



SHO6261

Mastergradsoppgave i teknologi

**Selvuttørkingsevne og kondensfare for yttervegger i passivhus**

**Desiccation ability and condensation hazard for outer walls in passive houses**

Øyvind Vollnes Johansen

Juni, 2016

**Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi  
Institutt for bygg, energi og materialteknologi**



<i>Tittel:</i> Selvuttørkingsevne og kondensfare for yttervegger i passivhus  Desiccation ability and condensation hazard for outer walls in passive houses		<i>Dato:</i> 20.06.2016
		<i>Gradering:</i> Åpen
<i>Forfatter:</i> Øyvind Vollnes Johansen		<i>Antall sider:</i> 67
		<i>Vedlegg:</i> 10
<i>Fakultet:</i> Ingeniørvitenskap og teknologi	<i>Institutt:</i> Bygg, energi og materialteknologi - Master Integreert bygningsteknologi	
<i>Veileder:</i> Dr.ing Per-Arne Sundsbø		
<i>Oppdragsgiver:</i> Consto AS	<i>Oppdragsgiver kontaktperson:</i> Petter Berg-Wollan	
<i>Sammendrag:</i> Etterspørselen av bygg som er oppført etter passivhusstandard øker i Norge, men det er til nå ikke blitt forsket mye på hvordan disse veggene, bygd etter passivhusstandard, vil oppføre seg i norsk klima. Det er blitt undersøkt ytterveggens evne til selvuttørking og eventuell kondensfare som kan oppstå, som følge av lokalisering i ulike klimasoner og i forhold til himmelretning. Resultatene fra simuleringen viser, såfremt veggoppbygningen er utført korrekt, små forskjeller på selvuttørkingsevne og kondensfare for veggene med hensyn på lokalisering og i forhold til himmelretning.		
<i>Abstract:</i> The demand of buildings listed by the passive house standard is increasing in Norway, but it has so far, not been researched much on how these walls, built to passive house standards, will behave in the Norwegian climate. This paper looks at the outer walls desiccation ability and any condensation danger that may arise, as a result of localization in different climatic zones and in relation to orientation. The results of the simulation shows, if the wall structure is correct, small differences in drying ability and condensation danger of the walls with respect to location and relative to orientation.		

## Forord

Denne masteroppgaven er utført ved UiT Norges arktiske universitet, avdeling Narvik, våren 2016. Masteroppgaven er utført ved masterstudiet, Integrert bygningsteknologi.

Masteroppgaven er gjennomført i samarbeid med Consto AS i Tromsø.

Opgaven er utført med tanke på fremtidige krav om at bygninger skal oppføres etter passivhusstandarden. Denne oppgaven tar for seg ytterveggs konstruksjoner og har som hensikt å undersøke ytterveggenes evne til selvuttørking og eventuell kondensfare som kan oppstå. Dette i forhold til om veggkonstruksjonen kan utføres likt i hele landet eller om den må tilpasses lokalt klima.

Takk til Dr.ing Per-Arne Sundsbø, veileder ved UiT, og Petter Wollan-Berg, veileder fra Consto AS, for god veiledning underveis i oppgaven.

Narvik 20.06.2016

---

Øyvind Vollnes Johansen

## Sammendrag

Etterspørselen av bygg som er oppført etter passivhusstandard øker i Norge, men det er til nå ikke blitt forsket mye på hvordan disse veggene, bygd etter passivhusstandard, vil oppføre seg i norsk klima. Det er ikke angitt spesifikke krav til U-verdi for yttervegger i passivhusstandard, de inngår heller som en del av hele bygget hvor kravet er en gitt mengde energibruk over ett år. Det henvises i passivhusstandarden at en typisk yttervegg har en U-verdi på 0,10-0,12 W/(m<sup>2</sup>K).

I sammenheng med denne endringen, og mulige fremtidige krav om bygging etter passivhusstandard, ønsker Consto AS å undersøke ytterveggenes evne til selvuttørking og eventuell kondensfare som kan oppstå, som følge av lokalisering i ulike klimasoner og i forhold til himmelretning.

Det har blitt simulert en passivhusvegg, med en U-verdi på 0,10 W/(m<sup>2</sup>K), av tre og en i betong, plassert i klima for Tromsø og Bergen. Det ble utført beregninger for å se selvuttørkingsevnen til veggen med byggfukt i isolasjonslaget, og eventuell kondensfare. Beregningen ble utført en gang for hver av himmelretningene sør, nord, vest og øst. Simuleringen ble utført ved bruk av WUFI-2D.

Resultatene fra simuleringen viser, såfremt veggoppbygningen er utført korrekt, små forskjeller på selvuttørkingsevne og kondensfare for veggene med hensyn på lokalisering og i forhold til himmelretning.

## Abstract

The demand of buildings listed by the passive house standard is increasing in Norway, but it is so far not been researched much on how these walls, built to passive house standards, will behave in the Norwegian climate. It is not set specific requirements for U-value for exterior walls in the passive house standard, they are included as part of the entire building where the requirement is a given amount of energy over a year. Referring to the passive standard that a typical outer wall has a U-value of 0.10-0.12 W / (m<sup>2</sup>K).

In conjunction with this change, and possible future claims regarding the construction by the passive standard, Consto AS want to investigate the outer walls desiccation ability and any condensation danger that may arise as a result of localization in different climatic zones and in relation to orientation.

It has been simulated a passive house wall, with a U-value of 0.10 W / (m<sup>2</sup>K), wood and concrete, placed in the cities, Tromsø and Bergen. It has been done calculations to evaluate the walls drying ability, with moisture in the insulation layer, and any condensation risk. The calculation was performed once for each of the cardinal points south, north, west and east. The simulation was conducted using WUFI-2D.

The results of the simulation shows, if the wall structure is correct, small differences in drying ability and condensation danger of the walls with respect to location and relative to orientation.

## Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Innledning .....</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrunn .....	1
1.2	Om oppdragsgiver .....	2
1.3	Hensikt med oppgaven.....	2
1.4	Begrensning av oppgaven .....	2
<b>2</b>	<b>Fuktmekanikk .....</b>	<b>3</b>
2.1	Porer og poresystem .....	3
2.2	Fuktbinding.....	5
2.2.1	Adsorptiv binding .....	5
2.2.2	Kapillærkondensasjon .....	6
2.3	Fuktinnhold.....	7
2.3.1	Hygroskopisk fukt og hysteresese.....	8
2.4	Fukttransport.....	9
2.4.1	Vanndampdiffusjon .....	10
2.4.2	Fuktkonveksjon.....	11
2.4.3	Fukttransport i væskefasen .....	13
<b>3</b>	<b>Fuktberegninger .....</b>	<b>14</b>
3.1	Transportlikningen .....	14
3.2	Bevaringslikningen.....	15
3.3	Samvirkende varme, fukt og lufttransport.....	16
<b>4</b>	<b>Varmetransport .....</b>	<b>17</b>
4.1	Varmeledning .....	17
4.2	Stråling.....	18
4.3	Konveksjon .....	18
4.4	Varmegjennomgangskoeffisient, U-Verdi .....	19
4.4.1	U-verdier i praksis.....	19
<b>5</b>	<b>Om passivhus.....</b>	<b>20</b>
5.1	Passivhusvegg i tre .....	21
5.1.1	Gjennomgående ytterveggløsninger .....	21
5.1.2	Todelt ytterveggløsninger .....	23
5.2	Passivhusvegg i betong.....	24
<b>6</b>	<b>Typiske fuktskader i vegg .....</b>	<b>25</b>
6.1	Manglende lufting og drenering.....	25
6.2	Vanngjennomtrengning i utette kledninger .....	26
6.3	Fuktskader som følge av kondens .....	26
<b>7</b>	<b>Klimapåkjening .....</b>	<b>27</b>
7.1	Nedbør.....	28
7.2	Slagregn .....	29
7.3	Klimaendringer .....	30

<b>8</b>	<b>Beregningsprogram for fukttransport - WUFI-2D.....</b>	<b>33</b>
8.1	Bruk av WUFI-2D .....	33
8.1.1	Geometri.....	33
8.1.2	Materialdata .....	33
8.1.3	Initialbetingelser.....	34
8.1.4	Grensebetingelser/klima .....	34
8.1.5	Beregninger .....	34
8.1.6	Resultater .....	34
8.1.7	Begrensninger.....	35
<b>9</b>	<b>Beregninger .....</b>	<b>36</b>
9.1	Veggoppbygning.....	36
9.2	Inngangsparametere .....	38
9.2.1	Materialparametre .....	38
9.2.2	Overflatebetingelser.....	39
9.2.3	Klimadata.....	40
9.2.4	Initialbetingelser.....	44
9.2.5	Beregningsperiode .....	45
9.2.6	Beregningsparametere .....	45
<b>10</b>	<b>Resultater.....</b>	<b>46</b>
10.1	Trevegg orientert mot sør .....	47
10.2	Trevegg orientert mot nord.....	50
10.3	Trevegg orientert mot vest.....	53
10.4	Trevegg orientert mot øst .....	54
10.5	Betongvegg orientert mot sør .....	55
10.6	Betongvegg orientert mot nord .....	58
10.7	Betongvegg orientert mot vest .....	61
10.8	Betongvegg orientert mot øst.....	62
<b>11</b>	<b>Konklusjon.....</b>	<b>63</b>
<b>12</b>	<b>Videre arbeid .....</b>	<b>64</b>
<b>13</b>	<b>Referanser .....</b>	<b>65</b>
<b>14</b>	<b>Vedlegg .....</b>	<b>67</b>

## Figurliste

Figur 1 De fire forskjellige poresystemene (Gjeving, Thue, 2002). .....	3
Figur 2 Ingen adhesjonskrefter (basert på Gjeving, Thue, 2002). .....	5
Figur 3 Adhesjonskrefter trekker dråpen ned mot underlaget (basert på Gjeving, Thue, 2002). .....	5
Figur 4 Menisker og kapillærkondensasjon i en pore (Gjeving, Thue, 2002). .....	6
Figur 5 Fuktinnhold i et materiale (basert på Gjeving, Thue, 2002). .....	7
Figur 6 Adsorpsjonskurve og desorpsjonskrue (Gjeving, Thue, 2002). .....	8
Figur 7 Eksempel på todimensjonalt problem (basert på Thue, 2014) .....	17
Figur 8 Eksempel på bolig oppført etter passivhusstandard (SINTEF, 2012). .....	20
Figur 9 Oppbygning av vegg med gjennomgående stender i I-profil (Eide, 2012). .....	21
Figur 10 Prinsipiell oppbygning av vegg med gjennomgående stender i I-profil. (SINTEF, 2013). .....	21
Figur 11 Gjennomgående stender av sammenlimte lameller (Eide, 2012). .....	22
Figur 12 Gjennomgående isolert laminert stender (Eide, 2012). .....	22
Figur 13 Todelt yttervegg med dobbelt bindingsverk (Eide, 2012). .....	23
Figur 14 Oppbygning av vegg med dobbelt bindingsverk av tre med kontinuerlig isolasjon imellom (SINTEF, 2013). .....	23
Figur 15 Prinsipiell oppbygning av betongvegg med isolasjon på utsiden eller innsiden (SINTEF, 2013). a. Kontinuerlig utvendig plastisolasjon. b. Kontinuerlig utvendig plastisolasjon og innvendig påforet isolasjon. c. Utvendig påforet isolasjon. d. Kontinuerlig utvendig isolasjon. ....	24
Figur 16 Fuktskader forårsaket av at den nederste horisontale lekten sperrer av for lufting og drenering (Geving, 2011). .....	25
Figur 17 Muggsopp på vindspærre som følge av manglende ventilering og drenering (Geving, 2011). .....	25
Figur 18 Vegg med plane plater hvor det har vært vanngjennomtrengning i fugene (Geving, 2011).. ..	26
Figur 19 Spaltepanel med åpne fuger som har gitt stor vannbelastning på bakveggen (Geving, 2011) ..	26
Figur 20 Kondensskader i yttervegg (Geving, 2011). .....	26
Figur 21 Inndeling av klimaet i Norge etter Köppens klimaklassifikasjon (Lisø, Kvande, 2007). .....	27
Figur 22 Normal årsmiddelnedbør for perioden 1961-1990 (Met, 2016). .....	28
Figur 23 Slagregnkart som viser mengde og retning for slagregn i Norge (Lisø, Kvande, 2007). .....	29
Figur 24 Prosjeksjon for temperatur i Tromsø perioden 2071 -2100, utført av meteorologisk institutt. Grønn linje er dagens normal, mens rød linje er projeksjon (Meteorologisk institutt, 2016). .....	31
Figur 25 Prosjeksjon av nedbør for Tromsø i perioden 2071-2100, utført av meteorologisk institutt. Grønn søyle er dagens normal, mens rød søyle er projeksjon (Meteorologisk institutt, 2016). .....	31
Figur 26 Prosjeksjon for temperatur i Bergen perioden 2071 -2100, utført av meteorologisk institutt. Grønn linje er dagens normal, mens rød linje er projeksjon (Meteorologisk institutt, 2016). .....	32
Figur 27 Prosjeksjon av nedbør for Bergen i perioden 2071-2100, utført av meteorologisk institutt. Grønn søyle er dagens normal, mens rød søyle er projeksjon (Meteorologisk institutt, 2016). .....	32
Figur 28 Oppbygning av passivhusvegg i tre i WUFI-2D. ....	36
Figur 29 Oppbygning av passivhusvegg i betong (Utklipp fra WUFI-2D). .....	37
Figur 30 Temperatur og relativ fuktighet for Tromsø (Utklipp fra WUFI-2D). .....	40
Figur 31 Solstrålings- og slagregnmengde i ulike himmelretninger for Tromsø (Utklipp fra WUFI-2D). .....	41
Figur 32 Innendørs klima for Tromsø (Utklipp fra WUFI-2D). .....	41
Figur 33 Temperatur og relativ fuktighet for Bergen (utklipp fra WUFI-2D). .....	42
Figur 34 Solstrålings- og slagregnmengde i ulike himmelretninger for Bergen (Utklipp fra WUFI-2D). ..	42
Figur 35 Innendørs klima for Bergen (Utklipp fra WUFI-2D). .....	43
Figur 36 Sorpsjonskurve for steinull (Geving, Thue, 2002). .....	46
Figur 37 Fuktutvikling for det indre isolasjonssjikt i sørlig orientert trevegg i Tromsø. ....	48
Figur 38 Fuktutvikling for det indre isolasjonssjikt i sørlig orientert trevegg i Bergen. ....	48
Figur 39 Fuktutvikling for det midtre isolasjonssjikt i sørlig orientert trevegg i Tromsø. ....	48
Figur 40 Fuktutvikling for det midtre isolasjonssjikt i sørlig orientert trevegg i Bergen. ....	48
Figur 41 Fuktutvikling for det ytre isolasjonssjikt i sørlig orientert trevegg i Tromsø. ....	49



Figur 42 Fuktutvikling for det ytre isolasjonssjikt i sørlig orientert trevegg i Bergen. ....	49
Figur 43 Fuktutvikling for det indre isolasjonssjikt i nordlig orientert trevegg i Tromsø. ....	51
Figur 44 Fuktutvikling for det indre isolasjonssjikt i nordlig orientert trevegg i Bergen. ....	51
Figur 45 Fuktutvikling for det midtre isolasjonssjikt i nordlig orientert trevegg i Tromsø. ....	51
Figur 46 Fuktutvikling for det midtre isolasjonssjikt i nordlig orientert trevegg i Bergen. ....	51
Figur 47 Fuktutvikling for det ytre isolasjonssjikt i nordlig orientert trevegg i Tromsø. ....	52
Figur 48 Fuktutvikling for det ytre isolasjonssjikt i nordlig orientert trevegg i Bergen. ....	52
Figur 49 Fuktutvikling for det indre isolasjonssjikt i sørlig orientert betongvegg i Tromsø. ....	56
Figur 50 Fuktutvikling for det indre isolasjonssjikt i sørlig orientert betongvegg i Bergen. ....	56
Figur 51 Fuktutvikling for det midtre isolasjonssjikt i sørlig orientert betongvegg i Tromsø. ....	56
Figur 52 Fuktutvikling for det midtre isolasjonssjikt i sørlig orientert betongvegg i Bergen. ....	56
Figur 53 Fuktutvikling for det ytre isolasjonssjikt i sørlig orientert betongvegg i Tromsø. ....	57
Figur 54 Fuktutvikling for det ytre isolasjonssjikt i sørlig orientert betongvegg i Bergen. ....	57
Figur 55 Fuktutvikling for det indre isolasjonssjikt i nordlig orientert betongvegg i Tromsø. ....	59
Figur 56 Fuktutvikling for det indre isolasjonssjikt i nordlig orientert betongvegg i Bergen. ....	59
Figur 57 Fuktutvikling for det midtre isolasjonssjikt i nordlig orientert betongvegg i Tromsø. ....	59
Figur 58 Fuktutvikling for det midtre isolasjonssjikt i nordlig orientert betongvegg i Bergen. ....	59
Figur 59 Fuktutvikling for det ytre isolasjonssjikt i nordlig orientert betongvegg i Tromsø. ....	60
Figur 60 Fuktutvikling for det ytre isolasjonssjikt i nordlig orientert betongvegg i Bergen. ....	60

## Tabelliste

Tabell 1 Ulike måter å angi fuktinnholdet i et materiale (Gjeving, Thue, 2002) .....	7
Tabell 2 Materialparametre for materialer brukt i simulering (WUFI; SINTEF, 2003a; SINTEF, 2003b) .....	38
Tabell 3 Overflatebetingelser for overflate mot ytre klima. ....	39
Tabell 4 Overflatebetingelser for overflate mot inneklime. ....	39
Tabell 5 Overflatebetingelser for symmetrigrensene. ....	39
Tabell 6 Initialbetingelser for materialer i trevegg med byggfukt. ....	44
Tabell 7 Initialbetingelser for materialer i betongvegg med byggfukt. ....	44
Tabell 8 Beregnings- og numeriske parametre brukt i simuleringen. ....	45
Tabell 9 Fuktinnhold (Kg/m <sup>3</sup> ) i sørlig orientert trevegg i Tromsø. ....	47
Tabell 10 Fuktinnhold (Kg/m <sup>3</sup> ) i sørlig orientert trevegg i Bergen. ....	47
Tabell 11 Fuktinnhold (Kg/m <sup>3</sup> ) i nordlig orientert trevegg i Tromsø. ....	50
Tabell 12 Fuktinnhold (Kg/m <sup>3</sup> ) i nordlig orientert trevegg i Bergen. ....	50
Tabell 13 Fuktinnhold (Kg/m <sup>3</sup> ) i vestlig orientert trevegg i Tromsø. ....	53
Tabell 14 Fuktinnhold (Kg/m <sup>3</sup> ) i vestlig orientert trevegg i Bergen. ....	53
Tabell 15 Fuktinnhold (Kg/m <sup>3</sup> ) i østlig orientert trevegg i Tromsø. ....	54
Tabell 16 Fuktinnhold (Kg/m <sup>3</sup> ) i østlig orientert trevegg i Bergen. ....	54
Tabell 17 Fuktinnhold (Kg/m <sup>3</sup> ) i sørlig orientert betongvegg i Tromsø. ....	55
Tabell 18 Fuktinnhold (Kg/m <sup>3</sup> ) i sørlig orientert betongvegg i Bergen. ....	55
Tabell 19 Fuktinnhold (Kg/m <sup>3</sup> ) i nordlig orientert betongvegg i Tromsø. ....	58
Tabell 20 Fuktinnhold (Kg/m <sup>3</sup> ) i nordlig orientert betongvegg i Bergen. ....	58
Tabell 21 Fuktinnhold (Kg/m <sup>3</sup> ) i vestlig orientert betongvegg i Tromsø. ....	61
Tabell 22 Fuktinnhold (Kg/m <sup>3</sup> ) i vestlig orientert betongvegg i Bergen. ....	61
Tabell 23 Fuktinnhold (Kg/m <sup>3</sup> ) i østlig orientert betongvegg i Tromsø. ....	62
Tabell 24 Fuktinnhold (Kg/m <sup>3</sup> ) i østlig orientert betongvegg i Bergen. ....	62

## 1 Innledning

### 1.1 Bakgrunn

Passivhus er et begrep og et konsept som ble lansert i Tyskland på 1990-tallet. Passivhus instituttet (Passivhaus Institut) ved dr. Wolfgang Feist har stått bak denne utviklingen.

Konseptet har etter hvert fått stor utbredelse over en rekke land i Europa og deriblant Norge. Passivhus-konseptet benytter passive tiltak som ekstra varmeisolasjon, ekstra god tetthet, gode vinduer, utnyttning av solenergi og varmegjenvinning. Disse tiltakene skal redusere energibehovet på en helhetlig og god måte uten å gå på bekostning av innemiljøet. I 2010 fastsatte Norge en egen Norsk standard for passivhus og lavenergibygninger som omhandler boliger, og i 2012 kom det en tilsvarende Norsk standard som gjelder for yrkesbygninger. Standardene inneholder kriterier for blant annet passivhus og kan benyttes for prosjektering, sertifisering og dokumentasjon. I dag (2016) er det et frivillig valg om man ønsker å bygge passivhus.

Norge har i dag en målsetting om å føre en aktiv nasjonal klimapolitikk og det forsøkes et bredt sett av virkemidler for å redusere de nasjonale utslippene.

Historisk så har energireglene i byggeteknisk forskrift vært knyttede til varmegjennomgangstall (U-verdi) i ulike bygningsdeler. Ved revideringer av kravene i passivhusstandarden begynte man etter hvert å åpne for muligheten ved å bruke funksjonskrav, parallelt med de mer detaljerte spesifikasjonskravene til bygningsdeler. Spesifikt krav om U-verdi ble fjernet i den seneste utgaven av passivhusstandarden, revidert den 01.05.2013.

Det betyr at man står fritt til å bruke hvilken som helst U-verdi på blant annet vegger, så lenge bygget som helhet er innenfor det totale energikravet i passivhusstandarden. Selv om det ikke er et spesifikt krav til U-verdien til vegger i passivhusstandarden vil det ikke være hensiktsmessig å bygge vegger med U-verdi høyere enn det gamle kravet på 0,15 (W/m<sup>2</sup>K).

Det er til nå ikke blitt forsket mye på hvordan disse tykkere og tettere veggene vil oppføre seg i det norske klimaet med hensyn på varme- og fukttransport. Vil det kunne oppstå kondens. Kan fukt inne i veggene få problemer med å tørke tilstrekkelig ut, slik at det kan oppstå muggsopp og andre problemer relatert til fukt.

Den ytre klimaskjermen er av stor betydning for energiregnskapet i bygningen. Nye byggeregler for passivhus vil stille større krav til vind- og fukttetthet og konstruksjonens varmeisolerende evner. I denne sammenhengen ønsker Consto AS å få undersøkt tetthet for aktuelle veggkonstruksjoner som følge av lokalisering i ulike klimasoner (kystklima, innlandsklima, ved varierende temperatursoner, små temperaturforskjeller) og orientering av vegg i forhold til himmelretning.

Det vil i denne oppgaven fokuseres på fare for at det oppstår kondens i veggene, og veggens evne til selvuttørking ved en gitt byggfuktbelastning og eventuell utfelling av fukt ved kondens. Oppgaven vil bli gjennomført ved å simulere fukt- og varmestransport i passivhusvegger av henholdsvis tre og betong.

## *1.2 Om oppdragsgiver*

Consto AS ble startet i Tromsø i 2006, og er i dag Nord-Norges størst byggetrepenør med 540 ansatte og en omsetning på 2,53 milliarder norske kroner i 2015. Consto AS fokuserer på særskilt kompetanse og kapasitet innenfor prosjektutvikling (Consto, 2016).

## *1.3 Hensikt med oppgaven*

Markedet har allerede til stor grad tilpasset seg å bygge i henhold til passivhusstandard. Hovedproblemstillingen i denne masteroppgaven er å undersøke/analysere kondensfare og evne til selvuttørking for aktuelle veggkonstruksjoner ved ulike klimatisk påvirkning. Dette i forhold til vegger av tre og betong.

Utgangspunktet er belastning som følge av lokalisering i norske klimasoner og orientering av vegg i forhold til himmelretning.

Det skal gjøres en vurdering i forhold til om det er bærekraftig og hensiktsmessig og ha lik utforming av yttervegg for passivhus over hele Norge eller om det bør være lokal tilpasning.

## *1.4 Begrensning av oppgaven*

Opgaven tar kun for seg to forskjellige veggtyper, en passivhusvegg av tre og en passivhusvegg av betong. Dette i samråd med veiledere. Oppgaven inkluderer ikke vurdering/analyse av total energi økonomiske- og kostnadmessige konsekvenser som følge av valg av løsning.

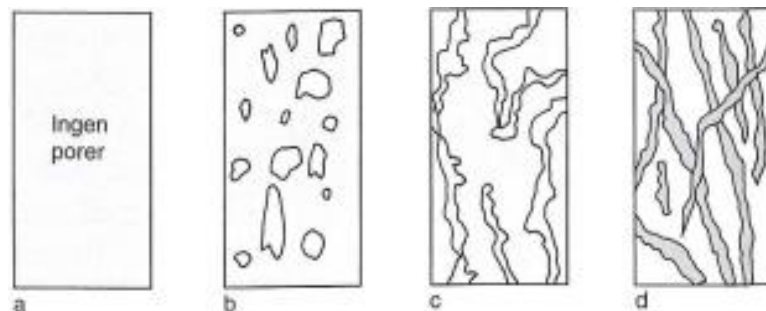
## 2 Fuktmekanikk

Alle materialer som blir utsatt for fukt i damp eller væskeform vil ta opp deler av denne. Det er kun materialer med helt lukket poresystem, som for eksempel metaller og glass, som ikke vil kunne ta opp fukt. De fleste bygningsmaterialer vil inneholde noe fukt som kan komme fra at man bygger inn fukt, eller tilførsel av fritt vann fra nedbør, lekkasjer eller grunnvann. Hvor mye fuktinnhold et material har avhenger av materialtype, poresystemets egenskaper, hvilken form for fuktbinding som oppstår, og fukthistorie (Geving og Thue, 2002).

### 2.1 Porer og poresystem

Porevolumet til et material finner man ved laboratorieforsøk. Det kan utføres ved koking eller ved å senke materialet i vann over en lengre periode, og det kan være aktuelt å kombinere dette med vakuumbehandling. Forholdet mellom en helt tørket og en vannmettet materialprøve benyttes til å finne romdensitet og densitet av materialets faststoff, som gir grunnlag for å finne materialets aktuelle porevolum. Det er det aktuelle porevolumet som er relevant i forhold til fuktopptak. I det absolutte porevolumet inkluderes også de isolerte porene, men disse porene er ikke relevant i praksis fordi de ikke kan bli fylt med vann (Geving og Thue, 2002).

Materialstrukturen gir grunnlag for definering av poresystemet som deles inn i fire forskjellige strukturer:



Figur 1 De fire forskjellige poresystemene (Gjeving og Thue, 2002).

- Ingen porer. For eksempel metaller, glass og noen plastmaterialer. Binder ikke fukt.
- Faststoff med lukkede porer. For eksempel skumglass, ekspandert polyuretan. Begrenset evne til å ta opp fukt.
- Faststoff og poresystem er kontinuerlig. Denne gruppen inkluderer de fleste byggematerialer som for eksempel betong og tre.
- Diskontinuerlig faststoff. Her faller alle stoffer i fiber, kornform og pulverform inn. Som for eksempel mineralull, sand og sement.

Materialer som faller inn under de tre siste gruppene kan binde fukt i poresystemet, og kalles derfor hygroskopiske materialer (Geving og Thue, 2002).

Det maksimale vanninnholdet i et materiale bestemmes av porøsiteten,  $n$ , som angir andel porevolum av totalt volum.

$$n = 1 - \left( \frac{\rho}{\rho_{sol}} \right) \quad (1)$$

Hvor:

$n$  = Porøsitet

$\rho$  = Romdensitet ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

$\rho_{sol}$  = Densitet av materialets faststoff ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

Porøsitetstallet for ulike materialer vil variere betydelig. Lette plastbaserte materialer kan ha en porøsitet helt opp til 99,8%, mens metaller har som regel ingen porøsitet. Et poresystems form, størrelse og fordeling har stor innvirkning på fuktbindings- og fukttransportegenskapene til et material. Porediameteren kan variere fra noen millimeter ned til molekylær størrelse. Ettersom fuktopptak og fukttransport er avhengig av fordelingen av størrelsen på porene, kartlegger man porestørrelsen ved analyse av tynne materialslip i mikroskop, eller ved hjelp av sugemetoder. Sugemetoden kan utføres ved at et væskemettet materiale settes under vakuum, og det opparbeides et undertrykk. Når undertrykket øker tømmes stadig mindre porer for væske, og vil gi et bilde av porestrukturen i materialet (Geving og Thue, 2002).

## 2.2 Fuktbinding

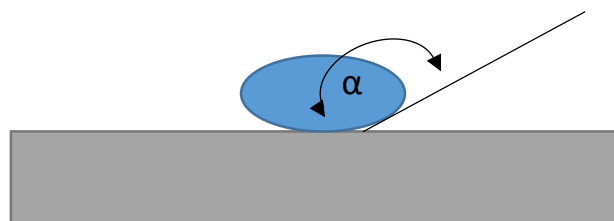
Når vann bindes til et material vil vannet avgi en viss varmemengde, som kalles sorpsjonsvarme. Mengden av varme som blir avgitt øker med styrken på bindingskreftene. Påvirkningen mellom vannet og det faste stoffet fører til endringer i egenskapene til både vannet og det faste stoffet. For eksempel vil det føre til en volumøkning i materialet, og varmeledningsevnen til materialet vil øke. Det skiller mellom kjemisk og fysikalsk binding. Vann som er kjemisk bundet vil være så sterkt bundet til materialet at det ikke inngår i fuktbetragtninger. Det er altså fysikalsk bundet vann, eller fordampbart vann, som er interessant ved fukt i materialer (Geving og Thue, 2002).

Fysikalske bindinger deles opp i tre hovedgrupper; osmotisk binding, adsorptiv binding og kapillærkondensasjon. Osmotisk binding skyldes salter som fører til redusert vanddamptrykk i materialet. Det er vanlig å se bort fra osmotisk binding ettersom det er relativt små saltmengder, som igjen gjør det vanskelig å skille mellom adsorptiv binding og osmotisk binding (Geving og Thue, 2002).

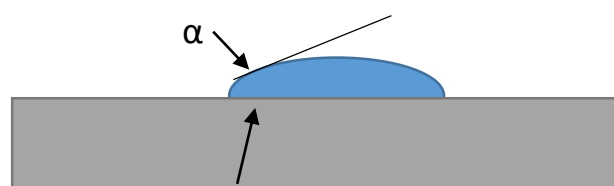
### 2.2.1 Adsorptiv binding

Adsorptiv binding kommer av tiltrekningskrefter mellom materialets overflatelag og vann- eller vanddampmolekyler. Vannmolekylets dipole struktur gjør at vannet adsorberes lettere og holdes sterkere fast enn andre molekyler. Vannmolekylene bindes lagvis, hvor det innerste molekylsjiktet ikke er damp eller vann men en seigtflytende væske. Utover i molekylagene vil bindingene svekkes gradvis, men man regner med at de fleste bygningsmaterialer er i stand til å adsorbere så mange som 30 molekylag. Det tilsvarer en fukthinne med tykkelse på ca. 10nm på poreveggene (Gjeving og Thue, 2002).

Materialtype er avgjørende for hvor store tiltrekningskreftene som overflaten til materialet utøver kan bli. Formen til en væskedråpe på et flatt underlag vil avhenge av adhesjonskreftene mellom væsken og materialet. Hovedsakelig vil overflatespenningene mellom gass og væske, faststoff og gass, og faststoff og væske avgjøre dråpens form, se figur 2 og figur 3. Fuktegenskapene til et materiale uttrykkes ved hjelp av fuktevinkelen,  $\alpha$ , som er et uttrykk for hvor sterke adhesjonskreftene er, se figur 2 og figur 3 (Geving og Thue og 2002).



Figur 2 Ingen adhesjonskrefter som trekker dråpen ned (basert på Gjeving og Thue, 2002).

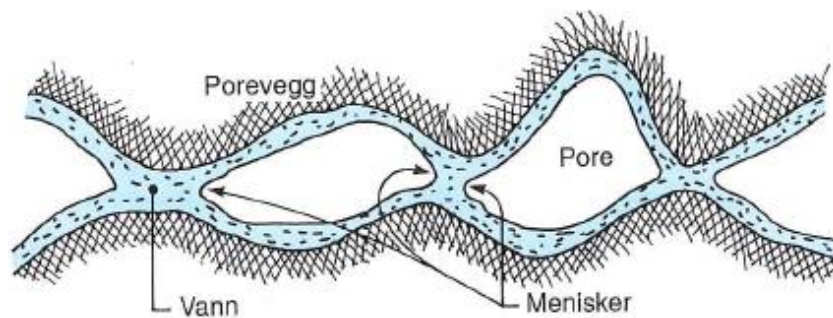


Figur 3 Adhesjonskrefter trekker dråpen ned mot underlaget (basert på Gjeving og Thue, 2002).

