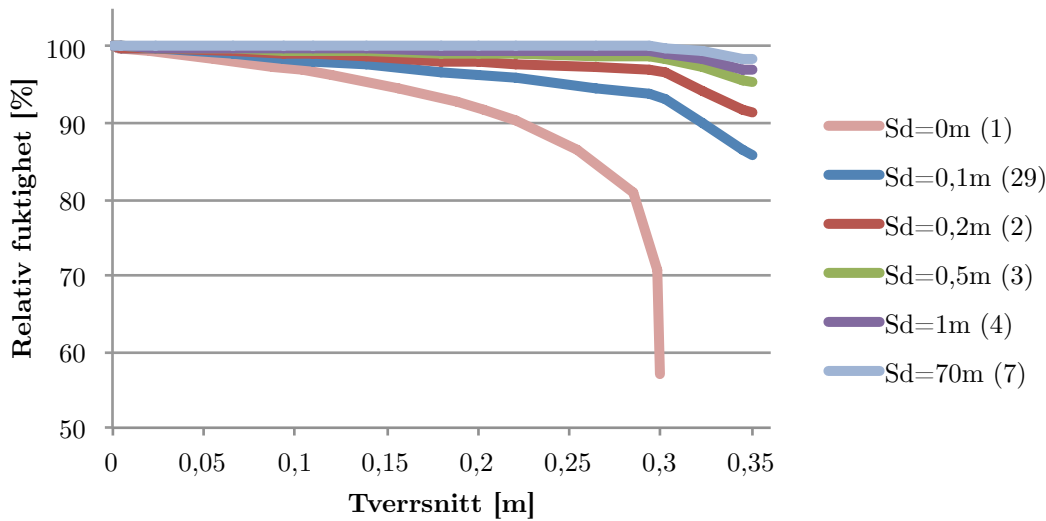
Figur 4-8 Prinsipiell oppbygning av veggen med gipsplate

Målet med å gjøre to analyser var å bekrefte at de to metodene gir samme fuktinnhold og  $\mu$ -transport. Figur 4-9 og Figur 4-10 viser RF over tverrsnittet ved de to tilfellene, og de er like gjennom hele veggen. Siden gipsplaten ligger inne som et eget sjikt viser Figur 4-10 platens RF i likevekt med inneluften ved innvendig overflate. Dette gir vesentlig lavere RF akkurat her.

Den første løsningen (uten gipsplate) er valgt i de øvrige beregningene blant annet for å bedre lesbarheten til resultatfigurene, da det siste punktet på grafen representerer punktet rett *bak* den innvendige kledningen (siden det ikke er noe kledning, kun dampmotstand). De øvrige figurene viser derfor ikke dette ”RF-fallet” ned til det som tilsvarer RF i inneluften.

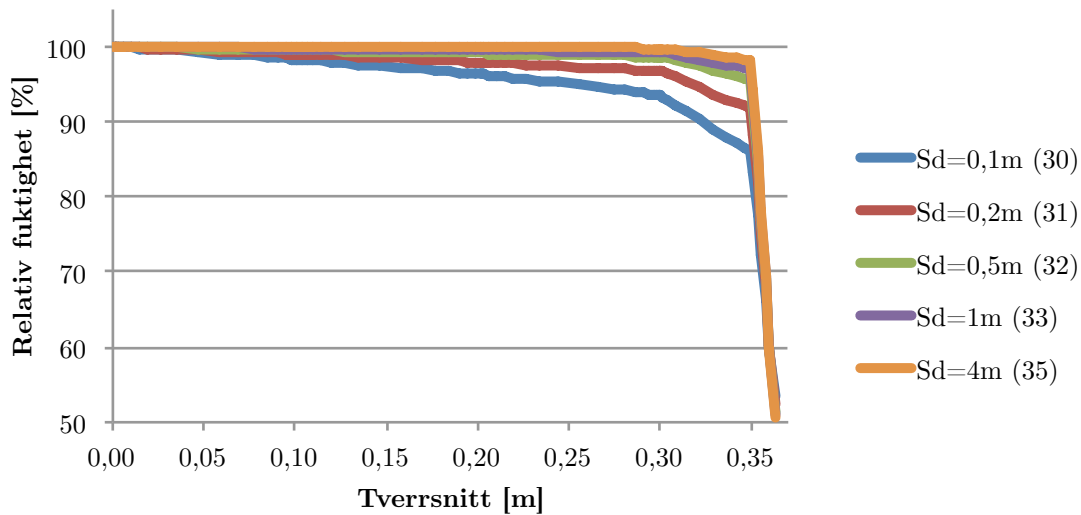
### RF over vegg-tverrsnittet

Simuleringene i WUFI viser klart at det er vesentlig mer uttørking der det ikke er noen overflatemotstand. I innredede rom er det riktig nok uvanlig å ikke ha noe innvendig kledning eller overflatebehandling på betongen. Det er likevel viktig å se hvor mye lavere RF er i veggen med fri betongoverflate. Alternativene med dampmotstand på 0,1 og 0,2 m skiller seg også positivt ut. For større dampmotstand blir RF så høy at den nærmer seg 100 prosent over hele tverrsnittet.



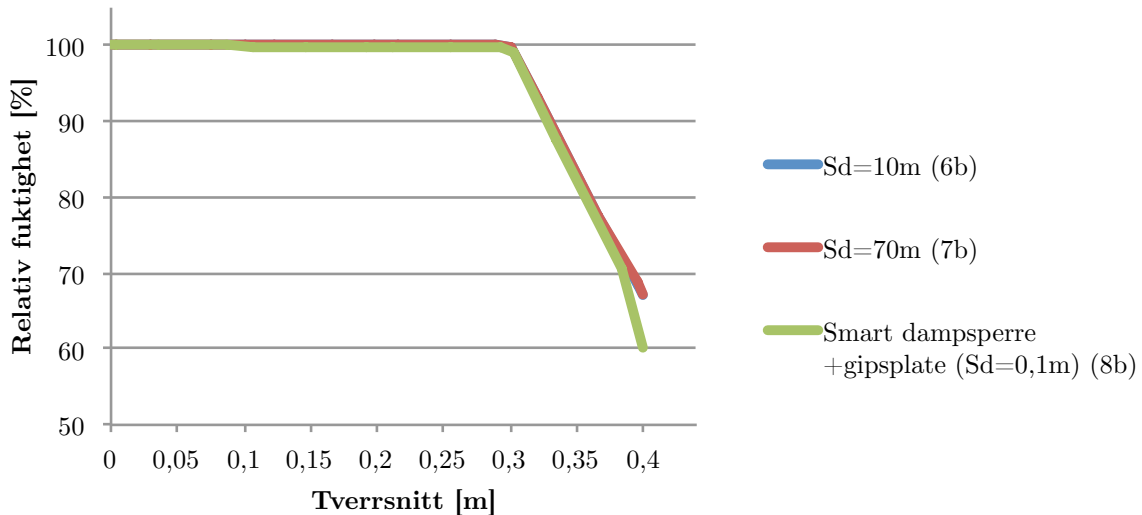
Figur 4-9 Effekt av variabel dampmotstand i innvendig kledning, vist ved RF over tverrsnittet (uten gipsplate)

I den andre serien (med gipsplate) er kledning med  $S_d$ -verdi på fire meter undersøkt i stedet for en med 70, siden dampsperrer ikke brukes i vegger helt under bakken. Betongen i konstruksjonen med  $S_d$ -verdi på fire meter er ikke helt vannmettet slik som for 70 meter, men den ligger tett opp mot 100 prosent RF over hele tverrsnittet.



Figur 4-10 Effekt av variabel dampmotstand i innvendig kledning, vist ved RF over tverrsnittet (med gipsplate)

I praksis brukes ikke dampbrems eller -sperre uten innvendig isolasjon. Figur 4-11 viser derfor resultatene fra beregningene som er gjort med innvendig isolasjon, og dampmotstand større enn ti meter. Alle variasjonene i Figur 4-11 har 100 mm isolasjon på både innside og utside.



**Figur 4-11 Effekt av variabel dampmotstad i dammsperre/ -brems, vist ved RF over tverrsnittet**

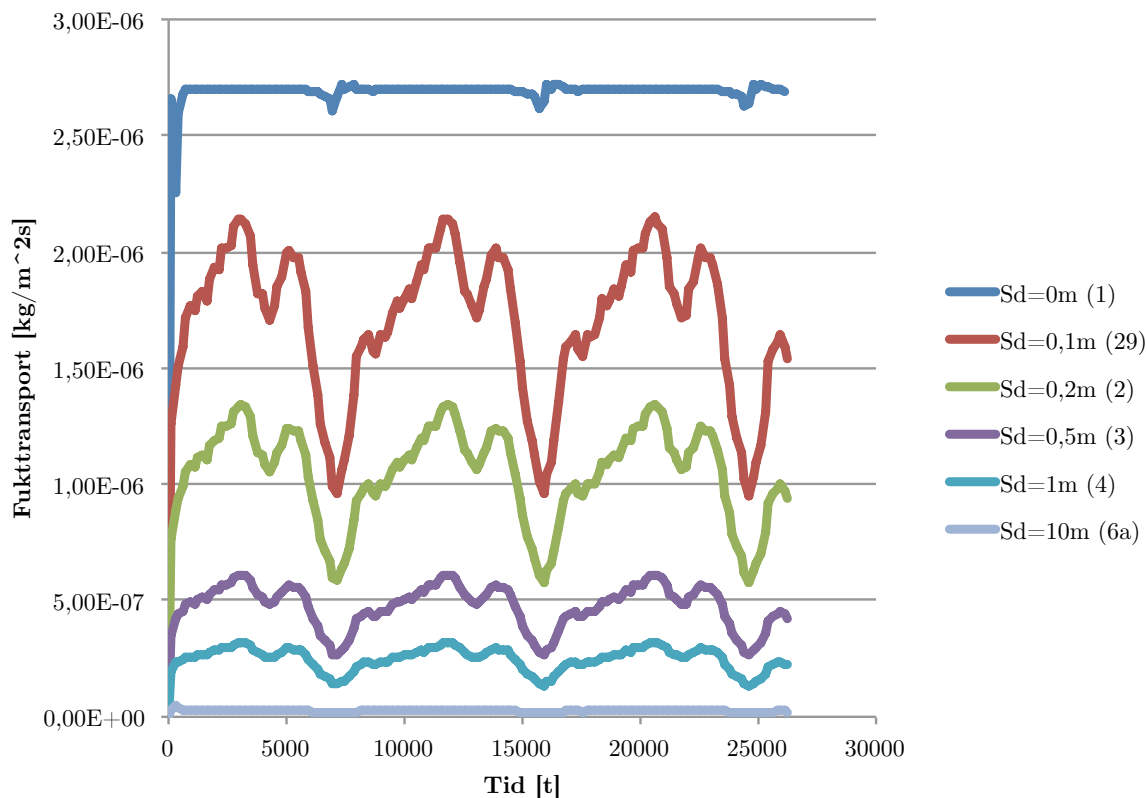
Innvendig isolasjon senker temperaturen i betongen, slik at RF øker. Av Figur 4-11 kan en se at den reduserte temperaturen i betongen, kombinert med en damptett overflate gir betong med 100 prosent RF gjennom hele tverrsnittet, og dermed også 100 prosent RF ved overgangen mellom betong og mineralull. Det er ingen forskjell mellom  $S_d$ -verdi 10 og 70m. Resultatene samsvarer godt med de i 4.3.4, der innvirkningen av innvendig isolasjon er vurdert. Det er liten forskjell på beregningene med og uten dammsperre (med lik isolasjonsmengde).

Som nevnt i kapittel 2.1.2 (om kapillær transport) er det viktig å være klar over at kapillærkreftene til betongen gjør at innsugingsevnen til betong teorien kan bli svært stor og at konstruksjoner som er i kontakt med vann skal kunne bli fullstendig vannmettet dersom fordampingen er forhindret. Dette ses også i Figur 4-9, Figur 4-10 og Figur 4-11, der betongen raskt nærmer seg vannmettet når dampmotstanden (ekvivalent luftlagstykkelse) stiger over 0,5 m.

I beregningene som er gjort i dette delkapittelet er teorien om at det er ugunstig med dammsperre når hele veggen er under bakken bekreftet. Fukttransporten fra betongen til påføringen er så stor at det er viktig med en dampåpen kledning slik at veggen får mulighet til å tørke innover.

### **Fukttransport gjennom betongen**

Det er også sett på fukttransporten gjennom betongen. Figur 4-12 viser fuktstrømmen gjennom et sjikt to millimeter fra den innvendige betongoverflaten.

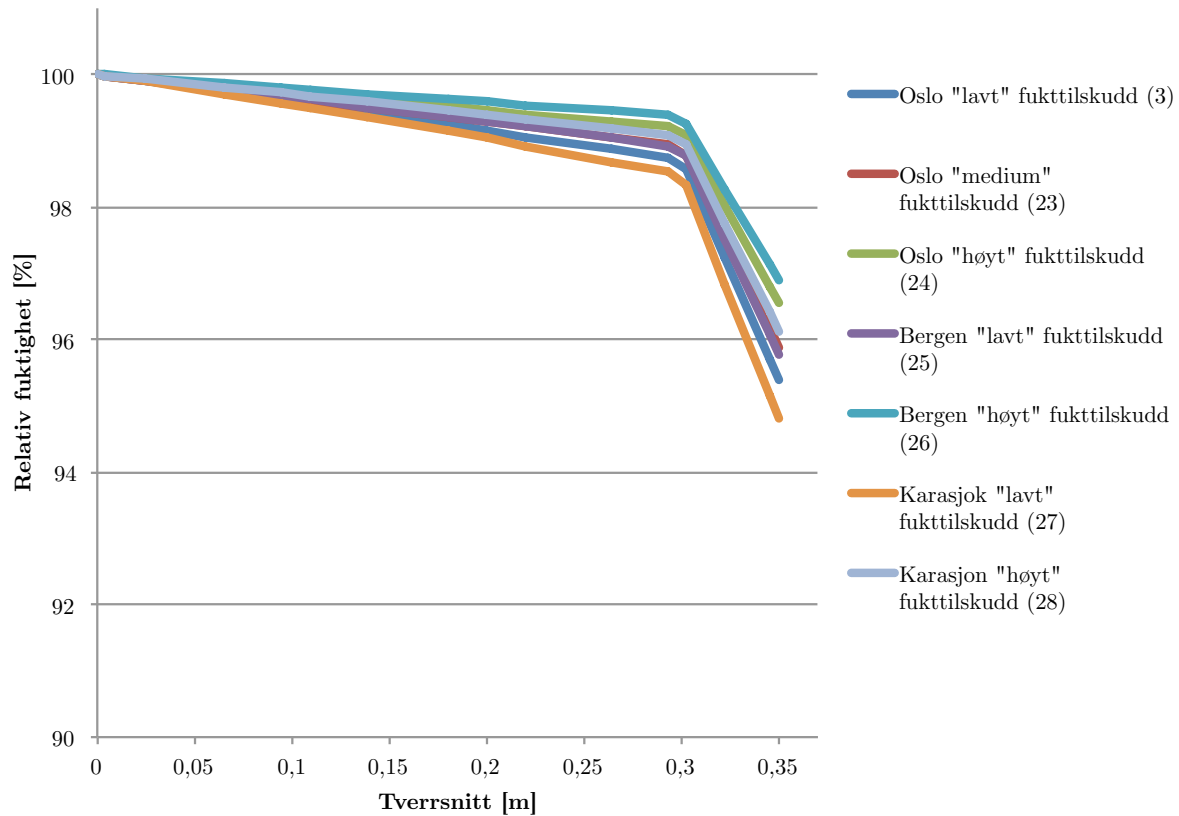


**Figur 4-12** Fuktstrømninger gjennom et sjikt i vegg to mm fra den innvendige betongoverflaten, vist med vegger med ulik innvendig dampmotstand

En dampåpen kledning gir vesentlig større fukttransport gjennom vegg enn en kledning med dampsperre. Dette er forventet. Det er forøvrig ikke forventet det ser ut til at det tar svært kort tid før betongen innstiller seg i likevekt med omgivelsene. Med unntak av de første 1000- 2000 timene er fuktstrømningene like for alle årene. Betong er et materiale med stor fukttreghet, så dette er ikke helt realistiske resultater for et betongvegg som er 300 mm tykk.

### 4.3.6 Innvendig klima

Figur 4-13 viser RF i referanseveggen i ulike byer i Norge, og i rom med ulikt fukttilskudd. Betydningen av by og fukttilskudd varierer noe. I denne undersøkelsen kommer Karasjok best ut, fuktt teknisk, mens Bergens klima gir de våteste konstruksjonene. Sett i lys av mengde årlig nedbør i de ulike byene er ikke dette er overraskende resultater.

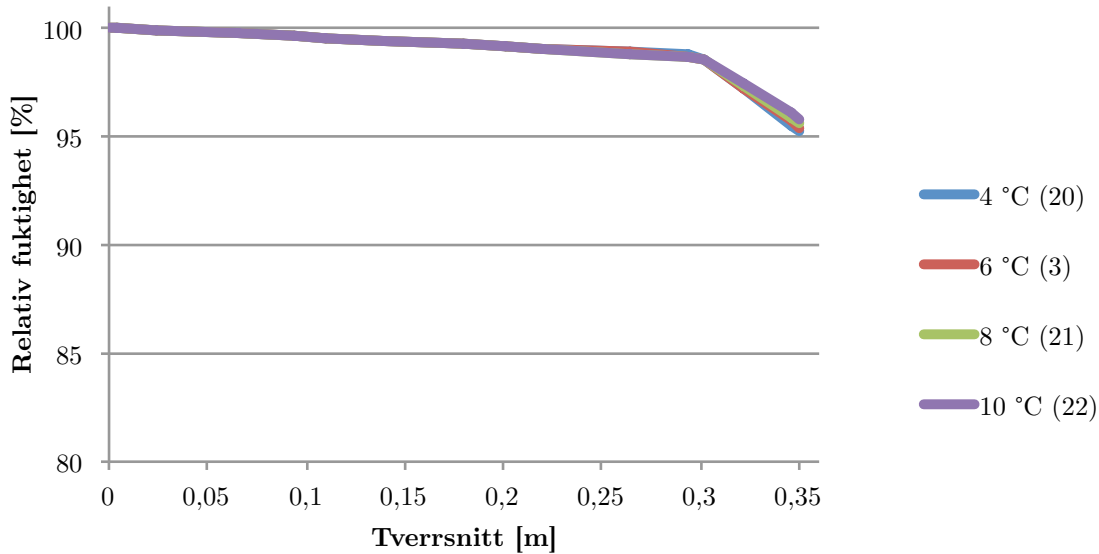


Figur 4-13 Effekt av ulikt inneklime, vist ved RF over tverrsnittet

Det er ikke store forskjeller mellom de ulike tilfellene i Figur 4-13, rundt to prosent ved innvendig overflate og én prosent ved betongsjiktets innvendige overflate. Forskjellene mellom de ulike alternativene er vesentlig mindre enn forventet. Det er likevel mulig at resultatene ville vært mer forskjellige dersom betongen hadde vært tettere, og med det tørrere, slik at inneklimate i større grad ville vært styrende for fuktinnholdet i den innerste delen av konstruksjonen. Med så høy RF som det er i konstruksjonen i Figur 4-13 blir væsketransporten totalt dominerende.

#### 4.3.7 Utvendig temperatur

Den fukttekniske situasjonen i veggkonstruksjonen under bakkenivå er ikke sensitiv for endringer i utetemperatur. Resultatet fra beregningene med variabel utetemperatur er vist i Figur 4-14.



Figur 4-14 Effekt av variabel utetemperatur, vist ved RF over tverrsnittet

Det er vanskelig å estimere temperaturen under grunnen, spesielt der det er grunnvann, men beregningene viser at dette ikke er en faktor som har spesiell betydning ved fuktberegning. Dette kan skyldes at variasjonene i temperatur er relativt liten, samtidig som isolasjonstykkelsen er relativt stor.

## 4.4 VURDERING OG DISKUSJON

Vurderingene av hver enkelt parameter er gitt fortløpende sammen med resultatene. Dette delkapittelet tar for seg en mer helhetlig vurdering av kjellerveggen som er undersøkt, og en vurdering av WUFI som analyseprogram.

### 4.4.1 Kjellerveggen

Kort oppsummert er funnene fra parameterstudiet det følgende:

- Langt under markoverflaten har ikke mengde utvendig isolasjon vesentlig betydning for fuktsituasjonen, forutsatt at isolasjonstykkelsen kun varieres innenfor det spekteret der krav om maksimal varmegjennomgang er tilfredsstillt



- Betongkvaliteten er en av de viktigste faktorene for veggens vannpermeabilitet
  - o Vanddampdiffusiviteten har minimal betydning når WUFI regner på fuktsituasjonen i betongkonstruksjoner som er påført vanntrykk. Dette kan skyldes at RF er så høy at all fukttransport er væsketransport
  - o Kapillaritetstallet til betongen er av stor betydning. Lavere kapillaritetstall gir tettere og tørrere betong. En endring i kapillaritetstallet har større innvirkning for lavere verdier. Altså vil konstruksjonen har en større positiv endring dersom kapillaritetstallet endrer seg fra 0,006 til 0,005 kg/(m<sup>2</sup> √s) enn om den endres fra 0,056 til 0,055 kg/(m<sup>2</sup> √s)
- Innvendig isolasjon gir vesentlig høyere RF i betongen. Dette skyldes i stor grad at temperaturen i betongen blir lavere, men isolasjonen vil også gi økt dampmotstand på veggens innside. I tilfellene med innvendig isolasjon er betongen omtrent vannmettet over hele tverrsnittet.
- Siden veggens er konstant vannmettet på utsiden er det helt avgjørende at veggens har uttørkingsmuligheter innover. Det er derfor viktig å ha en så dampåpen kledning som mulig
- Inneklimaet har større innvirkning enn uteklimaet for yttervegger under grunn og grunnvannstand, der det ikke er brukt dampspærre. Det anslås at inneklimaet vil ha større betydning for tettere konstruksjoner (tørrere) slik at ikke "trykket" fra den kapillære strømmingen utenfra blir like dominerende.

Dette betyr at dersom betongkonstruksjoner med vanntrykk på utvendig side og klimatiserte rom på innsiden skal ha innvendig kledning, må den være veldig dampåpen for å unngå fuktskader på veggens innside. Betongen bør være enda tettere enn den som er undersøkt i dette kapitlet.

Med unntak av tilfellet uten innvendig kledning har samtlige undersøkelser vist en RF på mer enn 80 prosent ved betongens innvendige overflate. Dette vil gi utfordringer knyttet til muggvekst i eventuelle organiske materialer på veggens innside.

Det tas forbehold om at enkelte av parameterne som er undersøkt vil kunne gi større utslag dersom det regnes på tettere betong enn det som er gjort i dette kapitlet. Referansebetongen har B45-kvalitet og kapillaritetstall på 0,0137. Dette skal i teorien være en tett betong som tilfredsstiller kravene om vanntetthet, men beregningene viser svært stor fuktgjennomgang.

Ved flere av parametervariasjonene er forskjellen mellom de ulike variantene kun en eller to prosent RF ved innvendig overflate, siden alle ligger tett opp under 100 prosent RF. Dersom betongen som undersøkes er tettere, slik at RF blir lavere er det mulig at utslagene blir større. Noen av parameterne undersøkes på nytt (i mindre omfang) i kapittel 5.

Resultatene fra simuleringene som er gjort i dette kapittelet kan raskt summeres i tre overordnede alternativer for å løse problematikken knyttet til fukt til å fra betongen:

- Konstruksjon uten innvendig kledning
- Konstruksjon med veldig dampåpen kledning
- Tettere betong, for å redusere fuktgjennomgangen

#### **4.4.2 WUFI som beregningsprogram**

WUFI ikke tar hensyn til betongens langsiktige egenskapsutvikling. Dette kan blant annet sees av Figur 4-12 der det kommer frem at fuktstrømningen gjennom innsiden av betongveggen er vurdert til å være lik alle de tre årene simuleringen pågikk (med unntak av de ca. 1500 første timene (ca.60 dager)).

Kapillaritetstallet er den av de parameterne som har vært undersøkt som har størst innvirkning på fukttilstanden i betongen, og at vanndampdiffusjonen er ubetydelig i forhold til kapillærtransporten. Det er uvisst hva som er årsak og virkning i denne sammenhengen; om RF i konstruksjonen er så høy fordi den kapillære fukttransporten er overdimensjonert, eller om den kapillære transporten er så stor fordi RF ligger så tett opp mot 100 prosent, slik at det ikke er muligheter for vanndampdiffusjon.

Store variasjoner i inneklimateet gå små utslag i fuktinnholdet i betongen. Dette kan være en indikasjon på av væsketransporten utenfra er så stor at den overstyrer diffusjonen innover i betongen ved den innvendige overflaten. Dette gir grunn til å vurdere om WUFI overdimensjonerer denne kapillære væsketransporten i beregningene. Dette blir undersøkt videre i kapittel 5.

## **5 FUKTBREGNINGER MED MÅLTE BETONGEGENSKAPER**

---

I dette kapitlet danner resultatene fra kapittel 3 og 4 grunnlag for videre analyser av kjellerveggen gjennom bruk av dataprogrammet WUFI. De fire betongene som ble undersøkt i kapittel 3 er brukt i kombinasjon med de faktorene som ble vurdert til å ha størst innvirkning på veggkonstruksjonen i kapittel 4. WUFI-beregningene er gjort med samme initialbetingelser som tidligere.

I dette kapitlet er det gjort to runder med analyser i WUFI. Den første baserer seg i stor grad på den samme metoden som ble brukt i kapittel 4 men den andre metoden tar hensyn til kapillær brytning i betongen. Sistnevnte analysen er gjort mer omfattende enn den første.

### **5.1 INPUTPARAMETERE**

De eneste inputparameterne som er endret fra beregningene i kapittel 4 er materialparameterne for betongen. Med unntak av fuktlagringskapasiteten, som er ulik for de to beregningsmetodene, er alle materialdataene for de ulike betongtypene som er lagt inn i WUFI presentert i Tabell 5-1

**Tabell 5-1** Oversikt over betongdata for de undersøkte betongene som er lagt inn i WUFI

Betongtype	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Porøsitet [%]	Kapillaritetstall [kg/m <sup>2</sup> vs]	Fri vannmetning [kg/m <sup>3</sup> ]	Vanndampmotstandstall [-]	Initiell RF [%]
B35M45 med Norcem Standardsement FA	2336	13,3	0,0137	116	314	90
B45MF40 SV 40 med Norcem Standardsement FA	2253	16,8	0,00794	113	594	80
B35M45 med Cemex Miljøsement	2357	13,1	0,00868	115	412	90
B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement	2234	16,0	0,00575	112	910	80

Den oppgitte porøsiteten er den totale porøsiteten til betongen, summen av sugporøsitet og makroporøsitet. Den frie vannmetningen er fuktmengden i betongen ved vannmetning uten ekstra trykk. Denne verdien tilsvarer fuktinnholdet dersom hele sugporøsitetsvolumet er fylt med vann.

Kapillaritetstallet tilsvarer som nevnt i kapittel 4.2.3 det som kalles vannabsorpsjonskoeffisient i WUFI, og ofte i bygningsfysikk for øvrig. Denne faktoren blir sammen med fuktinnholdet ved ulike RF (sorpsjonskurvene) brukt til å regne ut fuktdiffusivitetskoeffisienten  $D_{ws}$  [m<sup>2</sup>/s] for oppsuging. Denne varierer med RF i materialet.

Vanndampmotstandstallet,  $\mu$ , er beregnet ut fra vanndampmotstanden til betongene med formlene i kapittel 2.1.3.

Den initielle RF i betongen er basert på forskningsdata fra Skanska (se kapittel 0) og samtaler med Sverre Smeplass (veileder). Forskjellene mellom de to bestandighetsklassene skyldes den økte selvuttørkingseffekten i betonger med lavere v/b-tall.

Det er stor forskjell mellom desorpsjon og adsorpsjonskurvene, men i WUFI benyttes det kun *en* sorpsjonskurve. Valget som tas knyttet til verdier for vannlagringen, vil

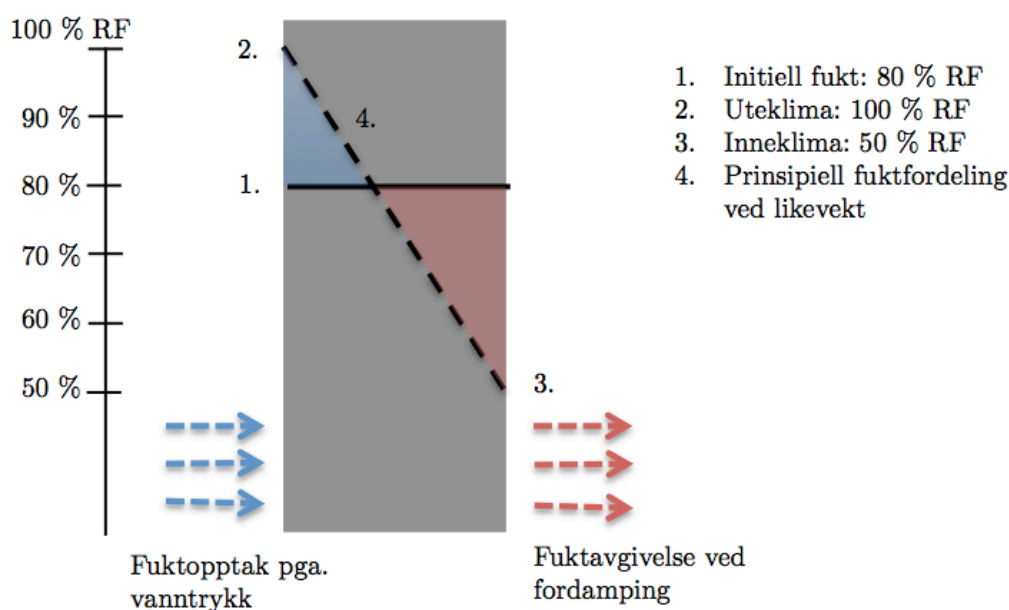
ha innvirkning for fukttransporten. Måten dette blir løst på er forskjellig i de to beregning metodene. Disse blir forklart i henholdsvis kapittel 5.2.1 og 5.3.2.

## 5.2 BEREGNING MED METODE FRA KAPITTEL 4

I det følgende er det forsøkt å beregne fuktsituasjonen i kjellerveggen på samme måte som ved parameterstudiet i kapittel 4, men med de målte dataene for de hygrotermiske egenskapene til betongen. Målet var at dette skulle gi et mer realistisk bilde av fuktsituasjonen.

### 5.2.1 Fremgangsmåte

Det anslås at betongen har en initiell fukt på 80 eller 90 prosent RF, avhengig av v/b-tall. Med vanntrykk på utsiden og klimatisert rom på innsiden vil betongen den første tiden fuktes opp på utsiden og tørkes ut på innsiden (se Figur 5-1). Dette betyr forenklet at fuktinnholdet i betongen vil følge en adsorpsjonskurve for på utsiden og desorpsjonskurve på innsiden. Det er valgt å legge adsorpsjonskurven til de ytterste 50 millimeterne av betongveggen og desorpsjonskurven på den resterende tykkelsen.



Figur 5-1 Prinsipiell skisse av fuktendring over betongverrsnittet

Som tidligere diskutert i kapittel 5.1 ble prøvene for sorpsjonskurvene og prøvene for porøsitet forbehandlet forskjellig, slik at de ikke kan sammenliknes direkte. Dette gir noen utfordringer når fuktlagringskapasiteten skal bestemmes. Fuktinnholdet angis i WUFI som kg vann per kubikkmeter betong, og resultatene fra de to testene

samsvarer ikke fullstendig. Det ser ut til at verdiene for de høyeste RF på desorpsjonskurven er noe for høye (som også antydnet tidligere). Det er derfor justert noe på desorpsjonskurven for å få bedre samsvar mellom fullstendig metning av betongen (målt i forbindelse med kapillærabsorpsjonen) og RF ved 94 prosent RF (målt ved sorpsjonstestene). For desorpsjonskurvene er derfor verdiene ved 94 prosent satt til å tilsvare fuktinnholdet dersom 94 prosent av sugporøsiteten er fylt med vann. De øvrige verdiene tilsvare de som ble målt i sorpsjonsforsøkene.

Verdiene for fuktlagringskapasiteten som er brukt i WUFI er angitt i Tabell 5-2 til Tabell 5-5.

**Tabell 5-2 Fuktinnhold [kg/m<sup>3</sup>] ved ulike RF for B35M45 Norcem Standardsement FA**

	<b>33 % RF</b>	<b>50 %</b>	<b>75 %</b>	<b>94 %</b>
Adsorpsjon	15,47	28,60	43,96	61,11
Desorpsjon	30,67	51,14	75,93	109,04

**Tabell 5-3 Fuktinnhold [kg/m<sup>3</sup>] ved ulike RF for B45MF40 SV40 Norcem Standardsement FA**

	<b>33 % RF</b>	<b>50 %</b>	<b>75 %</b>	<b>94 %</b>
Adsorpsjon	18,47	28,75	49,31	57,89
Desorpsjon	29,91	58,49	71,47	106,22

**Tabell 5-4 Fuktinnhold [kg/m<sup>3</sup>] ved ulike RF for B35M45 Cemex Miljøsement**

	<b>33 % RF</b>	<b>50 %</b>	<b>75 %</b>	<b>94 %</b>
Adsorpsjon	19,69	27,51	49,82	66,78
Desorpsjon	32,65	65,27	81,03	108,10

**Tabell 5-5 Fuktinnhold [kg/m<sup>3</sup>] ved ulike RF for B45MF40 SV40 Cemex Miljøsement**

	<b>33 % RF</b>	<b>50 %</b>	<b>75 %</b>	<b>94 %</b>
Adsorpsjon	18,37	27,40	52,70	67,10
Desorpsjon	37,35	66,83	81,42	105,28

### 5.2.2 Resultater fra WUFI-beregningene

I dette delkapittelet blir resultatene fra beregningene der de målte betongegenskapene er lagt inn i WUFI presentert. Delkapittelet består kun av en sammenlikning av betongene og en vurdering av kvalitetene på beregningene.

#### Avklaringer

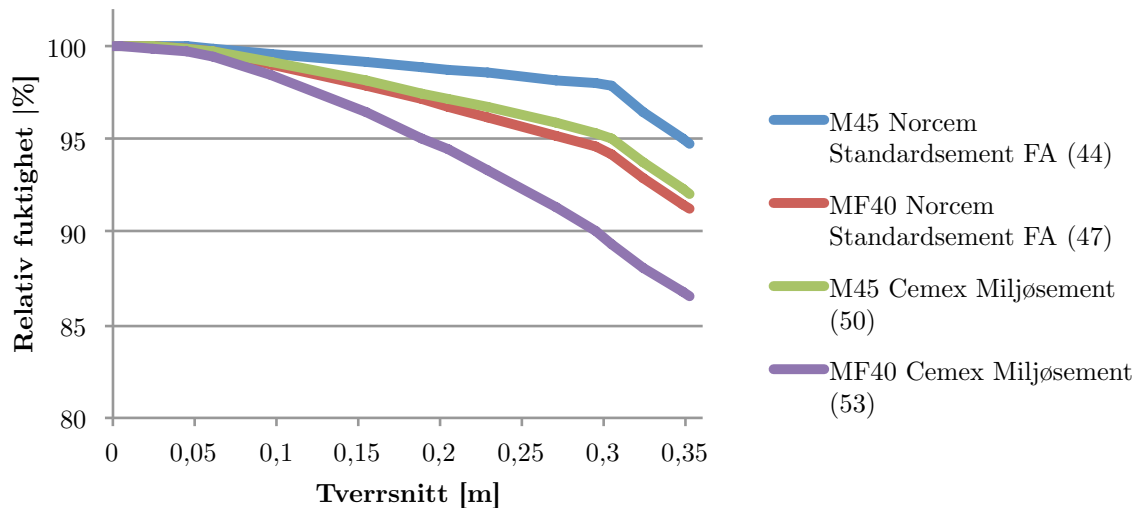
Ved presentasjon av resultatene er det brukt tilsvarende rammer som i kapittel 4.3. Kort oppsummert gjelder:

- For figurer vist som RF over veggverrsnittet:
  - o Utvendig isolasjon er ikke vist på figuren ( $RF_{XPS}=100\%$ )
  - o I grafene med visning av tverrsnittet representerer "0 meter" på tverrsnittsaksen betongens utvendige overflate
  - o Betongveggen er 300 millimeter tykk ved alle beregninger
  - o For de tilfellene der det er aktuelt er det også i figurene vist 50 millimeter uisolert påføring
  - o Samtlige figurer viser situasjonen etter en beregningsperiode på akkurat tre år (1. oktober)
- "Referansevegg"
  - o Referer til veggen angitt som referanse i kapittel 4.2.1. I hvert tilfelle er det gitt hvilken betongblanding som er undersøkt
  - o Referanseveggen har 200 millimeter XPS på utsiden, 50 mm uisolert påføring på innsiden og en innvendig dampmotstand på 0,5 m. Det innvendige klimaet er basert på MDRY for Oslo med lavt fukttilskudd i inneluften.
- Grafene er presentert for best å mulig vise forskjellene mellom de alternativene som er undersøkt i den aktuelle figuren. Derfor er ikke alle akser i samme skala.

Det fremgikk av kapittel 3.3 at B45MF40 SV 40 med Cemex Miljøsement er den klart tetteste betongen av de som er undersøkt. I noen tilfeller er det kun vist eksempler fra denne betongen. Dette er for å vise "ytterpunktet" av alternativene, altså det som gir resultater som skiller seg mest fra resultatene i kapittel 4.

#### De ulike betongtypene

I Figur 5-2 presenteres oversikt over RF i referanseveggen etter tre år, for de fire ulike betongtypene.



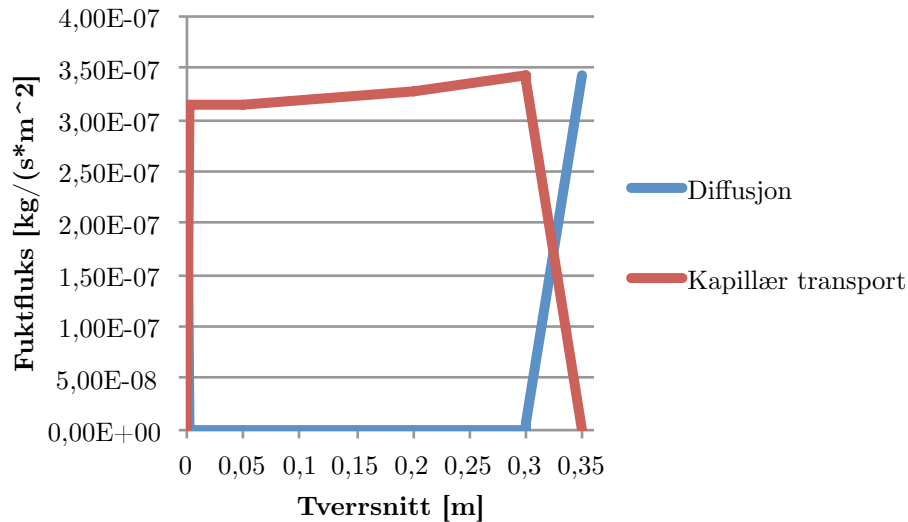
**Figur 5-2 Sammenlikning av RF over tverrsnittet av referanseveggen med de fire ulike betongene**

Samtlige betonger har oppnådd et tilnærmet lineært forhold mellom 100 prosent RF og RF ved betongens innvendige overflate. Dette er en indikasjon på at de er i likevekt med omgivelsene. På tross av at materialdataene er byttet ut med de som ble målt i laboratoriet, viser Figur 5-2 fortsatt veldig høye RF-verdier over hele veggverrsnittet. Dette er på tross av at noen av betongene er vurdert til å være *veldig* tette.

### Fukttransport

Fordelingen mellom dampdiffusjon og kapillærtransport i referanseveggen med B45MF40 SV40 betong med Cemex miljøsement er vist i Figur 5-3. Verdiene er hentet ut fra beregninger gjort i oktober, to år inn i perioden som ble simulert.





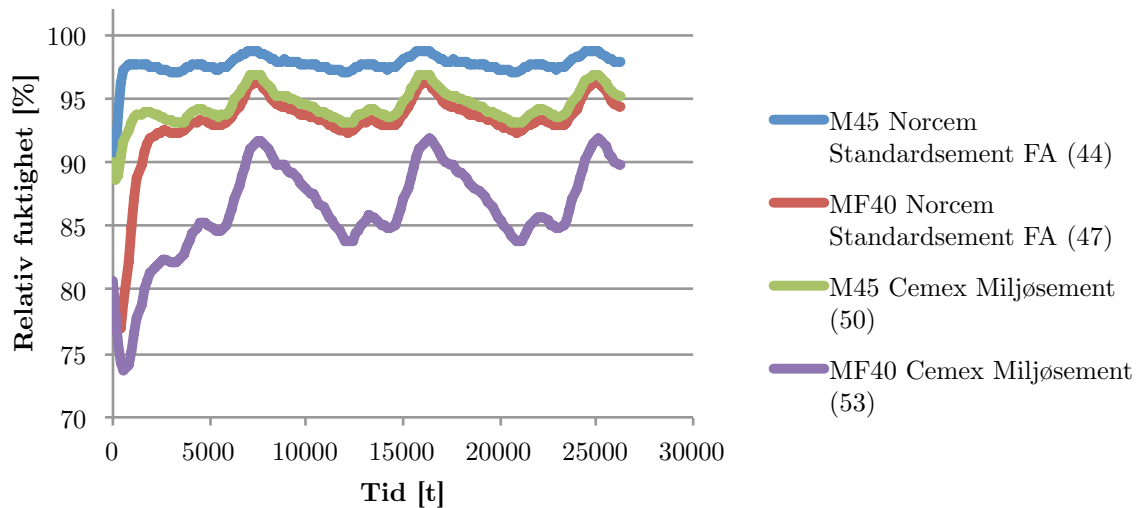
**Figur 5-3 Fordeling mellom diffusjon og kapillærtransport gjennom referansevegg med Cemex-betong kvalitet SV 40 i oktober**

Selv om kapillærtransporten er noe mindre i tilfellet i Figur 5-3 enn i referanseveggen fra kapittel 4, er tendensen fremdeles lik; den kapillære fukttransporten er svært dominerende sammenliknet med dampdiffusjonen. Det er også påfallende at den kapillære transporten øker innover i tverrsnittet. RF i inneluften øker mot oktober (i september) og det er naturlig at også RF ved den innvendige overflaten vil øke. Men det vurderes som unaturlig at denne økingen kun foregår kapillært, da fukten vil diffundere inn i vegg fra innsiden.

I kapittel 4.4.2 ble det argumentert for at den store andelen kapillær transport gjennom betongtverrsnittet kunne skyldes at betongen var for permeabel. For stor permeabilitet i betong gir så høy RF at væsketransporten blir dominerende. Figur 5-3 viser at dette er tilfellet også med en svært tett betong der den kapillære transporten er forventet å være vesentlig mindre og dampdiffusjonen mer fremtredende.

### **Endring av relativ fuktighet over tid**

Endringen av RF i betongen, to millimeter fra den innvendige overflaten er kartlagt for referansekonstruksjonen med de fire ulike betongtypene og vist Figur 5-4.

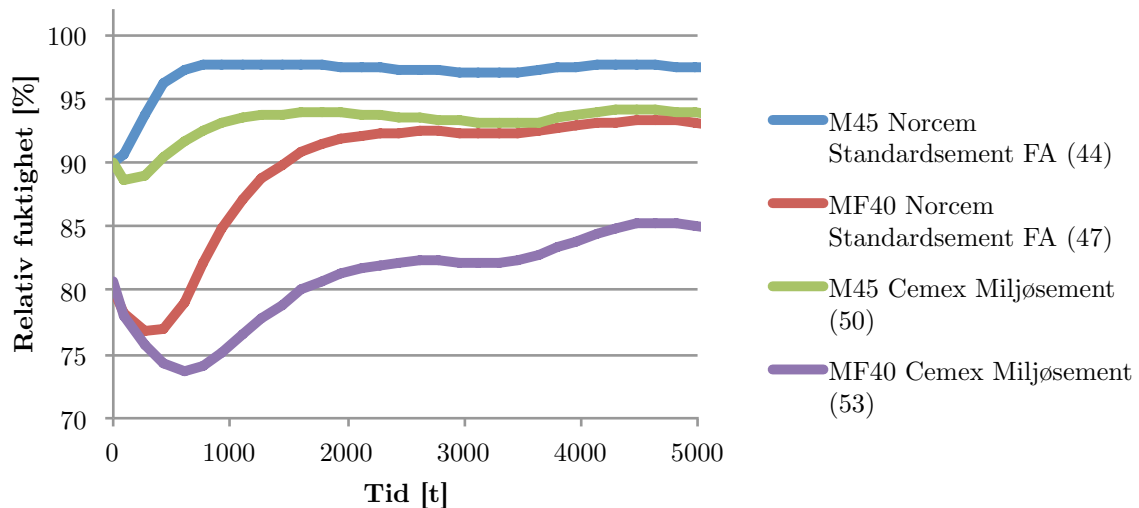


**Figur 5-4 Endring i RF over tid, 2 mm fra den innvendige betongoverflaten, for de fire undersøkte betongene**

Resultatene viser relativt store forskjeller mellom den tetteste og den minst tette betongtypen. Cemex-betongen med kvalitet B45MF40 SV40 gir en vesentlig tørrere innvendig overflate. Den påvirkes mer av det innvendige klimaet enn de øvrige. Dette kan skyldes at RF er lavere enn for de andre betongene, slik at fukten utenfra overstyrer virkningene av inneklimate.

Figur 5-4 viser også at det ikke er noen forskjell på fuktsituasjonen de tre årene som er undersøkt, med unntak av de første ca. 4000 timene (ca. 5,5 måned). Dette stemmer overens med funnene i kapittel 4.3, men det fremstår likevel som urealistisk at betongen er i likevekt med omgivelsene så raskt.

For bedre å vise hva som skjer den første tiden etter simuleringsstart er RF-nivået i de ulike betongene de første 5000 timene (208 døgn) vist i Figur 5-5. Med unntak av tidsaksen er den lik som Figur 5-4

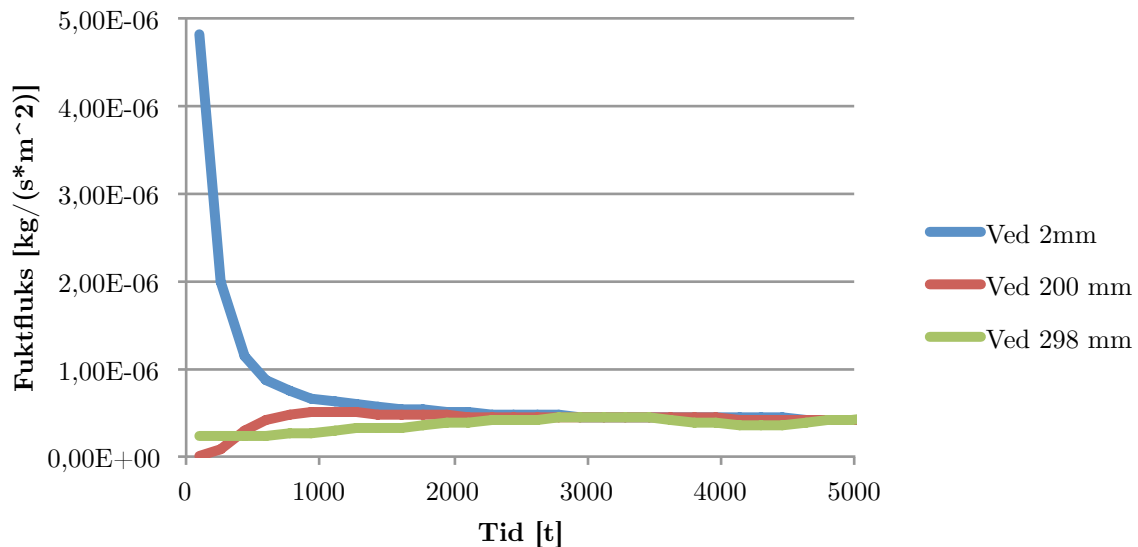


**Figur 5-5 Endring i RF de første 5000 timene etter påført vanntrykk, 2 mm fra den innvendige betongoverflaten for de fire undersøkte betongene**

Som nevnt er initiell RF satt til 90 prosent for betongene med B35M45-kvalitet og 80 prosent for de med B45MF40-kvalitet. Figur 5-5 viser at Norcem-betongen med B35M45-kvalitet tar opp vann ved innvendig overflate med en gang beregningene starter. De øvrige tørker litt ut mot inneluften før fuktstrømmen utenfra når gjennom betongen og overstyrer uttørkingen slik at betongen fuktes opp. Hvor mye de tørker innover avhenger av hvor tette de er og av initiell RF.