### 2.2.2 Kapillærkondensasjon

Kapillærkondensasjon er en sekundær effekt av adhesjonskreftene, og beskriver et materialets evne til å ta opp fritt vann som for eksempel regnvann, vann i grunnen, eller kondensvann. Denne sekundære effekten av adhesjonskreftene fører til at tykkelsen på de absorberte molekyllagene øker. Kapillærkondensasjon krever et kontinuerlig poresystem slik at vannet i porene blir sammenhengende. Når den relative fuktigheten (RF) øker vil det volumet som er fylt med luft minske. Etter hvert som molekyllagene øker vil to motsatte porevegger møtes og porene vil bli fylt med væske over et område, se figur 4 (SINTEF, 2005; Geving og Thue, 2002).

Væskeoverflatene som begrenser dette området tvinges, av adhesjonskreftene, over i konkav form og det dannes to menisker. En slik dobbeltkrum menisk har betydelig større tiltrekningskraft på de frie vanddampmolekylene i porene enn tiltrekningskraften til de enkeltkrumme eller helt plane væskehinnene på veggene har. Bindingskreftene mellom vannmolekylene i overflaten øker på grunn av kraftpåvirkningen på meniskene, og utvekslingen av molekyler mellom vannflate og luft avtar. Dette fører til at den relative luftfuktigheten over menisken synker, som betyr at vanddampens metningstrykk over en slik menisk er lavere enn metningstrykket over en plan vannflate med samme temperatur (Geving og Thue, 2002).



Figur 4 Menisker og kapillærkondensasjon i en pore (Geving og Thue, 2002).

Kapillærkondensasjon vil ha liten innvirkning på porer som har en radius større enn 100nm, og kapillærkondensasjon har liten betydning ved relativt lav luftfuktighet, for da vil de aktuelle porene være for små og har lite potensiale for fuktopptak. Når den relative fuktigheten kommer opp i 80-90% vil kapillærkondensasjon begynne å gi merkbare utslag i fuktopptaket, og øker raskt når den relative fuktigheten nærmer seg 100% (Geving og Thue, 2002).

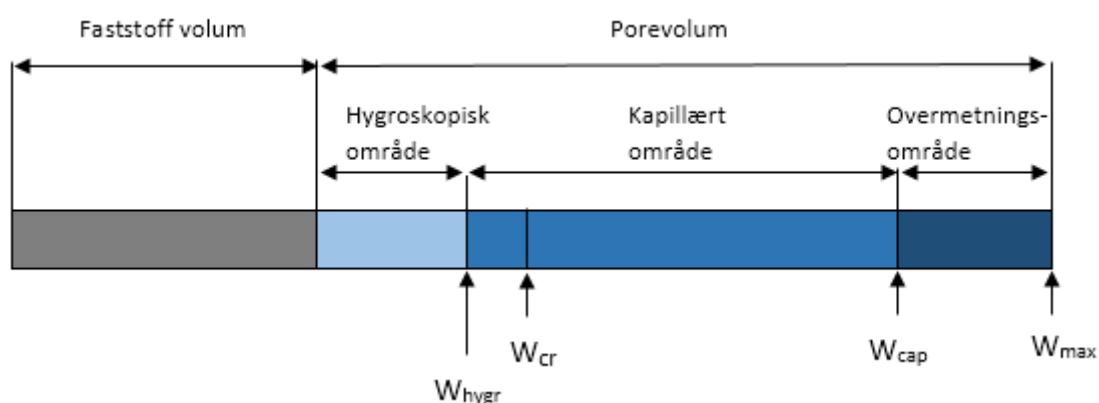
## 2.3 Fuktinnhold

Fuktinnhold i et materiale er den totale mengden fritt vann i materialet, det betyr vann som kan fordampe i materialet. Det er vanlig å finne fuktinnholdet i et materiale ved å veie det i uttørket og fuktig tilstand. Fuktinnholdet i porene kan uttrykkes på ulike måter, se tabell 1 (Gjeving og Thue, 2002).

Tabell 1 Ulike måter å angi fuktinnholdet i et materiale (Gjeving og Thue, 2002)

Definisjon	Symbol	Enhet
Fuktmasse/Tørrstoffmasse	$u$	Kg/kg (eller vektprosent)
Fuktmasse/Materialvolum	$W$	Kg/m <sup>3</sup>
Fuktvolum/Materialvolum	$\psi$	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> (eller volumprosent)
Metningsgrad, fuktvolum/porevolum	$S$	Ubenevnt (eller i prosent)

Det er vanlig å dele fuktinnhold inn i tre forskjellige områder; hygroskopisk område, kapillært område og overmetningsområdet, se figur 5.



Figur 5 Fuktinnhold i et materiale (basert på Gjeving og Thue, 2002).

Fuktinnholdet i det hygroskopiske området tilsvarer likevekt med luftfuktigheten i luften. Det vil si at fuktinnholdet blir høyere jo høyere den relative luftfuktigheten er. Teoretisk sett er den øvre hygroskopiske grensen ved 100% relativ fuktighet, men det er i praksis vanskelig å opprettholde et klima med så høy relativ fuktighet. Dermed defineres den hygroskopiske grensen ved ca. 95-98% relativ fuktighet (Gjeving og Thue, 2002).

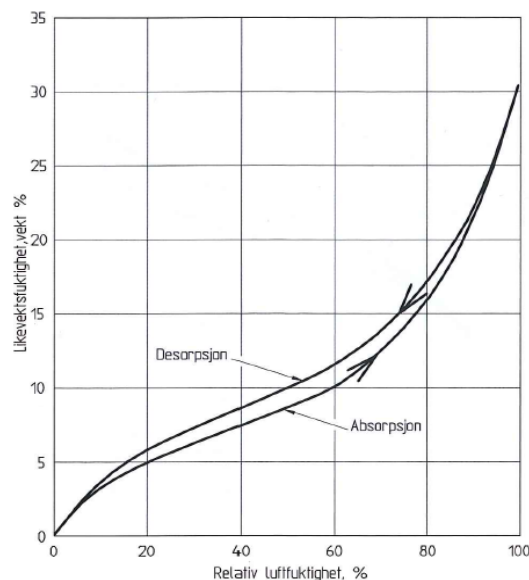
Dersom fuktinnholdet økes ytterligere, vil man nå et punkt hvor porevannsystemet er kontinuerlig, og fukttransport ved vannstrømning kan oppstå. Dette punktet kalles kritisk fuktinnhold, og fukttransport ved væskestrømning vil være dominerende over denne grensen. Området fra den øvre hygroskopiske grensen til kapillær metning er det kapillære området og fuktinnholdet her beskrives som en funksjon av porevannsundertrykket. Området fra kapillær til full metning er overmetningsområdet, og får å nå full metning må all resterende luft i poresystemet drives ut. Dette kan, i laboratorium, oppnås ved vakuumbehandling eller koking (Gjeving og Thue, 2002).



Disse tre fuktinnholdsområdene er aktuelle for hygroskopiske, kapillæraktive byggematerialer, som for eksempel betong og tre. For ikke-hygroskopiske og ikke-kapillæraktive materialer vil kun overmetningsområdet være aktuelt. Det kan for eksempel være isolasjonsmaterialer som mineralull (Geving og Thue, 2002).

### 2.3.1 Hygroskopisk fukt og hysteresse

Om man plasserer et hygroskopisk materiale i luft med konstant temperatur og fuktinnhold, vil fuktinnholdet i materialet etter hvert komme i likevekt med luftfuktigheten. Endringen vil gå raskt i starten før det etter hvert går saktere. Figur 6 viser en sorpsjonskurve, som igjen viser oppfuknings- og uttørkningsforløpet til et hygroskopisk og kapillæraktivt materiale. Sorpsjonskurven viser at det er en rask økning ved lave fuktforhold, hvor de første molekyllagene absorberes. Videre vil økningen i fuktinnhold avta og den øker proporsjonalt med den relative fuktigheten. Ved høy relativ fuktighet vil kurven stige raskt igjen, dette på grunn av at virkningen av kapillærkondensasjon dominerer ved høy relativ fuktighet (Geving og Thue, 2002).



Figur 6 Adsorpsjonskurve og desorpsjonskurve (Gjeving og Thue, 2002).

Om man reverserer prosessen, og tørker ut materialet, vil den samme relative fuktigheten gi et høyere fuktinnhold. Denne effekten kalles hysteresse, og vil variere mellom forskjellige materialtyper. Materialets fukthistorie vil derfor ha innvirkning på hvilket fuktinnhold materialet stiller seg inn på (Geving og Thue, 2002).

## 2.4 Fukttransport

Fukttransport i materialer skjer ved både sorpsjon av vanndamp fra lufta og ved kapillærsuging. Fukt kan transporteres i både dampform og væskeform, og de kan opptre samtidig. Det finnes en rekke forskjellige transportmekanismer og drivkraftpotensialer for fukttransport, som har betydning i bygningssammenheng; (Geving og Thue, 2002).

Vanndamptransport:

- *Vanndampdiffusjon og effusjon.* Skyldes vanndampmolekylenes egenbevegelser, og den dominerende drivkraften er forskjeller i vanndampens partialtrykk.
- *Løsningsdiffusjon.* Fukttransport i ikke-porøse organiske polymerer, som for eksempel overflatebehandling. Molekylær prosess hvor vann løses i polymermatrisen og diffunderer gjennom polymeren på grunn av en konsentrasjonsgradient.
- *Konveksjon.* Fukttransport ved luftstrømning. Forskjeller i luftens totaltrykk er drivkraften.

Væsketransport:

- *Kapillærledning.* Vannttransport i vannfylte porer som følge av forskjeller i porevannsundertrykket.
- *Overflatekrypning.* Opptre i porer som ikke er helt fylt med vann. Drivkraften er forskjeller i tykkelse på vannfilmen i porene, men oppstår først ved relativt høy RF. (50-60%)
- *Dreneringsstrømning.* Vannstrømning i de grove porene. Drivkraften er tyngdekraften.
- *Hydraulisk strømning.* Strømning av vann på grunn av overtrykk. Har betydning for konstruksjoner som skal inneholde vann, som for eksempel et svømmebasseng. Kan også oppstå ved snøsmelting og man får overvann ved terreng, på terrasser og tak.

### 2.4.1 Vanndampdiffusjon

Ved vanndampdiffusjon i luft har vannmolekylene i gassfasen høy hastighet, og vanndampmolekylene i et avgrenset rom vil fordele seg jevnt i det tilgjengelige volumet. Forskjeller i vanndampens partialtrykk vil etter hvert jevnes ut ved at vanndampen går i retning av lavere vanndamptrykk. Ved isoterme forhold kan netto damptransport i luften ved diffusjon uttrykkes ved Fick's diffusjonslov; (Geving og Thue, 2002).

$$g = -D_p * \nabla p_v = -D_v * \nabla v \quad (2)$$

Hvor:

$g$  = Dampfluks, diffundert dampmengde per tids- og flateenhet ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ).

$\nabla p_v$  = Gradienten i vanndampens partialtrykk ( $\text{Pa}/\text{m}$ ).

$\nabla v$  = Gradienten i vanndampskonsentrasjonen ( $\text{kg}/\text{m}^3$  pr.m =  $\text{kg}/\text{m}^4$ ).

$D_p$  = Vanndampens diffusjonstall i luft ( $\text{kg}/(\text{msPa})$ ) basert på damptrykk.

$D_v$  = Vanndampens diffusjonstall i luft ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) basert på dampkonsentrasjonen.

$D_v = D_p * R_v * T$

$R_v$  = Gasskonstanten for vanndamp =  $461,4 \text{ Nm}/\text{KgK}$ .

$T$  = Absolutt temperatur (K).

Fick's diffusjonslov viser at dampstrømmen vil avhenge av vanndampens diffusjonstall og endring i vanndamptrykk eller konsentrasjon per lengdeenhet, dersom temperaturen er konstant. Minustegnet i likningen viser at dampstrømmen går mot lavere partialtrykk/konsentrasjon (Gjeving, Thue, 2002).

For vanndampdiffusjon i et materiale vil damptransporten, som for vanndampdiffusjon i luft, gå fra høyere damptrykk til lavere damptrykk, helt til fuktinnholdet i materialet er i likevekt med luften omkring. Diffusjonstallet til et materiale vil reduseres når damp trenger inn i porene ettersom den frie luftmengden blir mindre. Det er kun i større porer at diffusjonen skjer som i fri luft. I de mindre porene vil molekylbevegelsene bestemmes av sammenstøt med poreveggene. I de mindre porene vil altså den transporterte dampmengden være avhengig av antall molekyler som treffer poreåpningen, som vil si dampens partialtrykk og midlere molekylhastighet. Denne damptransportformen kalles effusjon, men ettersom vanndamptrykk er drivkraften for både effusjon og diffusjon er det vanlig å betrakte dem under ett (Geving og Thue, 2002).

Innvirkningen fra materialets mikrostruktur på fukttransporten i dampfasen kan uttrykkes med materialmotstandsfaktor,  $\mu$ ;

$$\delta_p = \frac{D_p}{\mu} \quad (3)$$

Hvor:

$\delta_p$  = Diffusjonstallet, eller vanndamppermeabiliteten for materialet.

$D_p$  = Vanndampens diffusjonstall i luft ( $\text{kg}/(\text{msPa})$ ) basert på damptrykk.

Ved å kombinere likning 2 og 3 vil fukttransporten,  $g$ , kunne settes opp på følgende måte ved endimensjonal strøm og isoterme forhold;

$$g = -\delta_v * \frac{dv}{dx} = -\delta_p * \frac{dp_v}{dx} \quad (4)$$

Hvor:

$\delta$  = Vanndamppermeabiliteten til materialet

$\delta_v = \delta_p * (R_v * T)$  ( $m^2/s$ ), relatert til konsentrasjonsgradienten

$\delta_p$  = Damtrykksgradienten ( $kg/(mPas)$ )

$x$  = Diffusjonsveien ( $m$ )

Vanndamppermeabiliteten for et materiale er forholdet mellom vanndampstrøm per flateenhet og størrelsen på konsentrasjons- eller damtrykkgradienten i strømrretningen.

Den relative fuktmotstanden,  $\mu$ , er ikke avhengig av temperaturen. Når fuktinnholdet øker og porene fylles med vann, kan man forvente at den relative fuktmotstanden øker. Det vil si at permeabiliteten minsker når fuktinnholdet øker. Variasjoner i fuktinnholdet vil ha lav innvirkning på den relative fuktmotstanden ettersom transport i de grovere porene har større betydning (Geving og Thue, 2002).

#### 2.4.2 Fuktkonveksjon

Fuktkonveksjon er transport av vanndamp, ved hjelp av luftstrømmer, fra høyt lufttrykk til lavere lufttrykk. I enkelte tilfeller kan konveksjon føre til at store luftmengder transporteres, som fører til store mengder vanndamp.

Naturlig konveksjon kan oppstå i luftfylte hulrom eller i hulrom som er isolert med luftpermeable isolasjonsmaterialer, i bygningskonstruksjonen. Dette kan medføre en omfordeling av fukten i konstruksjonen. Forskjeller i temperatur mellom rom inne i en bygning kan gi luftstrømning mellom disse rommene, og varm fuktig luft strømmer inn i et kaldt rom, som kan føre til at det oppstår kondensasjon.

Påtvungen konveksjon oppstår ved forskjeller i luftens totaltrykk over en bygningsdel, og kan og betraktelig større luftstrømmer enn naturlig konveksjon. Påtvungen konveksjon er spesielt aktuelt for utvendige bygningsdeler og bygningsdeler mellom rom med stor temperaturforskjell, som for eksempel vegger i kjølerom. Det er spesielt ugunstig om luften går fra varm mot kald side. Den vil da avkjøles og få høyere relativ fuktighet etter hvert som den går gjennom veggen, og om temperaturen i veggen er lavere enn inneluftens duggpunkt vil det oppstå kondens og fuktinnholdet vil øke. Dersom luften strømmer fra kald til varm side vil det kunne føre til uttørking av veggen. Hovedfaktorer som kan gi påtvungen konveksjon er trykkvariasjoner på grunn av vind, overtrykk eller undertrykk på grunn av ventilasjon, og skorsteinseffekten (Geving og Thue, 2002).

Fuktkonveksjon kan oppstå i hulrom, spalter og porøse materialer. For å bestemme fukttransporten må først luftstrømmen bestemmes. Darcys lov gir grunnlag for å finne transportert luftmengde;

$$L = -A * \frac{B_0}{\eta} * \frac{dp_t}{dx} = -A * k_a * \frac{dp_t}{dx} \quad (5)$$

Hvor:

L = Luftmengden (m<sup>3</sup>/s)

A = Areal normalt på strømrretningen (m<sup>2</sup>)

B<sub>0</sub> = Spesifikk permeabilitet (m<sup>2</sup>)

η = Luftens dynamiske viskositet (≈ 18,1\*10<sup>-6</sup> Pa s ved 20 °C)

$\frac{dp_t}{dx}$  = Totaltrykkgradient (Pa/m)

k<sub>a</sub> =  $\frac{B_0}{\eta}$  : materialets luftgjennomslippelighet (m<sup>2</sup>/(Pa s))

Etter man har beregnet luftmengden, L, og dersom man kjenner luftens vanndampinnhold kan fuktmenge på grunn av tvungen konveksjon beregnes:

$$G = L * v \quad (6)$$

Hvor:

G = Transportert luftmengde (kg/s)

L = Luftmengde (m<sup>3</sup>/s)

v = luftens vanndampinnhold (kg/kg)

Minustegnet i ligning 5 angir at luftstrømmen går i retning av fallende trykk. Darcys lov er kun gjeldende ved laminære luftstrømmer, og dermed blir beregning av luftstrøm gjennom sprekker og hull mer komplisert (Geving og Thue, 2002).

### 2.4.3 Fukttransport i væskefasen

Kapillærkreftene vil gi væsketransport i de minste porene allerede ved relativt lavt fuktinnhold, men det er ved høyere fuktinnhold at væsketransporten blir dominerende, og har større påvirkning enn vanddamptransporten. Væsketransport drives av en kombinasjon av kapillærledning og overflatekrypning, og den samlede væsketransporten,  $g_w$ , i porøse materialer kan uttrykkes ved Darcys lov for laminær strømning i vannmettede materialer (Geving og Thue, 2002).

$$g_w = K_1 * \nabla s \quad (7)$$

Hvor:

$g_w$  = Væskestrømtettheten (kg/m<sup>2</sup>s)

$K_1$  = Permeabilitetskoeffisient (kg/mPas)

$s$  = Kapillært undertrykk (Pa)

Permeabilitetskoeffisienten er tilnærmet konstant ved høyt fuktinnhold, mens den er sterkt varierende ved lavere fuktinnhold.

Ved kapillær fuktvandring vil ikke alle porestørrelser ha innvirkning fukttransporten. Sugehastigheten i porer med radius på bare noen få nanometer vil være veldig liten og det vil være små vannmengder som transporteres, som betyr at fuktvandring vil ta lang tid. Er porene store, over 1mm, vil sugekraften være så liten at man kan se bort fra den kapillære virkningen. Mengden vann som transporteres kapillært er avhengig av metningsgraden til materialet. For at kapillært bundet vann skal gå over til fritt vann igjen må det bli påvirket av eksterne krefter, som for eksempel vindtrykk, statisk overtrykk eller gravitasjon (Geving og Thue, 2002).

Det kan også oppstå kapillærsuging mellom kontaktflatene til to materialer, hvor vann suges fra det ene materialet til det andre. Størrelsen på den kapillære virkningen er avhengig av fordelingen av porestørrelser i materialene, fuktinnholdet og hvor god kontakt det er mellom de to materialoverflatene. Fukttransporten mellom materialoverflatene vil foregå inntil poretrykket er likt, noe som medfører at fuktinnholdet i materialene kan være forskjellig (Geving og Thue, 2002).

Finporøse materialer vil som regel ha større porevannsundertrykk enn grovere materialer, og derfor suge vann fra et grovere materiale. Treverk er følsomt for høyt fuktinnhold, og vil som et finporøst materiale suge vann kapillært fra de fleste andre materialer. Det er derfor viktig å bruke kapillærbrytende folie for å hindre kapillærsuging mellom for eksempel en tresvill og grunnmur (Geving og Thue, 2002).

### 3 Fuktberegninger

Forskjellige bygningsdeler vil hele tiden påvirkes av endringer i klimaet. Temperatur, lufttrykk og fukttilstand i ute- og inneluft vil variere så å si hele tiden. Dette fører til en utveksling av både fukt og varme gjennom bygningsdelene. Eksperimentelle undersøkelser på effekten av endringene i klimaet vil kun gi resultater for den gitt situasjonen som undersøkes, og resultatene vil ikke være overførbare til andre tilfeller hvor temperatur, lufttrykk, fukttilstanden og materialsammensetningen er forskjellig. Det har derfor blitt utviklet mange forskjellige beregningsmodeller for varme-, fukt, og lufttransport hvor man raskt kan vurdere hvordan forskjellige konstruksjoner påvirkes av forskjellige klimapåvirkning. Til tross for at det eksisterer en mangfold av beregningsmodeller, har alle til felles at de bygger på Fouriers lov, transportlikningen og bevaringslikningen (Geving og Thue, 2002).

#### 3.1 Transportlikningen

Transportlikningen består av to forskjellige transportprosesser, diffus og konvektiv transport.

$$\text{Fluks} = -C * \nabla (\text{drivkraft}) \quad (8)$$

Hvor:

Fluks = Strømtetthet

C = Transportkoeffisient (permeabilitet, konduktivitet)

$\nabla$  = gradienten til drivkraften

Likningen uttrykker at det er en sammenheng mellom fluks og gradienten av drivkraften. Transportkoeffisienten tar inn egenskapene til materialet transporten foregår i.

Den konvektive transportlikningen uttrykker transport med volumforflytning av et transportmedium:

$$\text{Fluks} = \text{Fluks av transportmediet} * \text{Transportert størrelse} \quad (9)$$

Fluksen av transportmediet, som er gass eller væske, beskrives gjennom et uttrykk på formen av likning 8. Hvilken drivkraft som brukes i transportlikningen kan variere, men må være relevant i forhold til hvilken prosess man studerer. Ved modellering av fukttransport kan væsketransport og damptransport gjerne opptre samtidig, som gjør at valg av drivkraft ikke alltid er opplagt. Drivkraft for fukttransport kan variere mellom temperatur, fuktinnhold, relativ fuktighet, porevannsundertrykk, vanndamptrykk eller kjemisk potensial (Geving og Thue, 2002).

### 3.2 Bevaringslikningen

I følge Geving og Thue, 2002, er det grunnsetningen om bevaring av energi, masse og bevegelsesmengde som gir grunnlaget for bevaringslikninger. Disse angir at netto strøm inn eller ut av et kontrollvolum, sammen med hastigheten på generering eller absorpsjon, er lik endring i lagret mengde per tidsenhet. Massebalansen,  $M$ , kan da uttrykkes som:

$$-\nabla(\text{fluks av } M) + S_M = \frac{\delta(\text{innhold av } M)}{\delta_t} \quad (10)$$

Hvor:

$\nabla$  (fluks av  $M$ ) = Netto strøm inn eller ut kontrollvolumet

$S_M$  = Generert masse av  $M$ , per tids- og volumenhet

$\frac{\delta(\text{innhold av } M)}{\delta_t}$  = Endring i lagret mengde per tidsenhet

Massestrøm kan kun oppstå i materialer som har et åpent poresystem. Det vil si at det må være noen porer i materialet som er tilgjengelig for de massemolekylene som betraktes.

Energibalansen, som er termodynamikkens første hovedsetning, uttrykkes som:

$$dQ = dE + P * dV \quad (11)$$

Hvor:

$dQ$  = Energimengden som utveksles mellom systemet og dets omgivelser

$dE$  = Endring i systemets indre energiinnhold

$P*dV$  = Arbeidet som utøves på omgivelsene ( $P$ =trykk,  $V$ =volum)

Bevaringslikningen for bevegelsesmengde får først betydning når massestrømmen oppnår høye hastigheter. Det er som regel ikke tilfelle ved fukt- eller luftstrøm gjennom porøse materialer, men ved lekkasjer eller i hulrom kan det oppnås hastigheter som gjør det nødvendig å ta i bruk denne betingelsen (Geving og Thue, 2002).



### 3.3 Samvirkende varme, fukt og lufttransport

For en bygningsdel som er utsatt for klimapåkjenning vil det være et samvirke mellom varme-, fukt- og lufttransport. Fukttransport vil medføre energitransport, og fukt-/varmetransport skjer på grunn av temperaturendringer og med luftstrøm. Kondensasjon/fordampning og frysing/tining av vann involverer energiomsetning. I tillegg vil variasjoner i damptrykk og temperaturer føre til lufttransport.

Ved fullstendig modellering må varme-, fukt- og lufttransport betraktes som tre sammenkoblede transportprosesser. Sammen med drivpotensialet for transportprosessene, vil de aktuelle transportlikningene og bevaringslikningene for energi og masse gi en beskrivelse av situasjonen ved hjelp av tre partielle differensiallikninger. Differensiallikningene definerer ni spesifikke kapasiteter, ni transportparametere og tre kildeledd. Et kildeledd kan for eksempel være karbonatisering av kalkmørtel (Geving og Thue, 2002).

Disse kan alle være funksjoner av de tre drivpotensialene, som vil si at det er nødvendig å ha kunnskap om til sammen 18 koeffisienter for hvert enkelt materiale. Man må i tillegg ha kunnskap om geometri, materialsammensetning, randvilkår og initialbetingelser for å løse differensiallikningene. Dagens dataverktøy gjør det mulig å gjennomføre fullstendige modelleringer. Men det kreves altså store mengder eksakte inngangsdata for denne typen modellering, og det vil gi store mengder resultatdata som kan være komplisert å tolke. I tillegg vil mangel på kunnskap om materialparametre og randvilkår være en begrensende faktor (Geving og Thue, 2002).

Dersom det er usikkert om inngangsdataene er det lite hensiktsmessig å bruke avanserte dataverktøy. Det vil være mer hensiktsmessig å gjøre forenklinger i modelleringen. Ønsker man for eksempel å undersøke hovedtrekkene i varmetransport, kan man se bort fra varmetransport med fukt og luft og med det redusere modellen ned til kun en differensiallikning. Forenkling av materialparametre gjøres ofte ved at variasjon med temperatur og fuktinnhold idealiseres, eller at man benytter konstante verdier for parameterne. Slike forenklinger er vanlige i kommersielt tilgjengelige simuleringprogrammer, som for eksempel WUFI-2D, for fukt- og varmetransport (Geving og Thue, 2002).

Skal man bruke håndregnemodeller må man, i tillegg til forenklingene nevnt ovenfor, gjøre forenklinger i beskrivelsen av de fysiske prosessene som foregår. Skal man beregne får hånd, eller ved hjelp av regneark, må man være klar over hvilke forenklinger som gjøres og hvilken betydning det vil få for resultatet. Gode forenklete modeller tvinger dermed brukeren til å tenke over hvilke parametere som skal benyttes for å gi en tilstrekkelig overslagsberegning (Geving og Thue, 2002).

## 4 Varmetransport

I en bygningsdel kan varme overføres på tre forskjellige måter; ved ledning, ved stråling og ved konveksjon. En eller flere av disse mekanismene opptrer i alle varmeoverføringsprosesser. Dette fører da til temperaturvariasjoner gjennom en bygningsdel og vil gi grunnlag for fukttransport. I tillegg til de tre hovedformene for varmeoverføring kan man også få en forskyvning av varme ved at fukt i porøse materialer blir utsatt for tilstandsforandringer, hvor fordampning binder varme, mens kondensasjon frigjør varme (Thue, 2014).

### 4.1 Varmeledning

Varmeledning kan opptre i faste stoffer, væsker og gasser hvor varmen forplanter seg gjennom stoffet som molekylbevegelser. Varme molekyler støter i kalde molekyler og overfører noe av sin kinetiske energi. Grunnlaget for varmeledning er Fouriers lov.

$$q = \lambda * \frac{dT}{dx} \quad (12)$$

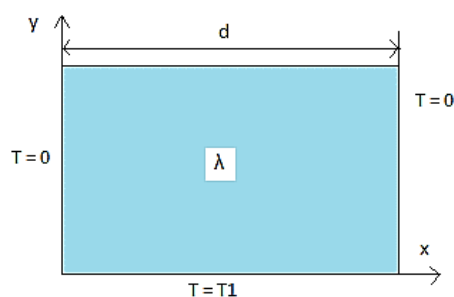
Hvor:

$q$  = Varmeflux ( $W/m^2$ )

$\lambda$  = Termisk konduktivitet ( $W/mK$ )

$\frac{dT}{dx}$  = Forandring i temperatur per materialtykkelse ( $K/m$ )

Denne formelen tar kun for seg endimensjonale varmeledningsberegninger med stasjonære forhold, som vil si når temperaturforholdene er konstante. Denne metoden være best egnet for overslagsberegninger, men geometri og randvilkår kan gjøre det nødvendig å gjøre beregninger i to eller tre dimensjoner for å få mer nøyaktige resultater (Thue, 2014).



Figur 7 Eksempel på todimensjonalt problem (basert på Thue, 2014)

Det forutsettes at platesidene ( $x = 0$ ,  $x = d$ ) har temperatur  $T = 0$  og kanten  $y = 0$  har konstant temperatur  $T_1$ . Termisk konduktivitet,  $\lambda$ , er konstant, og temperaturfordelingen er en funksjon av  $x$  og  $y$ . Den stasjonære varmeledningslikningen settes da opp som (Thue, 2014):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (13)$$

Den samme fremgangsmåten kan også benyttes for tredimensjonale problemer, men for praktiske problemer med komplisert geometri er dette vanskelig. Så for praktiske problemstillinger er det mer hensiktsmessig med grafiske tilnæringsmetoder og i dag finnes det forskjellige numeriske metoder som gjør det enklere å analysere flerdimensjonale problemer ved hjelp av en datamaskin.

For transiente varmeledningsproblemer varierer temperaturen i et punkt med tiden. Da kan man bestemme temperaturfordeling og varmestrømsforhold for et spesifikt tidspunkt. En analytisk løsning for transiente problemer er kun mulig for helt enkle geometri- og randvilkår. For praktiske problemstillinger brukes numeriske teknikker ved hjelp av datamaskiner (Thue, 2014).

#### 4.2 Stråling

Et hvert legeme som har frie flater og som har en temperatur over det absolutte nullpunkt vil emitte strålingsenergi. Temperatur og materialegenskaper bestemmer mengde, retning og bølgelengde. Gjennom absorpsjon vil legemet også bli tilført strålevarme fra andre legemer. Stråling mot en flate vil i ulik grad absorberes, transmitteres og reflekteres. For bygningsfysiske vurderinger kan man med relativt god nøyaktighet anta at strålingen er diffus, som vil si at overflaten emitterer og reflekterer strålingen likt i alle retninger. Denne betraktningen gjør beregning av varmetransport som følge av stråling enklere (Thue, 2014).

#### 4.3 Konveksjon

Konveksjon er sammensatt av to typer varmetransportprosesser. I et strømmende fluid har man energitransport ved den indre energien til fluidet forflytter seg, dette kalles adveksjon. Har man da i tillegg en temperaturforskjell vil energi i tillegg overføres molekylært mellom fluider som har forskjellige temperaturer. Konveksjon deles opp i to typer. Naturlig konveksjon og tvungen konveksjon. Naturlig konveksjon oppstår når strømmingen skyldes temperaturforskjeller (oppdriftskrefter), som for eksempel i et lag av minerallullisolasjon med lav densitet på kalde vinterdager. Tvungen konveksjon oppstår ved ytre påkjenninger, som for eksempel over- eller undertrykksventilasjon eller vindtrykk (Thue, 2014).

Når det kommer til konveksjon innen bygningsfysikken er man interessert i varmeoverføringen mellom en overflate og et tiliggende fluid, som oftest luft. Har overflaten og fluidet forskjellige temperaturer vil man få varmeoverføring i grensesjiktet mellom disse (Thue, 2014).

#### 4.4 Varmegjennomgangskoeffisient, U-Verdi

For å beskrive varmeisolasjonsegenskapene for plane, sjiktoppbygde bygningsdeler, brukes varmegjennomgangskoeffisienten, enklere kalt U-verdi. U-verdien defineres som den varmestrømstettheten som, under stasjonære forhold, passerer bygningsdelen når lufttemperaturforskjellen over bygningsdelen er 1 kelvin (Thue, 2014).

U-verdi bestemmes ved:

$$U = \frac{q}{\theta_i - \theta_e} \quad (14)$$

Hvor:

U = U-verdi (W/(m<sup>2</sup>K))

q = Varmestrømstetthet (W/m<sup>2</sup>)

θ<sub>i</sub> = Innetemperatur (°C)

θ<sub>e</sub> = Utetemperatur (°C)

U-verdi kan kun brukes til å beskrive endimensjonale, stasjonære varmestrømsforhold. Det kan ikke brukes til å beregne øyeblikksverdier for varmestrømmen. U-verdi vil derimot gi et bra resultat av gjennomsnittsforskjellene over en lengre tidsperiode (Thue, 2014).