Cemex-betongen med kvalitet B45MF40 SV 40 er den desidert tetteste av betongene som er undersøkt (kapittel 3.3). Denne tørker innover i bare rett under en måned (ca. 650 timer) før den fuktes opp igjen. Det tar dermed kun en måned før fukten fra utsiden når den innvendige overflaten. Etter dette tar det omtrent et halvt år før betongen er ferdig oppfuktet.

I Figur 5-6 er fukttransporten i B45MF40 betongen med Cemex Miljøsement studert nærmere. Figuren viser fukttransporten over tid, gjennom tre ulike sjikt i betongtverrsnittet. Avstandene i figuren er gitt i millimeter fra betongens utvendige overflate.



**Figur 5-6** Fukttransporten de første 5000 timene i B45MF40 SV40- betongen med Cemex Miljøsement, vist ved tre ulike dybder i tverrsnittet. Avstand er gitt fra utvendig overflate.

Dersom en kun ser på fukttransporten ser det ut til at betongen er i likevekt (at det er jevn fukttransport gjennom betongen) etter i underkant av 3000 timer (under 125 dager). På grunn av betongens fuktregnet og endringene i inneklimate vil de tre dybdene aldri ha helt lik fukttransport samtidig.

### Vurdering av de kapillære egenskapene

Den svært raske fuktgjennomgangen i samtlige av betongene gir grunnlag for å stille spørsmål ved hvorvidt WUFI behandler de hygrotermiske egenskapene til betong på en tilfredsstillende måte.

Det vurderes ikke som realistisk at en vegg på 300 mm med så god kvalitet som B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement har stasjonær fuktgjennomgang etter kun fem til seks måneder. For betongen med Norcem Standardsement FA med kvalitet B34M45 tar det under 1000 timer (41 dager) før tilstanden er stasjonær, dette er heller ikke realistisk.

Det er nevnt i kapittel 2.1.2 at kapillaritetstallet har vist seg å passe godt for de første ti mm av betongen. I beregningene gjort så langt har de kapillære egenskapene vært gjeldene over hele tverrsnittet, og det er tydelig av resultatene at dette ikke gjenspeiler virkeligheten. Det anbefales derfor å *ikke* benytte denne metoden for beregning av fuksituasjonen i betong i tilfeller som her, hvor det står konstant vanntrykk på betongens utside.

## 5.3 BEREGNINGER MED ALTERNATIV LØSNING FOR KAPILLÆR TRANSPORT

På bakgrunn av vurderingene i kapittel 5.2 er resten av beregningene gjort basert på en annen teori for den kapillære transporten. Endringene fra de tidligere beregningene ligger i at det er tatt hensyn til *kapillær brytning*.

### 5.3.1 Kapillær brytning

Bakgrunnen til teorien som er brukt i dette delkapittelet er hentet fra forskning gjort av H. M. Künzle, A. H. Holm og M. Krus (2008). Deres forskning konkluderer med at det oppstår en form for selvforsegling i betongen i noen tilfeller hvor den blir eksponert for naturlige fuktpåkjenninger. Det vil si at den kapillære transporten opphører et stykke inn i betongen. Dette fenomenet har vært kjent for forskere i en årrekke, men det er fremdeles uvisst nøyaktig hvorfor det inntreffer.

Betongen i undersøkelsene til Künzle et. al. ble først eksponert for slagregn. Det ble da oppdaget at fuktinnholdet ikke endret seg et stykke inni betongen, på tross av langvarig regnpåkjenning. For å teste om dette kun var den spesifikke betongen sin respons på et spesifikt miljø, ble prøvene plassert med den eksponerte overflaten i vann. De så da at det ytterste laget ble vannmettet, mens fuktinnholdet i det innerste laget forble uendret.

Etter undersøkelsene var ferdig ble prøvene snudd rundt, slik at den ”innvendige” overflaten var plassert ned i vannet. Det ble da absorbert vesentlig mer vann og det tok omtrent 50 timer før hele prøven var mettet fra baksiden. Dette viser at det hadde vært en kapillær brytning som hadde formet seg under eksponering for naturlige værpåkjenninger og at dette ikke skyldtes mer kjente hygrottermiske egenskaper, som for eksempel at den kapillære stighøyden var liten.

Selv om årsaken er ukjent er det klart at dette fenomenet er knyttet opp mot fukthistorikken til betongen, og det ser ikke ut til å inntreffe i tørket betong (som er kjent for å suge mye og raskt).

Det er ellers kjent at den kapillære transporten avtar med tiden, og med økende fuktinnhold.

### 5.3.2 Fremgangsmåte

På bakgrunn av forsøkene som indikerer at de kapillære kreftene opphører, er det i dette avsnittet valgt å dele betongen inn i to sjikt. I det ytterste vil det foregå kapillærsug, mens i det innerste sjiktet er fukttransporten begrenset til kun

dampdiffusjon. Betongen som ble testet i undersøkelsene til Künzel et. al. hadde et vann/semmentforhold på 0,6. Dette er vesentlig høyere enn for betongen som er undersøkt i denne oppgaven, men i mangel på annen forskning på temaet velges det å følge teoriene deres om at maks 70 mm av det ytterste laget er kapillærsugende. Det er dermed ikke lagt til rette for noe kapillær transport i de 230 innerste millimeterne av betongen, og væsketransportkoeffisienten er satt til null for alle RF-verdier i dette området.

I kapittel 3.3.5 kom det frem at desorpsjonskurven lå noe for høyt, mens adsorpsjonskurven lå litt for lavt. Det er vurdert at en ren sorpsjonskurve, og også overgangskurvene, vil ligge et sted mellom disse. Det er derfor valgt å bruke gjennomsnittsverdiene mellom de to kurvene. Sorpsjonskurvene som er brukt i beregningene er gitt i Tabell 5-6.

**Tabell 5-6 Sorpsjonskurvene til de ulike betongene**

	<b>33 %</b>	<b>53 %</b>	<b>75 %</b>	<b>94 %</b>
B35M45 med Norcem Standardsement FA	23,07	39,87	64,17	98,09
B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA	24,19	43,62	64,36	94,21
B35M45 med Cemex Miljøsement	26,17	46,39	65,43	96,09
B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement	27,86	47,12	67,06	91,49

Alle øvrige inputparametere tilsvarer de som er brukt i kapittel 5.1.

### **5.3.3 Parametervariasjoner**

Parametervariasjonene er basert på resultatene fra beregningene tidligere i oppgaven. Det ble også gjort vurderinger underveis i beregningene for å vurdere hvilke øvrige faktorer det ville være hensiktsmessig å undersøke videre. En oversikt over samtlige beregningsoppsett som er brukt i dette kapitlet er gitt i Vedlegg I.

I kapittel 4.3.6 ble det avklart at uteklimaet spilte liten rolle (og dermed også tykkelsen på den utvendige isolasjonen, forutsatt at kravene til U-verdi er tilfredsstillt). Selv om beregningene her er gjort på en annen måte enn det som ble gjort der, vurderes likevel disse resultatene som gyldige. Dette gjelder spesielt siden fukttransporten var vesentlig større enn det som er vurdert som realistisk, slik at påvirkningene fra uteklimaet er forventet å slå enda svakere ut ved beregningsmetoden som er brukt i dette kapitlet.

Innvirkningen inneklimate har på veggkonstruksjonen ble i kapittel 4.3.6 vurdert som liten, men det ble også konkludert med at denne kan være større dersom væsketransporten fra utsiden er mindre. Dette er derfor undersøkt nærmere i dette kapitlet. Det er vurdert at oppholdsrom som vil være aktuelle under bakken, som vurdert i denne oppgaven, vil være rom med god ventilasjon. Det er derfor bare undersøkt "lavt" fukttilskudd (se Figur 4-2) for de samme byene som tidligere; Oslo, Bergen og Karasjok.

Variierende dampmotstand i den innvendige kledningen ga store utslag for resultatene i kapittel 4.3.5. Dette er undersøkt nærmere i det følgende. Siden det er antatt at det ikke er noe kapillær transport i den innerste delen av betongveggen, vil det være mindre fuktavgivelse fra betongen, og dermed mindre behov for uttørking innover enn i beregningene som er gjort i kapittel 4.

Det ble også gjort nye beregninger av bruk av smart dampsperre (AirGuard Smart) og en dampsperre med  $S_d$ -verdi på ti meter i kombinasjon med 100 mm innvendig isolasjon, for å se om det kunne gi tilfredsstillende resultater med betong med mindre fuktgjennomgang enn den som er vurdert tidligere.

Parametervariasjonene som er utført er angitt i Tabell 5-7.

**Tabell 5-7 Oversikt over parametervariasjoner i beregninger med kapillære brytning**

Parameter	Variasjon
Dampmotstand i innvendig kledning	- 0m - 0,2 m - 0,5 m - 1 m - 4 m
Dampsperre (+100mm innvendig isolasjon)	- dampmotstand: 10m - smart dampsperre: AirGuard Smart
Beliggenhet (med lavt fukttilskudd)	- Oslo - Bergen - Karasjok

### 5.3.4 Resultater og vurdering fra WUFI-beregningene

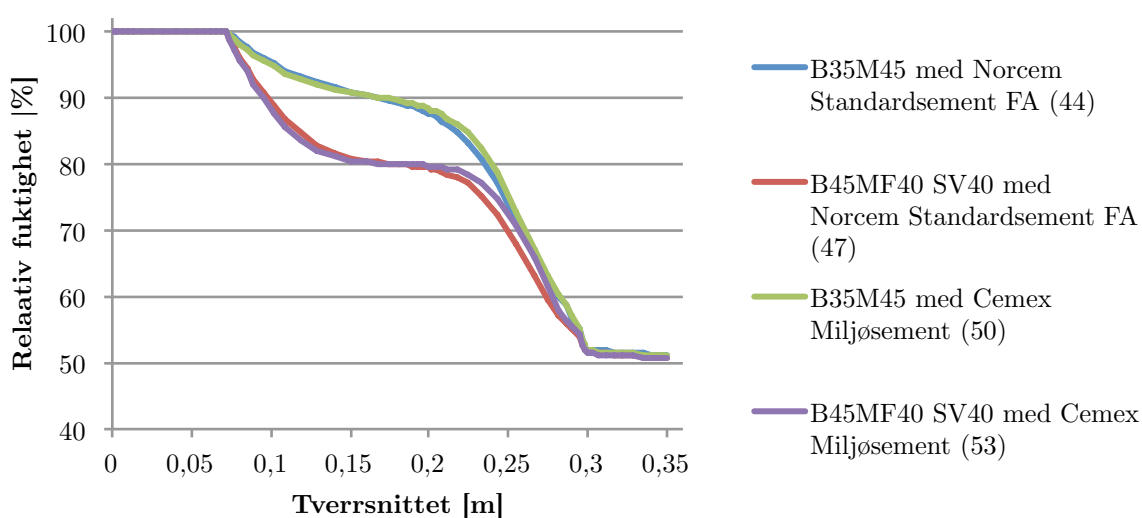
Resultatene fra WUFI-simuleringene der det er tatt hensyn til kapillær brytning er gitt i det følgende. Det er først gjort en sammenlikning av betongene og en vurdering av fukttransporten og –situasjonen ved denne metoden. Til slutt er påvirkningene av de ulike parameterne er gitt.

## Avklaringer

Med mindre annet er oppgitt gjelder de samme rammene for presentasjon av resultatene som i kapittel 0. Den eneste forskjellen er at simuleringene er kjørt over en periode på fem år, ikke tre som tidligere. I noen tilfeller er det vist simuleringer som har gått over ti år, men der er dette angitt spesifikt.

## De ulike betongtypene

RF over tverrsnittet til referanseveggen, med de fire ulike betongene er gitt i Figur 5-7.



**Figur 5-7 RF over tverrsnittet til referanseveggen etter fem år, med de fire ulike betongtypene**

Resultatene i Figur 5-7 gir et helt annet bilde enn resultatene fra de tidligere beregningene. De gir også resultater som samsvarer bedre med forventede verdier. Det fremgår av figuren at fukttransporten er så liten at det er den initielle RF/selvuttørkingen (sterkt påvirket av  $v/b$ -tallet) som påvirker fuktsituasjonen mest. I dette tilfellet er det ikke vesentlige forskjeller mellom de ulike sementtypene.

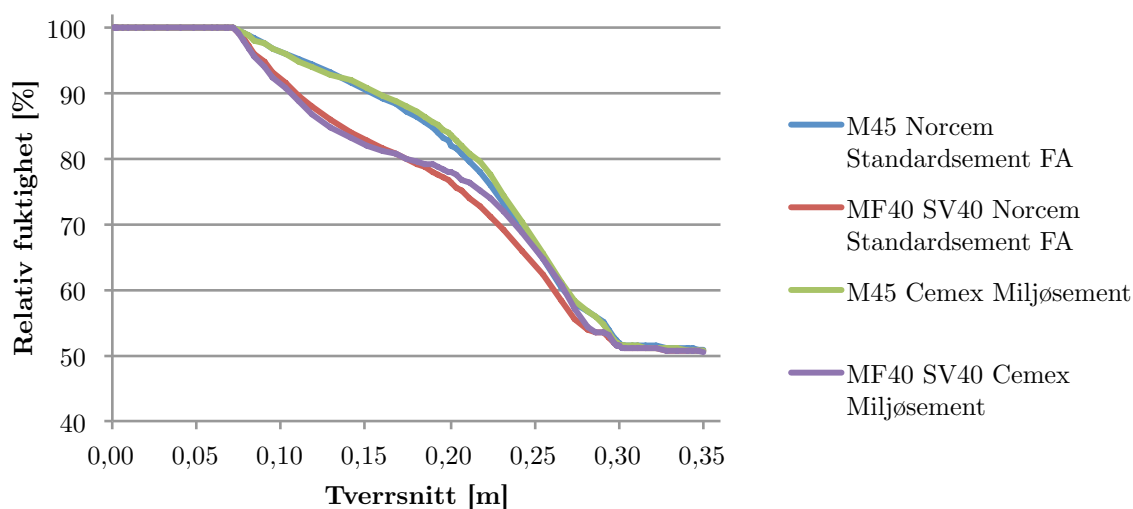
Delen av betongen med aktiv kapillær transport er fullstendig mettet, men dette har ingen innvirkning på fuktsituasjonen i den innerste delen av betongen. Det var usikkerheter knyttet til hvor stort området med kapillær transport skulle være, men siden det, etter fem år, fremdeles er områder inne i betongen som overhode ikke er berørt av det utvendige klimaet (spesielt for betongene med B45MF40 SV40-kvalitet), ville det ikke hatt noen innvirkning om dette området var et par cm tykkere eller tynnere. Ved stasjonær tilstand er det forventet at endringen i RF er lineær over tverrsnittet i den delen som ikke er påvirket av kapillær transport.



Resultatene ser ut til å samsvare med resultater publisert av blant annet R. H. Relling (1999) som viser at RF i betong som er nedsenket i vann er mer eller mindre upåvirket av omgivelsene et par cm inn i tverrsnittet etter et par år.

### Endring av fuktinnhold over tid

I Figur 5-8 er det vist RF over tverrsnittet til referanseveggen med de ulike betongtypene etter ti år med simuleringer (med unntak av tidsperioden for simuleringene er denne lik Figur 5-7).

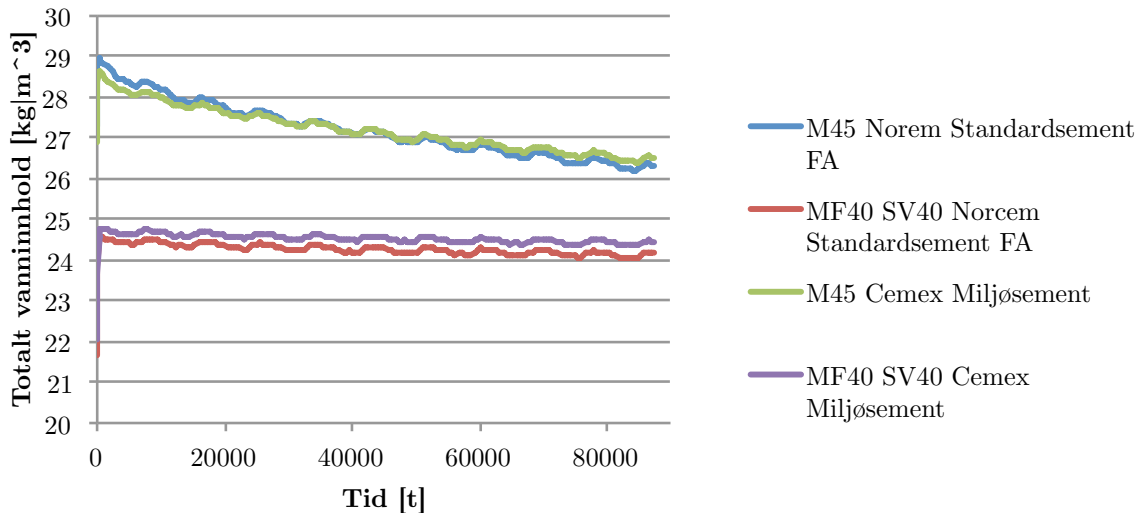


Figur 5-8 RF over tverrsnittet til referanseveggen etter ti år, med de fire ulike betongtypene

Av denne figuren kan en lese at betongene med MF40 SV40-kvalitet er tettere enn de med M45-kvalitet. Dette er synlig ved at fuktigheten i de sistnevnte følger en mer tilnærmet lineær linje mellom vannmettet tilstand og inneklimate. Dette indikerer at de er nærmere likevekt enn de øvrige betongene.

For betongene med MF40 SV40-kvalitet ser det ut til at det fremdeles er et lite område midt inne i betongen som er tilnærmet upåvirket av det ytre klimaet. Der er det kun betongens egenuttørking som har påvirkning på fuktnivået. Det at fukten fra utsiden ikke har nådd inn til midten av betongen etter ti år bekrefter at betongen er svært vanntett.

Figur 5-9 viser det totale simulerte fuktinnholdet i betongveggen i løpet av ti års eksponering. Det er svakt synlig at det er en økning i fuktinnholdet helt i begynnelsen. Dette skyldes det den raske kapillære absorpsjonen i det ytterste sjiktet. Etter at denne er mettet begynner resten av betongen å tørke ut mot inneluften.



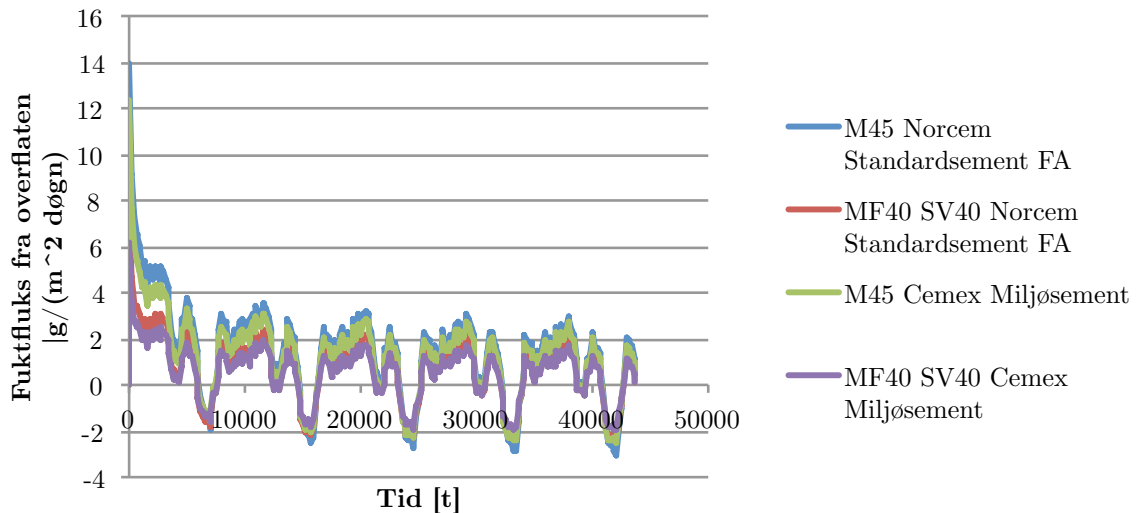
**Figur 5-9** Totalt simulert fuktinnhold i referanseveggen i løpet av ti års eksponering for de fire ulike betongtypene

Det er tydelig at betongene med B35M45 kvalitet tørker raskere enn de med B45MF40 SV40-kvalitet, som tørker svært sakte. Det er ingen av betongene som ser ut til å ha en stabil fuktstrøm etter ti år. Dette viser at betongene er svært tette.

WUFI tar ikke hensyn til betongens egenuttørking, så det er naturlig å anta at RF i det "uberørte" området egentlig vil være noe lavere enn det som er vist i Figur 5-8 etter ti år.

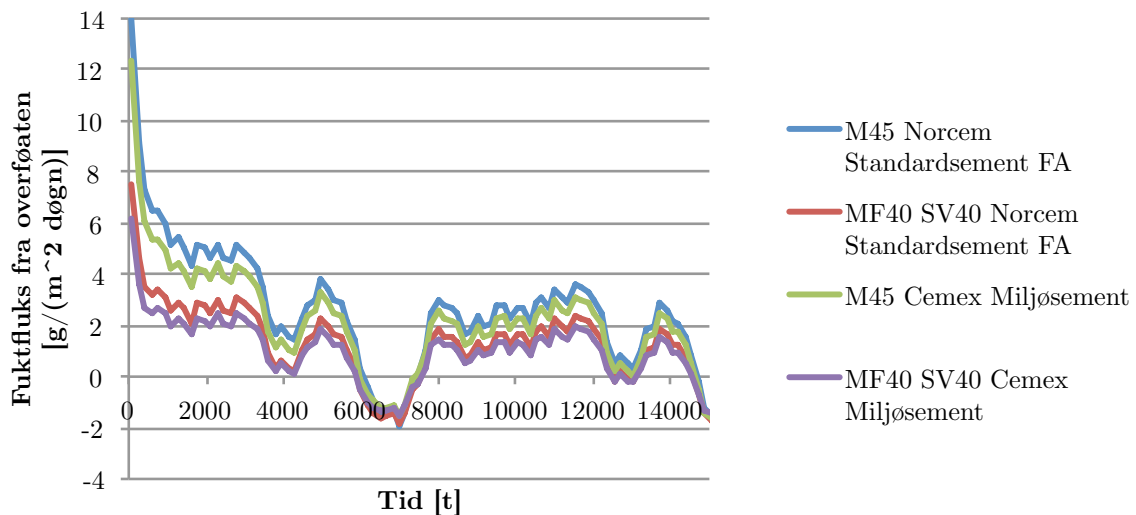
### **Fuktavgivelse fra den innvendige betongoverflaten**

Tidligere studier (Künzel et al., 2008) har konkludert med at den langsiktige dampdiffusjonsfluksen fra vanntette kjellervegger i betong ved stasjonære forhold er rundt  $5 \text{ g}/(\text{m}^2\text{døgn})$ , forutsatt at fordampingen er uhindret. Dette kan stemme med Figur 5-10, som viser fuktavgivelse fra referanseveggen. Her ligger beregnet fluks noe under  $5 \text{ g}/(\text{m}^2\text{døgn})$ . Denne aktuelle veggen har en innvendig dampmotstand på 0,5 m.



Figur 5-10 Fuktavgivelse fra den innvendige betongoverflaten over tid, ved de ulike betongtypene

Med unntak av de første månedene, reduseres fuktavgivelsen for hvert år i løpet av beregningsintervallet. Samtidig øker også fuktopptaket fra inneluften for hvert år. Figur 5-11 viser den samme fuktavgivelsen, men kun de første 1500 timene (ca. 60 dager).