##### 4.4.1 U-verdier i praksis

Den beregnede U-verdien kan være forskjellig fra den reelle U-verdien til en ferdigstilt bygningsdel. Det kan være flere grunner til dette, blant annet kan dårlig utførelse av isolasjonsarbeidet ha stor innvirkning på varmegjennomgangen. Laboratoriemålinger viser at unøyaktighet ved innlegging av mineralullplater kan gi en økning i U-verdi på 10-15% (Thue, 2014).

I henhold til standardiserte regler for beregning av U-verdi tar man hensyn til vanlige uregelmessigheter ved arbeidsutførelsen ved å plusse på et påslag til beregnet U-verdi:

$$U = \frac{1}{R_T} + \Delta U \quad (15)$$

Hvor:

U = U-verdi (W/(m<sup>2</sup>K))

R<sub>T</sub> = Konstruksjonens totale varmemotstand (m<sup>2</sup>/KW)

Størrelsen på ΔU avhenger av risiko for luftlommer i isolasjonssiktet, om det er festemidler som går igjennom isolasjonen og liknende.

Overslagsmessige beregninger vil være tilstrekkelig for mange formål, men det vil alltid være en viss grad av usikkerhet for en beregnet U-verdi, og i enkelte situasjoner kan avviket mellom beregnet og reell U-verdi være markant. Derfor må arbeidet som legges ned i beregning av U-verdi vurderes opp mot hvilken nøyaktighet som kreves for den aktuelle bygningsdelen (Thue, 2014).

## 5 Om passivhus

Passivhus er et begrep og et konsept som ble lansert i Tyskland på 1990-tallet. Passivhus instituttet (Passivhaus Institut) ved dr. Wolfgang Feist har stått bak denne utviklingen.

Passivhus er de mest energieffektive bygningene som omhandles av Norsk standard. Konseptet har etter hvert fått stor utbredelse over en rekke land i Europa og deriblant Norge. Passivhus-konseptet benytter passive tiltak som mer varmeisolasjon i tak, yttervegger og golv på grunn, bedre tetthet som gir svært få luftlekkasjer, ekstra godt isolerte vinduer, utnyttning av solenergi og varmegjenvinning. Disse tiltakene skal redusere energibehovet på en helhetlig og god måte uten å gå på bekostning av innemiljøet. I 2010 fastsatte Norge en egen Norsk standard (NS 3700) for passivhus og lavenergibygninger som omhandler boliger. Kravene i standarden gjelder for hele bygninger, men kan også deles opp for å prosjektere deler av bygninger, som for eksempel som en del av en flerfunksjonsbygning (NS 3700, 2013; Lavenergiprogrammet, 2013).

Passivhusstandarden stiller krav til samlet varmetap og minstekrav til bygningsdeler, hvor varmetapstallet er varmetap for bygningen delt på oppvarmet del av bruksarealet (BRA).

Det er ingen krav til U-verdi for yttervegg i passivhusstandarden, men viser til at typisk U-verdi for en passivhusvegg ligger på  $0,10-0,12\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .



Figur 8 Eksempel på bolig oppført etter passivhusstandard (SINTEF, 2012).

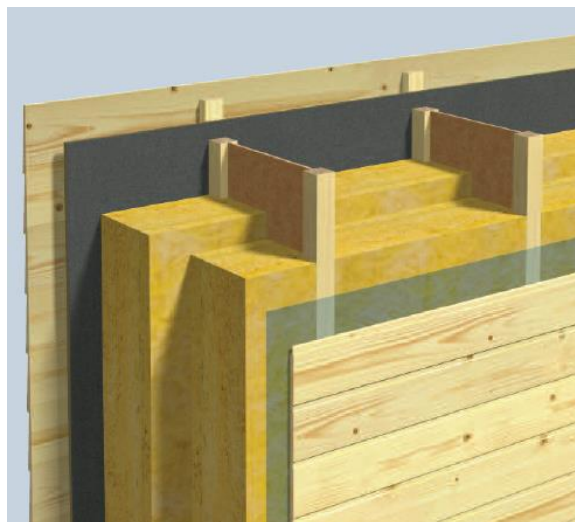
## 5.1 Passivhusvegg i tre

For yttervegger av tre har det vært vanlig å bygge veggen med bindingsverk i heltre, men med passivhusstandarden blir det strengere krav til energibruk og som en konsekvens må blant annet veggene bygges tykkere for å få plass til den isolasjonen som kreves for å oppnå en bedre U-verdi for veggen. Det er ingen krav til U-verdi for veggen i passivhusstandarden, men en normal passivhusvegg vil ha en tykkelse på 350-400mm. Dette fører til at man ikke kan produsere gjennomgående trestendere til bindingsverk av heltre. Skal man bygge en vegg med tykkelse på opp mot 400mm har man hovedsakelig to alternativer; gjennomgående ytterveggløsninger og todelte ytterveggløsninger (Eide, 2012).

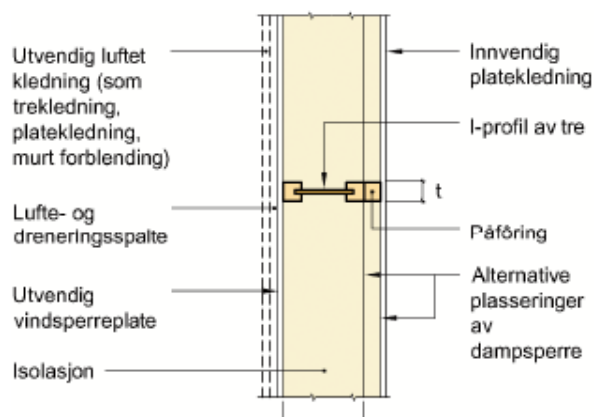
### 5.1.1 Gjennomgående ytterveggløsninger

En gjennomgående ytterveggløsning vil si at stenderen er gjennomgående i isolasjonssiktet, som er samme prinsippet som en heltre stender, men for å oppnå nødvendig tykkelse må man bruke andre materialer enn heltre. Det kan være I-profiler, limtre, isolert stender, og alle disse veggtypene kan bygges med en U-verdi på under 0,10 W/(m<sup>2</sup>K) (Eide, 2012; SINTEF, 2013a).

Oppbygning av passivhusvegg med gjennomgående I-profil:

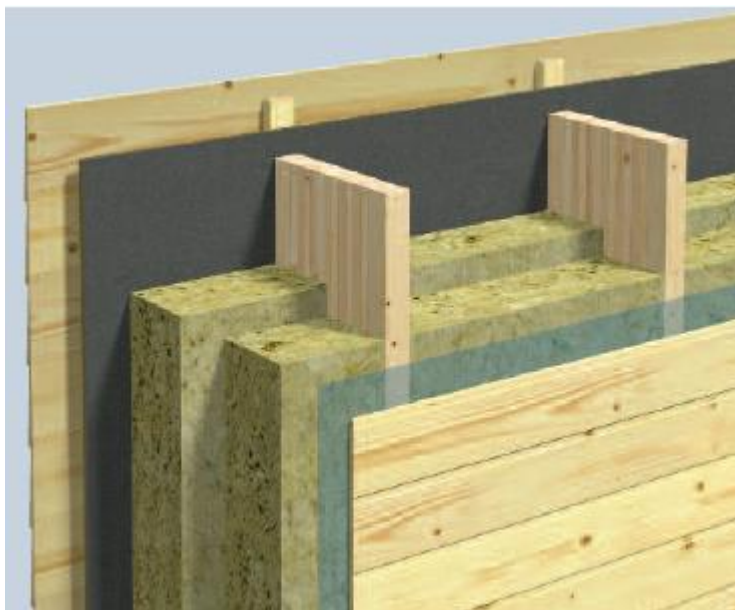


Figur 9 Oppbygning av vegg med gjennomgående stender i I-profil (Eide, 2012).

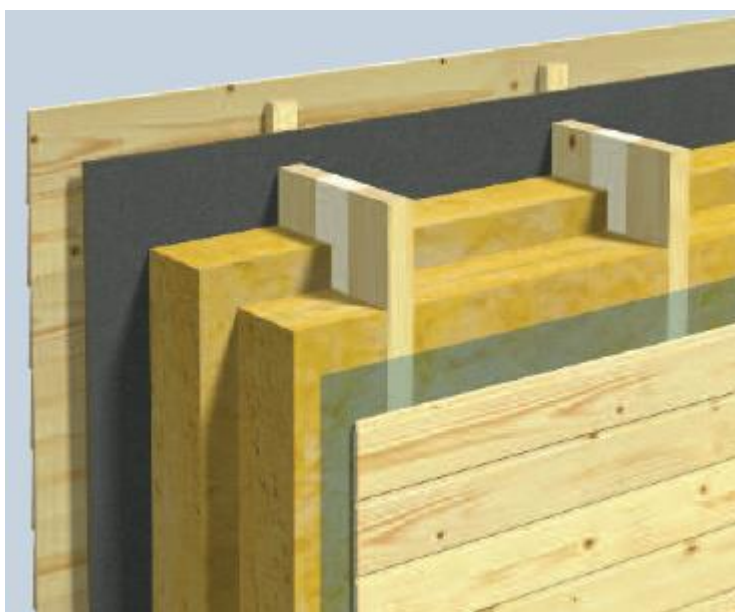


Figur 10 Prinsipiell oppbygning av vegg med gjennomgående stender i I-profil. (SINTEF, 2013a)

Under ser man noen andre alternativer til oppbygning av en passivhusvegg med gjennomgående stendere.



Figur 11 Gjennomgående stender av sammenlimte lameller (Eide, 2012).



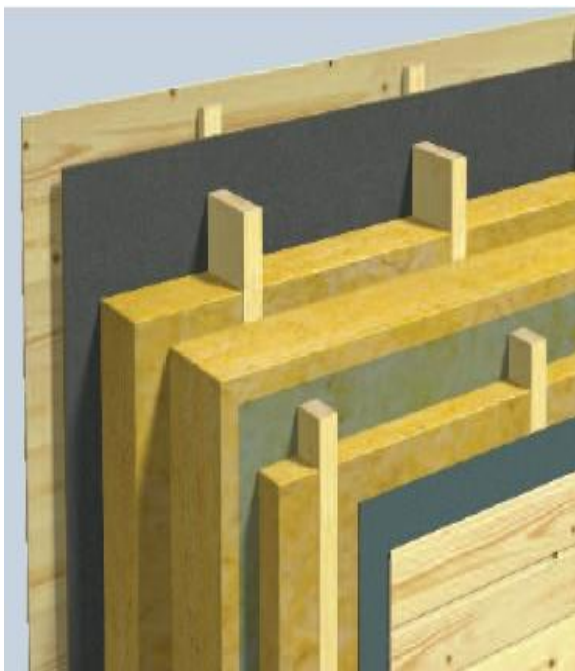
Figur 12 Gjennomgående isolert laminert stender (Eide, 2012).

### 5.1.2 Todelt ytterveggløsninger

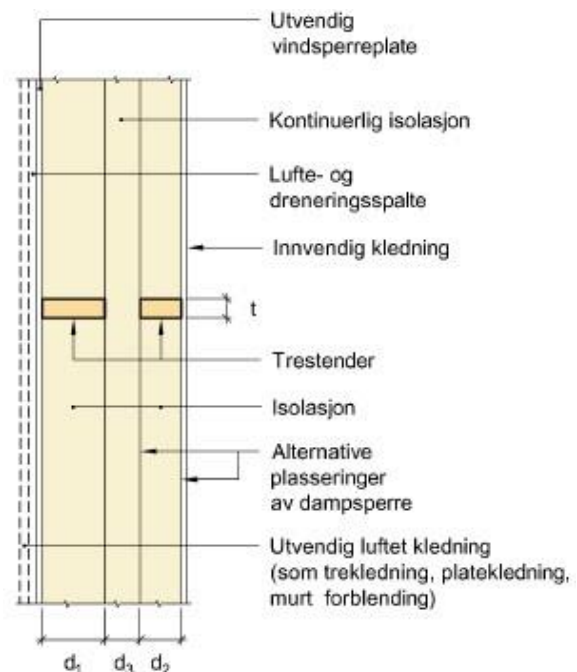
En todelt yttervegg bygges opp med to adskilte bindingsverkvegger, som kan bygges med heltre i standard dimensjoner. Veggene, pluss hulrommet mellom dem, isoleres.

Når man velger en todelt løsning må man vurdere hvilke av de to bindingsverkene som skal ha de bærende egenskapene (Eide, 2012; SINTEF, 2013b). Det er 3 forskjellige muligheter:

1. Utvendig bæring, hvor innerveggen er en vanlig ikke-bærende vegg.
2. Kombinert bæring, hvor innerveggen bærer etasjeskille og ytterveggen tak, snølast, vindlast og påført egenlast.
3. Innvendig bæring, hvor innerveggen tar all last bortsett fra vindlast.



Figur 13 Todelt yttervegg med dobbelt bindingsverk (Eide, 2012).

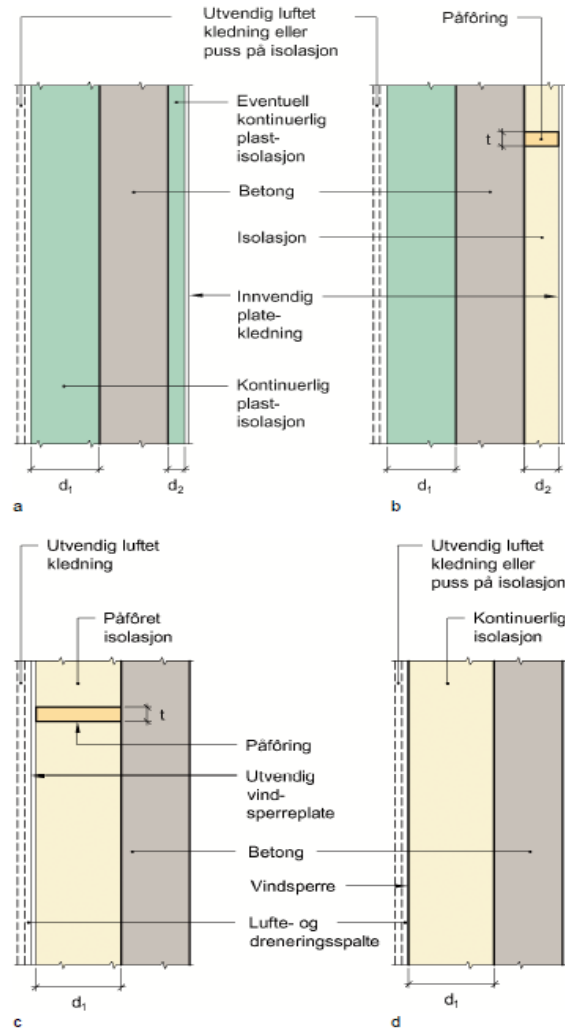


Figur 14 Oppbygning av vegg med dobbelt bindingsverk av tre med kontinuerlig isolasjon imellom (SINTEF, 2013b).



## 5.2 Passivhusvegg i betong

Figur 15 viser prinsipiell oppbygning av fire forskjellige passivhus yttervegger i betong.



Figur 15 Prinsipiell oppbygning av betongvegg med isolasjon på utsiden eller innsiden (SINTEF, 2013c).  
 a. Kontinuerlig utvendig plastisolasjon.  
 b. Kontinuerlig utvendig plastisolasjon og innvendig påført isolasjon.  
 c. Utvendig påført isolasjon.  
 d. Kontinuerlig utvendig isolasjon.

## 6 Typiske fuktskader i vegg

Fuktskader i vegger med luftet kledning skal ikke oppstå om veggen er utført på en korrekt metode. Oppstår det fuktskader skyldes det som regel slagregn, for dårlig lufting og drenering, fugeløsninger som er utført på en utilstrekkelig måte eller at beslag i vinduer er mangelfulle. Det kan i tillegg oppstå kondens hvis vanndamp trenger ut i veggen fra innsiden (Geving, 2011; Edvardsen og Ramstad, 2012).

### 6.1 Manglende lufting og drenering

Skader innenfor manglende lufting og drenering kan skyldes regnvann som ikke blir drenert ut, fuktig kledning som ikke tørkes godt nok ut på grunn av en dårlig luftespalte og fukt fra inneluft som ikke luftes vekk.

Årsaker til dette kan være at den nederste lekten (horisontale)sperrer delvis eller helt for lufting og drenering, se Figur 16. Vindsperrer av folie kan bli dyttet ut av isolasjonen og dekke til luftingen, derfor bør luftespalten mellom kledningen og vindsperra være minimum 20 mm. I topp og bunn av veggen anbefales det en lufteåpning på minimum 4 mm for å gi tilstrekkelig drenering (Geving 2011).



Figur 16 Fuktskader forårsaket av at den nederste horisontale lekten sperrer av for lufting og drenering (Geving, 2011).



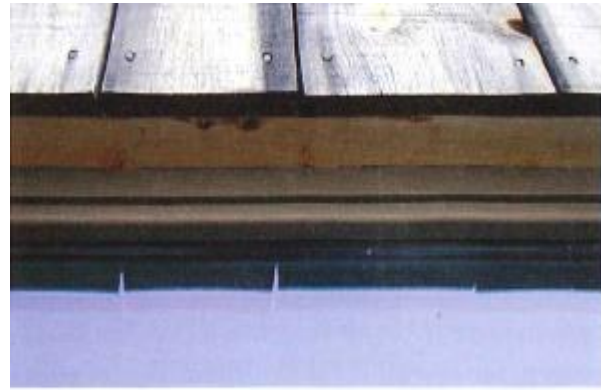
Figur 17 Muggsopp på vindsperre som følge av manglende ventilering og drenering (Geving, 2011).

## 6.2 Vanngjennomtrengning i utette kledninger

For kledning med åpne fuger, vil bakveggen være ekstra utsatt ettersom det vil være risiko for at store mengder vann kan trenge igjennom til vindsperra. Oftest gjelder dette plane platekledninger og spaltepanel. Figur 18 viser en vegg med plane plater hvor vann har trengt igjennom og vindsperra av gips har ikke tålt belastningen. Figur 19 viser en vegg med spaltepanel, som har økt i popularitet de siste årene, som er bordkledning som plasseres med et mellomrom. Denne kledningen krever ekstra krav til vindsperrsjiktets vannetthet og det må være ekstra god drenering (Geving, 2011).



Figur 18 Vegg med plane plater hvor det har vært vanngjennomtrengning i fugene (Geving, 2011).



Figur 19 Spaltepanel med åpne fuger som har gitt stor vannbelastning på bakveggen (Geving, 2011).

## 6.3 Fuktskader som følge av kondens

Kondensering oppstår ved vanndampdiffusjon eller ved luftlekkasjer fra inneluften. Skader som følge av luftlekkasje er vanligere enn skader som følge av vanndampdiffusjon. Er det brukt dampsperre av plastfolie i veggkonstruksjonen vil dampdiffusjon ikke være et problem. For at det skal oppstå kondensasjonsskader som følge av luftlekkasjer må det være en feil på innvendig side og et innvendig luftovertrykk. Luftovertrykk oppstår som regel kun i øvre del av en bygning som følge av skorsteinseffekten.

Det kreves en relativ høy luftfuktighet for at det skal oppstå kondensproblemer. Høy luftfuktighet skyldes som regel manglende eller dårlig ventilasjon. I rom med høyere luftfuktighet enn normalt, som for eksempel soverom, vil fuktskader som følge av kondens være noe man må passe på (Geving, 2011; SINTEF, 2007).

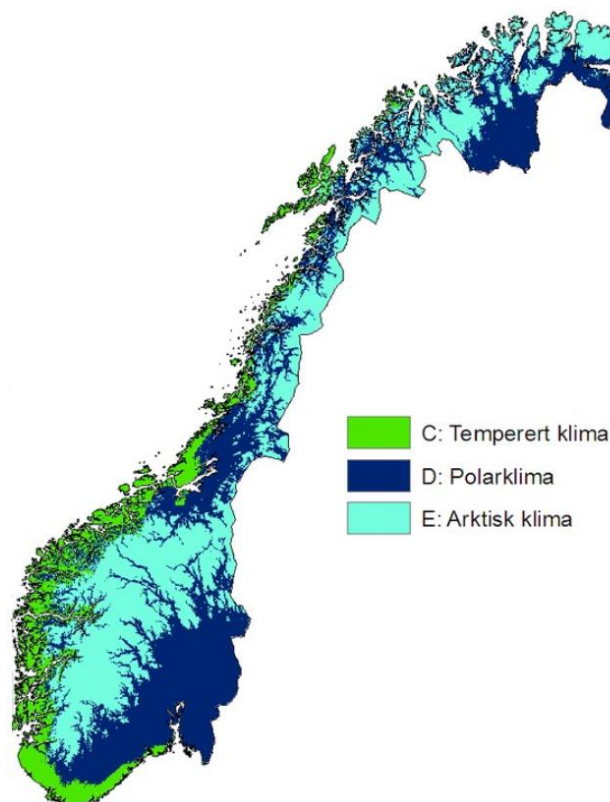


Figur 20 Kondensskader i yttervegg (Geving, 2011).

## 7 Klimapåkjenning

Norge har et klima som kan variere enormt, hvor høye fjell og dype daler fører til store lokale forskjeller i temperatur, nedbør og vindstyrke. Norge er et langstrakt land, hvor det fra det sørligste punktet (Lindesnes) til det nordligste punktet (Nordkapp) er hele 13 breddegrader. Den samme som fra Lindesnes til Middelhavet. Den lange kystlinjen og bratte topografien gjør at det er vanlig å oppleve ekstreme hendelser som kyststormer, snøskred og ras. Til tross for at Norge ligger såpass langt nord, har landet et mye vennligere klima enn hva man skulle forventet. Dette er på grunn av at landet ligger på østsiden av et enormt hav som fører med seg en varm, jevn havstrøm nær kysten og en dominerende sørvestlig luftstrøm fra Atlanterhavet (Lisø og Kvande, 2007).

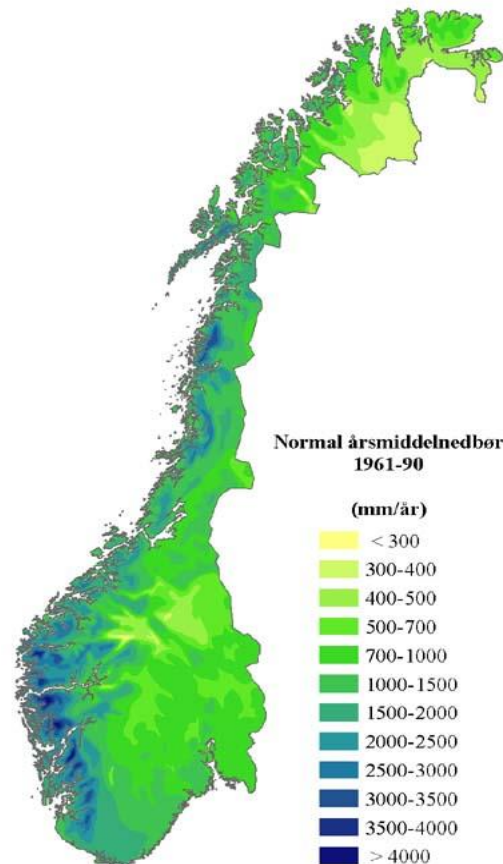
Köppens klimaklassifisering, se Figur 21, viser at Norge deles inn i 3 forskjellige klimasoner, som gir et inntrykk av de store klimavariasjonene i Norge. Kysten fra vestsiden av ytre Oslofjord og helt Troms har maritimt klima, som ligger under gruppe C, temperert klima. Indre områder av Østlandet, Sørlandet og Trøndelag har kontinentalt klima. Sørlige deler av Finnmark har kontinentalt polarklima. Høyfjellet i Sør-Norge, grensetraktene i Midt-Norge, Nordland, Troms, Svalbard og områdene nord i Finnmark har arktisk klima (Lisø og Kvande, 2007).



Figur 21 Inndeling av klimaet i Norge etter Köppens klimaklassifisering (Lisø og Kvande, 2007).

## 7.1 Nedbør

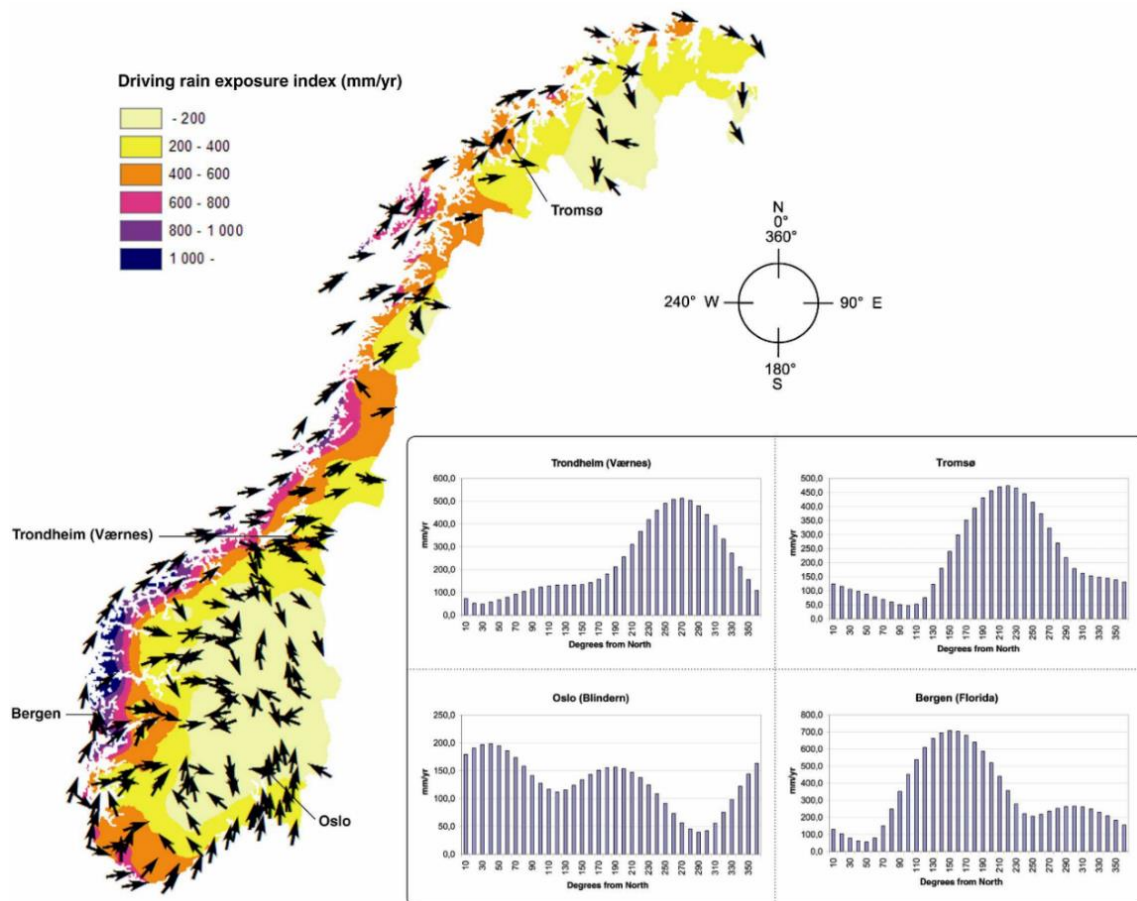
Nedbør er en fellesfortegnelse for alle formen for vann som utfelles fra atmosfæren i form av yr, regn, sludd, hagl eller snø. Den lokale topografien er avgjørende for mengden nedbør, og størst nedbør vil forekomme på vindsiden av fjell. Man får nedbør når vanndampmettede luftmasser avkjøles og ikke lengre kan inneholde så stor fuktighet. Temperaturen avgjør hvor mye vanndamp luften kan inneholde og varm luft kan inneholde mer vanndamp enn kald luft. Hvilken form for nedbør som treffer bakken avhenger av temperaturen i luften nær bakken og de fysiske prosessene i skyene (Lisø og Kvande, 2007).



Figur 22 Normal årsmiddelnedbør for perioden 1961-1990 (Lisø og Kvande, 2007).

## 7.2 Slagregn

Slagregn er nedbør som drives inn mot vertikale flater av vindkrefter, og store mengder slagregn vil kreve godt utførte detaljer på konstruksjoner for å hindre vanninntrenging. Da spesielt på ytterveggene. Tyngdekraft, bevegelsesenergi, trykkforskjeller og kapillærsuging kan føre til at slagregn trenger igjennom kledning og fuger og deretter videre inn i veggkonstruksjonen. Erfaringsdata tilsier at kraftige regnskyll sammen med korte, kraftige vindstøt gir størst fare for lekkasjer. Slagregn vil gi størst påkjenning på ytterkantene av veggen, hvor påkjenningen kan overstige slagregnmengden oppgitt på slagregnskartet, se Figur 23 (Lisø og Kvande, 2007).



Figur 23 Slagregnkart som viser mengde og retning for slagregn i Norge (Lisø og Kvande, 2007).

### 7.3 Klimaendringer

Klimascenario for Norge om 50 år (Lisø og Kvande, 2007):

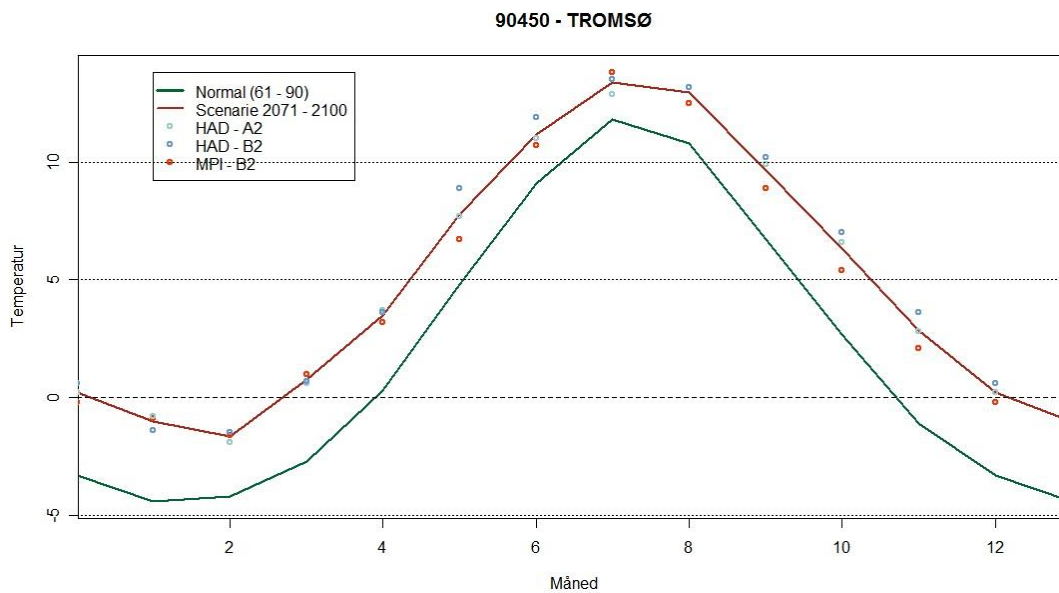
- Døgnets minimumstemperatur vil øke mer enn maksimumstemperaturen.  
For Finnmark vil vinterens gjennomsnitt av døgnenes minimumstemperatur øke med opptil 3°C, mens sommerens gjennomsnittlige maksimumstemperatur forventes å øke med 1,5-2°C. Sør for Troms vil vinterens gjennomsnitt av døgnenes minimumstemperatur øke med 1-2°C, mens sommerens gjennomsnittlige maksimumstemperatur forventes å øke med mindre enn 1°C.
- Flere steder i landet vil det oftere komme mer intens nedbør.  
Det forventes en økning i nedbørsmengde på ca. 20% på Vestlandet og på kysten av Troms og Finnmark. Østlandet forventes å få små endringer i nedbør.
- Det vil bli mindre nedbør i form av snø de fleste stedene i Norge.  
Det forventes en nedgang av nedbør i form av snø på nesten 40% på Jæren, som avtar øst for Lindesnes ned til 10% ved Oslofjorden. Nordover langs kysten til Troms avtar nedgangen jevnt ned til 10%. Nord for Troms forventes det små endringer, og innover i landet fra kysten vil nedgangen avta over hele landet.
- Det vil være økt risiko for sterk vind, høye bølger og stormflo  
Sterke vinder som i dag forventes oversteget en gang i året, vil kunne stige til å opptre dobbelt som ofte utenfor kysten av Finnmark og Troms, mens stigningen for resten av kysten forventes til litt mindre enn dobbelt så ofte.

FNs klimapanel har konkludert at menneskeskapte klimaendringer allerede har påvirket jordkloden, og at den globale temperaturøkningen de siste 50 årene i hovedsak er forårsaket av menneskets utslipp av klimagasser. Som en konsekvens av økte temperaturer og mer ekstremvær må man forvente større endringer i naturtyper og artssammensetninger i Norge. FNs klimapanel mener verden er dårlig forberedt på disse endringene.