Figur 5-11 Fuktavgivelse fra den innvendige betongoverflaten, ved de ulike betongtypene, de første 15000 timene

Det varierer hvor lang tid det tar for de ulike betongene å stabilisere seg i forhold til innklimaet, men etter ca. 2000 timer (ca. 80 dager) har samtlige betonger en fuktavgivelse på mindre enn 5 g/(m<sup>2</sup>døgn). Det er viktig å være klar over at dette er

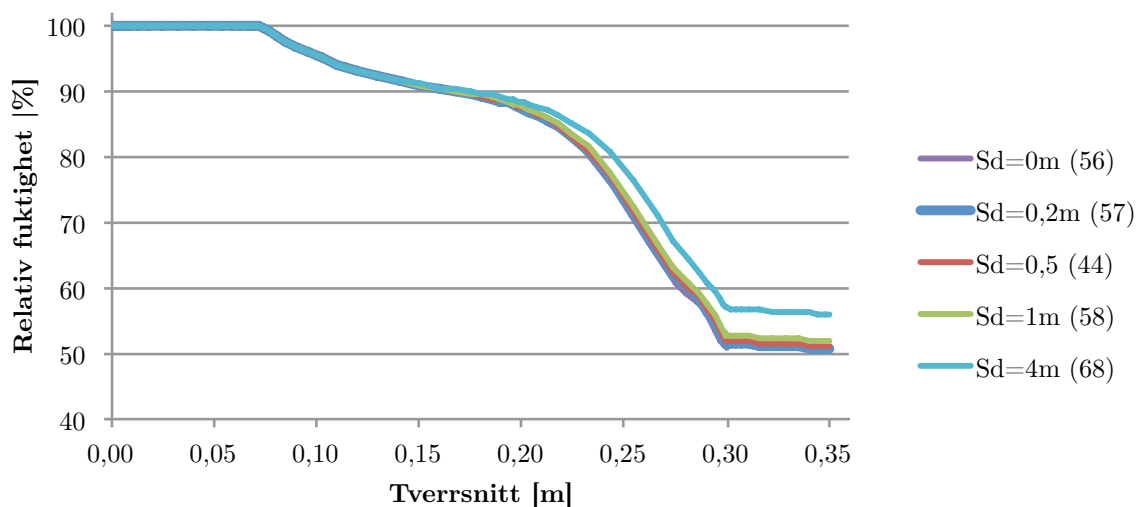
tiden fra beregningene begynte, ikke fra støp. Ved beregningsstart var RF allerede 80 eller 90 prosent, og betongene har dermed herdet en stund.

For å demonstrere innvirkningen av denne fuktavgivelsen kan den sammenliknes med mengde fukttilskudd i inneluften. Dersom forholdet mellom det innvendige volumet og veggarealet er 0,5, vil en fuktavgivelse på 3 g/(m<sup>2</sup>døgn) tilsvare 1,5 g/(m<sup>3</sup>døgn). Dette er ikke en ubetydelig mengde fukttilskudd til inneluften. I beregningene i dette kapittelet er det kun regnet med "lavt" fukttilskudd, med en maksverdi på 2,5 g/(m<sup>3</sup>døgn), og en slik fuktavgivelse fra betongen gir dermed en økning i overskuddsfukt på 60 prosent.

Fukttransporten *fra* betongen *til* inneluften (og den innvendige veggkonstruksjonen) er dermed viktig, selv om betongen er vanntett og beskytter mot fukten utenfra.

### Innvendig kledning

Det er gjort undersøkelser av betydningen av dampmotstanden i den innvendige kledningen for alle betongene. De undersøkte dampmotstandene varierer mellom 0 m og 4 m. RF for de ulike dampmotstandene i en vegg med betong med B35M45- kvalitet og Norcem Standardsement FA er vist i Figur 5-12.



**Figur 5-12** Effekt av variabel dampmotstand i innvendig kledning, vist ved RF over tverrsnittet med B35M45 Betong med Norcem Standardsement FA

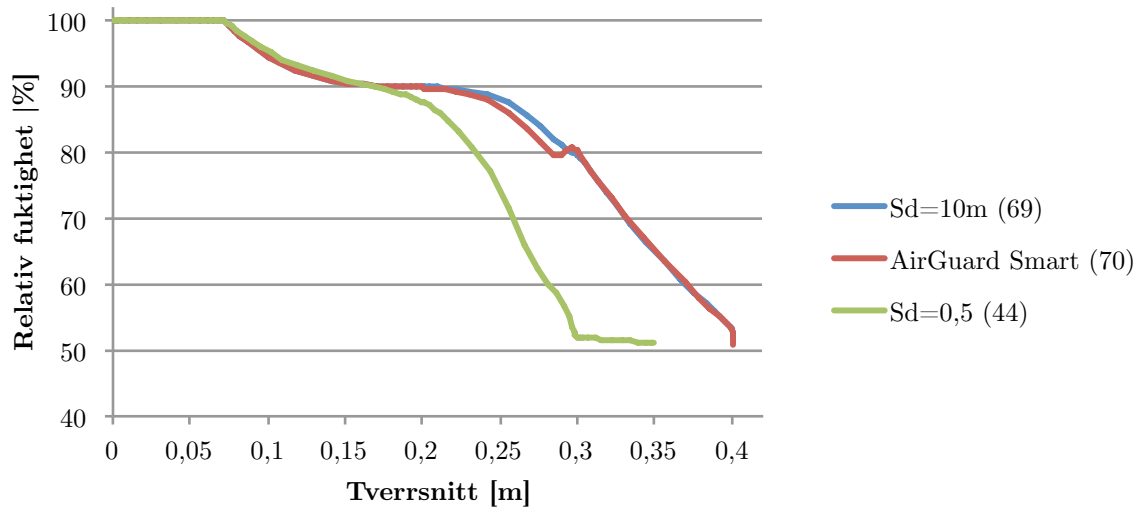
Figur 5-12 viser at det er relativt liten forskjell på fuktsituasjonen ved de ulike dampmotstandene i vegg. Betongtypen som er vist i figuren er den av de fire hvor de ulike kledningene ga størst utslag i form av forskjell i RF. Det er derfor ikke vist oversikt over fuktfordelingen over tverrsnittet i de øvrige betongtypene. de øvrige betongene er derfor ikke presentert.

Resultatene viser at den innvendige kledningen ikke er like kritisk for den generelle fuktsituasjonen og for veggens levetid som først antatt i kapittel 4.3.5. Det antas like vel at betydningen av dampmotstanden vil øke for økende dampmotstand Som nevnt vil det være en permanent fuktavgivelse fra betongen (tidvis på året vil det være et fuktopptak). Dette betyr at selv om dampmotstanden i den innvendige kledningen ikke har veldig stor innvirkning på fuktsituasjonen er det avgjørende at den aktuelle kledningen tåler denne fuktgjennomgangen.

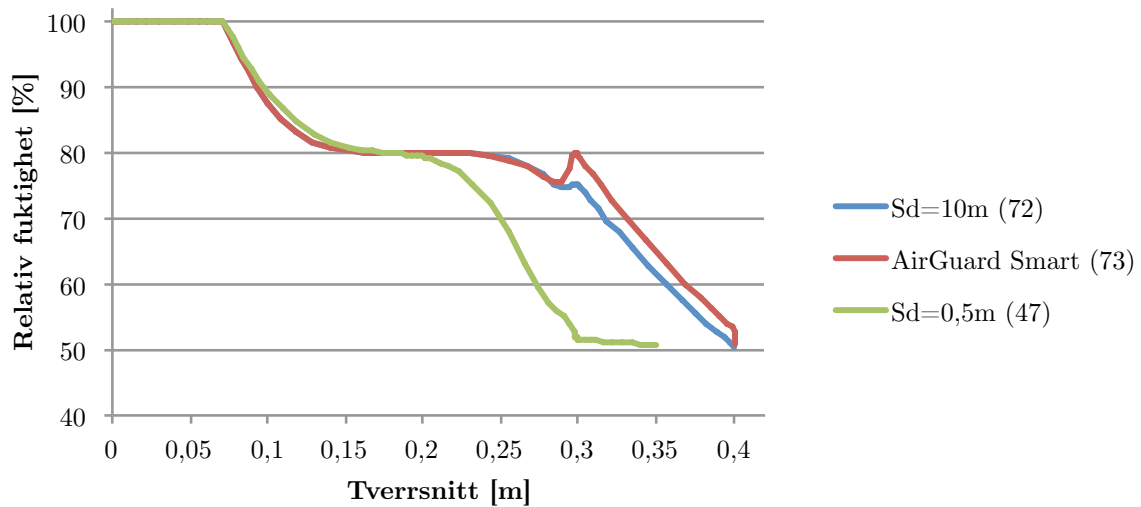
### **Innvendig isolasjon og dampsperre**

På bakgrunn av den lille påvirkningen dampmotstanden i den innvendige kledningen ga i beregningene over, er det også gjort undersøkelser av veggen der det er lagt inn isolasjon og dampsperre. Dette er gjort på tross av at bruken er bekreftet å ha en negativ effekt på veggen. Målet var å se hvor negativ denne effekten er.

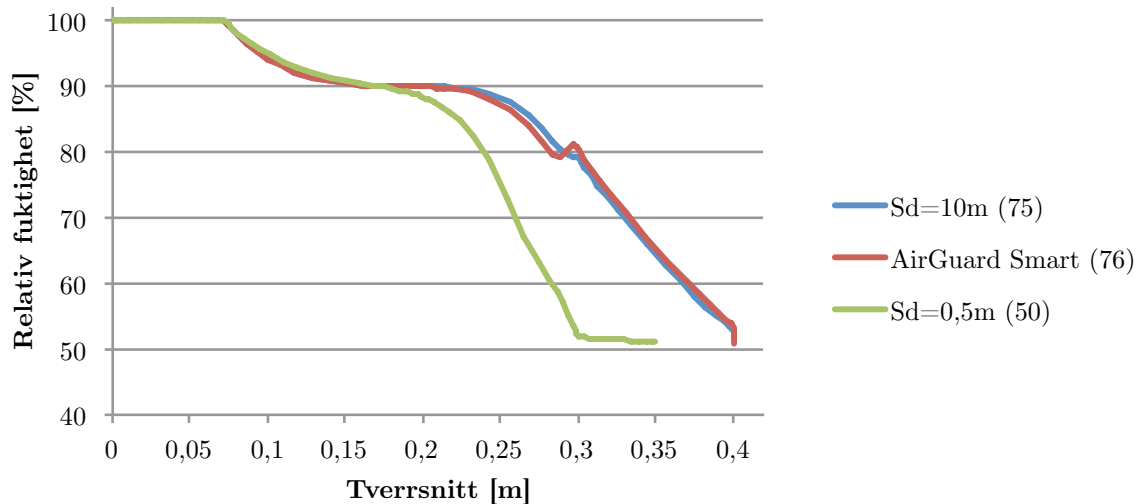
I vurderingene av dampsperre og AirGuard Smart er det brukt 100 mm isolasjon på innsiden og 100 mm på innsiden. I presentasjonen av tverrsnittet ser disse veggene ut til å være tykkere enn referanseveggen, men dette skyldes at den utvendige isolasjonen ikke er vist i grafene. Betongens innvendige overflate er i alle tilfeller ved 0,3 m. Resultatene er vist mot referanseveggen der det ikke er noe innvendig isolasjon og dampmotstanden i den innvendige kledningen er 0,5 m. Resultatene er vist i Figur 5-13 til Figur 5-16.



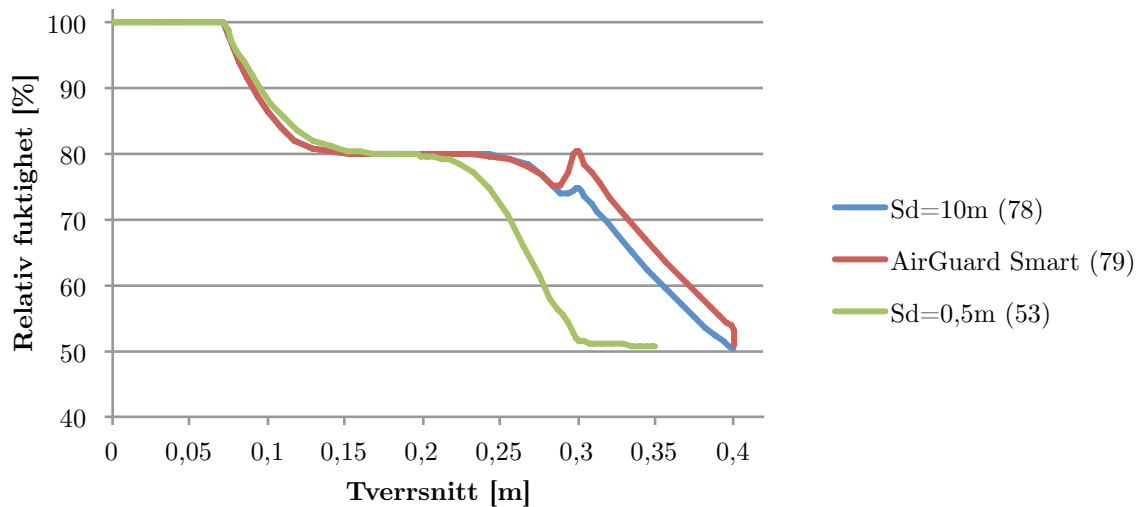
Figur 5-13 RF over tverrsnittet med innvendig isolasjon og dampsperre, sammenliknet med referanseveggen, for B35M45 med Norcem Standardsement FA etter fem års eksponering



Figur 5-14 RF over tverrsnittet med innvendig isolasjon og dampsperre, sammenliknet med referanseveggen, for B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA etter fem års eksponering



Figur 5-15 RF over tverrsnittet med innvendig isolasjon og dampsperre, sammenliknet med referanseveggen, for B35M45 med Cemex Miljøsement etter fem års eksponering



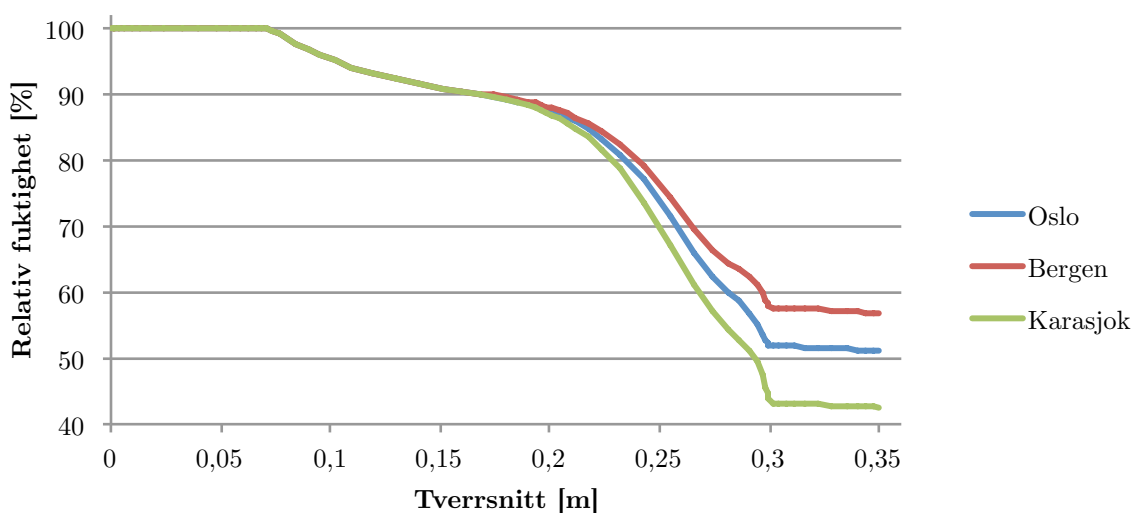
Figur 5-16 RF over tverrsnittet med innvendig isolasjon og dampsperre, sammenliknet med referanseveggen, for B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement etter fem års eksponering

Resultatene viser en vesentlig høyere RF i både påføringen og i den innerste delen av betongsjiktet i tilfellene med isolasjon og dampsperrer. Der referanseveggene har en RF på i overkant av 50 prosent ved betongens innvendige overflate etter fem år er tilsvarende verdi mellom 75 og 80 prosent (avhengig av initiell RF) for veggene med isolasjon og dampsperre.

Det lille ”hoppet” i RF i grafen som viser veggen med AirGuard Smart skyldes den variable RF i inneklimate, og viser at denne påvirker konstruksjonen i større grad enn i tilfellet med vanlig dampsperre. I perioden dataene er hentet fra blir isolasjonen tilført fukt fra inneluften. Det innerste sjiktet i betongveggen har ikke rukket å tilpasse seg dette RF-nivået.

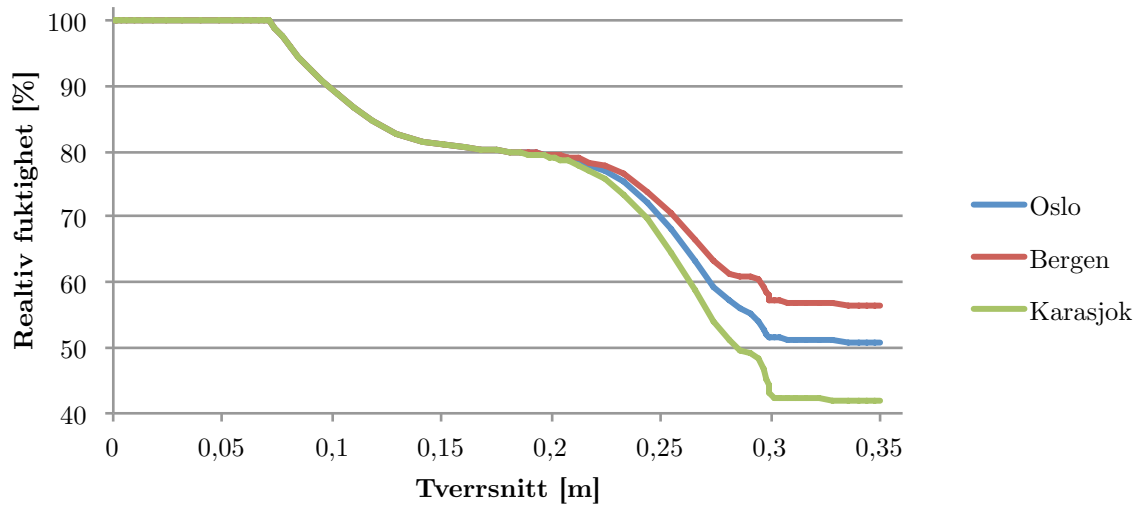
### Innvendig klima

Effekten av ulikt inneklimate er relativt lik for alle betongene. En oversikt over det aktuelle RF-nivået i alle de fire betongene er likevel vist i Figur 5-17 til Figur 5-20.

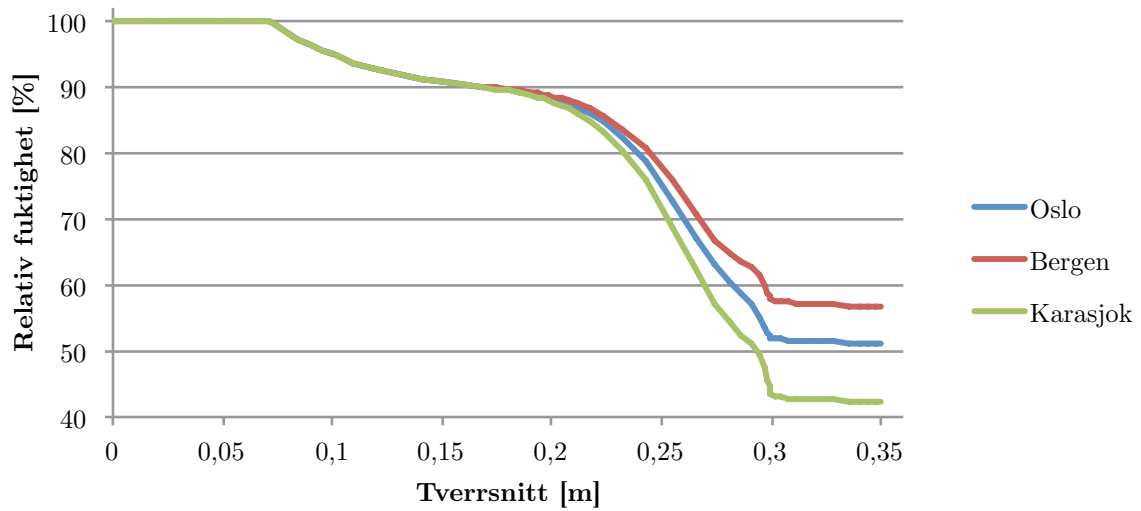


Figur 5-17 RF over tverrsnittet i referanseveggen i ulike byer i Norge, for B35M45 med Norcem Standardsement FA

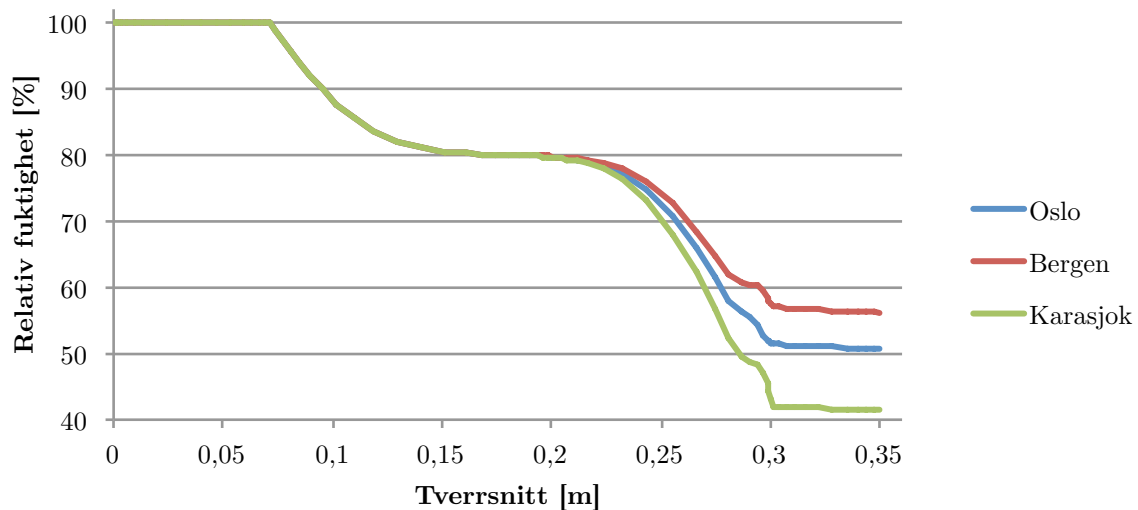




Figur 5-18 RF over tverrsnittet i referanseveggen i ulike byer i Norge, for B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA



Figur 5-19 RF over tverrsnittet i referanseveggen i ulike byer i Norge, for B35M45 med Cemex Miljøsement



**Figur 5-20 RF over tverrsnittet i referanseveggen i ulike byer i Norge, for B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement**

Veggene har en RF på mellom 40 og 60 prosent ved betongens innvendige overflate. Samtlige betonger viser vesentlig større påvirkning fra inneklimate enn det som ble funnet i kapittel 4.3.6. Det stemmer overens med teorien om at inneklimate har større innvirkninger for konstruksjoner der det er mindre kapillær væsketransport. I konstruksjonene gitt i dette kapitlet er den innerste delen av veggen stort sett kun avhengig av betongens initielle egenskaper og uttørking og oppfukning fra innemiljøet. Ved større fuktoverskudd enn det som er brukt i disse beregningene vil innvirkningene følgelig bli større (i form av høyere RF i veggens innerste del).

### 5.3.5 Vurdering og diskusjon

#### Beregningsmetode

Det er uklart hvorvidt det er riktig å kutte den kapillære transporten helt i den innerste delen av tverrsnittet. Men det er klart at den kapillære fukttransporten avtar innover i tverrsnittet (Relling, 1999) og at det er funnet tilfeller av en kapillær brytning mellom fem og ti cm inn i betongen (Künzel et al., 2008). En alternativ beregningsmetode kunne vært å redusere de kapillære egenskapene, uten å fjerne de helt. Men siden det ikke finnes forsøk som er gjort på dette, vil det være ren gjetting å sette en slik redusert verdi for den kapillære transporten. Løsningen med å regne med kapillær brytning, som ble presentert i kapittel 5.3.2 er vurdert som den beste av de som er tilgjengelige for å regne på fuktsituasjonen i en kjellervegg av betong eksponert for konstant vanntrykk.