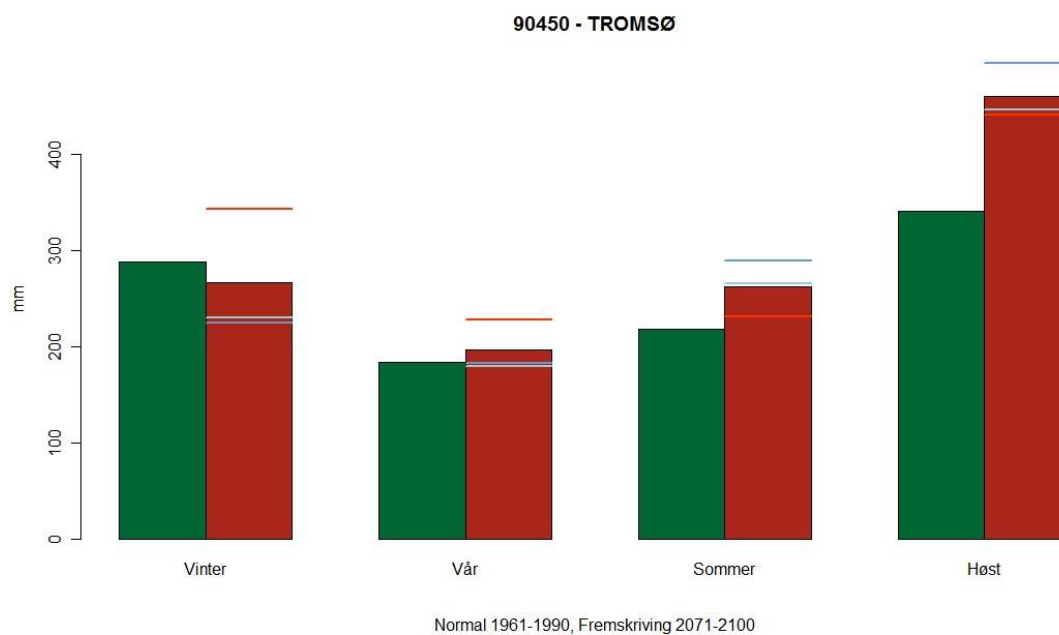
Som en konsekvens av at det allerede har vært en periode med høyere vintertemperaturer og fuktig vær, har det blitt registeret en økning av alge- og soppvekst på utendørsflater. Et enda mildere og fuktigere klima vil gi en lengre vekstsesong for mugg- og råtesopp. Dette fører til at det i framtiden vil være nødvendig med strengere krav til bestandigheten til utvendig kledning av tre. Det forventes også en større slagregnpåkjønning, som gjør det viktig at kledning monteres og ventileres korrekt (Lisø og Kvande, 2007).

Meteorologisk institutt har beregnet og gjort projeksjoner for nedbørsmengde og temperatur, i perioden 2071-2100, for flere av deres målestasjoner i Norge. Fra Figur 24 ser man at det for Tromsø forventes stigende temperaturen gjennom hele året, og at det blir en lengre periode med gjennomsnittstemperaturer over null grader. Figur 25 viser at det forventes mindre nedbør om vinteren i Tromsø, men at det for de andre årstidene er beregnet mer nedbør. Spesielt på høsten forventer man en sterk økning i nedbør i forhold til dagens nivå.

Fra Figur 26 og Figur 27, ser man at tendensen den samme for Bergen. Det forventes varmere temperaturer og mer nedbør, unntatt for sommeren hvor det forventes at nedbør holder seg på dagens nivå.

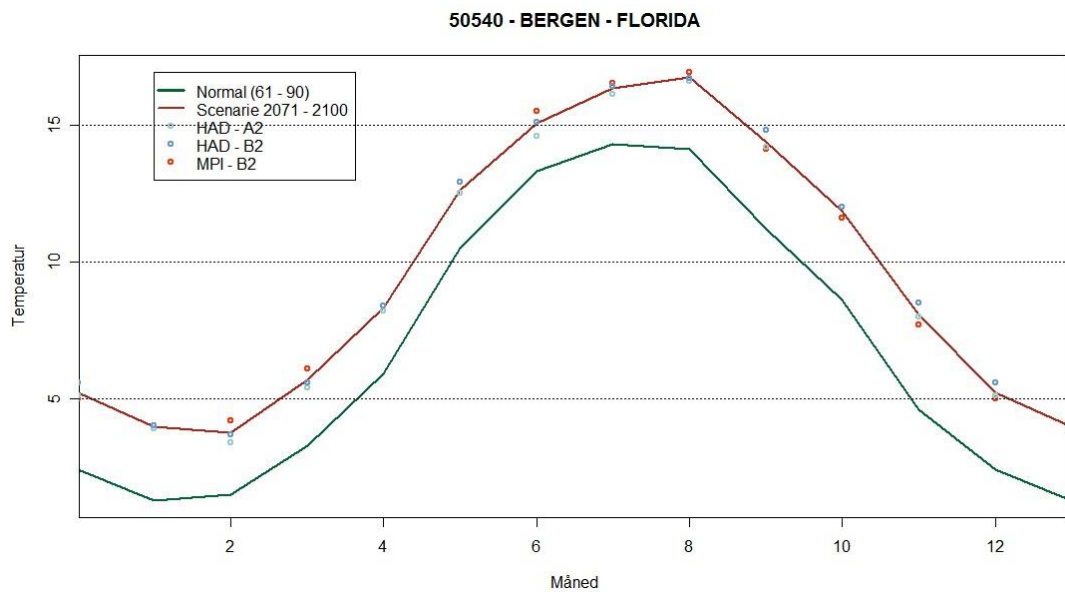


Figur 24 Projeksjon for temperatur i Tromsø perioden 2071 -2100, utført av meteorologisk institutt. Grønn linje er dagens normal, mens rød linje er projeksjon (Meteorologisk institutt, 2016).

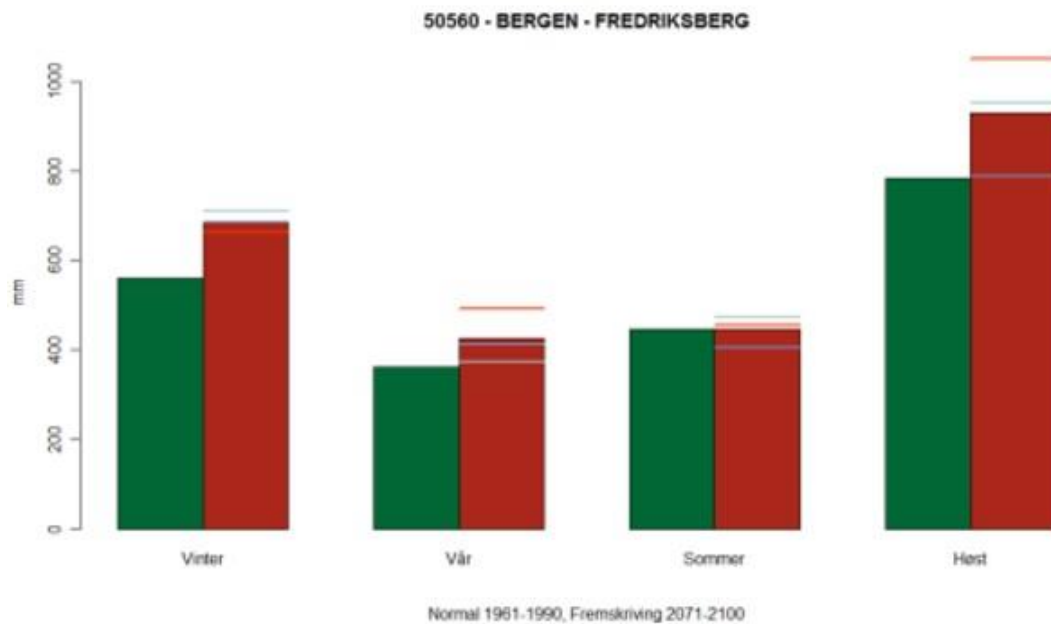


Figur 25 Projeksjon av nedbør for Tromsø i perioden 2071-2100, utført av meteorologisk institutt. Grønn søyle er dagens normal, mens rød søyle er projeksjon (Meteorologisk institutt, 2016).





Figur 26 Prosjeksjon for temperatur i Bergen perioden 2071 -2100, utført av meteorologisk institutt. Grønn linje er dagens normal, mens rød linje er projeksjon (Meteorologisk institutt, 2016).



Figur 27 Prosjeksjon av nedbør for Bergen i perioden 2071-2100, utført av meteorologisk institutt. Grønn søyle er dagens normal, mens rød søyle er projeksjon (Meteorologisk institutt, 2016).

## 8 Beregningsprogram for fukttransport - WUFI-2D

WUFI-2D er utviklet av Fraunhofer Institute for Building Physics, i Tyskland. WUFI-2D er utviklet for å simulere todimensjonal fukt- og varmetransport i bygningsdeler. Det brukes til å simulere virkningen av en gitt klimapåvirkning på fukt- og varmetransporten i bygningsdeler over tid. Programmet er rettet mot arkitekter, konsulenter og produsenter av bygningsdeler (Fraunhofer-Institut for Building Physics, 2016a).

Det ble valgt å bruke WUFI-2D ettersom programmet kan regne komplekse situasjoner, men samtidig ikke har for høy brukerterskel. Det ble også valgt på grunn av muligheten for å enkelt velge orientering av himmelretning, og muligheten for gratis fullversjon for studenter.

### 8.1 Bruk av WUFI-2D

WUFI-2D starter med et dialogvindu hvor man skriver inn prosjektinformasjon, som for eksempel prosjektnavn, nummer og klientinformasjon.

#### 8.1.1 Geometri

Neste steg er å utforme geometrien til bygningsdelen/konstruksjonen, og deretter genererer programmet automatisk ett numerisk rutenett for geometrien, med en laginndeling i x- og y-retning. Lagene deles videre opp i elementer, hvor antall elementer er avhengig av materialtykkelsen. Man kan redigere hvor mange lag rutenettet skal ha. Et økende antall lag vil øke kalkulasjonstiden, men vil også gi bedre nøyaktighet i beregningsresultatet.

#### 8.1.2 Materialdata

Valg av materialer gjøres fra WUFI's materialdatabase. Hvert materiale i databasen er registrert med grunnleggende parametere som må være tilstede for at simuleringen kan gjennomføres. Disse parametere er:

- Densitet,  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>)
- Porøsitet,  $n$  (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)
- Spesifikk varmekapasitet,  $c_p$  (J/KgK)
- Varmeledningsevne  $\lambda_p$  (W/mK)
- Diffusjonsmotstandsfaktor,  $\mu$  (-)

Om parameterne for ønsket materiale ikke samsvarer med materialdatabasen kan materialet redigeres til å samsvare med valgte verdier.

Det er viktig å passe på at materialdataene som velges er korrekte, og at omregning av materialdata blir korrekt. WUFI krever at dampmotstanden skal være diffusjonsmotstandsfaktor,  $\mu$ , mens det er vanlig at den oppgis som ekvivalent luftlagstykkelse  $S_d$ , eller vanddampmotstand  $Z_p$ . Eventuelle feil i materialdata kan føre til store feil i sluttresultatet.

### 8.1.3 Initialbetingelser

Initialbetingelsene er delt inn i temperatur, fuktinnhold og relativ fuktighet. For fuktinnhold kan man angi en gjennomsnittsverdi for materialene i relativ fuktighet, eller man kan angi fuktinnhold for hvert enkelt materiale ved å angi fuktinnhold i  $\text{Kg}/\text{m}^3$ . Det samme kan gjøres for temperatur, men det tilstrekkelig å angi gjennomsnittsverdier ettersom temperaturen i materialene vil justere seg etter grensebetingelsene etter noen timer.

### 8.1.4 Grensebetingelser/klima

Aktuelle grensebetingelser i WUFI er; utendørs klima, innendørs klima og systemgrense. Systemgrense betyr at varmeovergangskoeffisienten blir satt til null, og det vil være dampnett. Grensebetingelsene for utendørs og innendørs klima må ha angitt parametere for varmeovergangskoeffisient, dampdiffusjonstykkelse, absorptans av kortbølget solstråling, emissivitet av langbølget stråling.

For utendørs klima har WUFI en egen database med klimafilere for flere byer i Europa som det kan velges mellom. Klimadata kan også lastes inn fra eksterne klimafilere, eller om man ikke har tilgang til klimadata kan WUFI simulere ønsket klima ved å sette maksimums-, minimums- og gjennomsnittsverdier for temperatur og relativ fuktighet i løpet av et døgn og et år.

### 8.1.5 Beregninger

Før beregningen starter velger man hvor lang tid som skal simuleres. Det gjøres ved å velge en dato som simuleringen skal starte på, for så å sette antall tidssteg som simuleringen skal vare. Ett tidssteg er satt til en time som standard, men det kan redigeres etter ønske. Et års simuleringstid vil da være 8760 tidssteg. Det velges også hvilken kalkulasjonsmetoder som skal brukes, som er enten varmetransport/fukttransport eller begge deler. Det siste som må velges før beregningen startes er hvilke beregnede verdier, oppgitt under, som skal inkluderes i resultatfilen:

- Vanninnhold
- Relativ fuktighet
- Temperatur
- Damptrykk
- Kapillær fluks
- Diffusjonsfluks
- Varmefluks

WUFI-2D løser differensiallikningene for varme- og fukttransport numerisk. WUFI-2D bruker en metoden som kalles kontroll-volum metoden. Differensiallikningene diskretiseres og varme- og fukttransport beregnes i flere punkter (WUFI, 2016).

Differensiallikning for varmetransport: 
$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right)$$

Differensiallikning for fukttransport: 
$$\rho_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho_w D_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right)$$

### 8.1.6 Resultatbehandling i WUFI-2D

Resultatene fra simuleringen kan vises som en 2D animasjon i WUFI2DMotion, eller ved grafer i WUFIGraph som viser utviklingen til de ulike beregnede verdiene.

WUFI2DMotion åpner et vindu for hver av de beregnede verdiene, og man kan for eksempel velge å vise temperaturutviklingen gjennom bygningsdelen for hele simuleringsperioden. Det spilles så av en 2D animasjon hvor temperaturvariasjoner vises i °C med fargevariasjoner i rutenettet, og man kan se temperaturfordelingen for bygningsdelen. Det kan også velges å se temperaturfordeling i bygningsdelen for en bestemt dato. Det samme kan gjøres for fuktinnhold som vises som absolutt og relativ fuktinnhold fordelt i bygningsdelen.

WUFIGraph generer automatisk en graf som viser totalt vanninnhold i  $\text{kg/m}^3$  for hele bygningsdelen i simuleringsperioden. Det kan genereres grafer for temperatur- og fuktfordeling for hvert enkelt materiale, og det kan vise grafer for overganger mellom to forskjellige materialer.

### 8.1.7 Begrensninger

Aktuelle begrensninger og problemer man må ta hensyn til ved bruk av WUFI-2D er:

- Brukerfeil (Kan være å overse et viktig parameter, tastefeil, og lignende).
- Ikke nok grunnleggende kunnskap om beregningsdata.
- Feil i programvaren.

Programvaren skal ikke inneholde feil som kan føre til ukorrekte resultater i beregningen. Fraunhofer Institute for Building Physics har kontrollert simuleringer i programvaren opp mot eksperimentelle forsøk i henhold til aktuelle standarder, og resultater fra simulering har blitt verifisert (Fraunhofer-Institut for Building Physics, 2016b).

Det kan være problemer med å få tak i korrekte materialparametre, og er man usikker på om disse er korrekte vil det være lurt å gjennomføre simuleringer hvor man varierer de usikre materialparametrene for undersøke hvilken innvirkning de har på resultatet. Selv med korrekte materialparametre er det viktig å være klar over at resultatene kan avvike fra reelle forhold.

## 9 Beregninger

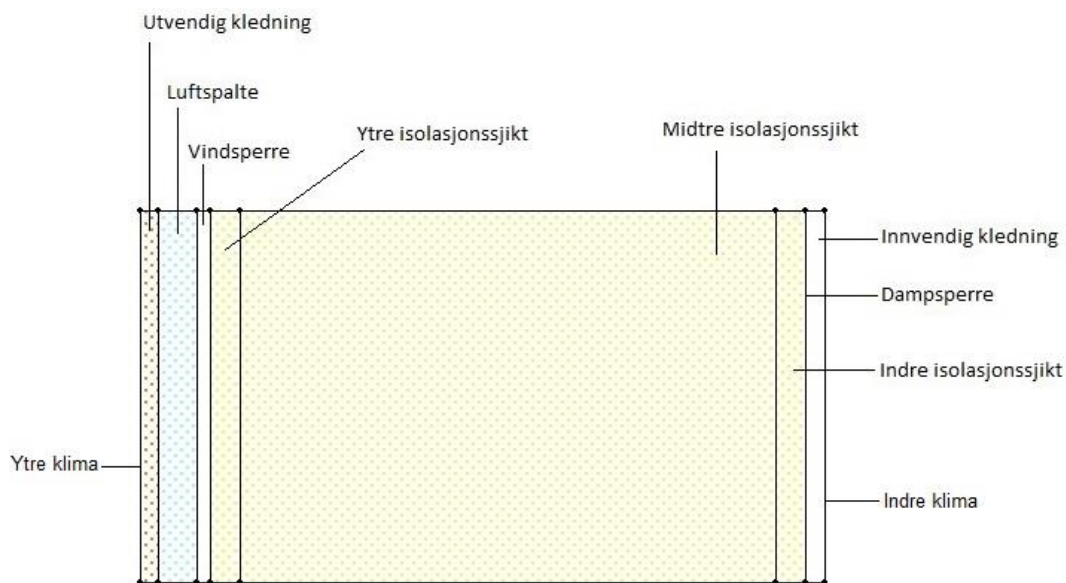
Det er valgt å simulere en passivhusvegg i tre og en passivhusvegg i betong med en valgt U-verdi på 0,10 W/(m<sup>2</sup>K) (Vedlegg x; SINTEF 2013). Det skal undersøkes om disse veggene oppfører seg likt med hensyn på kondensfare og uttørkningspotensiale i to forskjellige byer i Norge, som er Tromsø og Bergen. Det er valgt en beregningstid på 3 år.

### 9.1 Veggoppbygning

Beskrivelse av hvilke materialer som anvendes i simuleringen.

Oppbygning av passivhusvegg i tre består av, fra utsiden og innover:

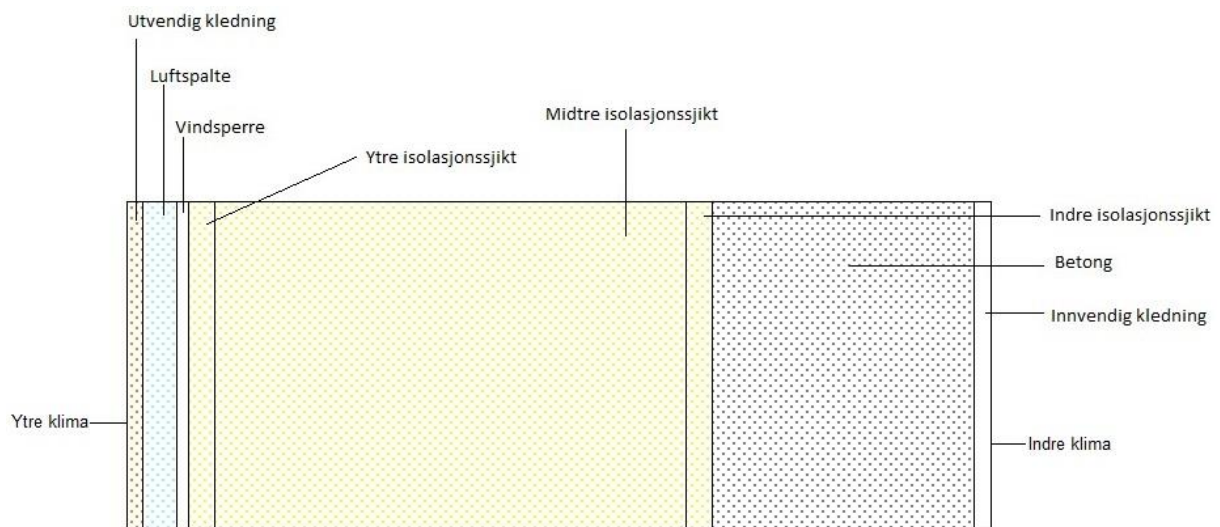
- Utvendig kledning av tre, 12.5 mm
- Luftspalte, 25mm
- Vindsperre, GU-plate 9.5 mm
- Isolasjon, mineralull, 400 mm
- Dampsperre, 0.2 mm
- Innvendig kledning, gipsplate 12.5 mm



Figur 26 Oppbygning av passivhusvegg i tre.

Oppbygning av passivhusvegg i betong, fra utsiden og innover:

- Utvendig kledning, 12.5mm
- Luftspalte, 25mm
- Vindsperre, GU-plate 9.5 mm
- Isolasjon, mineralull, 400 mm
- Betong B35, 200 mm
- Innvendig kledning, 12.5 mm



Figur 27 Oppbygning av passivhusvegg i betong.

## 9.2 Inngangsparametere

Som nevnt i kapittel 7, krever WUFI en del inngangsparametere for å kunne gjennomføre en tilstrekkelig simulering. I dette delkapittelet gjennomgås inngangsparametere som brukt til gjennomføringen av simuleringen.

### 9.2.1 Materialparametre

Tabell 3 viser minimumskrav av hva WUFI-2D krever av materialparametre for å gjennomføre en simulering. Det kan i tillegg være nødvendig med parametere som varierer ut i fra fuktinnhold i materialene.

Tabell 2 Materialparametre for materialer brukt i simulering (WUFI; SINTEF, 2003a; SINTEF, 2003b).

Materialsjikt	Densitet (Kg/m <sup>3</sup> )	Porøsitet (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Spesifikk varme- kapasitet c <sub>p</sub> (J/KgK)	Varmelednings- evne λ <sub>p</sub> (W/mK)	Diffusjons- motstandsfaktor μ
Utvendig kledning, 12,5 mm	420	0,75	1600	0,13	50
Vindsperre, GU-plate 9.5mm	675	0,71	850	0,2	8,33
Mineralull 400mm	60	0,95	850	0,035	1,3
Dampsperre, PE-folie, 0.2mm	130	0,001	2200	1,65	87000
Innvendig gipsplate, 12.5mm	625	0,73	850	0,2	8,33
Betong B35, 200mm	2200	0,18	850	1,6	248

### 9.2.2 Overflatebetingelser

Hver overflate til veggen må ha angitt overflatebetingelser for å gjennomføre beregninger. Overflatebetingelser som er brukt i denne oppgaven er de samme som blir anbefalt i kalkulasjonseksempel.

Tabell 3 Overflatebetingelser for overflate mot ytre klima.

Varmeovergangskoeffisient ( $W/m^2K$ )	17
Vanndampdiffusjonstykkelse (m)	1
Absorptans av kortbølget solstråling	0,9
Emissivitet av langbølget stråling	0,9

Tabell 4 Overflatebetingelser for overflate mot inneklime.

Varmeovergangskoeffisient ( $W/m^2K$ )	8
Vanndampdiffusjonstykkelse (m)	0
Absorptans av kortbølget solstråling	0
Emissivitet av langbølget stråling	0

Tabell 5 Overflatebetingelser for symmetrigrensene.

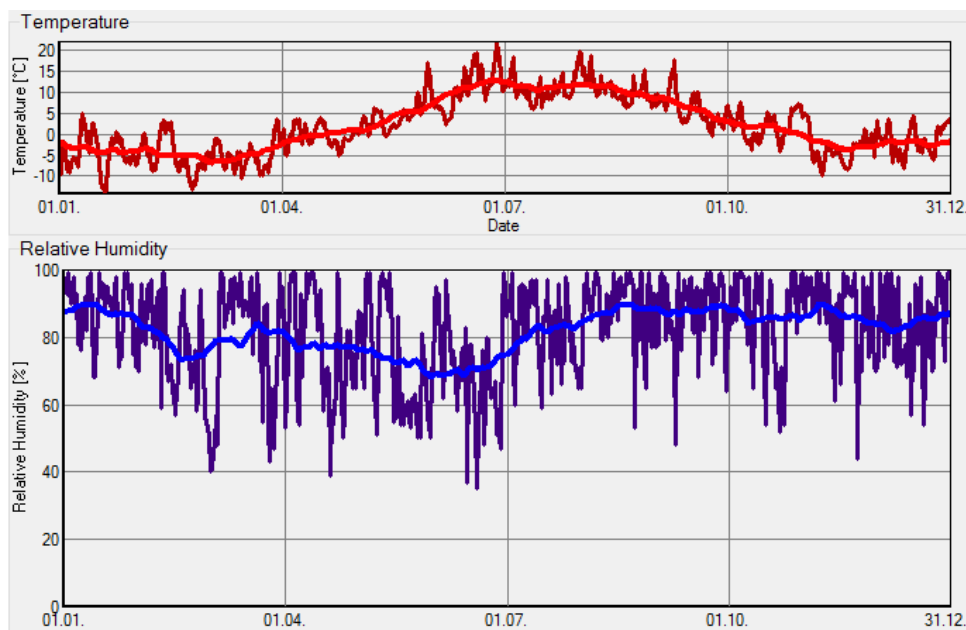
Varmeovergangskoeffisient ( $W/m^2K$ )	0
Vanndampdiffusjonstykkelse (m)	0
Absorptans av kortbølget solstråling	0
Emissivitet av langbølget stråling	0



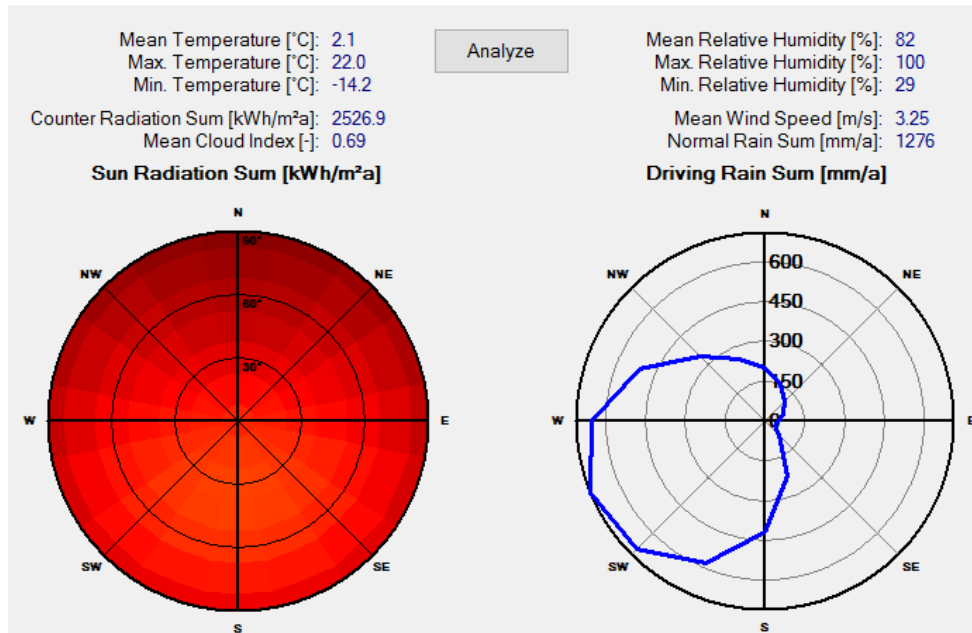
### 9.2.3 Klimadata

I simuleringen er det brukt klimafilere for Tromsø og Bergen som er to av totalt tolv byer i Norge som har klimafilere innlagt i programvaren. I klimafilene er det data for utendørs temperatur, relativ fuktighet, regn, global stråling og innendørs temperatur og luftfuktighet. Disse klimafilene er basert på MDRY (Moisture Design Reference Year), som angir klimadata for et år som er noe mer kritisk for konstruksjonen enn et gjennomsnittlig år. Det vil si et år hvor det er lavere temperaturer, høyere relativ fuktighet og lavere global stråling. MDRY representerer en kritisk fuktbelastning på konstruksjonen som opptrer ca. en gang pr tiende år.

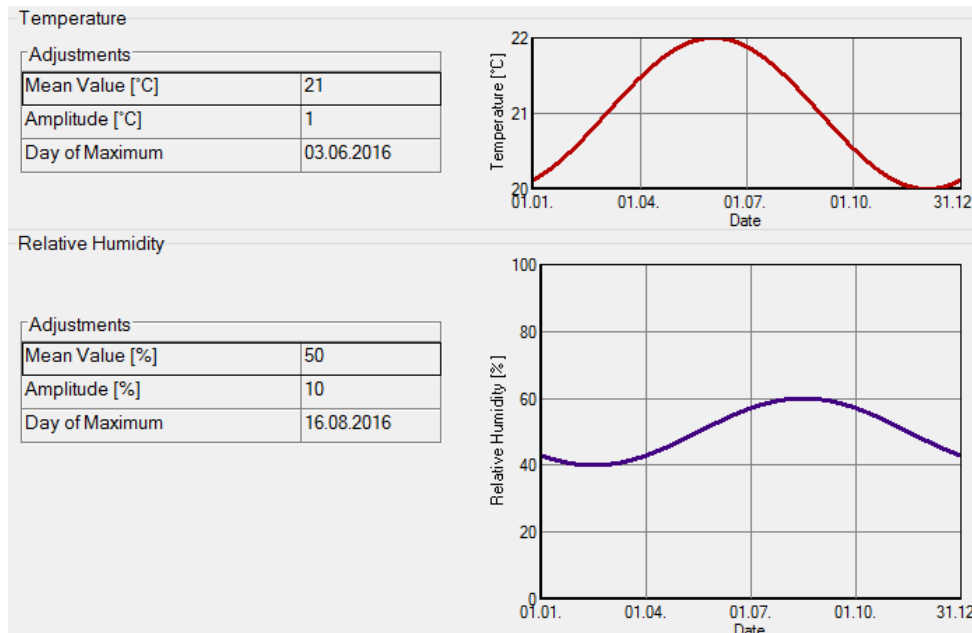
Figur 28 til Figur 30 viser klimadata for Tromsø.



Figur 28 Temperatur og relativ fuktighet for Tromsø (Utklipp fra WUFI-2D).

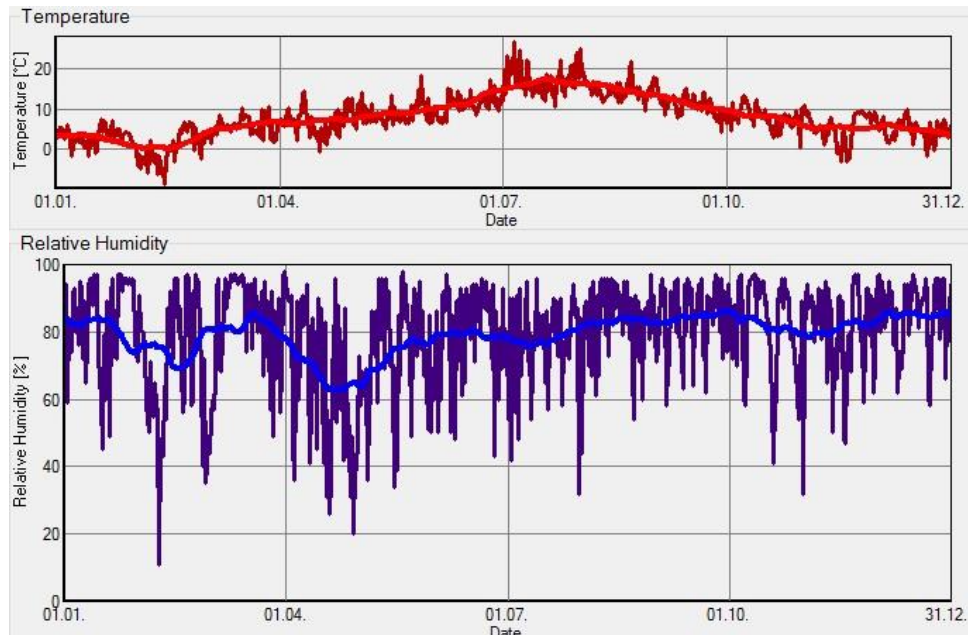


Figur 29 Solstrålings- og slagregnmengde i ulike himmelretninger for Tromsø (Utklipp fra WUFI-2D).

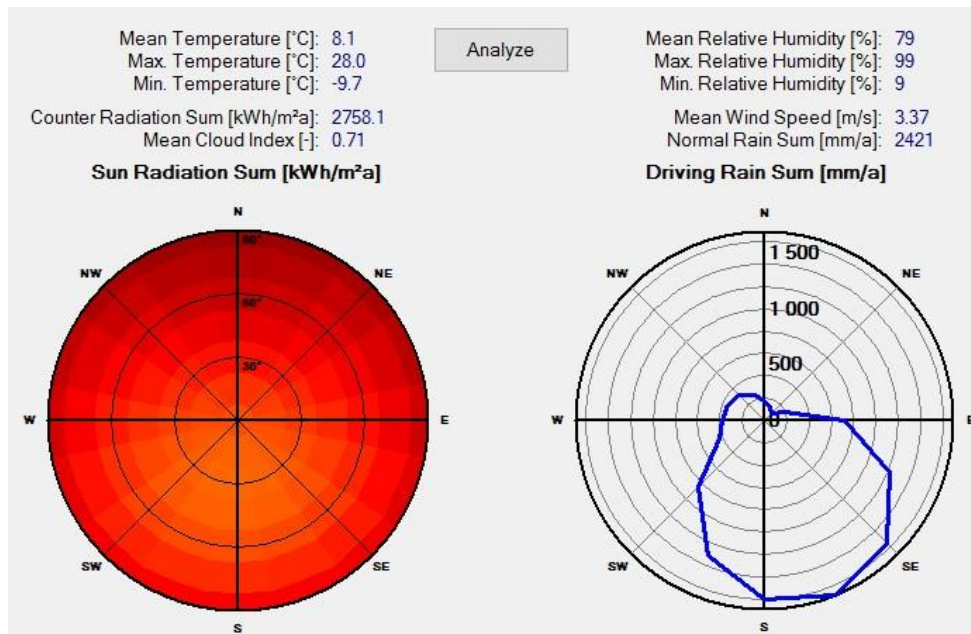


Figur 30 Innendørs klima for Tromsø (Utklipp fra WUFI-2D).

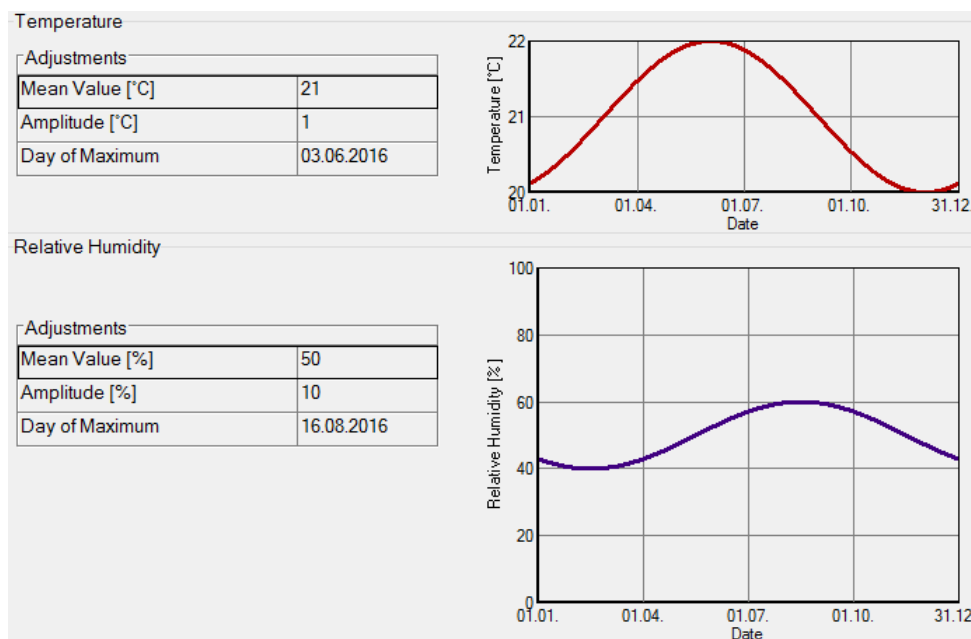
Figur 31 til Figur 33 viser klimadata for Bergen.



Figur 31 Temperatur og relativ fuktighet for Bergen (utklipp fra WUFI-2D).



Figur 32 Solstrålings- og slagregnmengde i ulike himmelretninger for Bergen (Utklipp fra WUFI-2D).



Figur 33 Innendørs klima for Bergen (Utklipp fra WUFI-2D).

### 9.2.4 Initialbetingelser

Initialbetingelsene for simuleringen er å angi temperatur og fuktinnhold for hvert materiale i veggen. I simuleringen er initialtemperaturen satt til 20°C, men dette har ingen innvirkning på beregningen ettersom temperaturen vil utjevne seg i forhold til grensebetingelsene i løpet av få simuleringstimer.

Fuktinnhold i det indre isolasjonssjiktet er satt til 50 (Kg/m<sup>3</sup>) for passivhusvegg av tre, mens det for passivhusvegg av betong velges et fuktinnhold på 35 (Kg/m<sup>3</sup>) i det indre isolasjonssjiktet. \*

Tabell 6 viser initialbetingelsene for trevegg med byggfukt. Tabell 7 viser initialbetingelsene for betongvegg med byggfukt.

Tabell 6 Initialbetingelser for materialer i trevegg med byggfukt.

Materiale	Temperatur (°C)	Fuktinnhold (Kg/m <sup>3</sup> )
Utvendig Kledning	20	83,3
Vindsperre	20	7
Ytre isolasjonssjikt, mineralull	20	1,8
Midtre isolasjonssjikt, mineralull	20	1,8
Indre isolasjonssjikt, mineralull	20	50
Dampsperre	20	0
Innvendig kledning	20	5

Tabell 7 Initialbetingelser for materialer i betongvegg med byggfukt.

Materiale	Temperatur (°C)	Fuktinnhold (Kg/m <sup>3</sup> )
Utvendig Kledning	20	83,3
Vindsperre	20	7
Ytre isolasjonssjikt, mineralull	20	1,8
Midtre isolasjonssjikt, mineralull	20	1,8
Indre isolasjonssjikt, mineralull	20	50
Betong B35	20	35*
Innvendig kledning	20	5

\*WUFI-2D har initialfukten til betong satt til 75 Kg/m<sup>3</sup> som standard, men med den fuktmengden mislyktes simulering hver gang. Det ble prøv mange forskjellige mengder fukt, både i betongen og i isolasjonssjiktet, helt til simuleringen kunne gjennomføres med 35 Kg/m<sup>3</sup> som initialfukt i betongen. Selv om betongen ikke har en reel initialfuktmengde forventes det at simuleringen kan brukes til å se tendensene i fuktvandringen for betongveggen.

### 9.2.5 Beregningsperiode

Det er valgt en beregningsperiode på 3 år slik at fuktutviklingen kan studeres over en lengre periode.

Beregningsstart:	01.05.2016
Beregningslutt:	01.05.2019

### 9.2.6 Beregningsparametere

I WUFI-2D velges det mellom ulike beregnings- og numeriske parametere som har innvirkning på hvordan simuleringen løser de numeriske problemene. Tabell 8 viser hvilke beregnings- og numeriske parametere som er brukt i simuleringen.

Tabell 8 Beregnings- og numeriske parametere brukt i simuleringen.

Varmetransport	Ja
Fukttransport	Ja
Ekskluder latent varme fra fordampning	Nei
Ekskluder latent varme fra kondensasjon	Nei
Ekskluder kapillærledning	Nei
Økt nøyaktighet	Nei
Tilpasset konvergens	Ja

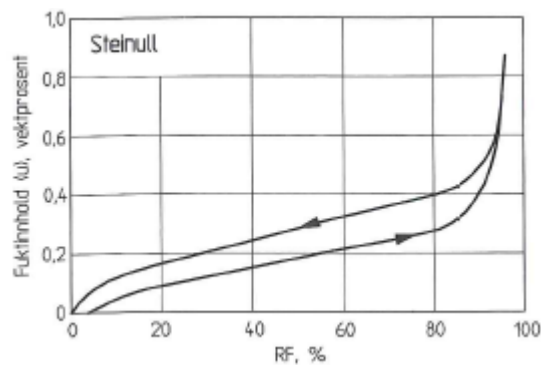
## 10 Resultater

Det har blitt utført simuleringer hvor veggene er plassert i Tromsø og Bergen, og veggene er simulert en gang hver for himmelretningene sør, nord, vest og øst.

Fukttinnhold oppgitt i tabellene er hentet på starttidspunktet for simuleringen som er den 01.05 og for samme dato etter 1 år, 2 år og simuleringsslutt etter 3 år.

Figurene viser fuktutviklingen i det indre, midtre og ytre isolasjonssjikt fra simuleringstart til simuleringsslutt. Oppdelingen i forskjellige isolasjonssjikt er gjort for å kunne se hvordan fukten eventuelt vil vandre i vegg, men vil i en reel vegg være ett eller to isolasjonslag.

For å sjekke kondensfaren brukes det en sorpsjonskurve for steinull. Figur 34 viser at det for steinull med en densitet på  $38 \text{ kg/m}^3$  vil dannes kondens ved ca. 95% relativ fuktighet og vektprosent på 0,9. Det gjelder for temperaturer mellom 20-25°C. I simuleringen er det brukt steinull med en densitet på  $60 \text{ kg/m}^3$ , som gir en kritisk volumprosent på omtrent  $34 \text{ kg/m}^3$  (Geving, Thue, 2002).



Figur 34 Sorpsjonskurve for steinull (Geving, Thue, 2002).

### 10.1 Trevegg orientert mot sør

Graf for totalt fuktinnhold i treveggen orientert sør, for både Tromsø og Bergen, kan sees i vedlegg 2.

Ut fra Tabell 9 og Tabell 10 kan man se at uttørkingen til passivhusveggen av tre, orientert sør, er relativt lik for Tromsø og Bergen. Det er kun minimale forskjeller på hvilke isolasjonslag som har mest fukt, mens den totale fuktmengden i veggen er lik.

Figur 35 til og med Figur 40 viser at fukten vandrer fra det indre isolasjonssjiktet og utover i veggen, og all isolasjon tørker ut. Ut fra figurene kan man også se at det ikke vil være noe fare for kondens i passivhusveggen av tre som er orientert sør.

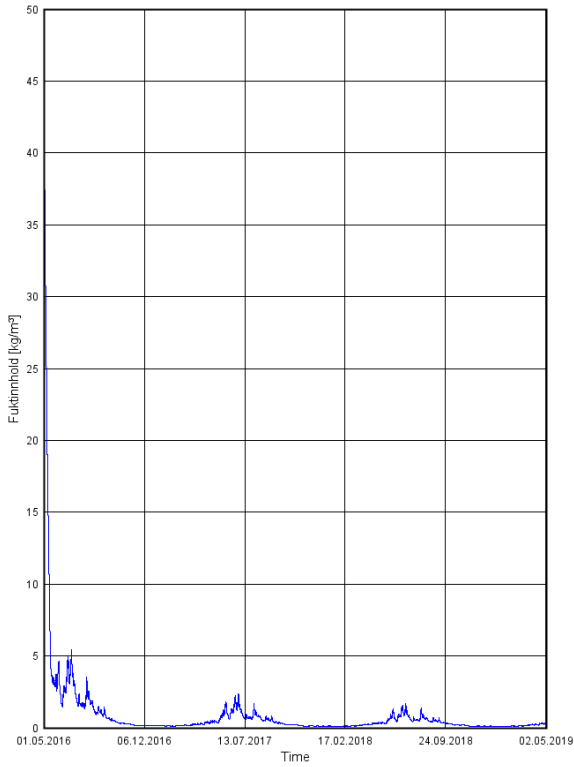
Tabell 9 Fuktinnhold (Kg/m<sup>3</sup>) i sørlig orientert trevegg i Tromsø.

Tid	Totalt	Indre isolasjonssjikt	Midtre isolasjonssjikt	Ytre isolasjonssjikt
Start (01.05.2016)	6,19	50	1,80	1,80
1 år (01.05.2017)	3,40	0,50	1,00	2,57
2 år (01.05.2018)	2,57	0,40	0,67	1,33
Slutt (01.05.2019)	2,49	0,39	0,64	1,23

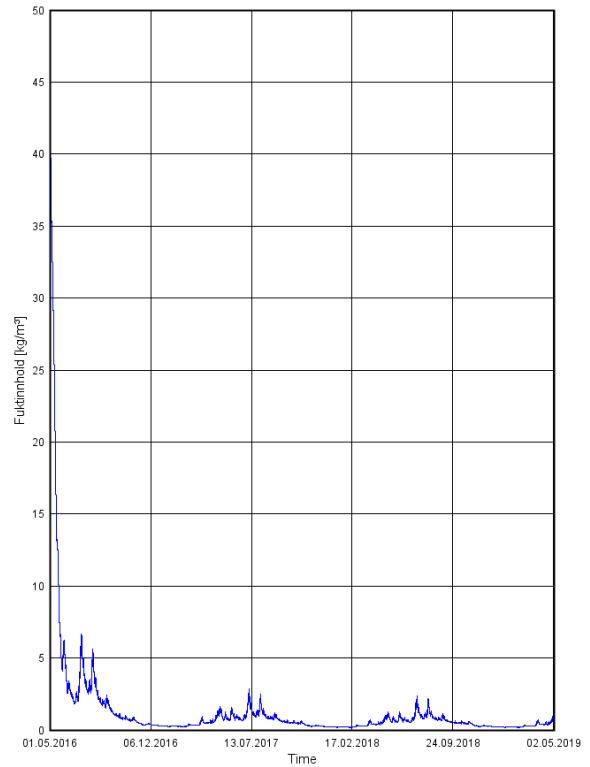
Tabell 10 Fuktinnhold (Kg/m<sup>3</sup>) i sørlig orientert trevegg i Bergen.

Tid	Totalt	Indre isolasjonssjikt	Midtre isolasjonssjikt	Ytre isolasjonssjikt
Start (01.05.2016)	6,19	50	1,80	1,80
1 år (01.05.2017)	3,07	1,22	1,26	1,42
2 år (01.05.2018)	2,55	0,93	0,89	0,95
Slutt (01.05.2019)	2,52	0,91	0,87	0,92

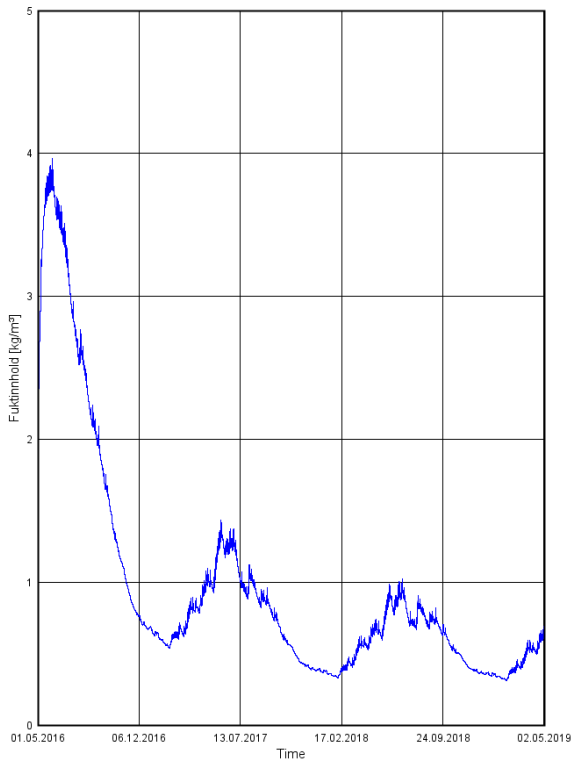




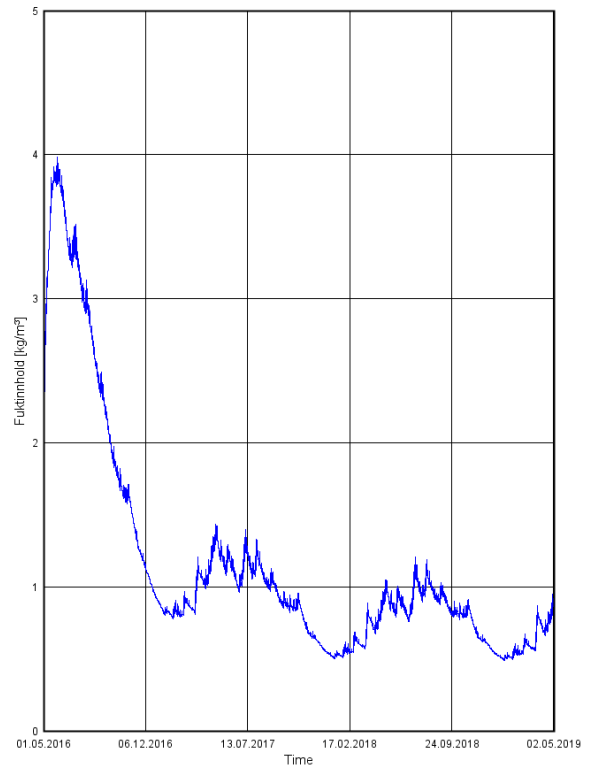
Figur 35 Fuktutvikling for det indre isolasjonssjikt i sørlig orientert trevegg i Tromsø.



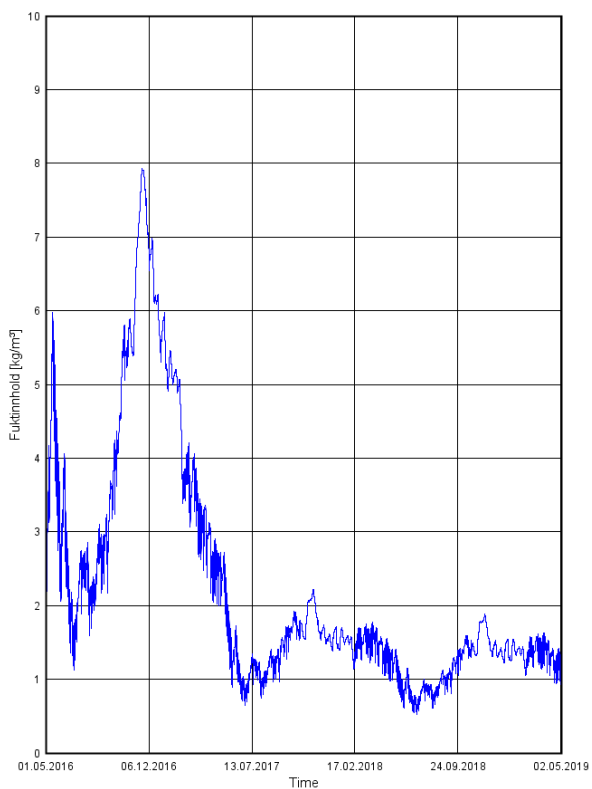
Figur 36 Fuktutvikling for det indre isolasjonssjikt i sørlig orientert trevegg i Bergen.



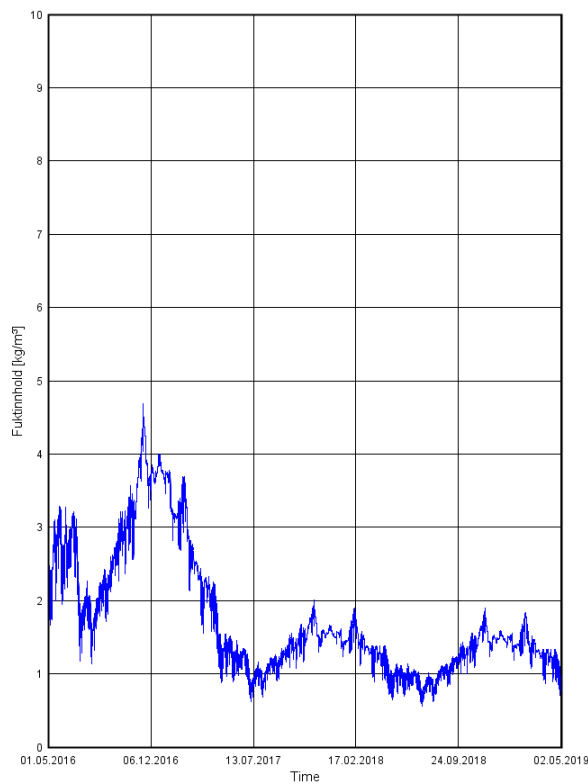
Figur 37 Fuktutvikling for det midtre isolasjonssjikt i sørlig orientert trevegg i Tromsø.



Figur 38 Fuktutvikling for det midtre isolasjonssjikt i sørlig orientert trevegg i Bergen.



Figur 39 Fuktutvikling for det ytre isolasjonssjikt i sørlig orientert trevegg i Tromsø.



Figur 40 Fuktutvikling for det ytre isolasjonssjikt i sørlig orientert trevegg i Bergen.

## 10.2 Trevegg orientert mot nord

Graf for totalt fuktinnhold i treveggen orientert nord, for både Tromsø og Bergen, kan sees i vedlegg 3.

Ut fra Tabell 11 og Tabell 12 kan man se at uttørkingen til passivhusveggen av tre, orientert nord, er relativt lik for Tromsø og Bergen. Det er kun små forskjeller på hvilke isolasjonslag som har mest fukt, mens den totale fuktmengden i veggen er lik.

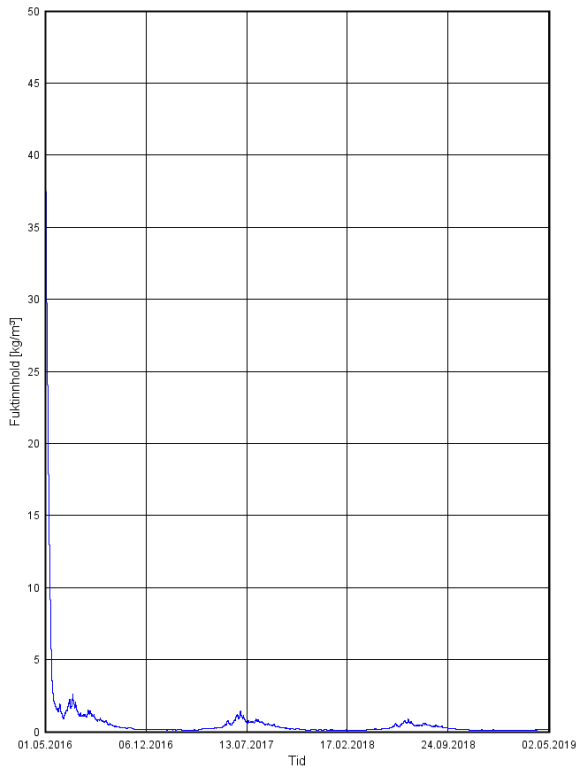
Figur 41 til og med Figur 46 viser at fukten vandrer fra det indre isolasjonssjiktet og utover i veggen, og all isolasjon tørker ut. Ut fra figurene kan man se at det ytre isolasjonssjikt har et større fuktinnhold rundt desember 2016 enn hva veggen som er orientert sør har, men det er fortsatt ikke fare for kondens i passivhusveggen av tre som er orientert nord.

Tabell 11 Fuktinnhold (Kg/m<sup>3</sup>) i nordlig orientert trevegg i Tromsø.

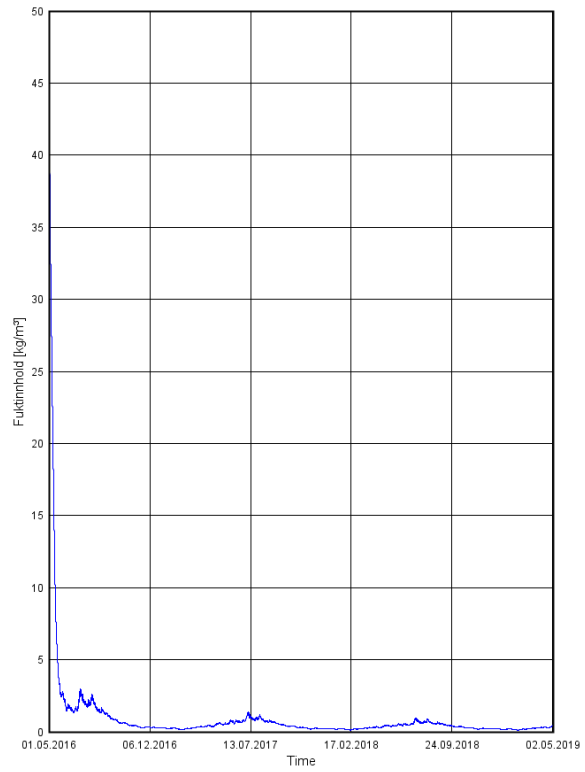
Tid	Totalt	Indre isolasjonssjikt	Midtre isolasjonssjikt	Ytre isolasjonssjikt
Start (01.05.2016)	6,20	50	1,80	1,80
1 år (01.05.2017)	4,21	0,22	0,75	4,13
2 år (01.05.2018)	2,94	0,17	0,46	1,50
Slutt (01.05.2019)	2,64	0,16	0,41	1,23

Tabell 12 Fuktinnhold (Kg/m<sup>3</sup>) i nordlig orientert trevegg i Bergen.

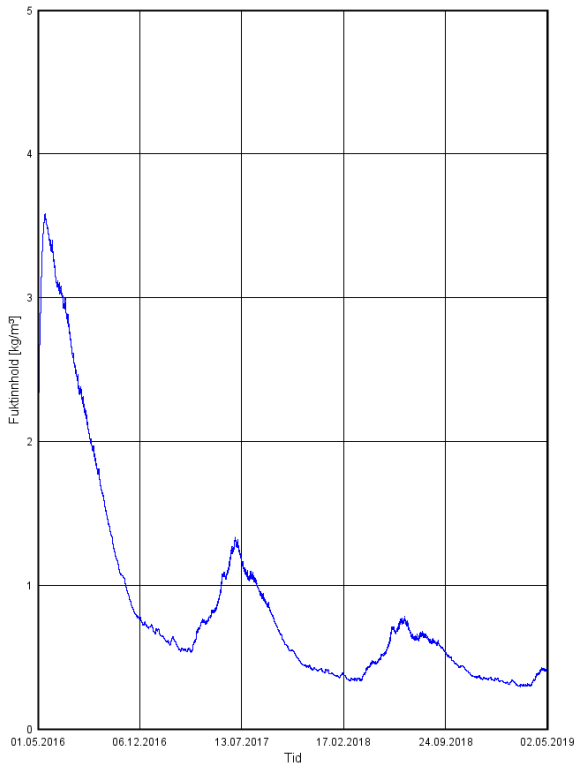
Tid	Totalt	Indre isolasjonssjikt	Midtre isolasjonssjikt	Ytre isolasjonssjikt
Start (01.05.2016)	6,20	50	1,80	1,80
1 år (01.05.2017)	3,55	0,59	0,99	2,08
2 år (01.05.2018)	2,63	0,46	0,67	1,10
Slutt (01.05.2019)	2,53	0,43	0,62	0,98



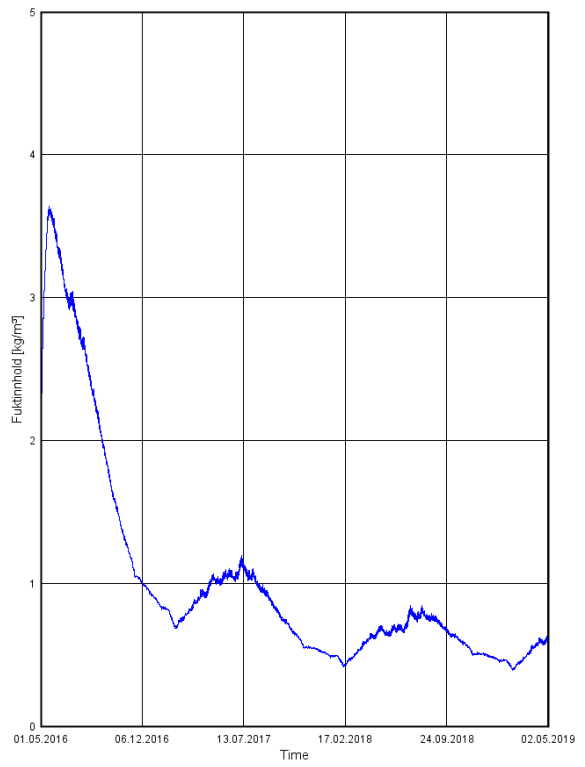
Figur 41 Fuktutvikling for det indre isolasjonssjikt i nordlig orientert trevegg i Tromsø.



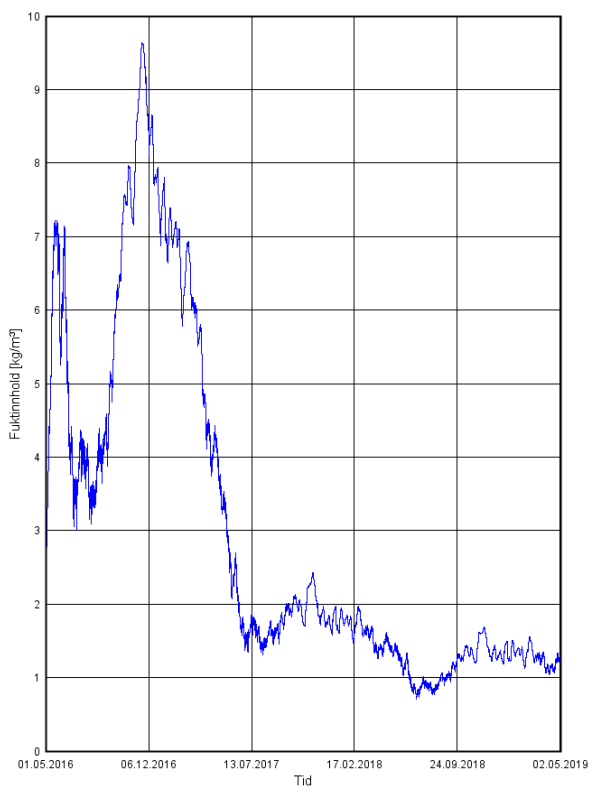
Figur 42 Fuktutvikling for det indre isolasjonssjikt i nordlig orientert trevegg i Bergen.



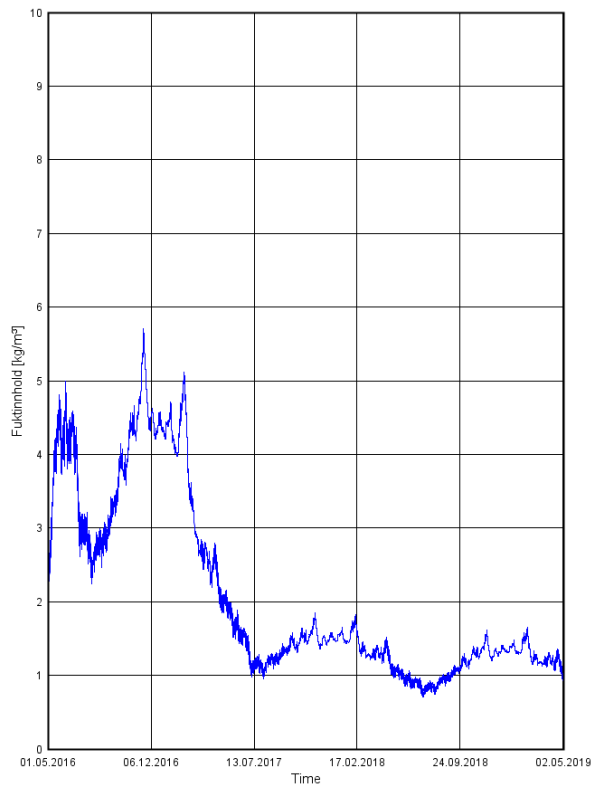
Figur 43 Fuktutvikling for det midtre isolasjonssjikt i nordlig orientert trevegg i Tromsø.



Figur 44 Fuktutvikling for det midtre isolasjonssjikt i nordlig orientert trevegg i Bergen.



Figur 45 Fuktutvikling for det ytre isolasjonssjikt i nordlig orientert trevegg i Tromsø.



Figur 46 Fuktutvikling for det ytre isolasjonssjikt i nordlig orientert trevegg i Bergen.

### 10.3 Trevegg orientert mot vest

Ettersom resultatene for den vestlig orienterte treveggen er relativt lik den sørlig orienterte treveggen kan resultatgrafene, for både Tromsø og Bergen, sees i vedlegg 4.

Ut fra Tabell 13 og Tabell 14 kan man se at uttørkingen til passivhusveggen av tre, orientert vest, er relativt lik for Tromsø og Bergen. Det er kun små forskjeller på hvilke isolasjonslag som har mest fukt, mens den totale fuktmengden i veggen er lik.

Grafene i vedlegg 4 viser at fukten vandrer fra det indre isolasjonssjiktet og utover i veggen, og all isolasjon tørker ut. Ut fra resultatgrafene kan man også se at det ikke vil være noe fare for kondens i passivhusveggen av tre som er orientert vest.

Tabell 13 Fukttinnhold (Kg/m<sup>3</sup>) i vestlig orientert trevegg i Tromsø.

Tid	Totalt	Indre isolasjonssjikt	Midtre isolasjonssjikt	Ytre isolasjonssjikt
Start (01.05.2016)	6,20	50	1,80	1,80
1 år (01.05.2017)	3,58	0,35	0,82	2,55
2 år (01.05.2018)	2,60	0,28	0,57	1,34
Slutt (01.05.2019)	2,48	0,27	0,53	1,16

Tabell 14 Fukttinnhold (Kg/m<sup>3</sup>) i vestlig orientert trevegg i Bergen.

Tid	Totalt	Indre isolasjonssjikt	Midtre isolasjonssjikt	Ytre isolasjonssjikt
Start (01.05.2016)	6,20	50	1,80	1,80
1 år (01.05.2017)	3,12	1,01	1,16	1,60
2 år (01.05.2018)	2,48	0,75	0,78	0,90
Slutt (01.05.2019)	2,44	0,73	0,76	0,87

#### 10.4 Trevegg orientert mot øst

Ettersom resultatene for den østlig orienterte treveggen er relativt lik den sørlig orienterte treveggen kan resultatgrafene, for både Tromsø og Bergen, sees i vedlegg 5.