Det er usikkert hvorvidt det er riktig å bruke 70 mm som tykkelse på det kapillæraktive sjiktet. Men siden det ser ut til å være områder midt i betongen som ikke er påvirket av området med full metning ville det ikke endret fuktsituasjonen på den innerste delen av betongen om den kapillæraktive tykkelsen hadde blitt endret.

Det er fremdeles ikke tatt høyde for betongens langsiktige egenskapsutvikling. En mulighet for å løse denne problemstillingen, inntil bedre metoder er tilgjengelige, kan være å dele beregningsperioden i to. I den første perioden brukes materialegenskaper for fersk betong, mens egenskapene til velherdet betong kan brukes i den neste. Resultatene fra den første beregningsperioden kan da brukes som initialverdier i den siste beregningen. For å kunne gjøre dette er det nødvendig med en bedre oversikt over betongens egenskaper i de to fasene. Denne løsningen er ikke vurdert i denne oppgaven.

### **Kjellervegg**

Ifølge beregningene i kapittel 5.3 er det helt klart at betongveggen er vanntett. På tross av at fukten fra grunnvannet ikke trenger gjennom betongen (de første ti årene), er det likevel viktig å ta hensyn til avdampingen fra betongoverflaten. For at denne byggfukten ikke skal hopes opp i påføringen er det nødvendig med en dampåpen kledning. Denne må også tåle dampgjennomgangen uten å svulle eller gi soppvekst. Ved en dampmotstand på fire meter i den innvendige kledningen øker fukttoppsamlingen og risikoen for problemer knyttet til muggvekst øker.

Innvendig isolasjon og dampsperre (både tradisjonell og ”smart”) bør unngås dersom det er mulig. Redusert temperatur i betongen og økt dampmotstand i veggen har en utelukkende negativ innvirkning på ytterveggen og gir stor risiko for muggvekst. Gipsplater og ubehandlet treverk anbefales ikke brukt i områder med over 85 prosent RF (SINTEF Byggforsk, 2005). Det er derfor, ifølge disse beregningene, helt på grensen å bruke innvendig isolasjon og dampsperre i kombinasjon med gips eller tre.

Det er klart at betongen med Norcem Standardsement er noe mer åpen enn betong med Cemex Miljøsement. Dette er synlig i beregningene i form av at førtnevnte har høyere RF i betongens ytterste del, og lavere i den innerste. Den har også noe mer fordamping fra overflaten.



## 6 KONKLUSJON

---

Gjennom laboratorieforsøk og bruk av analyseverktøyet WUFI er det gjort analyse av ulike parameteres innvirkning på kjellervegger under grunnvannstand. Konklusjonene, herunder om analyseverktøyets egnethet for denne typen analyser, oppsummeres nedenfor.

### 6.1 BETONGENS TETTHETSEGENSKAPER

Undersøkelsene viser konsekvent at betongene med Cemex Miljøsement er tettere enn tilsvarende betongkvaliteter med Norcem Standardsement FA. Betongene er laget med likt matriksvolum med samme krav til kvalitet, og kan derfor sammenliknes direkte.

Betongkvaliteten B45MF40 SV 40 med Cemex Miljøsement er ekstremt tett, men samtlige betonger har resultater som er vurdert til å vanntette, med god margin. Dette er tilfellet på tross av at resultatene fra undersøkelsen av den kapillære sugesevnen er vurdert til å indikere noe høyere permeabilitet enn det som er tilfellet i den jomfruelige betongen. Siden det eneste kravet til vanntett betong er gitt ved v/b-tall er det et begrenset sammenlikningsgrunnlag for å vurdere *hvor* gode resultatene er.

Undersøkelsene har vist at resultatene fra testene, og dermed tetthetsegenskapene til betongen, er svært avhengig av betongens fukthistorikk. For at resultatverdier skal ha noen reell verdi er det nødvendig at de følges av en oversikt over betongens fukthistorikk. Det gjør det vanskelig å kartlegge egenskapene til gammel betong. Den samme betongblandingen er forventet å kunne gi svært ulike resultater for de samme testene, dersom prøvene er forbehandlet ulikt. Dette gjør det vanskelig å gi konkrete verdier for tetthetsegenskapene til betong.

Til tross for at det er utført flere undersøkelser knyttet opp mot betongens tetthetsegenskaper er det fremdeles mange variabler som er mangelfullt utredet.

## **6.2 METODER FOR Å UNDERSØKE BETONGENS TETTHETSEGENSKAPER**

Testing av tetthetsegenskapene til så tette betonger som de som er undersøkt i denne oppgaven er vanskelig og tidkrevende. Sorpsjonsisotermen er flatere for vanntett betong og fukttransportkoeffisienten er lavere enn for vanlig betong. Det betyr at det er mindre fukt som kan fordampe eller opptas, og måling kan bli utfordrende.

Undersøkelsene av kapillær sugesevne og porøsitet viste tydelig at metodene ikke egner seg for betong med M40-kvalitet. Siden fuktopptaket er så lite, og går så sakte får det et annet forløp enn det som er forventet for betong. Dermed blir heller ikke beregningene av kapillaritetstall og motstandstall nøyaktige. Det bør vurderes om det finnes andre metoder for å kartlegge disse egenskapene som passer bedre.

Ved undersøkelser av tetthetsegenskapene til betong, og spesielt vanntett betong, er det nødvendig å beregne mye tid, og det bør vurderes å fravike retningslinjene i aktuelle standarder noe. For eksempel er det mulig at betongen ikke er i likevekt med omgivelsene selv om vektendringen over døgnet er på mindre enn 0,01 prosent, som er gitt i standarden for måling av egenskaper ved dampgjennomgang.

I tilfellene der det er mulig bør betongen forbehandles likt for de ulike prøvemethodene, slik at det er mulig å bruke de ulike resultatene i de samme beregningene. Dette innebærer at både herdeforholdene og tørkeprosedyrene (evt. oppfukning-) bør være like for alle undersøkelsene.

Resultatenes avhengighet av fukthistorikken vil gi utfordringer ved sammenlikning av ulike betongtyper som er testet til forskjellig tid eller sted, eller ved kartlegging av krav til betongen. Sammenlikningsgrunnlaget blir forskjellig og vanskelig å etterprøve, da fukthistorikken sjeldent er lik for ulike prøver.

## **6.3 KJELLERVEGGER I BETONG UNDER GRUNNVANNSTAND**

Basert på WUFI-beregningene anbefales følgende for oppbygning av kjellervegger under grunnvannstand:

- Det bør kun benyttes isolasjon på veggens utside. Den utvendige isolasjonen må tåle stor fuktbelastning uten at den termiske konduktiviteten øker for mye. Innvendig termisk isolasjon og dampsperre bør unngås.
- Det er helt nødvendig med dampåpen kledning på veggens innside for å gi betongen tørkemuligheter innover. Beregningene viste en vesentlig forverring i veggens fuktinnhold da kledningens dampmotstand gikk mot en ekvivalent luftlagstykkelse på fire meter. Det må brukes materialer i kledningen som tåler noe fuktgjennomgang
- Dersom maksimalkravet til U-verdi for ytterveggen i henhold til Byggteknisk forskrift er tilfredsstilt har ikke uteklimaet noe vesentlig innvirkning på fuktsituasjonen i ytterveggen
- Betongen er det mest avgjørende materialet i en kjellervegg mot grunnvannstand. Det er betongen som ivaretar veggens vanntetthet, og det er betongen som har den største mengden byggfukt. Dette er tilfellet også selv om påføringen er utført i treverk, selv om det ikke er vurdert i denne oppgaven

WUFI-beregningene viste at det etter fem år var områder på flere cm i betongene med MF40-kvalitet som var helt uberørt av omgivelsene, og etter ti år var fremdeles ikke tilstanden stasjonær i noen av betongene. Samtlige betonger (og dermed veggkonstruksjoner) er, i henhold til beregningene, absolutt vanntette.

Selv om betongene med Cemex Miljøsement er tettere enn de med Norcem Standardsement gir ikke WUFI-beregningene indikasjoner på at sementtype har noen vesentlig innvirkning på fuktsituasjonen i de aktuelle veggene. Viktigere er v/b-tallet og betongens initielle RF, som er sterkt knyttet til hverandre. Siden samtlige betonger avgir så lite fukt vil det ta svært lang tid å endre RF i midten av betongen fra 90 til 80 prosent. Selvuttørkingen er derfor avgjørende for betongens fuktinnhold i midten av tverrsnittet. Det bør riktignok ikke være et poeng i seg selv et RF er lavt i midten av betongen, da det er fuktavgivelsen og RF ved den innvendige overflaten som er de faktorene som har innvirkning på resten av konstruksjonen.

Betongens initielle RF og mulighet for tørking innover er, ifølge resultatene fra WUFI-beregningene, de faktorene som har størst påvirkning på det langsiktige fuktnivået i konstruksjonen.

Beregningene viste en *relativt* stor forskjell i fuktavgivelse fra betongens innvendige overflate. Den minst tette av betongene (B35M45 med Norcem Standardsement FA), avgir tidvis dobbelt så mye fukt som den tetteste (B45MF40 SV40 med Cemex

Miljøsement). Forskjellene er størst det første halve året av beregningene. Med unntak av den helt første tiden har samtlige betongtyper en fuktavgivelse mellom ca. 3,5 og -2 gram per kvadratmeter per døgn.

## 6.4 WUFI

WUFI bør brukes kritisk ved beregning av fukttransport gjennom betongkonstruksjoner. Betongene som er inkludert i programmets database bør ikke uten videre brukes som de er ved beregninger der det er direkte vanntrykk (eller regn) på betongen. Dette skyldes trolig at den kapillære transporten er vesentlig overdrevet i WUFIs beregninger av fuktinnholdet i betongen, og at de kapillære egenskapene er like over hele betongtverrsnittet.

Ved beregning av fukttransport i betongkonstruksjoner eksponert for fritt vann bør betongen deles inn i to sjikt med ulike kapillære egenskaper. Det finnes lite forskning på kapillær brytning, så det er usikkert hvor stor forskjell det bør være på de to sjiktene. Siden dette ikke er kjent, anbefales det at de kapillære egenskapene kuttes helt mellom fem og ti centimeter inn i betongsjiktet.

WUFI tar ikke høyde for den langsiktige utviklingen av betongens egenskaper. En løsning på dette problemet kan være å dele beregningsintervallet i to, og bruke ulike materialegenskaper i de to tidsperiodene. Det kan skilles mellom egenskapene til fersk og velherdet betong, og la sluttresultatene fra den første beregningsperioden være initialbetingelsene i den siste. Dette er ikke undersøkt i denne oppgaven.

På grunn av usikkerheten knyttet til beregningene i WUFI bør resultatene ikke brukes uten videre til dimensjonering. De bør kun benyttes til å studere virkninger av ulike tiltak eller til overordnede vurderinger av konstruksjonene.

## 6.5 FORBEHOLD

På grunn av den lange forsøktiden for betongprøvene, og dermed det sene tidspunktet resultatene forelå på, kombinert med utfordringene knyttet til analyseprogrammet er det vanskelig å gi endelige svar for fukttilstanden i kjellervegger eksponert for grunnvann.

Arbeidet har imidlertid avdekket flere nye forskningsspørsmål som må kartlegges før en kan vurdere slike kjellervegger helhetlig og realistisk. Disse er presentert i kapittel 7.



## 7 VIDERE ARBEID

---

Denne oppgaven tar for seg undersøkelse av betongenes tetthetsegenskaper, og disse er brukt for å beregne en kjellervegg i analyseprogrammet WUFI. Gjennom hele oppgaven er det kartlagt usikkerheter som bør vurderes nærmere før resultatene kan brukes til prosjektering og nøyaktig beregning.

### 7.1 BETONGEGNSKAPER

Det bør undersøkes om det er andre testmetoder som kan brukes for å kartlegge *hvor* tett vanntett betong faktisk er, eller om de eksisterende testene kan revideres for å gi mer entydige svar. Det er for eksempel vist i denne oppgaven at det for svært tett betong ikke er en lineær sammenheng mellom roten av tiden og vannabsorpsjonen. Utrekningene av kapillaritetstallet og motstandstallet blir derfor ikke riktige, og resultatene kan gi misvisende verdier. Det var også store problemer med måling av dampdiffusjonen gjennom prøvestykkene. Årsaken til dette er ukjent, men problemene med å bruke denne metoden for testing av betong er velkjente.

Det bør også gjøres en vurdering av hvor stor innvirkning de ulike tørkemethodene har på betongens porøsitet. Det er til nå ukjent hvor stor virkningen av tørking ved 100 grader er, og dermed også hvor stor feilmargin det er i resultatene fra prøvene der dette er gjort, sammenliknet med jomfruelig betong eller tester der prøvestykkene er tørket ved andre temperaturer.

### 7.2 WUFI

Det mangler oversikt over hvorvidt WUFI-beregninger av fukttransport i betongvegger (også de som er påført konstant vanntrykk) samsvarer med virkeligheten. Relevansen og troverdigheten til samtlige WUFI-beregninger som er

gjort i denne oppgaven er usikre siden beregningene ikke er verifisert. Det oppfordres derfor til å gjøre in situ undersøkelser i en betongvegg med vanntrykk på en side. Slike undersøkelser kan bestå av å montere RF-sensorer ved ulike dybder i en ny vegg med sammenfallende klimaforhold som i denne oppgaven, og kartlegge endringer i RF. Dette kan blant annet fortelle hvor langt inn i betongen væskefronten trenger før fukttransporten går over i dampdiffusjon. Prøver over tid vil også gi svar på hvor raskt fuktfonten beveger seg gjennom betongen, og hvor lang tid det tar før tilstanden er stasjonær.

Etter at dette er kartlagt kan resultatene brukes til å bekrefte WUFI-resultatene, eller kalibrere beregningene slik at de stemmer overens med virkelige forhold. Først da vil WUFI-beregningene ha en reell verdi og kunne brukes ved prosjektering av kjellervegger.

Det kan også bores ut kjerner av eksisterende bygg. Dersom kjernen kuttes i skiver kan en vurdere fuktinnholdet over tverrsnittet. For å vurdere dette er det viktig med god oversikt over betongen som er brukt. Dette innebærer både materialsammensetning, fukthistorikk, alder og tid siden vanntrykket ble påført.

Det bør også ses på muligheter for å ta hensyn til utviklingen av betongens (og andre materialers) egenskaper over tid i WUFI. Dette er viktig i alle konstruksjoner, og ved beregninger over flere år vil ikke materialene oppføre seg likt gjennom hele beregningstiden.

### **7.3 KJELLERVEGGER**

I denne oppgaven er det lagt vekt på å vurdere innvirkningen av ulike parametere og faktorer. Det er ikke kartlagt konkrete løsninger for valg av materialer.

På grunn av utfordringene knyttet til beregningene i denne oppgaven, bør det gjøres en ny vurdering av betongvegger under grunnvannstand når materialparameterne er tilstrekkelig kartlagt og beregningene i WUFI er verifisert/kalibrert.

## REFERANSER

---

- K. BAKKEJORD 2015. Skriftlig og muntlig kommunikasjon. Skanska Norge AS.
- V. BAROGHEL-BOUNY 2006a. Water vapour experiments on hardened cementitious materials. Part II: Essential tool for assessment of transport properties and for durability prediction. *Cement and Concrete Research*, Vol. 37.
- V. BAROGHEL-BOUNY 2006b. Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials. Part I: Essential tool for analysis of hygral behaviour and its relation to pore structure. *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, 414-437.
- S. BYGGFORSK 2003. Materialdata for vanddamptransport. 573.430.
- H. COLLEUILLE & T. VESTERSAGER 2015. Nasjonalt overvåkningsnett for grunnvann og markvann (Fysiske parameter). *Driftsrapport 2004. Status pr. januar 2005*. Norges vassdrags- og energidirektorat.
- M. A. A. ELATY 2014. Compressive strength prediction of Portland cement concrete with age using a new model. *HBRC Journal*, Vol. 10.
- J. ELDEGARD. 2013. Den nye betongen. Hvordan velge riktige produkter- i et miljøperspektiv? *byggutengrenser.no*, 5. september.
- FRAUNHOFER IBP. 2012. *Moisture Transport in Building Materials, Computer Simulation with the WUFI Model* [Internett]. Tilgjengelig fra: [http://www.hoki.ibp.fraunhofer.de/wufi/grundl\\_ueberblick\\_e.html](http://www.hoki.ibp.fraunhofer.de/wufi/grundl_ueberblick_e.html) [Besøkt 20. november 2014].
- S. GEVING 2014. Nye standardforslag for fuktmåling-praktiske konsekvenser. *Nasjonalt fuktseminar*.
- S. GEVING & J. HOLME 2011. Mean and diurnal indoor air humidity loads in residential buildings. *Journal of Building Physics*.
- S. GEVING & J. V. THUE 2002. *Fukt i bygninger*, Oslo, Norges byggforskningsinstitutt.
- P. GUNDERSEN, J. V. THUE & K. R. LISØ 2004. Nye løsninger for varmeisolering og frostsikring av gulv på grunnen med ringmur. *Prosekt rapport 370*. SINTEF Byggforsk, Klima2000.
- G. HEDENBLAD 1993. Moisture Permeability of Mature Concrete, Cement Mortar and Cement Paste. *Division of building materials. Lund Institute of Technology*.
- A. D. HERHOLDT, C. F. P. JUSTESEN, P. NEPPER-CHRISTENSEN & A. NIELSEN 1979. *Beton-Bogen*, Aalborg Portland, CtO.
- INSTRUMENT COMPANIET AS 2001. Fuktmåling- Brukermanual Protimeter MMS.
- S. JACOBSEN (ed.) 2013. *TKT 4215 Concrete Technology*, Trondheim: NTNU.

- P. JOHANSSON & L.-O. NILSSON 2006. Vattensugning i betong- Laboratorieundersökningar, fältmätningar, beräkningar och modeller. *Lunds Tekniska Högskola, Avd. Byggnadsmaterial*.
- M. KVALVIK, S. GEVING, J. LINDGÅRD & O. SKJØLSVOLD 2009. Uttøringshastighet for betonggulv- Laboratorieforsøk for norske betonger. *Prosjektrapport 32*. SINTEF Byggforsk.
- H. M. KÜNZEL 1995. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. Fraunhofer Institute of Building Physics.
- H. M. KÜNZEL, A. H. HOLM & M. KRUS 2008. Hygrothermal Properties and Behaviour of Concrete. *WTA-Almanach*, 161-181.
- C. LJUNGKRANTZ, G. MÖLLER & N. PETERSONS (eds.) 1994. *Betonghandbok: AB Svensk Byggtjänst*.
- K. N. MJÖRNELL. 1994. *Self-desiccation in concrete*. Chalmers University of Technology.
- T. NARUM & R. H. RELING 1991. Kapillær absorpsjon; erfaringer med metoden. Trondheim: Norges Tekniske Høgskole.
- L.-O. NILSSON 2002. Long-term moisture transport in high performance concrete. *Materials and Structures*, 35, 641-649.
- NORSK STANDARD 2009a. Prøving av fersk betong. Del 2: Synkmål. *NS-EN 12350-2:2009*.
- NORSK STANDARD 2009b. Prøving av fersk betong. Del 7: Luftinnhold. Trykkmetoder. *NS-EN 12350-7:2009*.
- R. H. RELING. 1999. *Coastal Concrete Bridges: Moisture State, Chloride Permeability and Aging Effects*. Doktor Ingeniøravhandling, NTNU.
- S. ROELS, J. CARMELIET, H. HENS, O. ADAN, H. BROCKEN, R. CERNY, Z. PAVLIK, C. HALL, K. KUMARAN, L. PEL & R. PLAGGE 2004. Interlaboratory Comparison of Hygric Properties of Porous Building Materials. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, Vol. 27.
- SINTEF BYGGFORSK 2004. Varmeisolasjonmaterialer. Typer og egenskaper. 573.344.
- SINTEF BYGGFORSK 2005. Gipsplater. Typer og egenskaper. 571.047.
- S. SMEPLASS 2014. Betongens struktur og egenskaper- Fra lærebok. Ikke publisert: Skanska Norge AS.
- S. SMEPLASS 2015. Skriftlig og muntlig kommunikasjon. Skanska Norge AS.
- S. SMEPLASS & O. SKJØLSVOLD 1996. Betongprøving, Kapillær sugsevne og porøsitet. SINTEF.

- STANDARD NORGE 2001. Byggematerialers og -produkters hygrotermiske egenskaper. Bestemmelse av egenskaper ved vanndampgjennomgang. *NS-EN ISO 12572*.
- STANDARD NORGE 2007. Beggematerialer og -produkter- Hygrotermiske dimensjonerende verdier og prosedyrer for bestemmelse av deklarererte og praktiske termiske verdier. *NS-EN ISO 10456:2007*.
- STANDARD NORGE 2009. Prøving av fersk betong. Del 6: Densitet. *NS-EN 12350-6:2009*.
- STANDARD NORGE 2012. Bygningskomponenter og bygningsdelers hygrotermiske egenskaper. Innvendig overflatetemperatur for å unngå kritisk overflatefuktighet og kondensasjon i mellomrom. Beregningsmetoder. *NS-EN ISO 13788*.
- STANDARD NORGE 2014. Måling av relativ fuktighet (RF) i betong. *NS 3511:2014*.
- E. THORSRUD. 2013. *Smarte dampsperrer- betydning av vinterforhold*. Master i teknologi, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- B. TIME, T. KVANDE, K. TERJESEN & Ø. SÆTER 2004. Fukttransport i mineralske bygningsmaterialer- materialeegenskaper. *Prosjektrapport 369*. SINTEF Byggforsk, Klima2000.
- WUFI. 2010. *Velkommen til WUFI.no* [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://www.wufi.no> [Besøkt 20.11 2014].
- WUFI. 2012. *WUFI-Wiki* [Internett]. Tilgjengelig fra: <http://www.wufi-wiki.com> [Besøkt Januar- juni 2015].
- M. S. ÅHS. A quantitative model of moisture redistribution in dual layer concrete slabs with regards to hysteresis. Nordic Symposium on Building Physics 2008, 2008 Copenhagen. 873-880.



## VEDLEGG

---

- Vedlegg A – Oppgavetekst
- Vedlegg B – Betongresepter
- Vedlegg C – Korrigerte betongresepter
- Vedlegg D – Beregning av densitet iht. Powers teori
- Vedlegg E – Kapillærabsorpsjon
- Vedlegg F – Masseendring ved bestemmelse av egenskaper ved vanndampgjennomgang
- Vedlegg G – Prøving av vanndampgjennomgang etter ISO/DIS 12572
- Vedlegg H – Sorpsjonsdata
- Vedlegg I – Matriser for beregningsvariasjoner i WUFI

## **MASTEROPPGAVE**

(TBA4905 Bygnings- og materialteknikk, masteroppgave)

VÅREN 2015

for

**Tuva Jakobsen Rønnes**

**Fukttransport i betongvegger i bygninger**

### **OPPGAVE**

Oppgaven går ut på å vurdere hvilke permanente fuktbelastninger fra betongkonstruksjonen ulike typer innredninger kan tåle uten spesielle tiltak, både i et bygningsteknisk perspektiv, og med tanke på innklimaet. Utformingen av innredningene velges i samråd med Skanskas bygningsfysikere. Det skal antas normale årstidsvariasjoner både for ytre og indre miljø.

Resultatene skal brukes til å definere krav til tetthet for betongkonstruksjonen og betongmaterialet, basert på betongens tverrsnittsdimensjon, og målbare materialparametere som vandampsdiffusjonskoeffisient og kapillaritetstall. Det hører med til oppgaven å bestemme disse materialparameterne for et utvalg av betongsammensetninger, og bruke måleresultatene til å etterregne typisk fuktavgivelse fra betongkonstruksjonen ved hjelp av analyseprogrammet WUFI. Om mulig skal det tas hensyn til betongens langsiktige egenskapsutvikling.



## GENERELT

Oppgaveteksten er ment som en ramme for kandidatens arbeid. Justeringer vil kunne skje underveis, når en ser hvordan arbeidet går. Eventuelle justeringer må skje i samråd med faglærer ved instituttet.