Ut fra Tabell 15 og Tabell 16 kan man se at uttørkingen til passivhusveggen av tre, orientert øst, er relativt lik for Tromsø og Bergen. Det er kun små forskjeller på hvilke isolasjonslag som har mest fukt, mens den totale fuktmengden i veggen er lik.

Grafene i vedlegg 5 viser at fukten vandrer fra det indre isolasjonssjiktet og utover i veggen, og all isolasjon tørker ut. Ut fra resultatgrafene kan man også se at det ikke vil være noe fare for kondens i passivhusveggen av tre som er orientert øst.

Tabell 15 Fukttinnhold (Kg/m<sup>3</sup>) i østlig orientert trevegg i Tromsø.

Tid	Totalt	Indre isolasjonssjikt	Midtre isolasjonssjikt	Ytre isolasjonssjikt
Start (01.05.2016)	6,20	50	1,80	1,80
1 år (01.05.2017)	3,71	0,33	0,81	2,70
2 år (01.05.2018)	2,68	0,27	0,55	1,38
Slutt (01.05.2019)	2,52	0,26	0,51	1,20

Tabell 16 Fukttinnhold (Kg/m<sup>3</sup>) i østlig orientert trevegg i Bergen.

Tid	Totalt	Indre isolasjonssjikt	Midtre isolasjonssjikt	Ytre isolasjonssjikt
Start (01.05.2016)	6,20	50	1,80	1,80
1 år (01.05.2017)	3,32	1,01	1,16	1,72
2 år (01.05.2018)	2,55	0,75	0,78	0,94
Slutt (01.05.2019)	2,49	0,72	0,74	0,89

### 10.5 Betongvegg orientert mot sør

Graf for totalt fuktinnhold i betongvegg orientert sør, for både Tromsø og Bergen, kan sees i vedlegg 6.

Ut fra Tabell 17 og Tabell 18 kan man se at uttørkingen til passivhusveggen av betong, orientert sør, er relativt lik for Tromsø og Bergen. Den totale fuktmengden er litt høyere for betongveggen som er simulert i Bergen, men en forskjell på  $1,5 \text{ Kg/m}^3$  er ikke markant. Det er også samme tendens i betongveggen som i treveggen med at det er litt forskjell på hvor i isolasjonssjiktet det er mest fukt. For Tromsø er det små mengder mer fukt i det ytre isolasjonssjiktet enn i Bergen, mens det i Bergen er det minimalt mer fukt i det midtre og indre isolasjonssjiktet.

Figur 47 til og med Figur 52 viser at fukten vandrer fra det indre isolasjonssjiktet og utover i veggen, og isolasjonen tørker ut, med små økninger i fuktinnhold på vinteren som tørker ut i sommerhalvåret. Ut fra figurene kan man se at det ikke vil være noe fare for kondens i passivhusveggen av betong som er orientert sør.

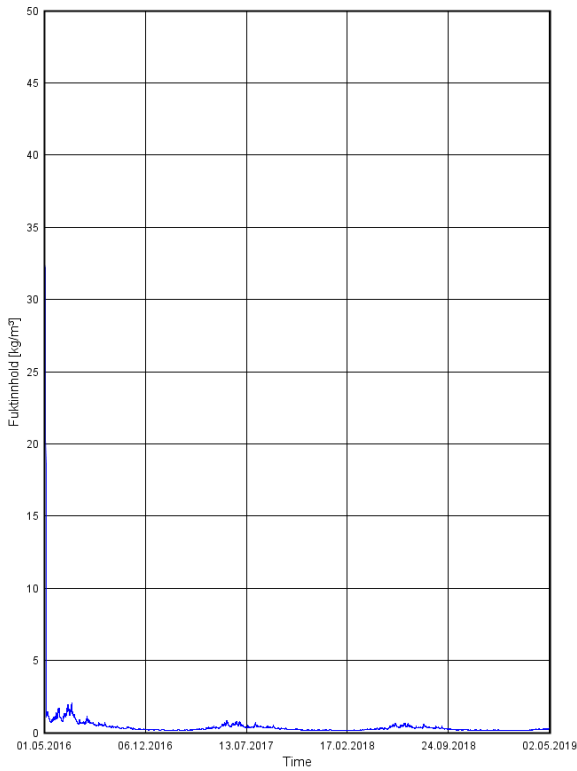
Tabell 17 Fuktinnhold ( $\text{Kg/m}^3$ ) i sørlig orientert betongvegg i Tromsø.

Tid	Totalt	Indre isolasjonssjikt	Midtre isolasjonssjikt	Ytre isolasjonssjikt
Start (01.05.2016)	14,93	50	1,80	1,80
1 år (01.05.2017)	13,67	0,41	0,83	1,86
2 år (01.05.2018)	13,04	0,35	0,64	1,24
Slutt (01.05.2019)	12,80	0,33	0,59	1,12

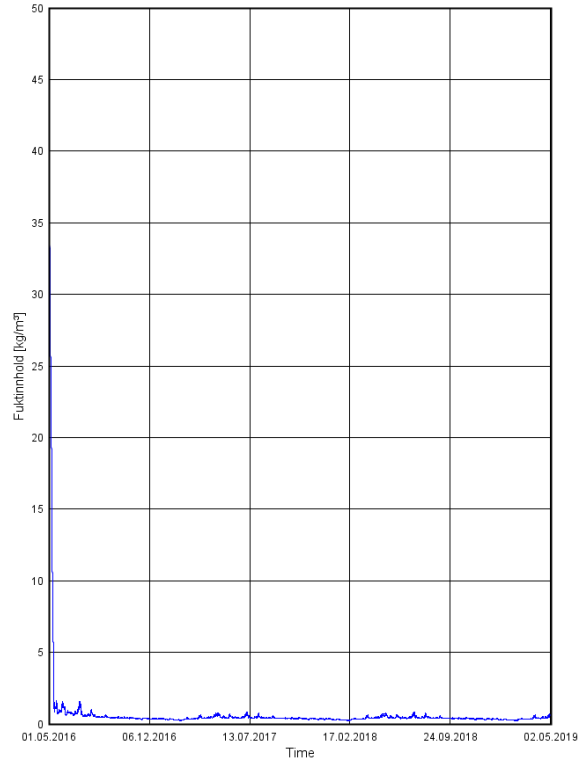
Tabell 18 Fuktinnhold ( $\text{Kg/m}^3$ ) i sørlig orientert betongvegg i Bergen.

Tid	Totalt	Indre isolasjonssjikt	Midtre isolasjonssjikt	Ytre isolasjonssjikt
Start (01.05.2016)	14,93	50	1,80	1,80
1 år (01.05.2017)	14,55	0,66	0,80	0,85
2 år (01.05.2018)	14,42	0,65	0,78	0,82
Slutt (01.05.2019)	14,37	0,64	0,76	0,81

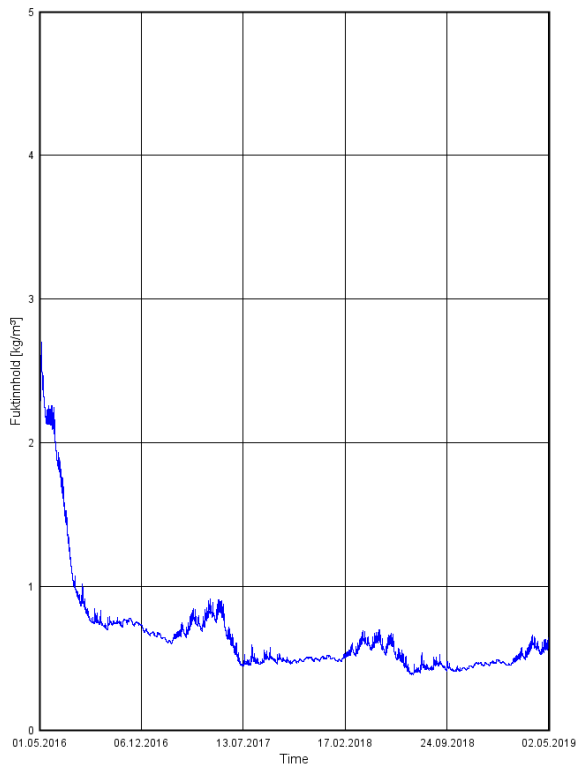




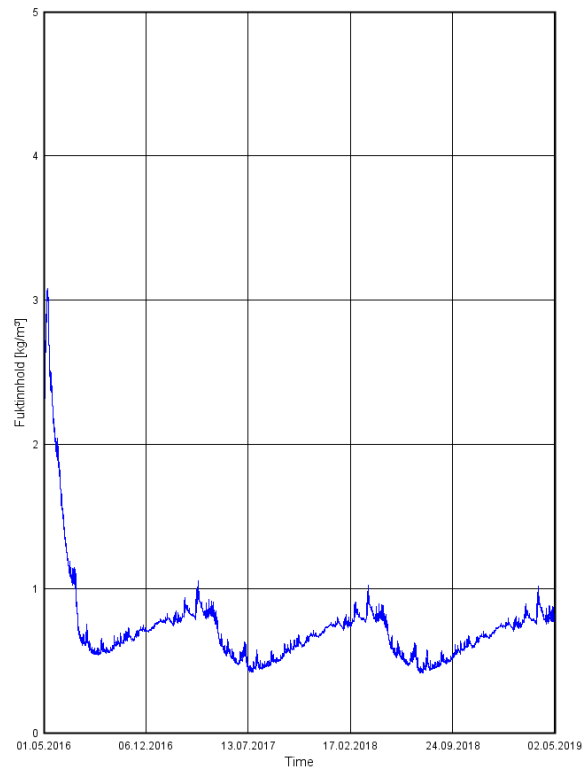
Figur 47 Fuktutvikling for det indre isolasjonssjikt i sørlig orientert betongvegg i Tromsø.



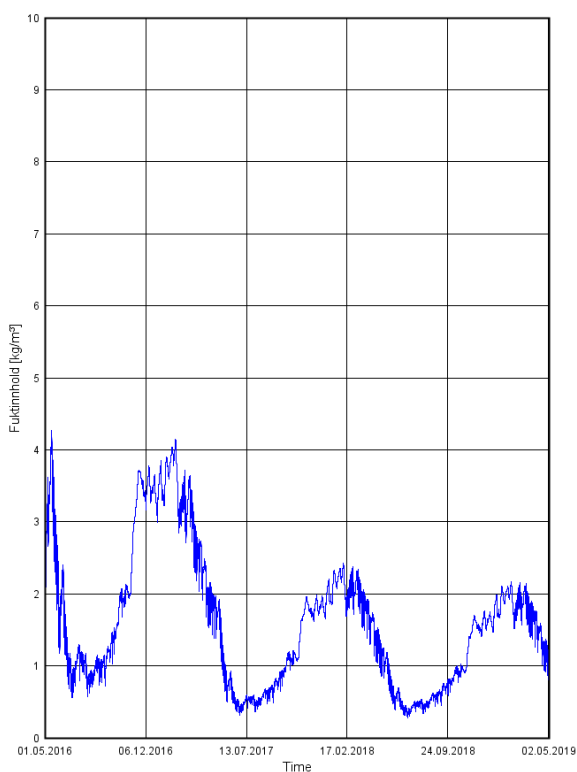
Figur 48 Fuktutvikling for det indre isolasjonssjikt i sørlig orientert betongvegg i Bergen.



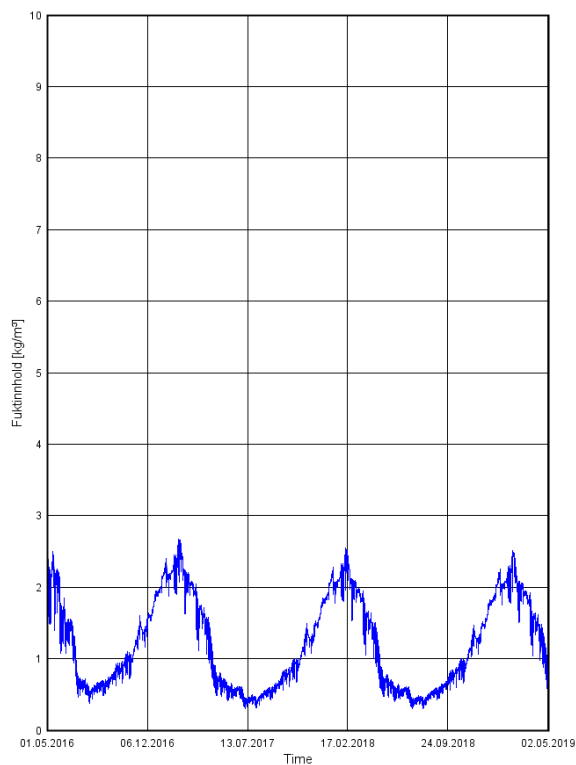
Figur 49 Fuktutvikling for det midtre isolasjonssjikt i sørlig orientert betongvegg i Tromsø.



Figur 50 Fuktutvikling for det midtre isolasjonssjikt i sørlig orientert betongvegg i Bergen.



Figur 51 Fuktutvikling for det ytre isolasjonssjikt i sørlig orientert betongvegg i Tromsø.



Figur 52 Fuktutvikling for det ytre isolasjonssjikt i sørlig orientert betongvegg i Bergen.

### 10.6 Betongvegg orientert mot nord

Graf for totalt fukttinnhold i betongvegg orientert sør, for både Tromsø og Bergen, kan sees i vedlegg 7.

Ut fra Tabell 19 og Tabell 20 kan man se at uttørkingen til passivhusveggen av betong, orientert nord, er relativt lik for Tromsø og Bergen. Den totale fuktmengden er litt høyere for betongveggen som er simulert i Bergen, men en forskjell på 1,4 Kg/m<sup>3</sup> er ikke markant.

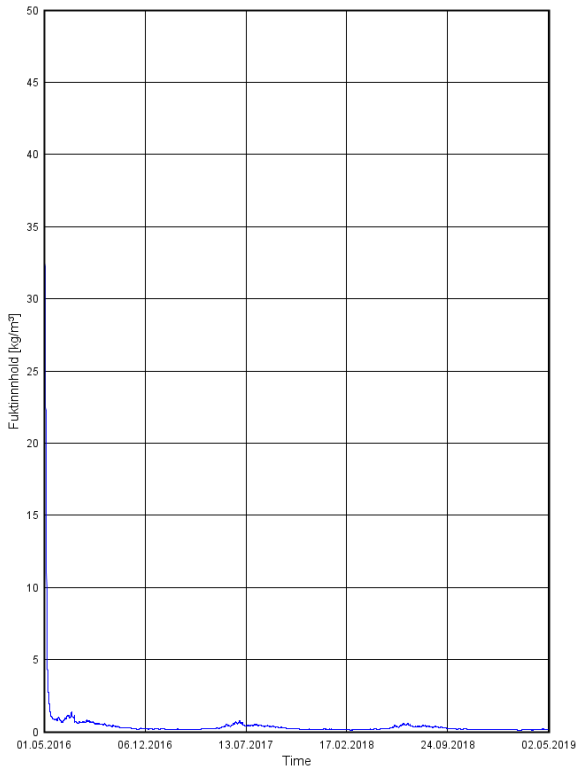
Figur 53 til og med Figur 58 viser at fukten vandrer fra det indre isolasjonssjiktet og utover i veggen, og isolasjonen tørker ut, med små økninger i fukttinnhold på vinteren som tørker ut i sommerhalvåret. Som for treveggen, har også betongveggen orientert nord, noe mer fukt i det ytre isolasjonssjikt tidlig i simuleringen, men ut fra figurene kan man se at det ikke utgjør noe fare for kondens i passivhusveggen av betong som er orientert nord.

Tabell 19 Fukttinnhold (Kg/m<sup>3</sup>) i nordlig orientert betongvegg i Tromsø.

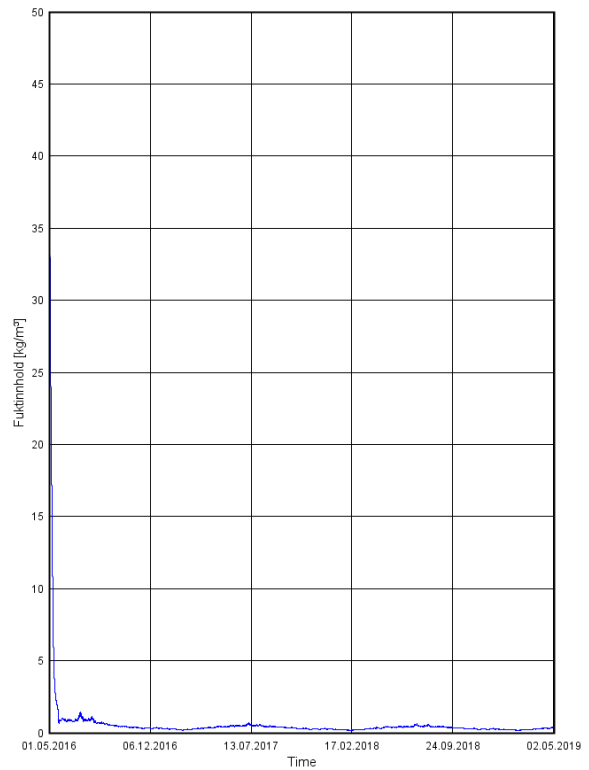
Tid	Totalt	Indre isolasjonssjikt	Midtre isolasjonssjikt	Ytre isolasjonssjikt
Start (01.05.2016)	14,93	50	1,80	1,80
1 år (01.05.2017)	14,01	0,21	0,69	3,20
2 år (01.05.2018)	13,39	0,19	0,53	1,85
Slutt (01.05.2019)	13,08	0,18	0,49	1,61

Tabell 20 Fukttinnhold (Kg/m<sup>3</sup>) i nordlig orientert betongvegg i Bergen.

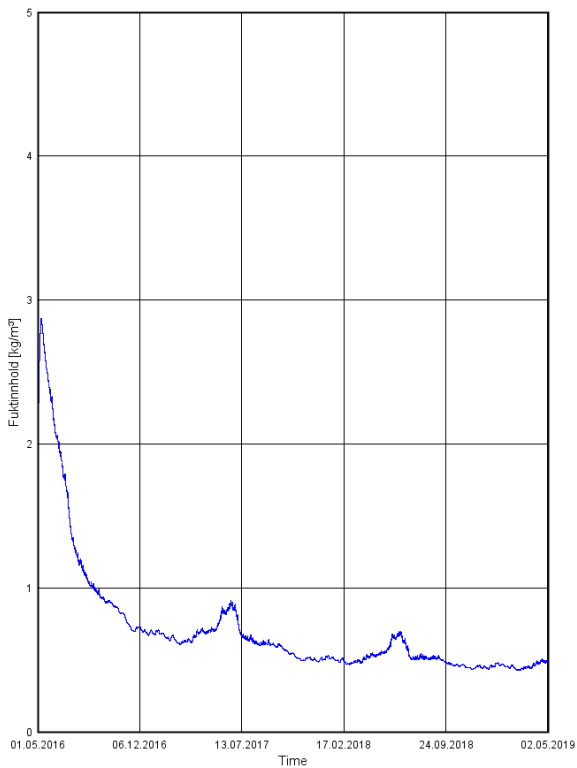
Tid	Totalt	Indre isolasjonssjikt	Midtre isolasjonssjikt	Ytre isolasjonssjikt
Start (01.05.2016)	14,93	50	1,80	1,80
1 år (01.05.2017)	14,51	0,45	0,79	1,51
2 år (01.05.2018)	14,43	0,42	0,69	1,19
Slutt (01.05.2019)	14,44	0,42	0,67	1,13



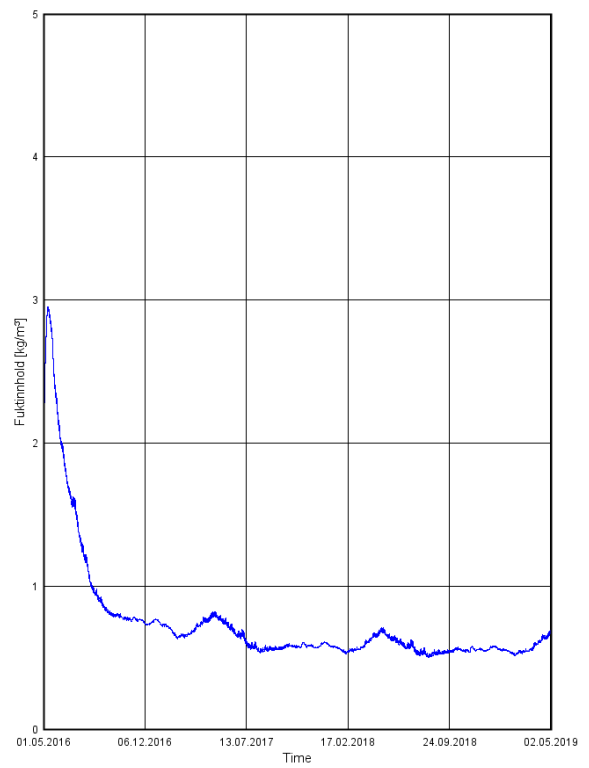
Figur 53 Fuktutvikling for det indre isolasjonssjikt i nordlig orientert betongvegg i Tromsø.



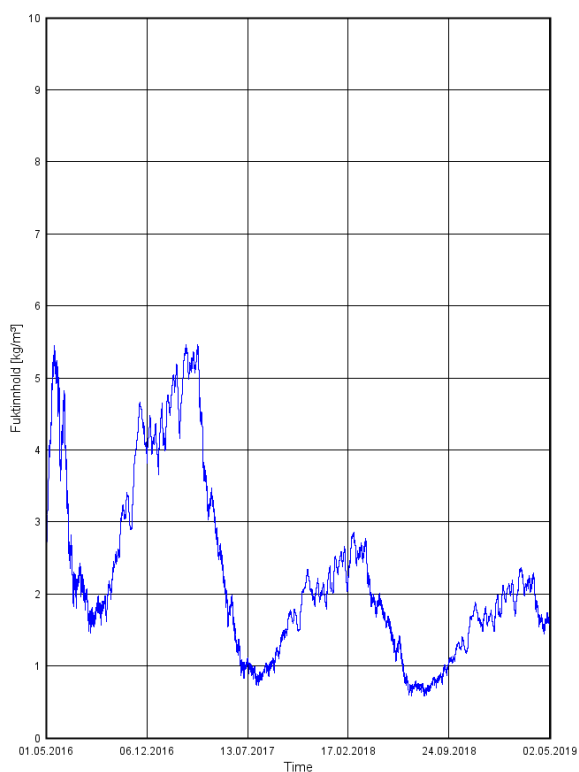
Figur 54 Fuktutvikling for det indre isolasjonssjikt i nordlig orientert betongvegg i Bergen.



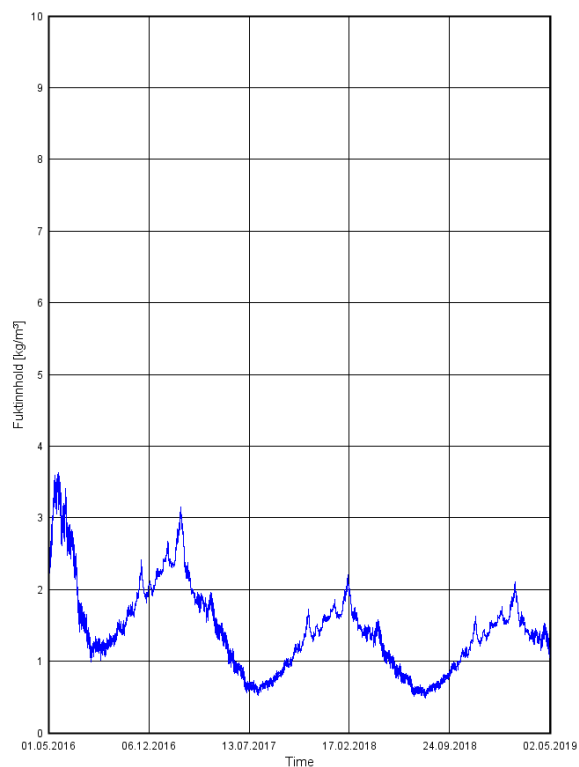
Figur 55 Fuktutvikling for det midtre isolasjonssjikt i nordlig orientert betongvegg i Tromsø.



Figur 56 Fuktutvikling for det midtre isolasjonssjikt i nordlig orientert betongvegg i Bergen.



Figur 57 Fuktutvikling for det ytre isolasjonssjikt i nordlig orientert betongvegg i Tromsø.



Figur 58 Fuktutvikling for det ytre isolasjonssjikt i nordlig orientert betongvegg i Bergen.

### 10.7 Betongvegg orientert mot vest

Ettersom resultatene for den vestlig orienterte betongveggen er relativt lik den sørlig orienterte betongveggen kan resultatgrafene, for både Tromsø og Bergen, sees i vedlegg 8.

Ut fra Tabell 21 og Tabell 22 kan man se at uttørkingen til passivhusveggen av betong, orientert vest, er relativt lik for Tromsø og Bergen. Den totale fuktmengden er litt høyere for betongveggen som er simulert i Bergen, men en forskjell på 1,7 Kg/m<sup>3</sup> er ikke markant.

Grafene i vedlegg 8 viser at fukten vandrer fra det indre isolasjonssjiktet og utover i veggen, og isolasjon tørker ut, med små økninger i fuktinnhold på vinteren/våren som tørker ut i sommerhalvåret.

Ut fra resultatgrafene kan man også se at det ikke vil være noe fare for kondens i passivhusveggen av betong som er orientert vest.

Tabell 21 Fuktinnhold (Kg/m<sup>3</sup>) i vestlig orientert betongvegg i Tromsø.

Tid	Totalt	Indre isolasjonssjikt	Midtre isolasjonssjikt	Ytre isolasjonssjikt
Start (01.05.2016)	14,93	50	1,80	1,80
1 år (01.05.2017)	13,17	0,28	0,69	1,94
2 år (01.05.2018)	12,92	0,27	0,61	1,59
Slutt (01.05.2019)	12,82	0,26	0,60	1,53

Tabell 22 Fuktinnhold (Kg/m<sup>3</sup>) i vestlig orientert betongvegg i Bergen.

Tid	Totalt	Indre isolasjonssjikt	Midtre isolasjonssjikt	Ytre isolasjonssjikt
Start (01.05.2016)	14,93	50	1,80	1,80
1 år (01.05.2017)	14,55	0,64	0,85	1,06
2 år (01.05.2018)	14,52	0,61	0,77	0,93
Slutt (01.05.2019)	14,52	0,60	0,76	0,92

### 10.8 Betongvegg orientert mot øst

Ettersom resultatene for den østlig orienterte betongveggen er relativt lik den sørlig orienterte betongveggen kan resultatgrafene, for både Tromsø og Bergen, sees i vedlegg 9.

Ut fra Tabell 23 og Tabell 24 kan man se at uttørkingen til passivhusveggen av betong, orientert vest, er relativt lik for Tromsø og Bergen. Den totale fuktmengden er litt høyere for betongveggen som er simulert i Bergen, men en forskjell på 1,3 Kg/m<sup>3</sup> er ikke markant.

Grafene i vedlegg 9 viser at fukten vandrer fra det indre isolasjonssjiktet og utover i veggen, og isolasjon tørker ut, med små økninger i fuktinnhold på vinteren/våren som tørker ut i sommerhalvåret.

Ut fra resultatgrafene kan man også se at det ikke vil være noe fare for kondens i passivhusveggen av betong som er orientert øst.

Tabell 23 Fuktinnhold (Kg/m<sup>3</sup>) i østlig orientert betongvegg i Tromsø.

Tid	Totalt	Indre isolasjonssjikt	Midtre isolasjonssjikt	Ytre isolasjonssjikt
Start (01.05.2016)	14,93	50	1,80	1,80
1 år (01.05.2017)	13,65	0,27	0,70	2,06
2 år (01.05.2018)	13,10	0,23	0,55	1,37
Slutt (01.05.2019)	12,88	0,22	0,51	1,26

Tabell 24 Fuktinnhold (Kg/m<sup>3</sup>) i østlig orientert betongvegg i Bergen.

Tid	Totalt	Indre isolasjonssjikt	Midtre isolasjonssjikt	Ytre isolasjonssjikt
Start (01.05.2016)	14,93	50	1,80	1,80
1 år (01.05.2017)	14,44	0,60	0,88	1,16
2 år (01.05.2018)	14,29	0,57	0,80	1,01
Slutt (01.05.2019)	14,22	0,56	0,78	0,98

## 11 Oppsummering og Konklusjon

Etterspørselen av bygg som er oppført etter passivhusstandard øker i Norge, men det er til nå ikke blitt forsket mye på hvordan disse veggene, bygd etter passivhusstandard, vil oppføre seg i norsk klima. Det er ikke angitt spesifikke krav til U-verdi for yttervegger i passivhusstandard, de inngår heller som en del av hele bygget hvor kravet er en gitt mengde energibruk over ett år. Det henvises i passivhusstandard at en typisk yttervegg har en U-verdi på 0,10-0,12 W/(m<sup>2</sup>K).

Vil man kunne sett opp den samme veggen uansett hvor i Norge man skal bygge, eller må veggen tilpasses etter hvor i det langstrakte landet, og det vidt forskjellige klimaet det innebærer, veggen skal bygges.

Det har blitt simulert en passivhusvegg, med en U-verdi på 0,10 W/(m<sup>2</sup>K), av tre og en i betong, plassert i klima for Tromsø og Bergen. Det ble utført beregninger for å se selvuttørkingsevnen til veggen med byggfukt i isolasjonslaget, og eventuell kondensfare. Beregningen ble utført en gang for hver av himmelretningene sør, nord, vest og øst.

Ut fra resultatene av simuleringen, som forbeholder at utførelsen av veggkonstruksjonen er korrekt og uten feil i blant annet dampsperrsjiktet, ser man at for passivhusveggen av tre er det ingen fare for at veggen ikke tørker ut. Resultatgrafene viser at fukten i isolasjonen forflytter seg fra det indre isolasjonssjiktet og utover til det ytre isolasjonslaget før det er gått ett år i simuleringen, hvor det så tørker ut i løpet av simuleringperioden.

Resultatene viste at veggen orientert nord, i Tromsø, oppnådde et litt høyere fuktinnhold i det ytre isolasjonssjiktet enn hva som var tilfellet for de resterende himmelretningen. Dette tyder på at den nordlige siden har størst potensial til å skape kondensproblemer, og kan være lurt å tenke på ved plassering av rom som kan ha høyere luftfuktighet, som for eksempel soverom og kjøkken.

Det totale fuktinnholdet i passivhusveggen av tre, for alle himmelretningene, er likt for både Tromsø og Bergen. Ut fra dette kan det konkluderes at en passivhusvegg av tre, med en U-verdi på 0,10 W/(m<sup>2</sup>K), vil oppføre seg likt både i Tromsø og Bergen med hensyn på selvuttørking og kondensfare.

For passivhusveggen av betong viser resultatene noe mindre fuktinnhold i isolasjonssjiktene til betongveggen i forhold til treveggen, og dette skyldes tidligere nevnte problem med initialfukten til betongen. Ettersom initialfukten til betongen måtte settes ned for å få gjennomført simuleringen, vil betongen i simuleringen trekke til seg noe av fukten som ble satt i det indre isolasjonssjiktet, som igjen fører til mindre fukt utover i isolasjonssjiktene i forhold det som var tilfellet i treveggen.

Selv med problemene som oppsto med initialfukten til betongen, viser resultatene samme tendenser som veggen av tre. Fukten går fra det indre isolasjonssjiktet og utover til det ytre isolasjonssjiktet før det er gått ett år i simuleringen.

Det totale fuktinnholdet i passivhusveggen av betong, for alle himmelretningene, ender opp relativt like for både Tromsø og Bergen. Ut fra dette kan det konkluderes at en passivhusvegg av betong, med en U-verdi på 0,10 W/(m<sup>2</sup>K), vil oppføre seg likt både i Tromsø og Bergen med hensyn på selvuttørking og kondensfare.

Såfremt utførelsen av veggkonstruksjonen er uten feil og mangler, vil det ut fra resultatene i simuleringen vil det være mulig å bruke samme passivhusvegg både i Tromsø og Bergen.



## 12 Videre arbeid

For å finne et endelig svar på om det er bærekraftig og hensiktsmessig å ha lik utforming for yttervegger i passivhus over hele landet, vil det fortsatt være flere problemstillinger som må svares. Det er i denne oppgaven kun sett på vegger med en bestemt U-verdi. Det må undersøkes hvordan vegger med forskjellige U-verdier vil oppføre seg i gitte klimaer. Veggene simulert i denne oppgave har heller ikke vinduer, som kan ha innvirkning på resultatene.

Det er i WUFI-2D heller ikke modellert i 3D, noe som førte til at det ikke var mulig å få med trevirke som er i veggene, som for eksempel stendere. Simulering i et annet program hvor dette er en mulighet vil vær hensiktsmessig.

Videre vil det være nødvendig å utføre kostnads- og energiberegninger for hver enkelt veggtype, for å få et oversiktlig svar på om det er hensiktsmessig å bygge samme yttervegger etter passivhusstandarden over hele landet.

### 13 Referanser

Bohne, A.R, Aalberg, A. 2011, Bygningsmaterialer – kompendium, Norges teknisk naturvitenskapelige universitet.

Consto, 2016, Postboks 6154 Langnes, 9291 Tromsø. <http://consto.no/> (05.06.2016)

Eide, S. 2012, FOKUS på tre nr. 55, TreFokus AS, Postboks 13 Blindern, 0313 Oslo.

Edvardsen, K.I, Ramstad, T. 2012, Håndbok 53 Trehus, ISBN 978-82-536-0919-5, SINTEF byggforsk. Forskningsveien 3B, p.b Blindern, 0314 Oslo.

Fraunhofer-Institut for Building Physics, Holzkirchen, 2016a, <https://wufi.de/en/software/wufi-2d/> (05.05.2016)

Fraunhofer-Institut for Building Physics, Holzkirchen, 2016b, <https://wufi.de/en/software/validation/> (10.05.2016)

Geving, S. Thue, J.V. 2002, Håndbok 50 Fukt i bygninger, ISBN 978-82-536-0747-4, Norges byggforskningsinstitutt.

Geving, S. 2011, Håndbok 3 Fuktskader: årsaker utredning og tiltak, ISBN 978-82-536-1228-7, SINTEF byggforsk.

Lisø, K.R. Kvande, T. 2007, Klimatilpasning av bygninger, ISBN 978-82-536-0960-7, SINTEF Byggforsk.

Lavenergiprogrammet, 2013, Prosjektering av passivhus. Lavenergiprogrammet, Postboks 7187 Majorstuen, 0307 Oslo.

Meteorologisk institutt, 2016, postboks 6314 Langnes, 9293 Tromsø. <http://www.met.no/Troms%C3%B8.9UFRLYXJ.ips> (04.05.2016)

Meteorologisk institutt, 2016, Allègaten 70, 5007 Bergen. <http://www.met.no/Bergen.9UFRLYWI.ips> (04.05.2016)

NS 3700:1013, Standard Norge, 2013, Kriterier for passivhus og lavenergibygninger - boligbygninger. Standard Norge, Postboks 242, 1326 Lysaker

SINTEF 2003a, Byggdetalj 573.121 - Sending 1, Byggforskserien – Materialer til luft- og dampetting, SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer, Pb. 123 Blindern, 0314 Oslo.

SINTEF 2003b, Byggdetalj 573.430 - Sending 2, Byggforskserien – Materialdata for vanddamptransport, SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer, Pb. 123 Blindern, 0314 Oslo.

SINTEF 2005, Byggdetalj 421.132, Byggforskserien – Fukt i bygninger. Teorigrunnlag, SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer, Pb. 123 Blindern, 0314 Oslo.

SINTEF 2007, Byggdetalj 740.111, Byggforskserien – Kondens på kalde overflater. Årsaker og tiltak, SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer, Pb. 123 Blindern, 0314 Oslo.

SINTEF 2012, Byggdetalj 321.521, Byggforskserien – Passivhus. Eksempler på bygninger i Norge, SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer, Pb. 123 Blindern, 0314 Oslo.

SINTEF 2013a, Byggdetalj 471.403, Byggforskserien – U-verdier. Vegger over terreng – bindingsverk av I-profiler av tre, SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer, Pb. 123 Blindern, 0314 Oslo.

SINTEF 2013b, Byggdetalj 471.404, Byggforskserien – U-verdier. Vegger over terreng – dobbelt bindingsverk av tre med kontinuerlig isolasjon imellom, SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer, Pb. 123 Blindern, 0314 Oslo.

SINTEF 2013c, Byggdetalj 471.451, Byggforskserien – U-verdier. Vegger over terreng – betong, SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer, Pb. 123 Blindern, 0314 Oslo.

Thue, J.V, 2014, Bygningsfysikk – grunnlag. NTNU, Institutt for bygg, anlegg og transport.

Zirkelbach, D. Schmidt, Th. Künzel H.M. Kehrler, M. Bludau, Ch., 2016, WUFI-2D Calculation example. Fraunhofer-Institut for Building Physics, Holzkirchen.

WUFI, 2016, Fraunhofer-Institut for Building Physics, Holzkirchen  
<http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php5/Details:Physics> (14.06.2016)

## 14 Vedlegg

1. U-Verdiberegninger for trevegg.
2. Simuleringsresultat for total fuktinnhold sørvendt trevegg i Tromsø og Bergen.
3. Simuleringsresultat for total fuktinnhold nordvendt trevegg i Tromsø og Bergen.
4. Resultatgrafer for trevegg orientert mot vest.
5. Resultatgrafer for trevegg orientert mot.
6. Simuleringsresultat for total fuktinnhold sørvendt betongvegg i Tromsø og Bergen.
7. Simuleringsresultat for total fuktinnhold nordvendt betongvegg i Tromsø og Bergen.
8. Resultatgrafer for betongvegg orientert mot vest.
9. Resultatgrafer for betongvegg orientert mot øst.
10. Oppgavebeskrivelse.

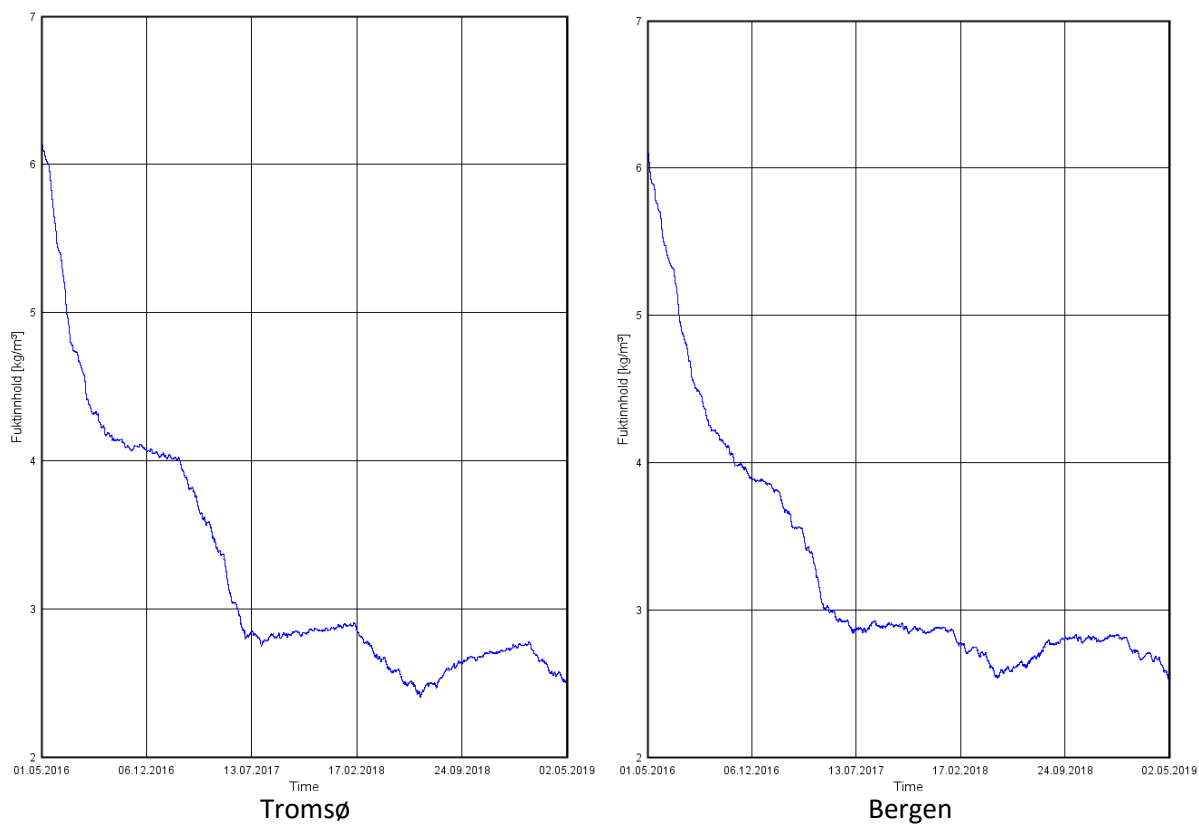
### 14.1 Vedlegg 1

U-verdiberegning trevegg. Beregnet fra varmeovergangsmotstand for hvert materialsjikt i veggen.

Treanddel		Stegandel		Øvre grenseverdi T		Nedre grenseverdi T		Rtot		U-verdi	
13 % CC 60	Stegandel a Stegandel b	0,87 0,13		10,411		10,196		10,30		0,097	
		Sjikt		d [mm]		λ		Øvre grenseverdi Ra Rb		Nedre grenseverdi R	
Inne	Rsi	Innv. overgangsmotstand	0	0	0,13	0,13	0,13	0,13			
1	Gips	13	0,25	0,05	0,05	0,05	0,05				
2	Mineralull Trestender 36mm Legering mineralull/ stender	48 48	0,035 0,12	1,37	0,40	1,04					
3	Dampsperre PE-folie	0,2	0	0,02	0,02	0,02					
4	Mineralull I-profil	200 200	0,035 0,12	5,71	1,67	4,34					
5	Legering mineralull/ Iprofil Mineralull I-profil	200 200 200	0,035 0,12	5,71	1,67	4,34					
6	Legering mineralull/ Iprofil Vindspørre (GU plate)	200 9,5	0,1	0,10	0,095	4,34					
7	Luftespalte	23	0	0,13	0,13	0,13					
8	Kledning tre	12,5	0,13	0,10	0	0					
9		0	0	0	0	0					
Rse Ute	Utv. Overgangsmotstand	0	0	0,04	0,04	0,04					
<b>Tot</b>		<b>506,2</b>		<b>13,363</b>	<b>4,200</b>	<b>10,196</b>					

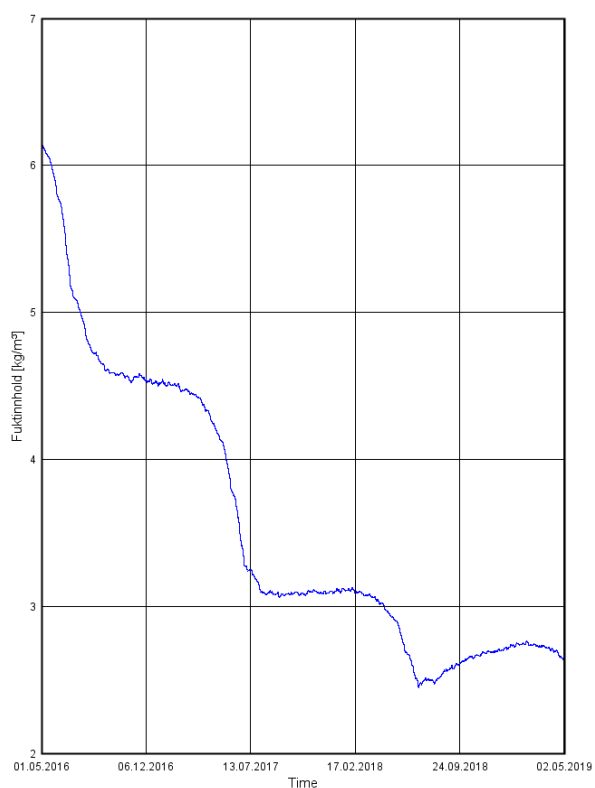
## 14.2 Vedlegg 2

Simuleringsresultat for totalt fuktinnhold sørvendt trevegg i Tromsø og Bergen.

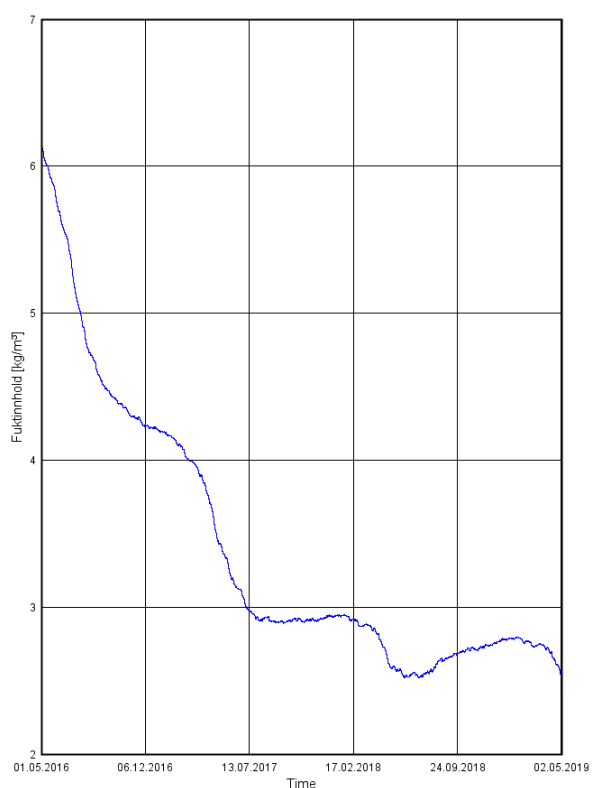


### 14.3 Vedlegg 3

Simuleringsresultat for totalt fuktinnhold nordvendt trevegg i Tromsø og Bergen.



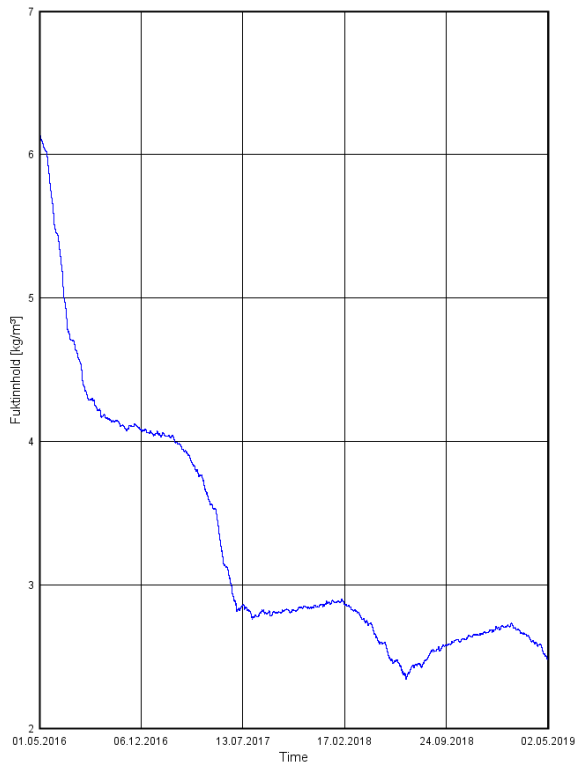
Tromsø



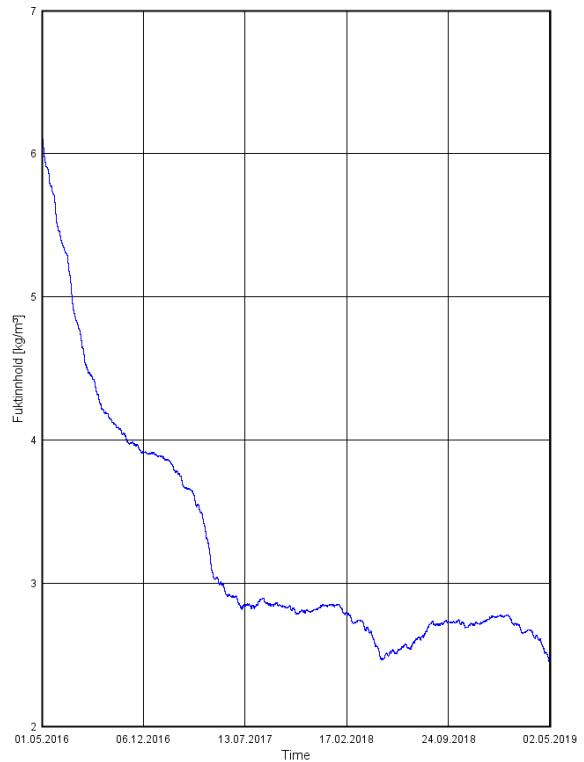
Bergen

### 14.4 Vedlegg 4

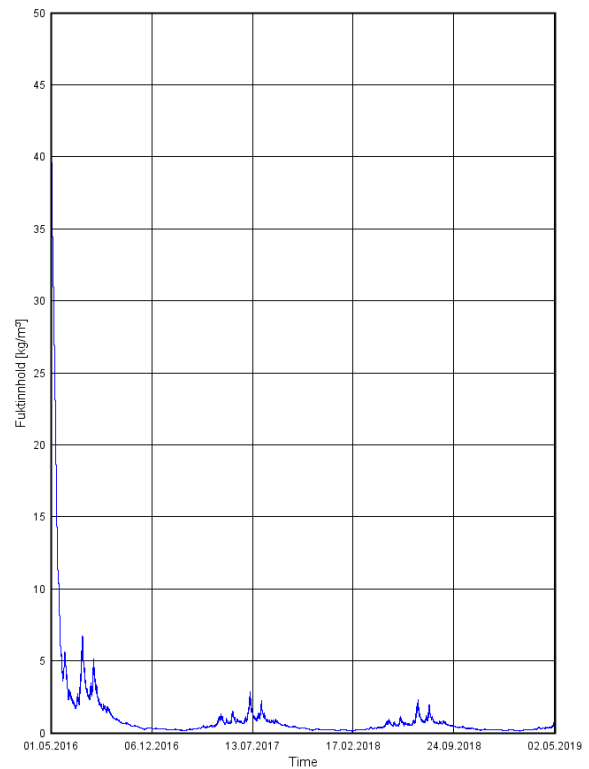
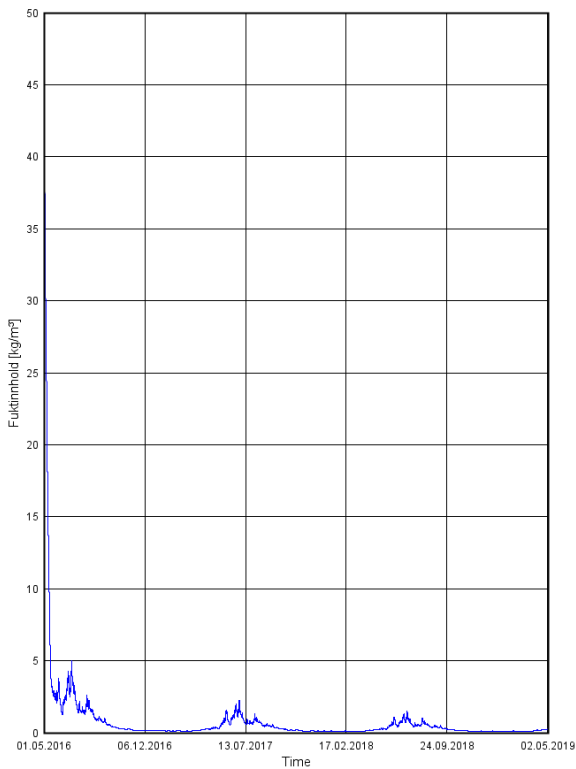
Resultatgrafer for trevegg orientert mot vest som viser totalt fuktinnhold og fuktinnhold i indre, midtre og ytre isolasjonssjikt.



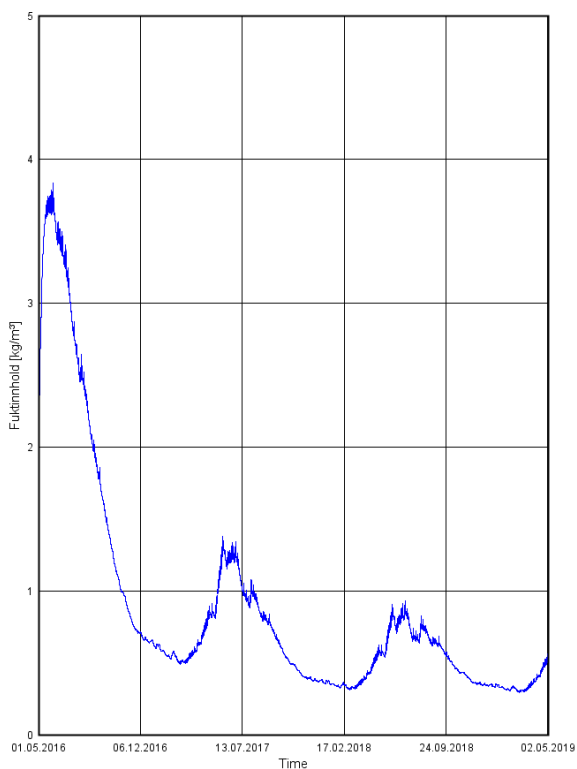
Tromsø



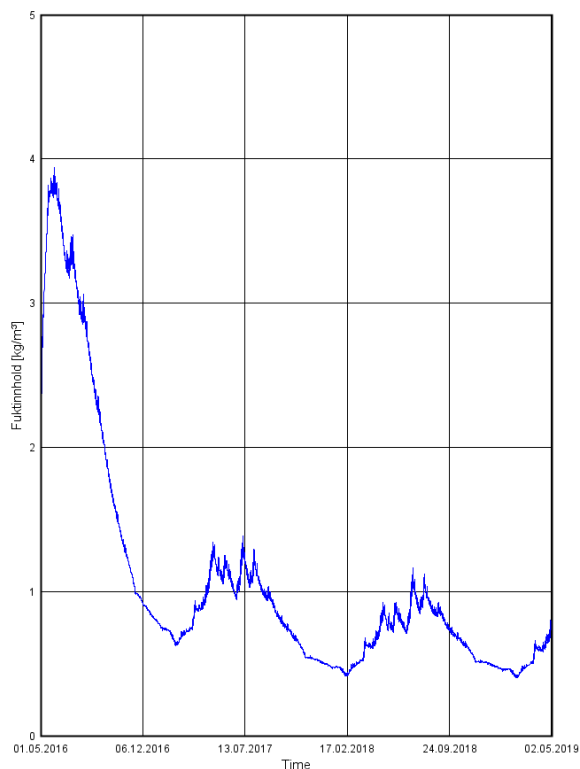
Bergen



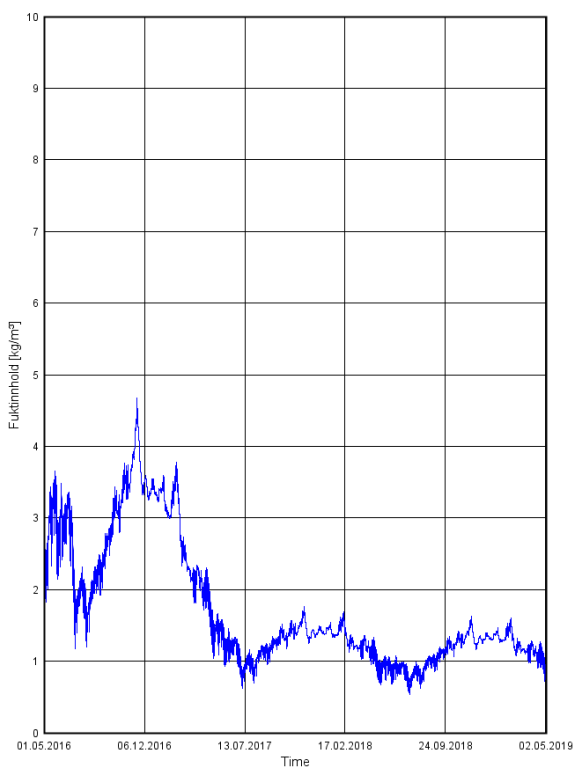
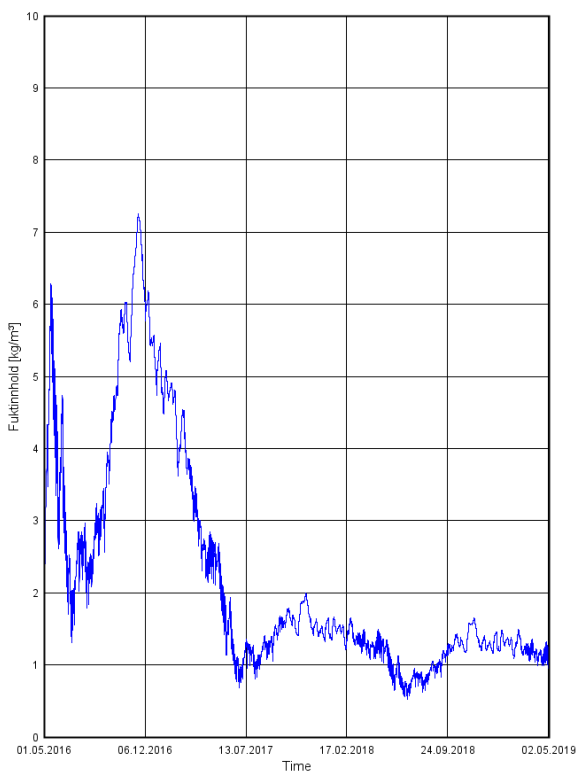




Tromsø

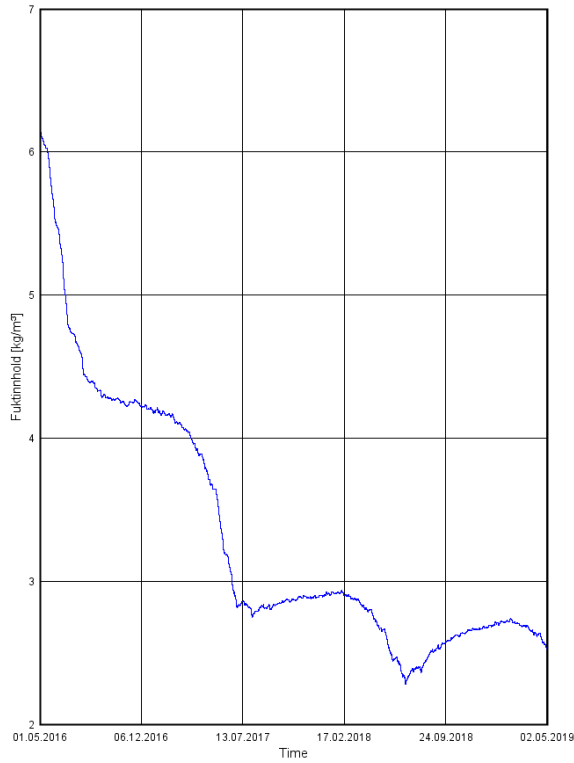


Bergen

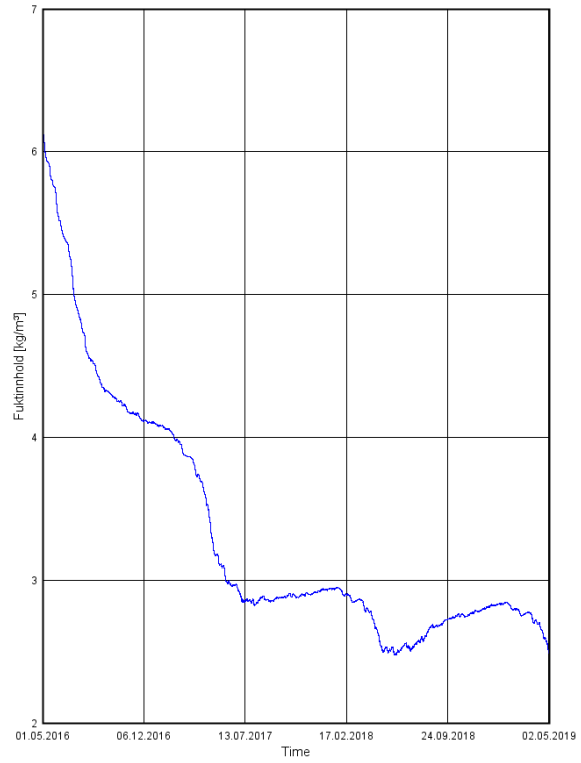


### 14.5 Vedlegg 5

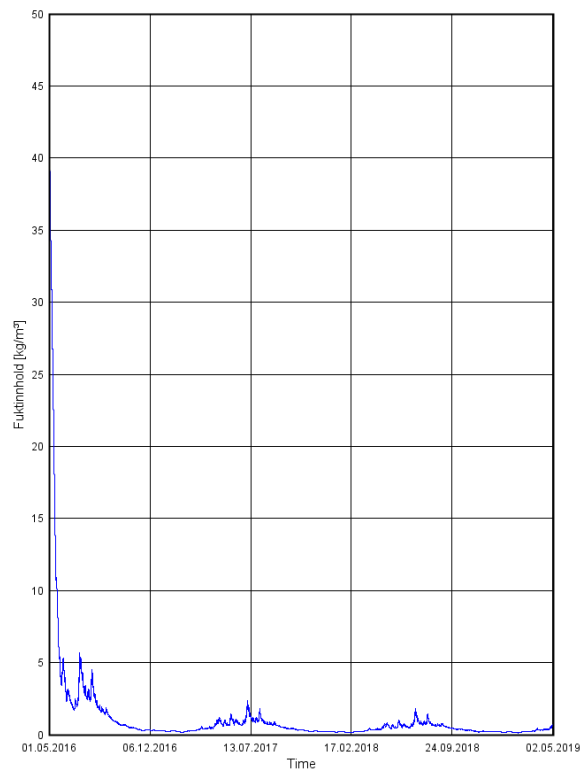
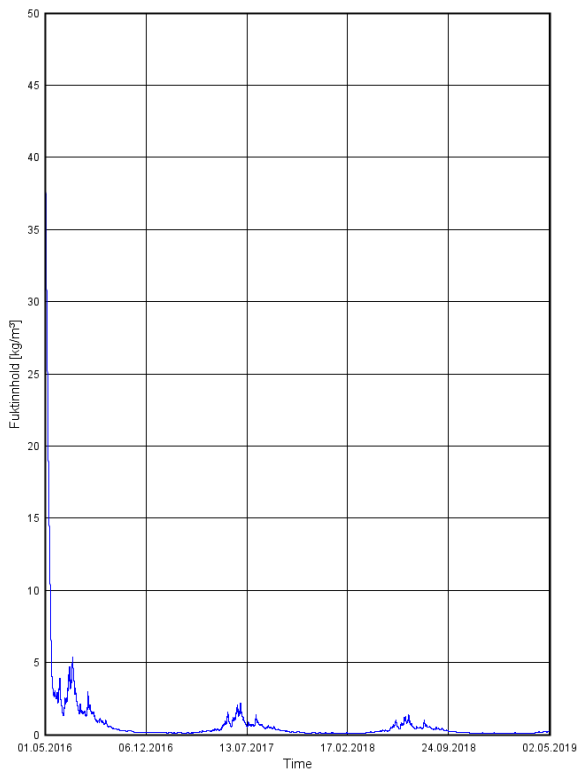
Resultatgrafer for trevegg orientert mot øst som viser totalt fuktinnhold og fuktinnhold i indre, midtre og ytre isolasjonssjikt.