Ved bedømmelsen legges det vekt på grundighet i bearbeidingen og selvstendigheten i vurderinger og konklusjoner, samt at framstillingen er velredigert, klar, entydig og ryddig uten å være unødig voluminøs.

Besvarelsen skal inneholde

- standard rapportforside (automatisk fra DAIM, <http://daim.idi.ntnu.no/>)
- tittelside med ekstrakt og stikkord (mal finnes på siden <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank>)
- sammendrag på norsk og engelsk (studenter som skriver sin masteroppgave på et ikke-skandinavisk språk og som ikke behersker et skandinavisk språk, trenger ikke å skrive sammendrag av masteroppgaven på norsk)
- hovedteksten
- oppgaveteksten (denne teksten signert av faglærer) legges ved som Vedlegg 1.

Besvarelsen kan evt. utformes som en vitenskapelig artikkel for internasjonal publisering. Besvarelsen inneholder da de samme punktene som beskrevet over, men der hovedteksten omfatter en vitenskapelig artikkel og en prosessrapport.

Instituttets råd og retningslinjer for rapportskrivning ved prosjektarbeid og masteroppgave befinner seg på <http://www.ntnu.no/bat/studier/oppgaver>.

### Hva skal innleveres?

Rutiner knyttet til innlevering av masteroppgaven er nærmere beskrevet på <http://daim.idi.ntnu.no/>. Trykking av masteroppgaven bestilles via DAIM direkte til Skipnes Trykkeri som leverer den trykte oppgaven til instituttkontoret 2-4 dager senere. Instituttet betaler for 3 eksemplarer, hvorav instituttet beholder 2 eksemplarer. Ekstra eksemplarer må bekostes av kandidaten/ ekstern samarbeidspartner.

Ved innlevering av oppgaven skal kandidaten levere en CD med besvarelsen i digital form i pdf- og word-versjon med underliggende materiale (for eksempel datainnsamling) i digital form (f. eks. excel). Videre skal kandidaten levere innleveringsskjemaet (fra DAIM) hvor både Ark-Bibl i SBI og Fellestjenester (Byggsikring) i SB II har signert på skjemaet. Innleveringsskjema med de aktuelle signaturene underskrives av instituttkontoret før skjemaet leveres Fakultetskontoret.

Dokumentasjon som med instituttets støtte er samlet inn under arbeidet med oppgaven skal leveres inn sammen med besvarelsen.

Besvarelsen er etter gjeldende reglement NTNUs eiendom. Eventuell benyttelse av materialet kan bare skje etter godkjenning fra NTNU (og ekstern samarbeidspartner der dette er aktuelt). Instituttet har rett til å bruke resultatene av arbeidet til undervisnings- og forskningsformål som om det var utført av en ansatt. Ved bruk ut over dette, som utgivelse og annen økonomisk utnyttelse, må det inngås særskilt avtale mellom NTNU og kandidaten.

**(Evt) Avtaler om ekstern veiledning, gjennomføring utenfor NTNU, økonomisk støtte m.v.**  
Beskrives her når dette er aktuelt. Se <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank> for avtaleskjema.

**Helse, miljø og sikkerhet (HMS):**

NTNU legger stor vekt på sikkerheten til den enkelte arbeidstaker og student. Den enkeltes sikkerhet skal komme i første rekke og ingen skal ta unødige sjanser for å få gjennomført arbeidet. Studenten skal derfor ved uttak av masteroppgaven få utdelt brosjyren "Helse, miljø og sikkerhet ved feltarbeid m.m. ved NTNU".

Dersom studenten i arbeidet med masteroppgaven skal delta i feltarbeid, tokt, befaring, feltkurs eller ekskursjoner, skal studenten sette seg inn i "Retningslinje ved feltarbeid m.m.". Dersom studenten i arbeidet med oppgaven skal delta i laboratorie- eller verkstedarbeid skal studenten sette seg inn i og følge reglene i "Laboratorie- og verkstedhåndbok". Disse dokumentene finnes på fakultetets HMS-sider på nettet, se <http://www.ntnu.no/ivt/adm/hms/>. Alle studenter som skal gjennomføre laboratoriearbeid i forbindelse med prosjekt- og masteroppgave skal gjennomføre et web-basert TRAINOR HMS-kurs. Påmelding på kurset skjer til [sonja.hammer@ntnu.no](mailto:sonja.hammer@ntnu.no)

Studenter har ikke full forsikringsdekning gjennom sitt forhold til NTNU. Dersom en student ønsker samme forsikringsdekning som tilsatte ved universitetet, anbefales det at han/hun tegner reiseforsikring og personskadeforsikring. Mer om forsikringsordninger for studenter finnes under samme lenke som ovenfor.

**Oppstart og innleveringsfrist:**

Oppstart og innleveringsfrist er i henhold til informasjon i DAIM.

**Faglærer ved instituttet:** Stig Geving

**Veileder(eller kontaktperson) hos ekstern samarbeidspartner:** Sverre Smeplass (Skanska Norge AS)

Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU

Dato: 14.01.2014

Underskrift

  
Faglærer

## **VEDLEGG B – BETONGRESEPTER**

---

Inneholder de planlagte betongreseptene i følgende rekkefølge:

- B35M45 med Norcem Standardsement FA
- B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA
- B35M45 med Cemex Miljøsement
- B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement

Reseptene inkluderer også data fra blanding om synkmål, ferskdensitet og luftinnhold.

Prosj./id.:

Navn på serie / blandingsnummer: B35M45  
med Norcem Standardsement FA

Blandevolum:	50 liter
Dato:	7. oktober 2014
Tidspunkt for vanntilsetning	10.21
Ansvarlig:	Tuva Rønnes
Utført av:	tuva Rønnes og Steinar Seehuus

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Standard FA	382,1	19,105			19,105
0	0,0	0,000	50	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	171,9	8,597		-2,789	5,808
Absorbert vann	6,2	0,309			0,309
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1089,9	54,495	4,5	2,452	56,947
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	725,9	36,294	0,5	0,181	36,475
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Mapei Dynamon SX-N	3,8	0,191	81,5	0,156	0,191
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

6,116

\*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

\*\* NBI Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	13 min	21 min	24 min		
Synkmål	14,5 cm				
Utbredelsesmål					
Luft			1,80 %		
Densitet		19205			

Blandeskjema for B35M45 med Norcem Standardsement FA

Prosj./id.:

Navn på serie / blandingsnummer: B35M40  
SV40 med Norcem Standardsement FA

Blande volum:	50 liter
Dato:	7. oktober 2014
Tidspunkt for vanntilsetning	08.41
Ansvarlig:	Tuva Rønnes
Utført av:	Tuva Rønnes og Steinar Seehuus

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Norcem Standard FA	389,9	19,493			19,493
Elcem Microsilica	19,5	0,975	50	0,975	1,949
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	171,5	8,577		-3,646	4,930
Absorbert vann	5,8	0,290			0,290
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1023,8	51,192	4,5	2,304	53,496
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	681,9	34,094	0,5	0,170	34,265
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Mapei Dynamon SX-N	3,9	0,195	81,5	0,159	0,195
SikaAer-S	0,8	0,039	99,55	0,039	0,039
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

5,220

\*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

\*\* NBI Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	14 min	22 min	39 min	46 min	64 min
Synkmål	13 cm		17,5 cm		
Utbredelsesmål					
Luft				6,50 %	
Densitet		19234		19122	18407,000

Blandeskjema for B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA

Prosj./id.:

Navn på serie / blandingsnummer: B35M45  
med Cemex Miljøsement

Blande volum:	50 liter
Dato:	07.okt.14
Tidspunkt for vanntilsetning	13.44
Ansvarlig:	Tuva Rønnes
Utført av:	Tuva Rønnes og Steinar Seehuus

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Cemex miljøsement	389,1	19,457			19,457
0	0,0	0,000	50	0,000	0,000
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	175,1	8,756		-2,792	5,963
Absorbert vann	6,2	0,309			0,309
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1089,9	54,495	4,5	2,452	56,947
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	725,9	36,294	0,5	0,181	36,475
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Mapei Dynamon SX-N	3,9	0,195	81,5	0,159	0,195
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

6,272

\*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

\*\* NBI Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	11 min	16 min			
Synkmål	23 cm				
Utbredelsesmål					
Luft		1 %			
Densitet		19387			

Blandeskjema for B35M45 med Cemex Miljøsement



Prosj./id.:

Navn på serie / blandingsnummer: B35MF40  
SV40 med Cemex Miljøsement

Blandevolum:	50 liter
Dato:	07.okt.14
Tidspunkt for vanntilsetning	12.22
Ansvarlig:	Tuva Rønnes
Utført av:	Tuva Rønnes og Steinar Seehuus

Materialer	Resept kg/m <sup>3</sup>	Sats kg	Fukt* %	Korr. kg	Oppveid** kg
Cemex miljøsement	396,9	19,846			19,846
Elkem Microsilica	19,8	0,992	50	0,992	1,985
	0,0	0,000	0	0,000	0,000
Fritt vann	174,6	8,732		-3,663	5,070
Absorbent vann	5,8	0,290			0,290
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1023,8	51,192	4,5	2,299	53,491
Årdal 0/2 mm nat. vask	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Årdal 8/16mm	681,9	34,094	0,5	0,170	34,265
Årdal 16/22 mm	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
	0,0	0,000	0,0	0,000	0,000
Mapei Dynamon SX-N	4,0	0,198	81,5	0,162	0,198
SikaAer-S	0,8	0,040	99,55	0,040	0,040
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
	0,0	0,000	100	0,000	0,000
Stålfiber	0,0	0,000			0,000
PP-fiber	0,0	0,000			0,000

\*Se fotnote på delark "Proporsjonering"

\*\* NBI Våte mengder, også for pozzolaner og fillere

Fersk betong					
Tid etter vanntilsetning	19 min	32 min	44 min		
Synkmål			22 cm		
Utbredelsesmål					
Luft	3 %	8 %			
Densitet	18904	18074			

Blandeskjema for B35M45 med Cemex Miljøsement

## **VEDLEGG C – KORRIGERTE BETONGRESEPTER**

---

Dette vedlegget inneholder de betongreseptene, korrigert for luftinnhold og densitet, i følgende rekkefølge:

- B35M45 med Norcem Standardsement FA
- B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA
- B35M45 med Cemex Miljøsement
- B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement



Korrigert betongresept for B35M45 med Norcem Standardsement FA

<b>Materiale</b>	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>
Norcem Standard FA	385,97
Fritt vann	173,04
Absorbert vann	6,24
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1100,95
Årdal 8/16mm	733,23
Mapei Dynamon SX-N	3,07
<b>Proporsjonert betongdensitet (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2399,99</b>

Korrigert betongresept for B35M40 SV40 med Norcem Standardsement FA

<b>Materiale</b>	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>
Norcem Standard FA	389,92
Elcem Microsilica	19,50
Fritt vann	178,32
Absorbert vann	5,80
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1024,01
Årdal 8/16mm	681,99
Mapei Dynamon SX-N	7,43
SikaAer-S	4,68
<b>Proporsjonert betongdensitet (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2300,94</b>

Korrigert betongresept for B35M45 med Cemex Miljøsement

Materiale	Kg/m <sup>3</sup>
Cemex miljøsement	395,02
Fritt vann	177,76
Absorbert vann	6,27
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1106,36
Årdal 8/16mm	736,84
Mapei Dynamon SX-N	3,95
<b>Proporsjonert betongdensitet (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2422,97</b>

Korrigert betongresept for B35M45 med Cemex Miljøsement

Materiale	Kg/m <sup>3</sup>
Cemex miljøsement	388,50
Elkem Microsilica	19,42
Fritt vann	174,92
Absorbert vann	5,68
Årdal 0/8 mm nat. vask.	1002,10
Årdal 8/16mm	667,40
Mapei Dynamon SX-N	5,89
SikaAer-S	3,13
<b>Proporsjonert betongdensitet (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2259,13</b>

## VEDLEGG D – BEREGNING AV DENSITET IHT. POWERS TEORI

---

Beregning av betongens porøsitet er gjort i henhold til Powers teori.

I beregningene er det brukt følgende densitetsverdier:

- Norcem standardsement FA:  $2950 \text{ kg/m}^3$
- Cemex Miljøsement:  $3080 \text{ kg/m}^3$

Porøsitetsberegningene er presentert i følgende rekkefølge:

- Porøsitetsberegninger for B35M45 med Norcem Standardsement FA
- Porøsitetsberegninger for B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA
- Porøsitetsberegninger for B35M45 med Cemex Miljøsement
- Porøsitetsberegninger for B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement

Porøsitetsberegninger for B35M45 med Norcem Standardsement FA

Komponent	Ved blanding		Hydratasjonsgrad= 0,6		
	Masse (kg/m <sup>3</sup> )	Volum (l/m <sup>3</sup> )	Masse (kg/m <sup>3</sup> )	Volum (l/m <sup>3</sup> )	Volum-%
Uhydratisert sement	386,00	130,85	154,40	52,34	-
Hydratisert sement	0,00		231,60	78,51	-
Fritt vann (kap.porer)	173,00	173,00	78,04	78,04	7,80 %
Kjemisk bundet vann	0,00		53,27	40,22	-
Fysisk budet vann (gelporer)	0,00		41,69	41,69	4,17 %
Kontraksjonsporer	-			13,05	1,31 %
Totalt volum		303,85		303,85	13,28 %

Porøsitetsberegninger for B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA

Komponent	Ved blanding		Hydratasjonsgrad= 0,6		
	Masse (kg/m <sup>3</sup> )	Volum (l/m <sup>3</sup> )	Masse (kg/m <sup>3</sup> )	Volum (l/m <sup>3</sup> )	Volum-%
Uhydratisert sement	409,40	138,78	163,76	55,51	-
Hydratisert sement	0,00		245,64	83,27	-
Fritt vann (kap.porer)	178,30	178,30	77,59	77,59	7,76 %
Kjemisk bundet vann	0,00		56,50	42,66	-
Fysisk budet vann (gelporer)	0,00		44,22	44,22	4,42 %
Kontraksjonsporer	-			13,84	1,38 %
Totalt volum		317,08		317,08	13,56 %

Porositetsberegninger for B35M45 med Cemex Miljøsement

Komponent	Ved blanding		Hydratasjonsgrad= 0,6		
	Masse (kg/m <sup>3</sup> )	Volum (l/m <sup>3</sup> )	Masse (kg/m <sup>3</sup> )	Volum (l/m <sup>3</sup> )	Volum- %
Uhydratisert sement	395,00	128,25	158,00	51,30	-
Hydratisert sement	0,00		237,00	76,95	-
Fritt vann (kap.porer)	177,80	177,80	80,63	80,63	8,06 %
Kjemisk bundet vann	0,00		54,51	41,16	-
Fysisk budet vann (gelporer)	0,00		42,66	42,66	4,27 %
Kontraksjonsporer	-			13,35	1,34 %
Totalt volum		306,05		306,05	13,66 %

Porositetsberegninger for B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement

Komponent	Ved blanding		Hydratasjonsgrad= 0,6		
	Masse (kg/m <sup>3</sup> )	Volum (l/m <sup>3</sup> )	Masse (kg/m <sup>3</sup> )	Volum (l/m <sup>3</sup> )	Volum- %
Uhydratisert sement	407,90	132,44	163,16	52,97	-
Hydratisert sement	0,00		244,74	79,46	-
Fritt vann (kap.porer)	174,90	174,90	74,56	74,56	7,46 %
Kjemisk bundet vann	0,00		56,29	42,50	-
Fysisk budet vann (gelporer)	0,00		44,05	44,05	4,41 %
Kontraksjonsporer	-			13,79	1,38 %
Totalt volum		307,34		307,34	13,24 %

## **VEDLEGG E – KAPILLÆRABSORPSJON**

---

Inneholder hovedresultatene fra undersøkelsene av betongens kapillærabsorpsjon i følgende rekkefølge:

- B35M45 med Norcem Standardsement FA
- B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA
- B35M45 med Cemex Miljøsement
- B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement

# Kapillærabsorpsjon- B35M45 med Norcem Standardsement FA

## Kapillærabsorpsjon

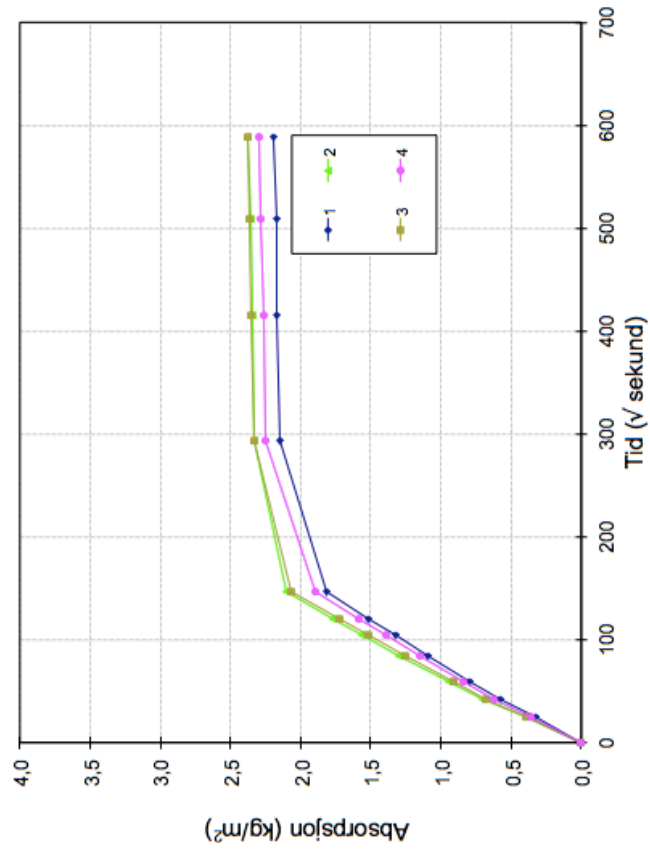
KS 14-05-04-110

SS 2012-04-26

Oppdrag: B35M45 Norcem Std FA

Størrelse	Middelverdier	Var. koeff. / std.av.
Motstandstall	6,65E+07 [s/m <sup>2</sup> ]	7,7 %
Kapillaritetstall	1,37E-02 [kg / m <sup>2</sup> ⌀ s]	7,3 %
Sugporøsitet	11,6 [% vol.]	3,4 %
Åpen makroporøsitet	0,1 [% vol.]	22,5 %
Lukket makroporøsitet	1,6 [% vol.]	7,7 %
PF-verdi. (samlet)	0,12	-
Faststoffdensitet	2695 [kg / m <sup>3</sup> ]	7 [kg / m <sup>3</sup> ]
Tørrdensitet	2336 [kg / m <sup>3</sup> ]	12 [kg / m <sup>3</sup> ]

Antatt bindemiddelmengde	382 [kg/m <sup>3</sup> ]
Estimert mengde sementlim	277 [l/m <sup>3</sup> ]
Antatt hydrasjonsgrad	0,60
Antatt silikainnhold	0 [%]
<b>Estimert masseforhold</b>	<b>0,41</b>



# Kapillærabsorpsjon- B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA

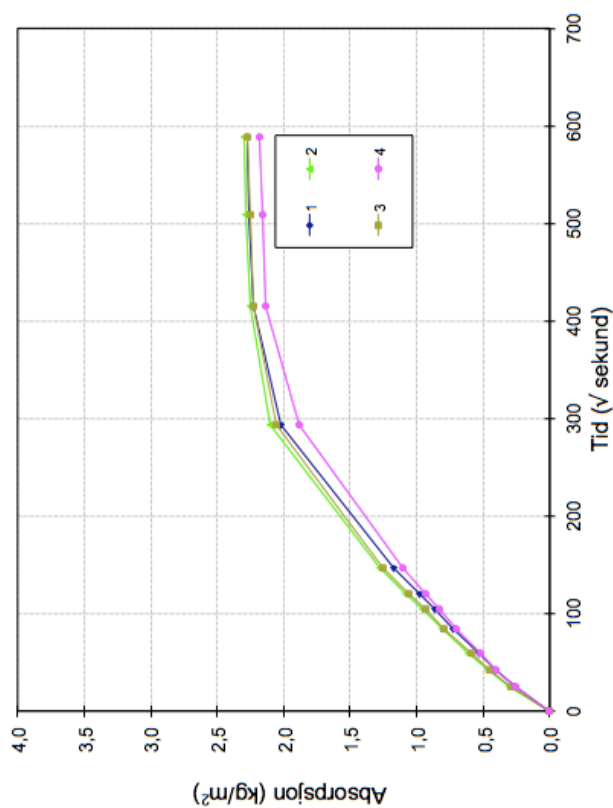
## Kapillærabsorpsjon KS 14-05-04-110

SS 2012-04-26

Oppdrag: B35M40 SV40 Norcem Std FA

Størrelse	Middelverdi	Var. koef. / std.av.
Motstandstall	1,85E+08 [s/m <sup>2</sup> ]	10,2 %
Kapillaritetstall	7,94E-03 [kg / m <sup>2</sup> s]	6,7 %
Sugporøsitet	11,3 [% vol.]	2,7 %
Åpen makroporøsitet	0,3 [% vol.]	15,6 %
Lukket makroporøsitet	5,2 [% vol.]	2,6 %
PF-verdi (samlet)	0,31	-
Fasistetthetsitet	2709 [kg / m <sup>3</sup> ]	8 [kg / m <sup>3</sup> ]
Tørredensitet	2253 [kg / m <sup>3</sup> ]	10 [kg / m <sup>3</sup> ]

Antatt bindemiddelmengde	409 [kg/m <sup>3</sup> ]
Estimert mengde sementlim	290 [l/m <sup>3</sup> ]
Antatt hydrasjonsgrad	0,70
Antatt silikainnhold	5 [%]
<b>Estimert masseforhold</b>	<b>0,39</b>





# Kapillærabsorpsjon- B35M45 med Cemex Miljøsement

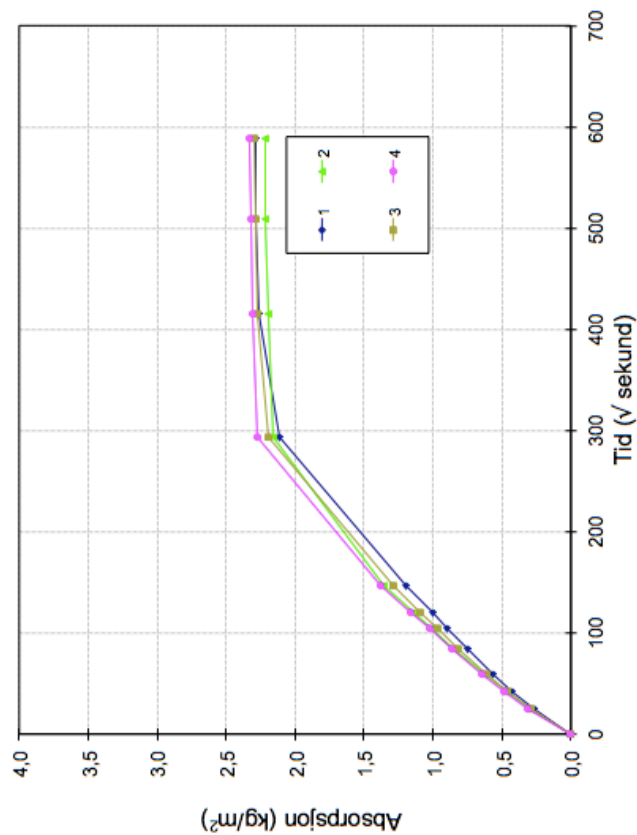
## Kapillærabsorpsjon KS 14-05-04-110

SS 2012-04-26

Oppdrag: **B35M45 Cemex**

Størrelse	Middelverdier	Var. koef. / std.av.
Motstandstall	1,66E+08 [s/m <sup>2</sup> ]	15,4 %
Kapillaritetstall	8,68E-03 [kg / m <sup>2</sup> ⌀ s]	6,8 %
Sugporøsitet	11,5 [% vol.]	2,0 %
Åpen makroporøsitet	0,2 [% vol.]	13,6 %
Lukket makroporøsitet	1,4 [% vol.]	5,9 %
PF-verdi (samlet)	0,10	-
Faststoffdensitet	2711 [kg / m <sup>3</sup> ]	8 [kg / m <sup>3</sup> ]
Tørredensitet	2357 [kg / m <sup>3</sup> ]	9 [kg / m <sup>3</sup> ]

Antatt bindemiddelmengde	389 [kg/m <sup>3</sup> ]
Estimert mengde sementlim	292 [l/m <sup>3</sup> ]
Antatt hydrasjonsgrad	0,80
Antatt silikainnhold	0 [%]
<b>Estimert masseforhold</b>	<b>0,43</b>



# Kapillærabsorpsjon- B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement

## Kapillærabsorpsjon

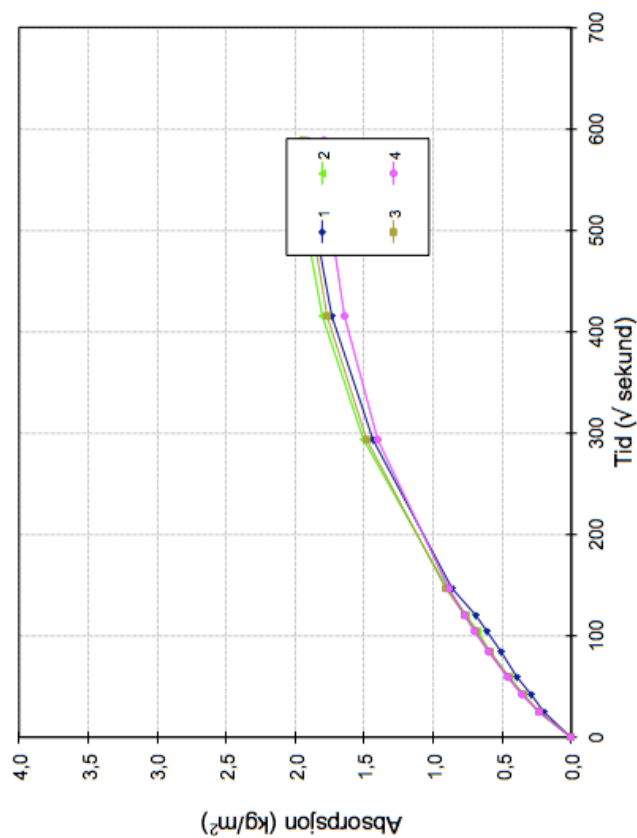
KS 14-05-04-110

SS 2012-04-26

Oppdrag: B35M40 SV40 Cemex

Størrelse	Middelverdier	Var. koeff. / std.av.
Motstandstall	1,95E+08 [s/m <sup>2</sup> ]	8,8 %
Kapillaritetstall	5,75E-03 [kg / m <sup>2</sup> s]	2,4 %
Sugporøsitet	9,6 [% vol.]	4,0 %
Åpen makroporøsitet	1,6 [% vol.]	32,9 %
Lukket makroporøsitet	4,8 [% vol.]	7,6 %
PF-verdi (samlet)	0,30	-
Faststoffdensitet	2657 [kg / m <sup>3</sup> ]	12 [kg / m <sup>3</sup> ]
Tørrdensitet	2234 [kg / m <sup>3</sup> ]	16 [kg / m <sup>3</sup> ]

Antatt bindemiddelmengde	417 [kg/m <sup>3</sup> ]
Estimert mengde sementlim	283 [l/m <sup>3</sup> ]
Antatt hydratasjonsgrad	0,80
Antatt silikainnhold	5 [%]
<b>Estimert masseforhold</b>	<b>0,35</b>



## **VEDLEGG F – MASSEENDRING VED BESTEMMELSE AV EGENSKAPER VED VANNDAMPGJENNOMGANG**

---

Inneholder loggført masseendring for ulike relative fuktigheter i følgende rekkefølge:

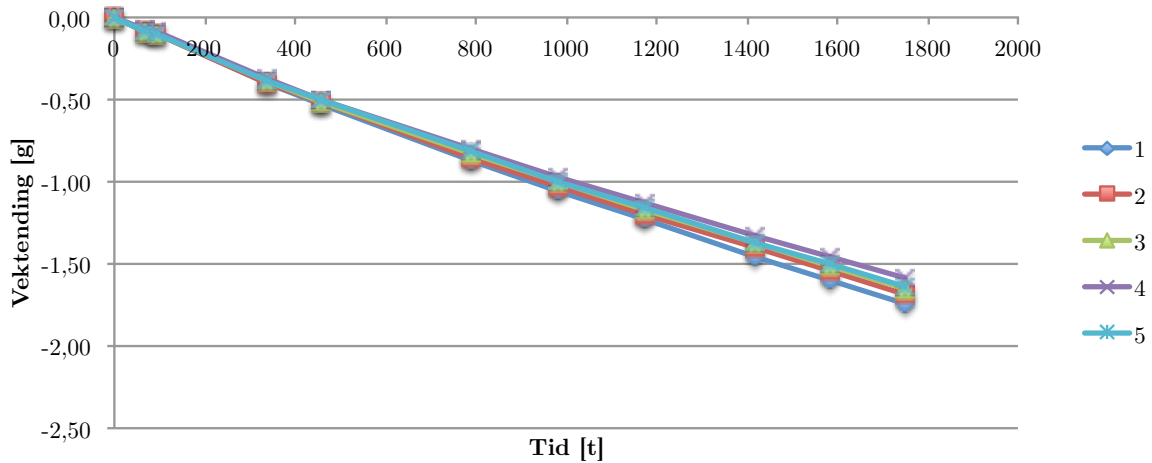
- $\text{KNO}_3$  – 94 % RF i koppen og 75 % RF i omgivende rom (84,5 % gjennomsnitt)
  - Vektendring for B35M45 med Norcem Standardsement FA
  - Vektendring for B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA
  - Vektendring for B35M45 med Cemex Miljøsement
  - Vektendring for B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement
- $\text{MgCl}_2$  – 33 % RF i koppen og 75 % RF i omgivende rom (54 % gjennomsnitt)
  - Vektendring for B35M45 med Norcem Standardsement FA
  - Vektendring for B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA
  - Vektendring for B35M45 med Cemex Miljøsement
  - Vektendring for B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement
- $\text{LiCl}$  – 11 % RF i koppen og 50 % RF i omgivende rom (30,5 % gjennomsnitt)
  - Vektendring for B35M45 med Norcem Standardsement FA
  - Vektendring for B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA
  - Vektendring for B35M45 med Cemex Miljøsement
  - Vektendring for B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement

Merk at siden betongene har trengt ulike tid for å innstilles i likevekt er tidsaksene er ulike.

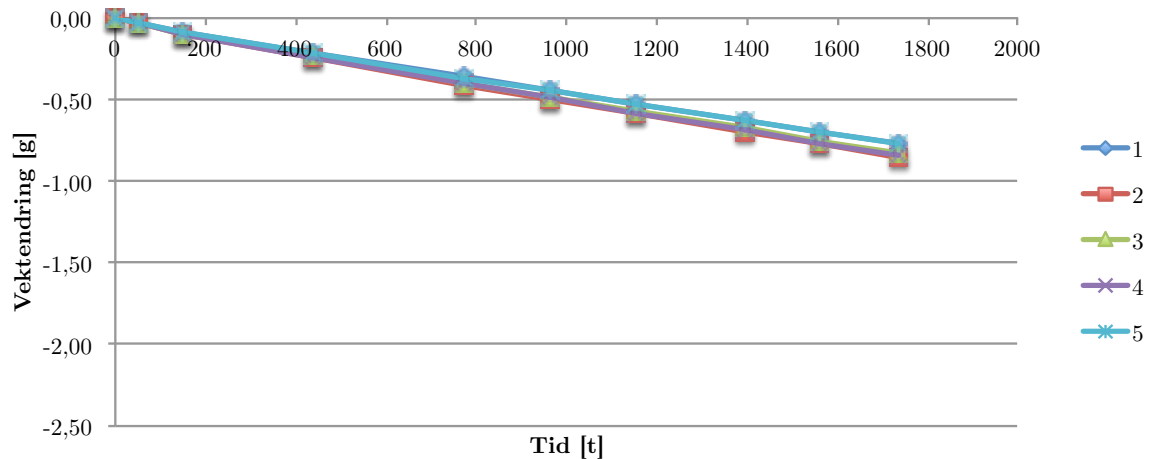
## KNO<sub>3</sub> – 94 % RF i koppen og 75 % RF i omgivende rom (84,5 % gjennomsnitt)

Forventet oppførsel over tid: vektreduksjon

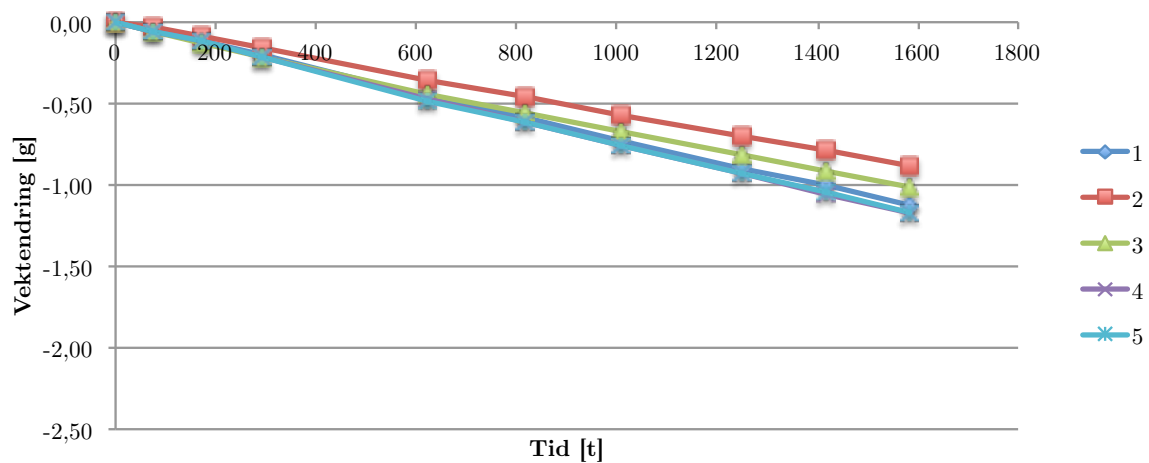
Test: OK



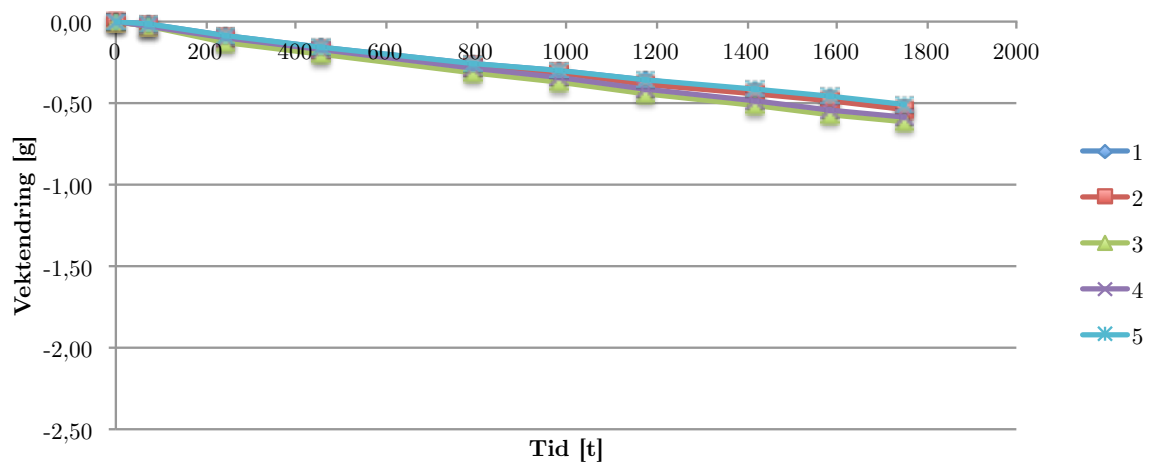
B34M45 med Norcem Standardsement FA. (94%/75%) Vektendring siden start for de enkelte prøvene



B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA. (94%/75%) Vektendring siden start for de enkelte prøvene



**B34M45 med Cemex Miljøsement (94%/75%) Vektendring siden start for de enkelte prøvene**

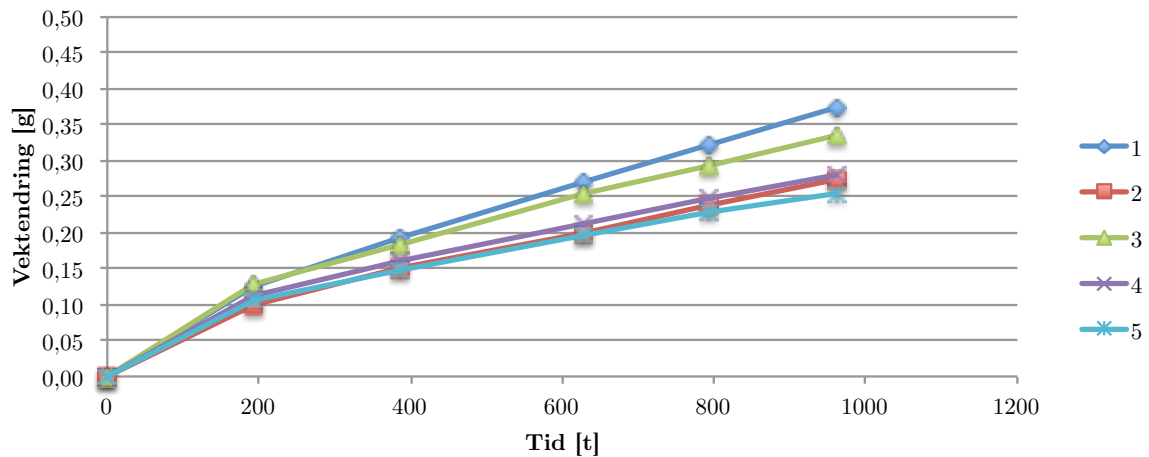


**B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement (94%/75%) Vektendring siden start for de enkelte prøvene**

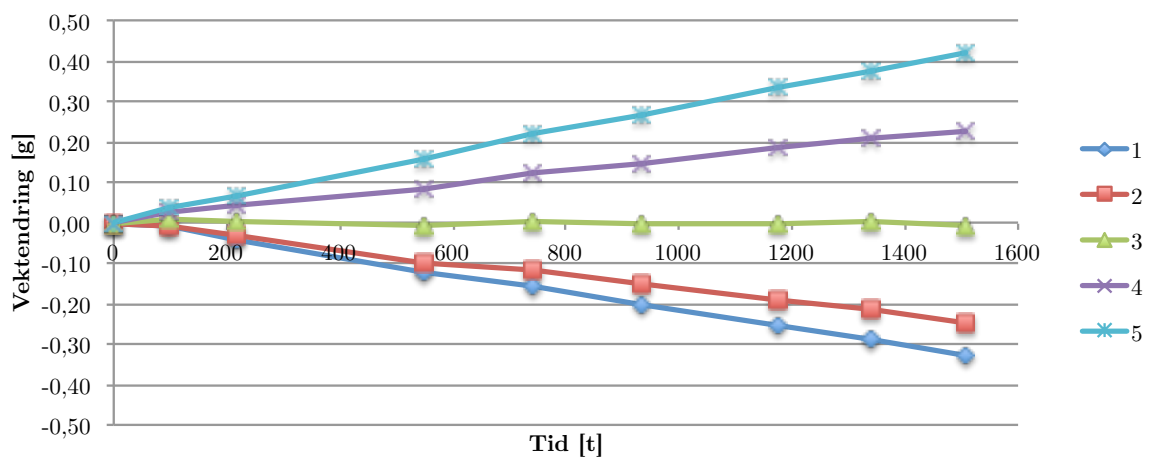
## MgCl<sub>2</sub> – 33 % RF i koppen og 75 % RF i omgivende rom (54 % gjennomsnitt)

Forventet oppførsel over tid: vektøkning

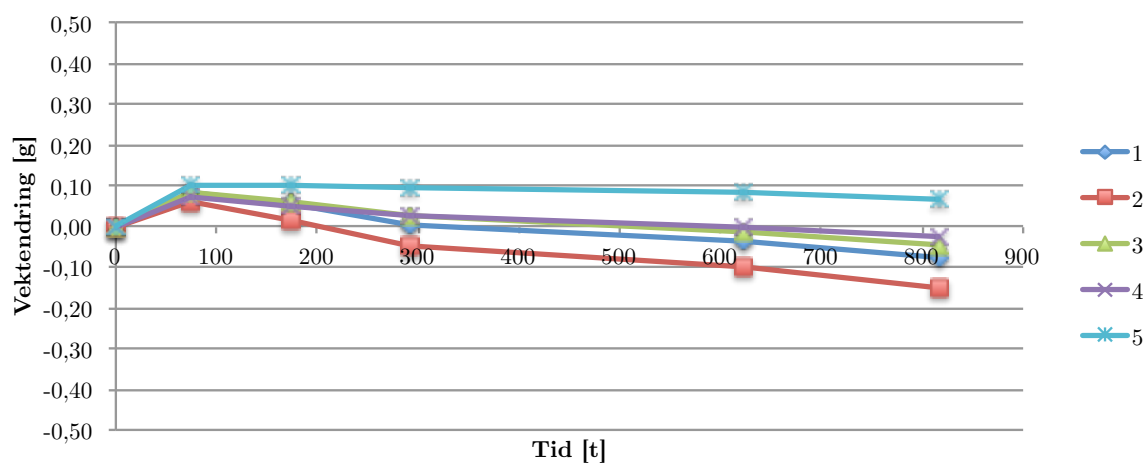
Test: Ikke OK



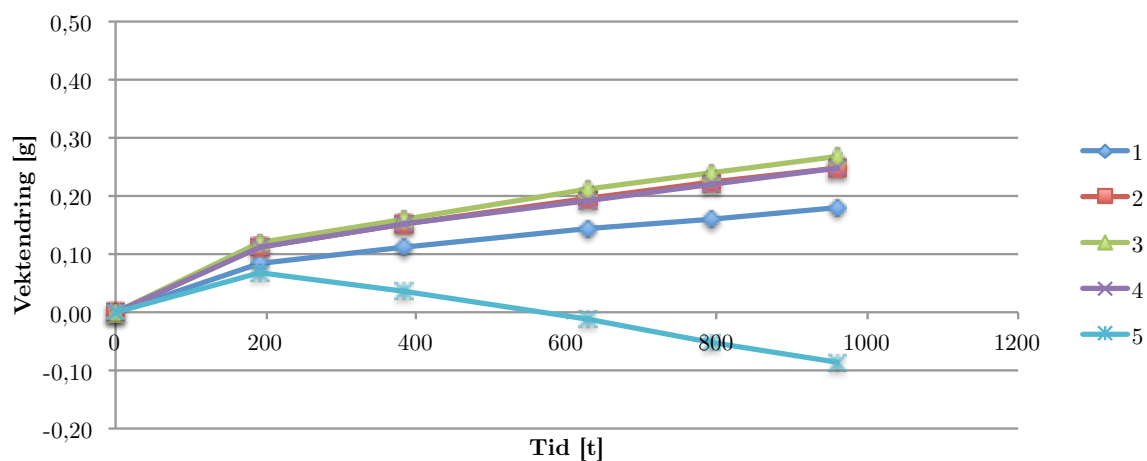
B34M45 med Norcem Standardsement FA. (33%/75%) Vektendring siden start for de enkelte prøvene



B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA. (33%/75%) Vektendring siden start for de enkelte prøvene



**B34M45 med Cemex Miljøsement. (33%/75%) Vektending siden start for de enkelte prøvene**

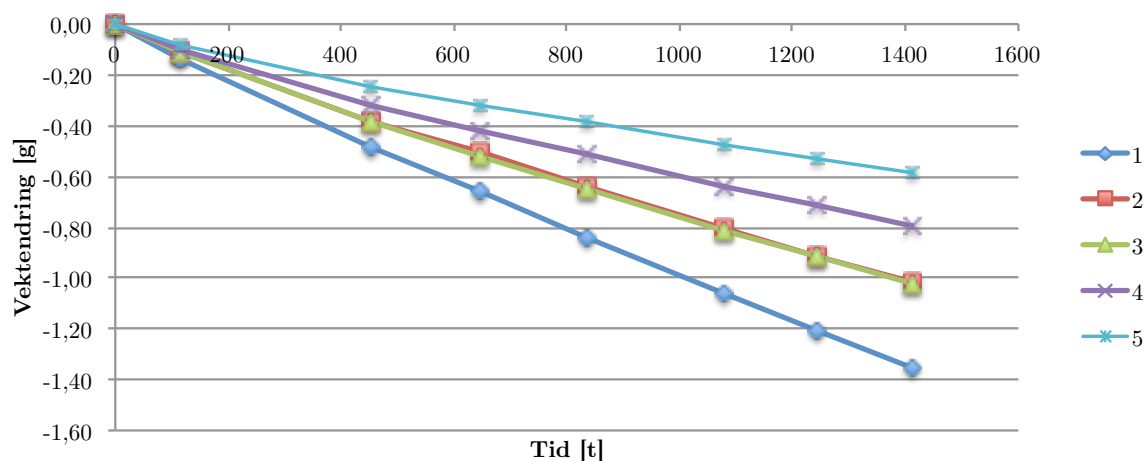


**B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement. (33%/75%) Vektending siden start for de enkelte prøvene**

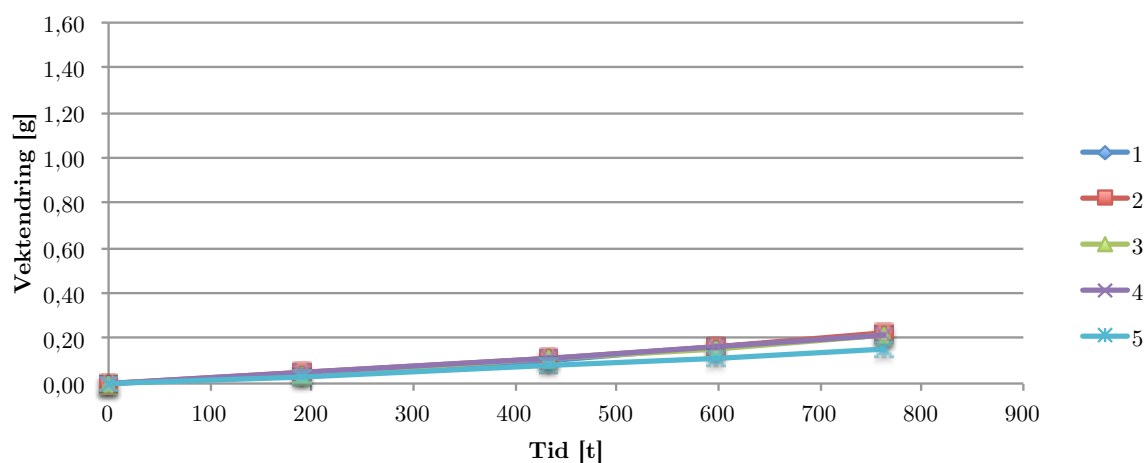
## LiCl – 11 % RF i koppen og 50 % RF i omgivende rom (30,5 % gjennomsnitt)

Forventet oppførsel over tid: vektøkning

Status: Ikke OK

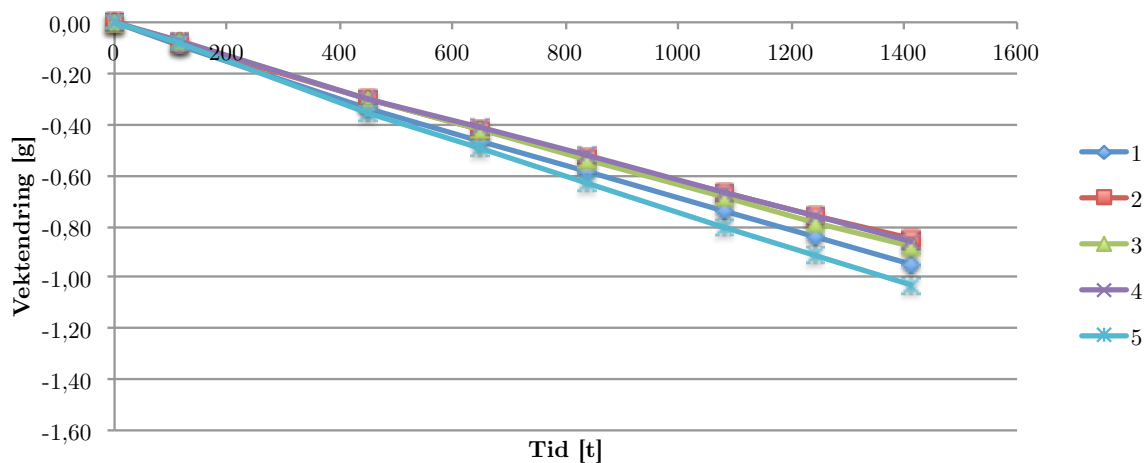


B34M45 med Norcem Standardsement FA. (11%/50%) Vektendring siden start for de enkelte prøvene

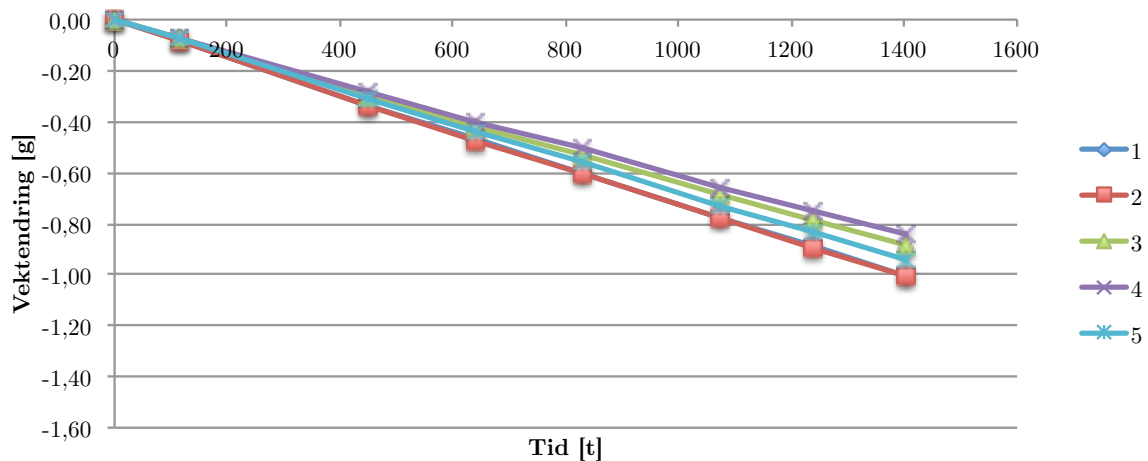


B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA. (11%/50%) Vektendring siden start for de enkelte prøvene





**B34M45 med Cemex Miljøsement. (11%/50%) Vektendring siden start for de enkelte prøvene**



**B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement. (11%/50%) Vektendring siden start for de enkelte prøvene**

## **VEDLEGG G – PRØVING AV VANNDAMPGJENNOMGANG ETTER ISO/DIS 12572**

---

Resultatene undersøkelsene av masseendring ved vanndampgjennomgang for de ulike betongene er presentert i følgende rekkefølge:

- Vanndampmotstand til B35M45 med Norcem Standardsement FA
- Vanndampmotstand til B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA
- Vanndampmotstand til B35M45 med Cemex Miljøsement
- Vanndampmotstand til B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement

# Prøvningsrapport for B35M45 med Norcem Standardsement FA



**PRØVINGS RAPPORT**  
Prøving av vanndamppermeans etter ISO/DIS 12572

Produktnavn: FA uten luft  
Oppdragsgiver: Tuva  
Prosjektnummer: 0  
Produkttype: Betong

Tykkelse, mm: 9,5  
Målenummer: Serie 4  
Prøvediameter: (mm) 90  
Salttype i boksen: KNO3  
Prøveperiode: fra: 24.04.2015  
til: 26.05.2015

	Middel i prøveperioden
Relativ luftfuktighet i boksen (%RF)	94,1
Relativ luftfuktighet i rommet (%RF)	74,8
Temperatur i boksen (°C)	23,0
Temperatur i rommet (°C)	23,0
Barometertrykk (hPa)	1004,2

Lufth. over pr.(m/s): 0,3

Tabell 1 Temperatur, relativ luftfuktighet og barometertrykk i prøveperioden.

Prøve nummer	Vanndamppermeans	Vanndampmotstand	
	(kg/m <sup>2</sup> sPa)	(m)	(m <sup>2</sup> sPa/kg)
1	6,50E-11	3,100	1,54E+10
2	6,24E-11	3,200	1,60E+10
3	6,12E-11	3,300	1,63E+10
4	5,88E-11	3,400	1,70E+10
5	6,05E-11	3,300	1,65E+10
Middel	6,16E-11	3,260	1,63E+10

Tabell 2 Vanndamppermeans og vanndampmotstand for de fem prøvestykkene. Enkeltresultatene er et middel over fem tidsintervall med stabil fukttransport. Resultatene er korrigert for overgangsmotstanden over prøven, damptransport gjennom overlappsonen, og motstanden i luftlaget i boksen.

SIGN:

# Prøvningsrapport for B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA



**PRØVINGS RAPPORT**  
**Prøving av vanndamppermeans etter ISO/DIS 12572**

Produktnavn: FA med luft  
Oppdragsgiver: Tuva  
Prosjektnummer: 0  
Produkttype: Betong

Tykkelse, mm: 9,5  
Målenummer: Serie 1  
Prøvediameter: (mm) 90  
Salttype i boksen: KNO<sub>3</sub>  
Prøveperiode: fra: 24.04.2015  
til: 26.05.2015

	Middel i prøveperioden
Relativ luftfuktighet i boksen (%RF)	94,1
Relativ luftfuktighet i rommet (%RF)	74,8
Temperatur i boksen (°C)	23,0
Temperatur i rommet (°C)	23,0
Barometertrykk (hPa)	1003,3

Lufth. over pr.(m/s): 0,3

Tabell 1 Temperatur, relativ luftfuktighet og barometertrykk i prøveperioden.

Prøve nummer	Vanndamppermeans	Vanndampmotstand	
	(kg/m <sup>2</sup> sPa)	(m)	(m <sup>2</sup> sPa/kg)
1	3,11E-11	6,400	3,21E+10
2	3,46E-11	5,800	2,89E+10
3	3,36E-11	5,900	2,97E+10
4	3,43E-11	5,800	2,92E+10
5	3,16E-11	6,300	3,17E+10
Middel	3,30E-11	6,040	3,03E+10

Tabell 2 Vanndamppermeans og vanndampmotstand for de fem prøvestykkene. Enkeltresultatene er et middel over fem tidsintervall med stabil fukttransport. Resultatene er korrigert for overgangsmotstanden over prøven, damptransport gjennom overlappsonen, og motstanden i luftlaget i boksen.

SIGN:

# Prøvningsrapport for B35M45 med Cemex Miljøsement



## PRØVINGS RAPPORT Prøving av vanndamppermeans etter ISO/DIS 12572

Produktnavn: FA uten luft  
Oppdragsgiver: Tuva  
Prosjektnummer: 0  
Produkttype: Betong

Tykkelse, mm: 9,5  
Målenummer: Serie 4  
Prøvediameter: (mm) 90  
Salttype i boksen: KNO3  
Prøveperiode: fra: 24.04.2015  
til: 26.05.2015

	Middel i prøveperioden
Relativ luftfuktighet i boksen (%RF)	94,1
Relativ luftfuktighet i rommet (%RF)	74,8
Temperatur i boksen (°C)	23,0
Temperatur i rommet (°C)	23,0
Barometertrykk (hPa)	1004,2

Lufth. over pr.(m/s): 0,3

Tabell 1 Temperatur, relativ luftfuktighet og barometertrykk i prøveperioden.

Prøve nummer	Vanndamppermeans	Vanndampmotstand	
	(kg/m <sup>2</sup> sPa)	(m)	(m <sup>2</sup> sPa/kg)
1	6,50E-11	3,100	1,54E+10
2	6,24E-11	3,200	1,60E+10
3	6,12E-11	3,300	1,63E+10
4	5,88E-11	3,400	1,70E+10
5	6,05E-11	3,300	1,65E+10
Middel	6,16E-11	3,260	1,63E+10

Tabell 2 Vanndamppermeans og vanndampmotstand for de fem prøvestykkene. Enkeltresultatene er et middel over fem tidsintervall med stabil fukttransport. Resultatene er korrigert for overgangsmotstanden over prøven, damptransport gjennom overlappsonen, og motstanden i luftlaget i boksen.

SIGN:

# Prøvningsrapport for B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement



## PRØVINGS RAPPORT Prøving av vanndampermeans etter ISO/DIS 12572

Produktnavn: FA uten luft  
Oppdragsgiver: Tuva  
Prosjektnummer: 0  
Produkttype: Betong

Tykkelse, mm: 9,5  
Målenummer: Serie 4  
Prøvediameter: (mm) 90  
Salttype i boksen: KNO<sub>3</sub>  
Prøveperiode: fra: 24.04.2015  
til: 26.05.2015

	Middel i prøveperioden
Relativ luftfuktighet i boksen (%RF)	94,1
Relativ luftfuktighet i rommet (%RF)	74,8
Temperatur i boksen (°C)	23,0
Temperatur i rommet (°C)	23,0
Barometertrykk (hPa)	1004,2

Lufth. over pr.(m/s): 0,3

Tabell 1 Temperatur, relativ luftfuktighet og barometertrykk i prøveperioden.

Prøve nummer	Vanndampermeans	Vanndampmotstand	
	(kg/m <sup>2</sup> sPa)	(m)	(m <sup>2</sup> sPa/kg)
1	6,50E-11	3,100	1,54E+10
2	6,24E-11	3,200	1,60E+10
3	6,12E-11	3,300	1,63E+10
4	5,88E-11	3,400	1,70E+10
5	6,05E-11	3,300	1,65E+10
Middel	6,16E-11	3,260	1,63E+10

Tabell 2 Vanndampermeans og vanndampmotstand for de fem prøvestykkene. Enkeltresultatene er et middel over fem tidsintervall med stabil fukttransport. Resultatene er korrigert for overgangsmotstanden over prøven, damprtransport gjennom overlappsonen, og motstanden i luftlaget i boksen.

SIGN:

## VEDLEGG H - SORPSJONSDATA

---

Resultatdata fra undersøkelse av adsorpsjon og desorpsjon for betongen i følgende rekkefølge:

- B35M45 med Norcem Standardsement FA
- B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA
- B35M45 med Cemex Miljøsement
- B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement

### Forklaring til tabellene:

$m_0$ : massen til prøvestykket etter tørking ved  $50\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$

$m_w$ : massen til prøvestykket ved likevekt med aktuell RF

u: fuktinnhold ved likevekt angitt ved vekt av tørrvekt

### Øvrig informasjon:

Gjennomsnittstemperatur:  $23\text{ °C}$

Standardavvik temperatur:  $0,5\text{ °C}$

Type vekt: Mettler 1200

Nøyaktighet til vekten: 0,001

### B35M45 med Norcem Standardsement FA

Prøve	Adsorpsjon 33 %			Adsorpsjon 53 %			Adsorpsjon 75 %			Adsorpsjon 94 %		
	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]
1	185,10	186,31	0,0065	183,52	185,80	0,0124	186,34	189,72	0,0181	189,66	193,90	0,0224
2	187,79	188,91	0,0060	182,40	184,63	0,0122	188,41	191,80	0,0180	193,22	198,50	0,0274
3	177,50	178,73	0,0069	186,35	188,61	0,0121	184,09	187,57	0,0189	181,74	186,58	0,0266
4	183,35	184,60	0,0068	184,06	186,32	0,0123	185,64	189,18	0,0190	183,91	188,94	0,0274
5	191,23	192,54	0,0069	184,05	186,28	0,0121	181,20	184,82	0,0200	182,18	187,11	0,0271
Gj.snitt	184,99	186,22	0,0066	184,07	186,33	0,0122	185,14	188,62	0,0188	186,14	191,01	0,0262

Prøve	Desorpsjon 94 %			Desorpsjon 75 %			Desorpsjon 53 %			Desorpsjon 33 %		
	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]
1	185,26	194,85	0,0517	181,91	188,64	0,0370	185,93	189,94	0,0215	186,72	189,23	0,0134
2	181,21	191,77	0,0583	185,67	192,20	0,0352	188,18	192,22	0,0215	183,91	186,37	0,0133
3	184,35	196,14	0,0639	182,28	188,83	0,0359	184,15	188,23	0,0222	189,76	191,91	0,0113
4	188,97	199,11	0,0537	179,82	186,48	0,0371	185,44	189,62	0,0225	181,90	184,35	0,0135
5	188,85	200,45	0,0614	185,81	192,39	0,0354	183,73	187,71	0,0217	184,53	187,12	0,0141
Gj.snitt	185,73	196,46	0,0578	183,10	189,71	0,0361	185,48	189,54	0,0219	185,36	187,80	0,0131



**B45MF40 SV40 med Norcem Standardsement FA**

Prøve	Adsorpsjon 33 %			Adsorpsjon 53 %			Adsorpsjon 75 %			Adsorpsjon 94 %		
	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]
1	176,68	178,16	0,0084	179,09	181,35	0,0126	176,67	180,54	0,0219	181,03	185,49	0,0246
2	183,55	184,94	0,0076	183,01	185,30	0,0125	173,32	177,20	0,0224	176,36	181,02	0,0264
3	178,01	179,34	0,0074	173,72	175,95	0,0129	179,73	183,49	0,0209	170,12	174,56	0,0261
4	175,02	176,52	0,0086	176,82	179,00	0,0123	168,28	172,10	0,0228	175,40	179,98	0,0261
5	179,68	181,30	0,0090	169,59	171,88	0,0135	175,95	179,74	0,0215	175,93	180,38	0,0253
Gj.snitt	178,59	180,05	0,0082	176,44	178,70	0,0128	174,79	178,61	0,0219	175,77	180,28	0,0257

Prøve	Desorpsjon 94 %			Desorpsjon 75 %			Desorpsjon 53 %			Desorpsjon 33 %		
	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]
1	179,09	187,48	0,0468	181,53	187,52	0,0330	179,51	183,94	0,0247	180,62	183,04	0,0134
2	170,39	181,91	0,0676	176,20	182,43	0,0354	179,05	183,85	0,0268	181,90	184,43	0,0139
3	179,42	189,96	0,0587	169,06	175,27	0,0368	181,58	186,18	0,0253	179,50	181,94	0,0136
4	176,92	187,18	0,0580	178,48	184,95	0,0362	181,65	186,35	0,0259	175,59	177,94	0,0134
5	175,79	186,08	0,0585	184,92	191,36	0,0348	178,00	182,83	0,0271	168,62	170,67	0,0121
Gj.snitt	176,32	186,52	0,0579	178,03	184,31	0,0352	179,96	184,63	0,0260	177,25	179,60	0,0133

### B35M45 med Cemex Miljøsement

Prøve	Adsorpsjon 33 %				Adsorpsjon 53 %				Adsorpsjon 75 %				Adsorpsjon 94 %			
	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	
1	185,00	186,68	0,0091	183,52	185,72	0,0120	186,68	190,86	0,0224	183,63	189,12	0,0299				
2	186,50	188,02	0,0081	182,83	184,92	0,0114	181,04	185,09	0,0224	185,43	190,37	0,0266				
3	184,60	186,10	0,0081	181,69	183,81	0,0117	185,51	189,40	0,0210	186,10	191,28	0,0279				
4	186,38	187,93	0,0083	177,36	179,41	0,0116	188,04	191,67	0,0193	188,32	193,68	0,0284				
5	183,99	185,47	0,0081	182,57	184,70	0,0117	184,53	188,35	0,0207	186,42	191,78	0,0288				
Cj.smitt	185,29	186,84	0,0084	181,59	183,71	0,0117	185,16	189,07	0,0211	185,98	191,25	0,0283				

Prøve	Desorpsjon 94 %				Desorpsjon 75 %				Desorpsjon 53 %				Desorpsjon 33 %			
	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	
1	182,04	191,41	0,0514	186,37	193,12	0,0362	186,66	192,14	0,0294	187,63	190,24	0,0140				
2	184,64	193,82	0,0497	187,97	193,19	0,0278	186,28	191,61	0,0286	187,33	189,95	0,0140				
3	185,82	195,23	0,0507	188,03	194,72	0,0356	185,25	190,58	0,0287	195,40	198,02	0,0134				
4	182,98	193,12	0,0554	186,01	193,07	0,0379	190,40	195,44	0,0264	187,24	189,84	0,0139				
5	186,61	197,57	0,0587	185,17	191,54	0,0344	187,49	192,23	0,0253	185,45	188,05	0,0140				
Cj.smitt	184,42	194,23	0,0532	186,71	193,13	0,0344	187,22	192,40	0,0277	188,61	191,22	0,0139				

### B45MF40 SV40 med Cemex Miljøsement

Prøve	Adsorpsjon 33 %			Adsorpsjon 53 %			Adsorpsjon 75 %			Adsorpsjon 94 %		
	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]
1	174,52	175,99	0,0084	176,35	178,53	0,0123	172,11	176,14	0,0234	173,43	178,73	0,0306
2	175,55	176,99	0,0082	177,39	179,56	0,0123	173,91	178,04	0,0237	173,08	178,44	0,0310
3	175,75	177,18	0,0081	173,82	175,95	0,0123	171,06	175,31	0,0248	171,18	176,45	0,0308
4	173,23	174,75	0,0088	174,53	176,65	0,0121	175,68	179,79	0,0234	186,27	191,64	0,0288
5	179,32	180,68	0,0076	170,74	172,85	0,0124	175,59	179,55	0,0225	174,78	179,85	0,0290
Gj.snitt	175,67	177,12	0,0082	174,56	176,71	0,0123	173,67	177,77	0,0236	175,75	181,02	0,0300

Prøve	Desorpsjon 94 %			Desorpsjon 75 %			Desorpsjon 53 %			Desorpsjon 33 %		
	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]	m <sub>0</sub> [gram]	m <sub>w</sub> [gram]	u [kg/kg]
1	173,47	182,22	0,0504	180,36	186,71	0,0352	179,22	184,03	0,0269	170,37	173,22	0,0168
2	175,41	184,89	0,0540	178,62	185,32	0,0375	170,57	175,87	0,0311	173,23	176,28	0,0176
3	174,21	183,42	0,0529	176,76	183,58	0,0386	171,78	177,10	0,0310	181,82	184,81	0,0164
4	170,81	180,60	0,0573	177,74	184,21	0,0364	174,40	179,47	0,0291	176,18	179,16	0,0169
5	171,61	179,29	0,0447	176,79	182,89	0,0345	172,37	177,81	0,0316	172,66	175,41	0,0159
Gj.snitt	173,10	182,08	0,0519	178,05	184,54	0,0364	173,67	178,86	0,0299	174,85	177,78	0,0167

# **VEDLEGG I - MATRISE FOR BEREGNINGSVARIASJONER I WUFI**

---

Inneholder i følgende rekkefølge:

- Beregningsvariasjoner 1-28 (kapittel 4)
- Beregningsvariasjoner 29-43 (kapittel 4)
- Beregningsvariasjoner 44-79 (kapittel 5)

De merkede beregningsvariasjonene representerer referanseveggen.

	1	2	3	4	5	6a	6b	7a	7b	8a	8b	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28			
<b>Dampmotstand i innvendig kledning [m]</b>	x																																	
Sd = 0																																		
Sd = 0,1																																		
Sd=0,2 (Platekledninger)		x																																
<b>Sd = 0,5 (Platekledninger)</b>			x																															
Sd = 1 (Platekledninger)				x																														
Sd = 2 (Dampbrems)					x																													
Sd = 2 (Platekledning+maling)																																		
Sd = 10 (Dampsperre)						x																												
Sd = 70 (Dampperre)								x																										
Smart dampsperre-gipsplate (Sd=0,1)																																		
Smart dampsperre-gipsplate (Sd=0,2)																																		
0 mm	x																																	
<b>50 mm med luft</b>		x	x	x	x	x		x																										
50 mm med mineralull																																		
100 mm med mineralull																																		
200 mm med mineralull																																		
<b>Betongtype M45 (der ikke annet er oppgitt er selvtørrkingen 90 %v ved beregningsstart)</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
<b>Normal- Fraunhofer (k=0,0137) (Vanndampdiffusjonsmotstand (=248 [-]))</b>																																		
Vanndampdiffusjonsmotstand (=310 [-])																																		
Væsketransportkoeffisient k=0,3																																		
Væsketransportkoeffisient k=0,1																																		
Væsketransportkoeffisient k=0,01																																		
Væsketransportkoeffisient k=0,009																																		
Væsketransportkoeffisient k=0,008																																		
Væsketransportkoeffisient k=0,007																																		
Væsketransportkoeffisient k=0,006																																		
Væsketransportkoeffisient k=0,005																																		
Normal- Fraunhofer Byggfukt: 80 %																																		
Normal- Fraunhofer Byggfukt: 70 %																																		
Normal- Fraunhofer Byggfukt: Utside: 90 %- Innside 70 %																																		
<b>Tykkelse på utvendig XPS</b>	x	x	x	x	x	x		x																										
200 mm																																		
150 mm																																		
100 mm																																		
0 mm																																		
<b>Utetemperatur</b>																																		
4° C																																		
6° C	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
8° C																																		
10° C																																		
<b>Fukttilskudd i inneluften (Løst: 2.5 g/m3, Medium: 4 g/m3, Høyt 4 g/m3)</b>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Oslo (lavt fukttilskudd)																																		
Oslo (medium fukttilskudd)																																		
Oslo (Høyt fukttilskudd)																																		
Bergen (lavt fukttilskudd)																																		
Bergen (høyt fukttilskudd)																																		
Karasjok (lavt fukttilskudd)																																		
Karasjok (høyt fukttilskudd)																																		

	29	30	31	32	33	34	35	36a	36b	36c	37	38	39	40	41	42	43	44	
Dampmotstand i innvendig kledning [m]	Sd = 0																		
	Sd = 0,1	x																	
	Sd=0,2 (Platekledninger)		x																
	Sd = 0,5 (Platekledninger)			x							x	x	x	x	x	x	x		
	Sd = 1 (Platekledninger)																		
	Sd = 2 (Dampbrems)																		
	Sd = 2 (Platekledning+maling)																		
	Sd = 10 (Dampsperre)																		
	Sd = 70 (Dampperre)																		
	Smart dampsperre+gipsplate (Sd=0,1)										x								
	Smart dampsperre+gipsplate (Sd=0,2)											x							
	Tykkelse på påføring	0 mm																	
50 mm med luft		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
50 mm med mineralull																			
100 mm med mineralull																			
200 mm med mineralull																			
Betongtype M45 (der ikke annet er oppgitt er selvtørringen 90 %v ved beregningsstart)		Normal - Fraunhofer (k=0,0137)	x	x	x	x	x	x	x	x	x								
		(Vandampdiffusjonsmotstand (=248 [-]))																	
		Vandampdiffusjonsmotstand (=310 [-])																	
		Væsketransportkoeffisient k=0,3																	x
		Væsketransportkoeffisient k=0,1																	
		Væsketransportkoeffisient k=0,01																	
		Væsketransportkoeffisient k=0,009																	
	Væsketransportkoeffisient k=0,008																		
	Væsketransportkoeffisient k=0,007																		
	Væsketransportkoeffisient k=0,006																		
	Væsketransportkoeffisient k=0,005																		
	Normal - Fraunhofer Byggfukt: 80 %																		
Normal - Fraunhofer Byggfukt: 70 %																			
Normal - Fraunhofer Byggfukt: Utside: 90 % - Innside 70 %																			
Tykkelse på utvendig XPS	200 mm	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
	150 mm																		
	100 mm																		
	0 mm																		
Utetemperatur	4° C																		
	6° C	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
	8° C																		
	10° C																		
Fukttilskudd i inneluften (Lavt: 2,5 g/m3, Medium: 4 g/m3, Høyt 4 g/m3)	Oslo (lavt fukttilskudd)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
	Oslo (medium fukttilskudd)																		
	Oslo (høyt fukttilskudd)																		
	Bergen (lavt fukttilskudd)																		
	Bergen (høyt fukttilskudd)																		
	Karasjok (lavt fukttilskudd)																		
Karasjok (høyt fukttilskudd)																			