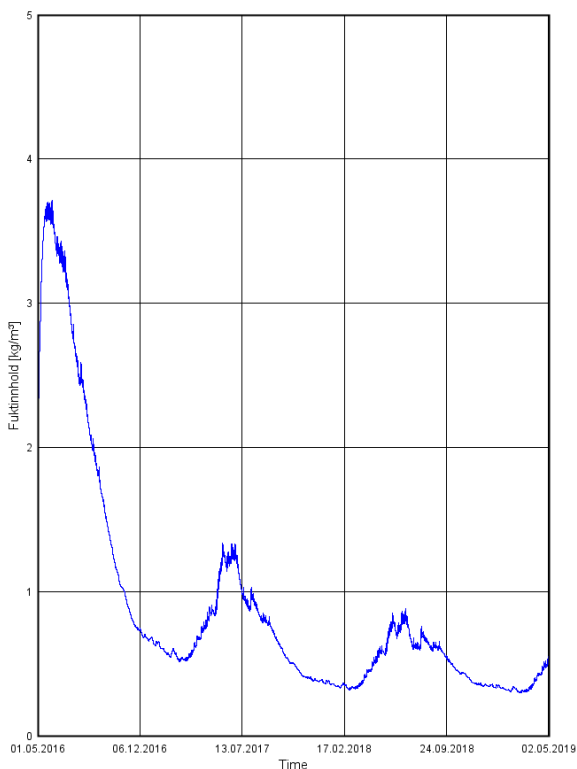


Tromsø

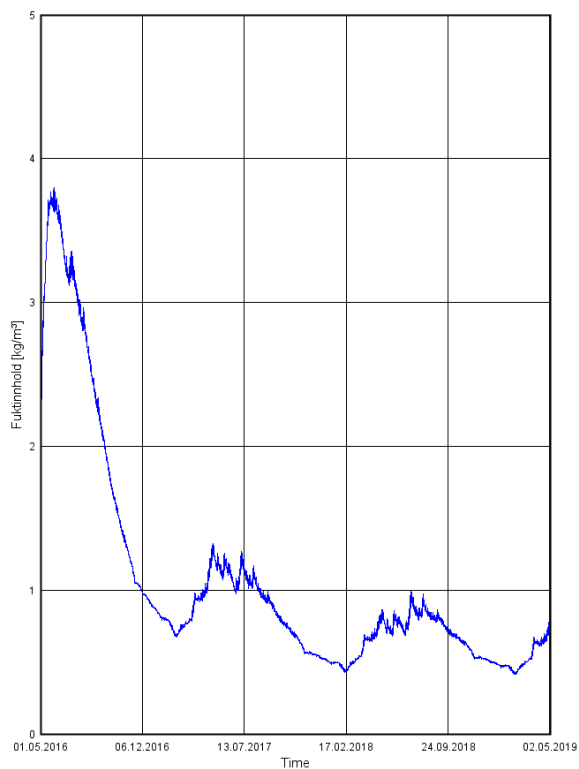


Bergen

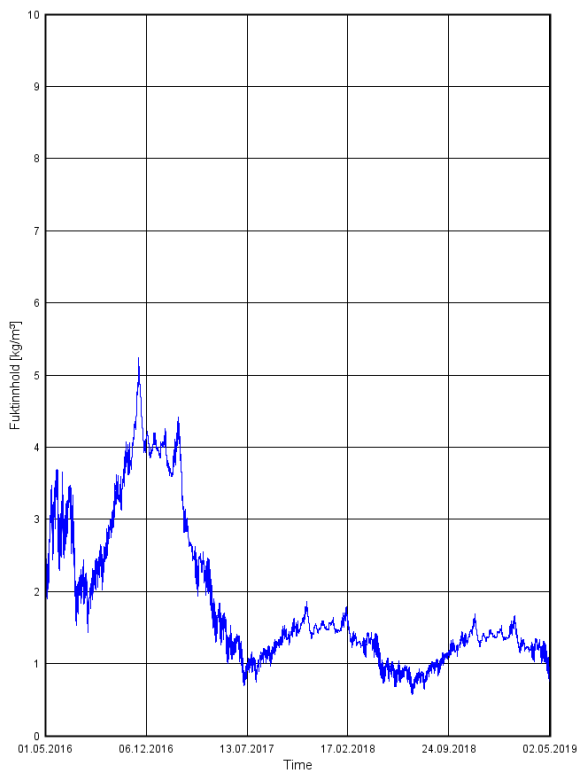
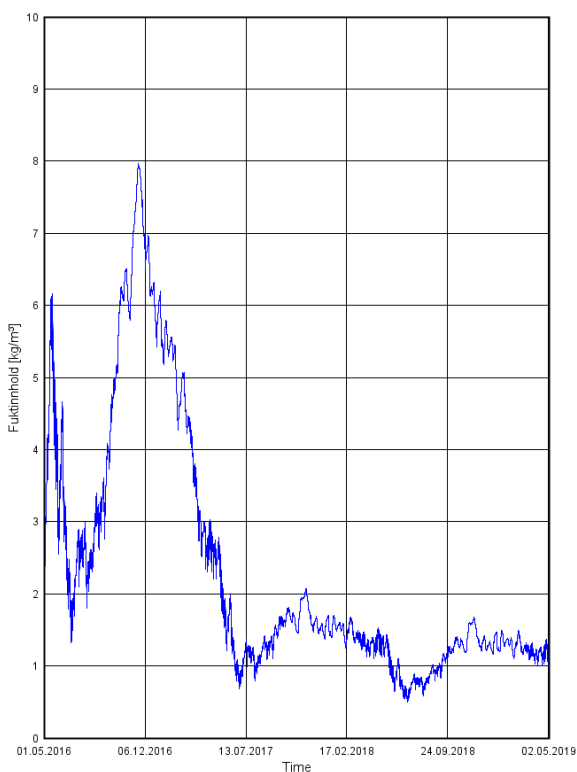




Tromsø

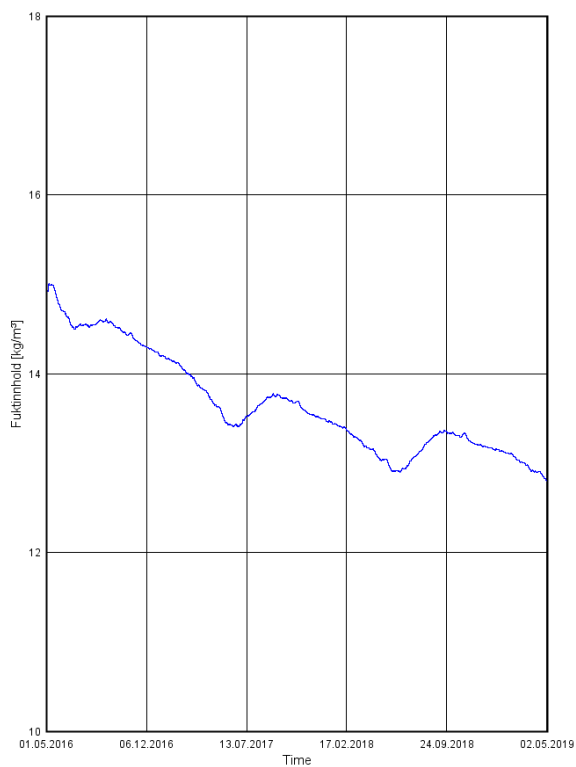


Bergen

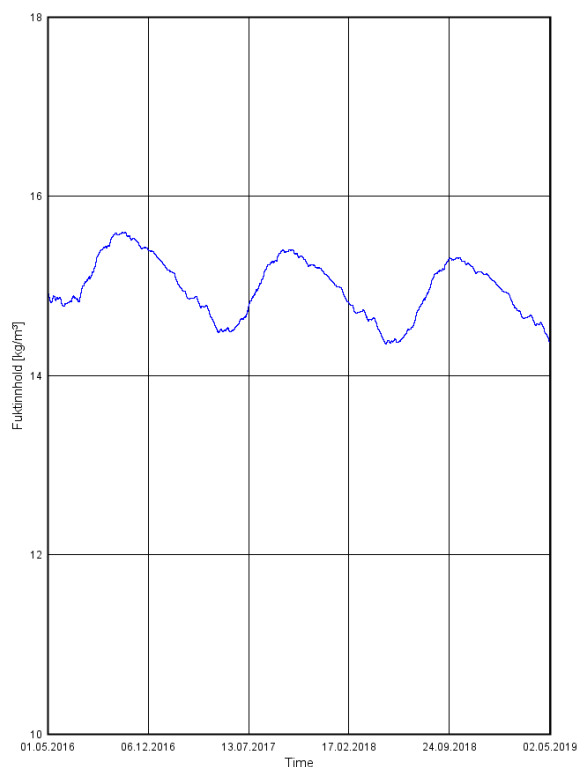


### 14.6 Vedlegg 6

Simuleringsresultat for totalt fuktinnhold sørvendt betongvegg i Tromsø og Bergen.



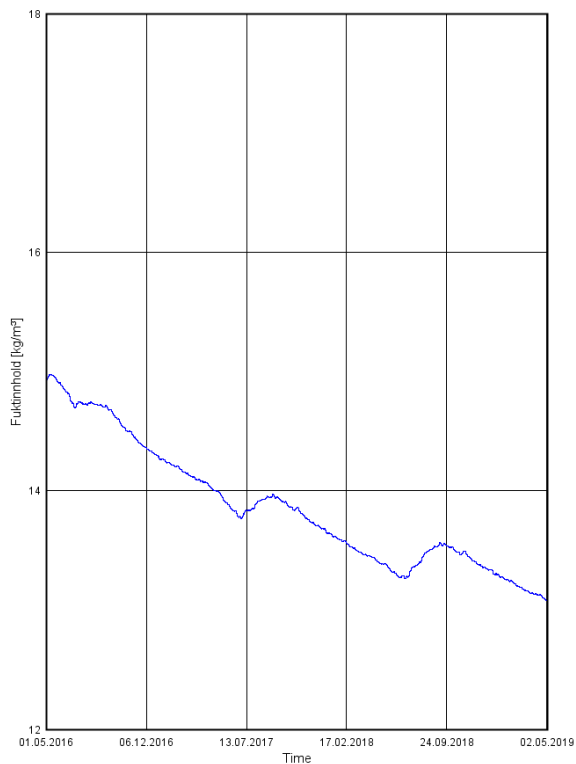
Tromsø



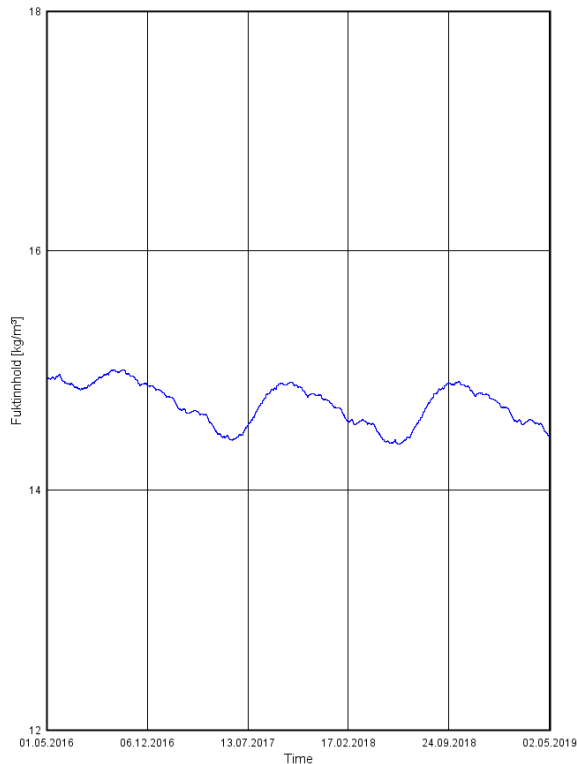
Bergen

### 14.7 Vedlegg 7

Simuleringsresultat for total fukttinnhold nordvendt betongvegg i Tromsø og Bergen.



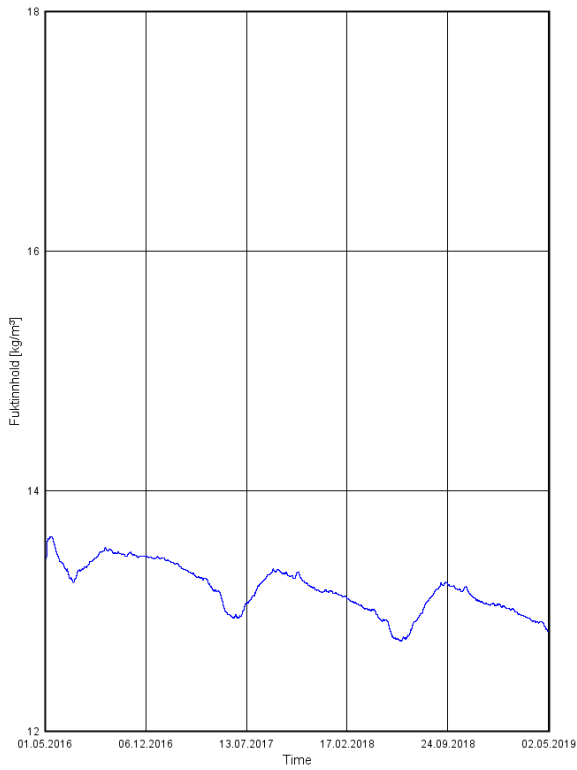
Tromsø



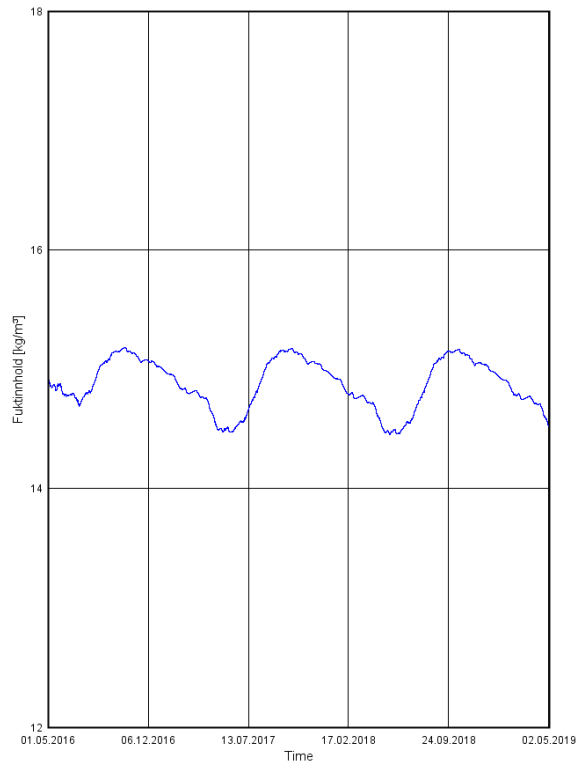
Bergen

### 14.8 Vedlegg 8

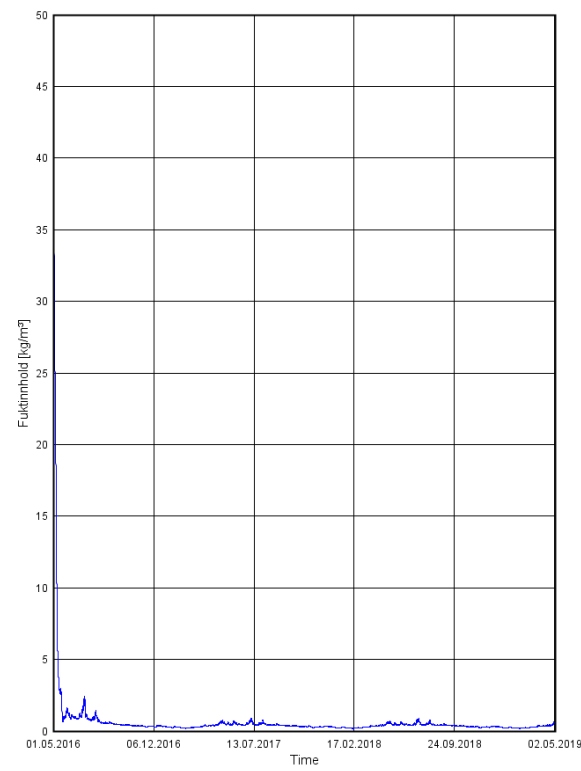
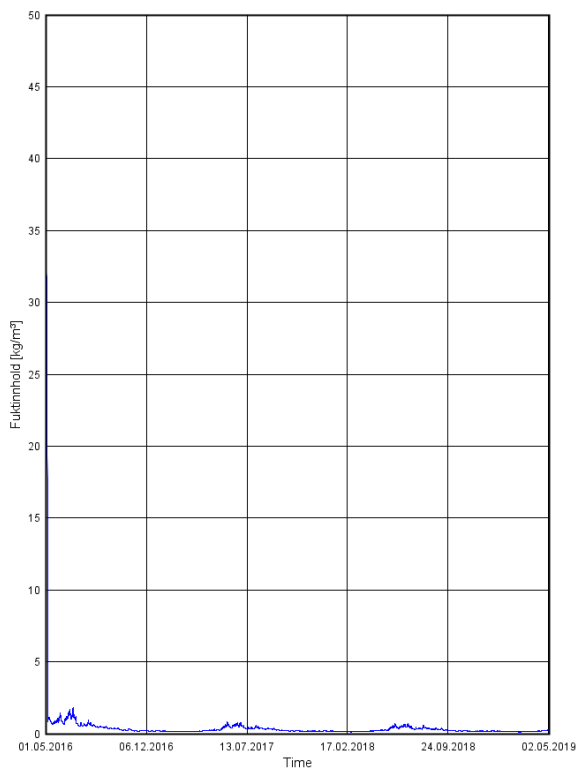
Resultatgrafer for betongvegg orientert mot vest som viser totalt fuktinnhold og fuktinnhold i indre, midtre og ytre isolasjonssjikt.

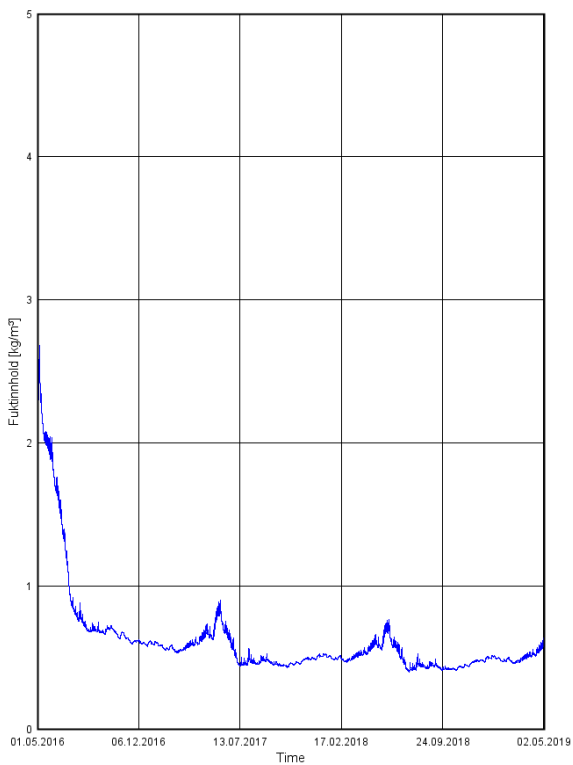


Tromsø

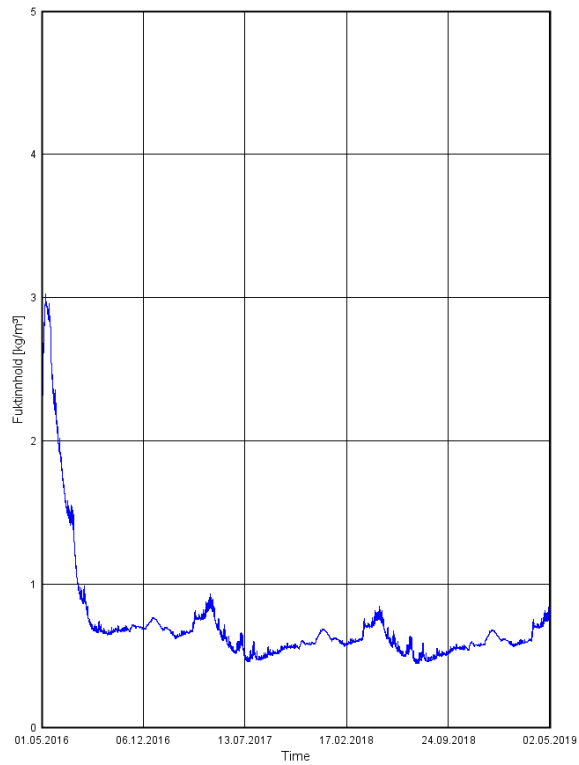


Bergen

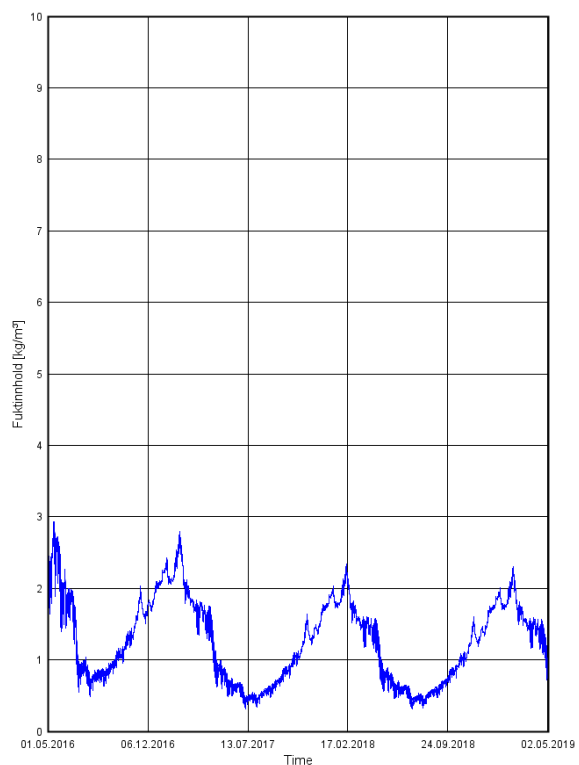
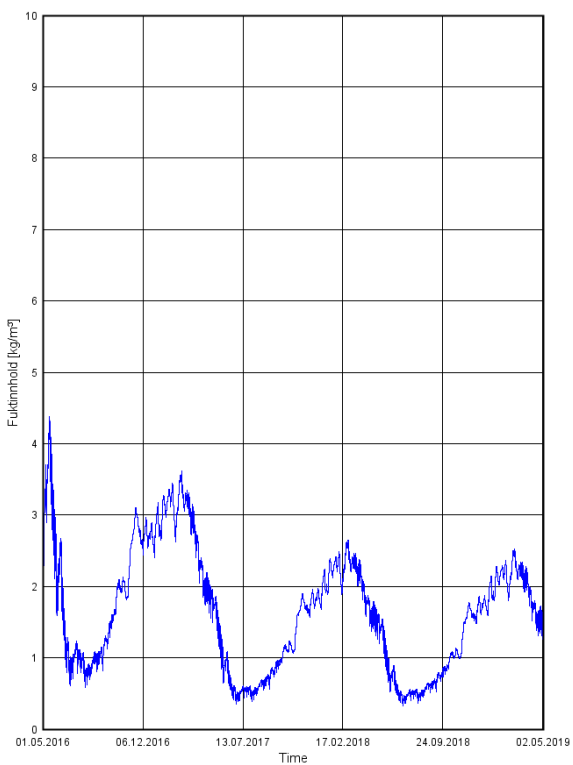




Tromsø

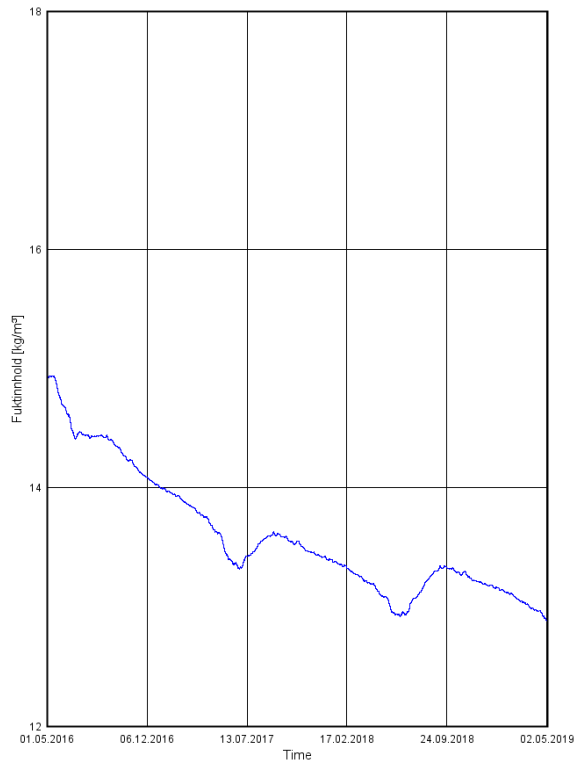


Bergen

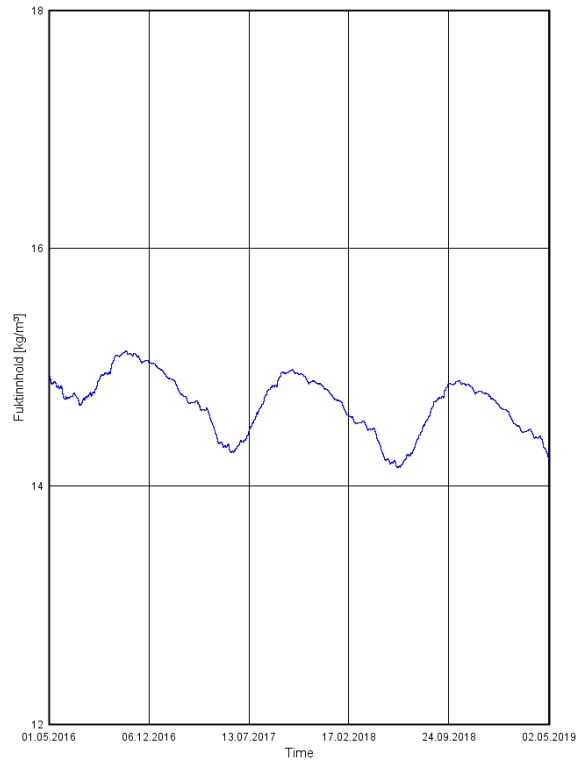


### 14.9 Vedlegg 9

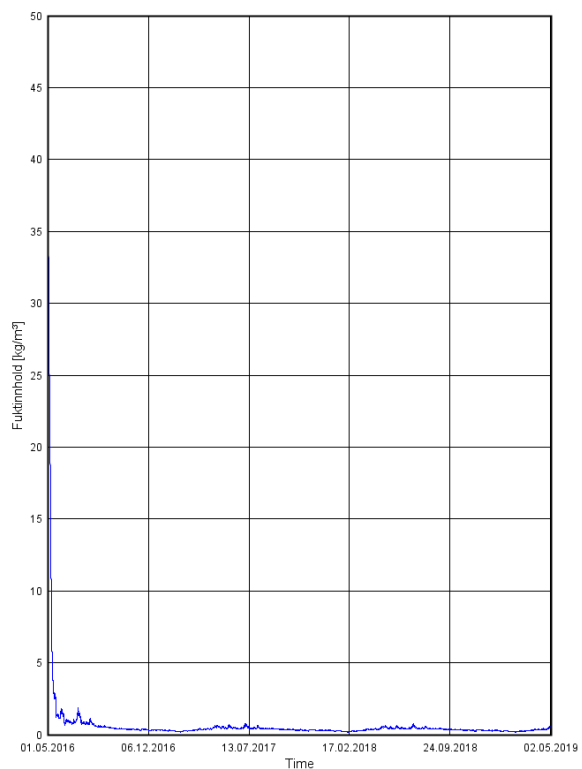
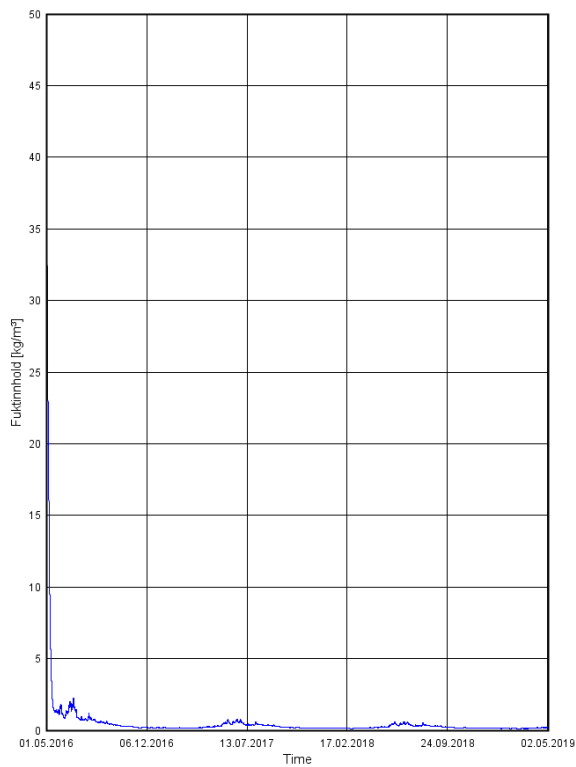
Resultatgrafer for betong orientert mot øst som viser totalt fuktinnhold og fuktinnhold i indre, midtre og ytre isolasjonssjikt.



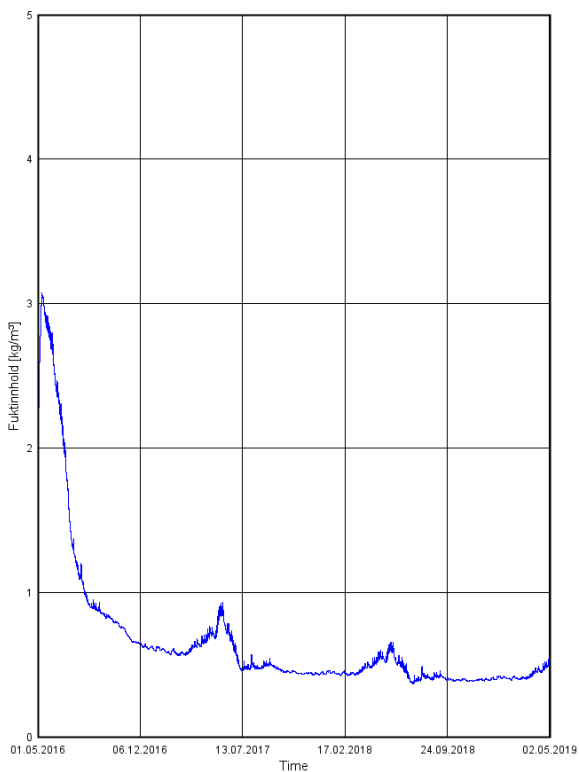
Tromsø



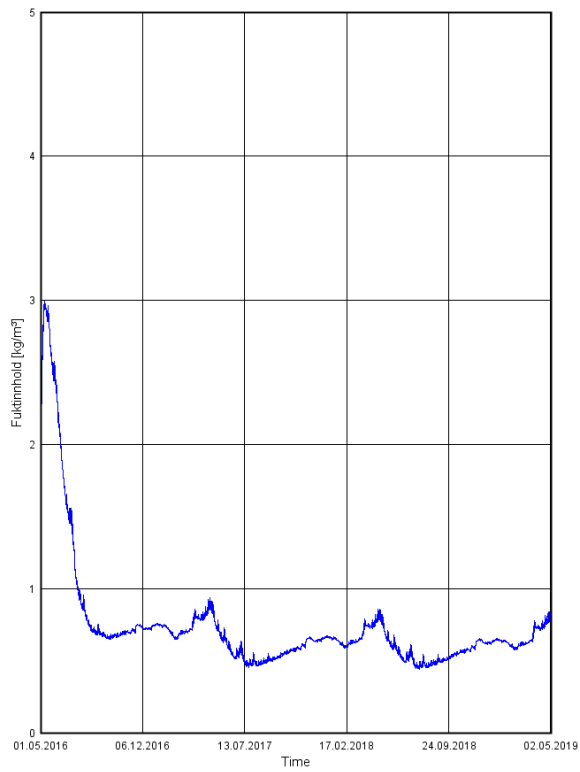
Bergen



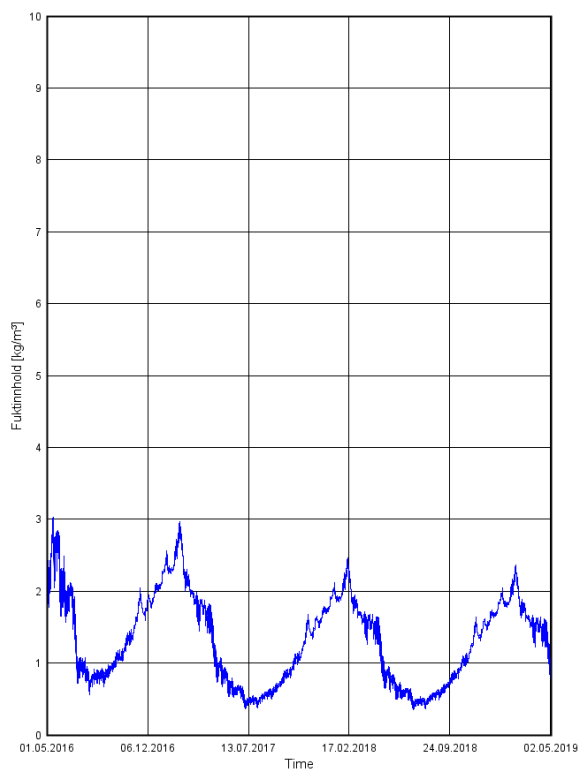
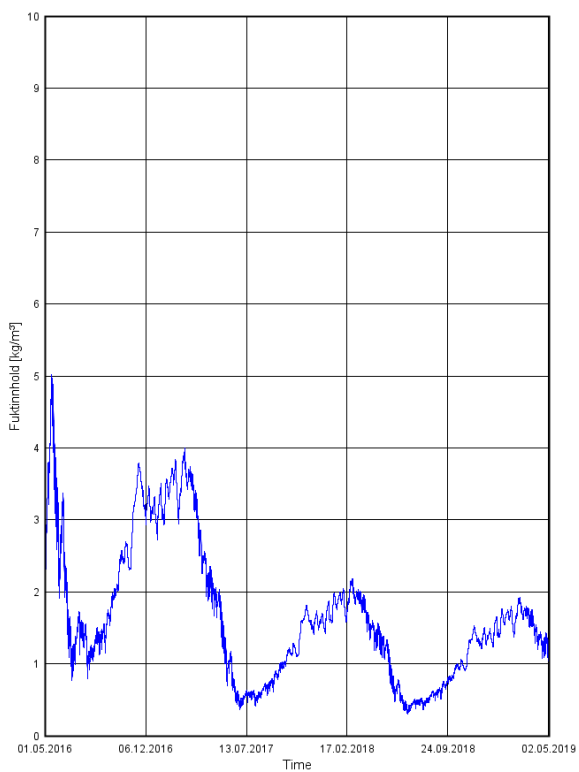




Tromsø



Bergen



# Vind- og fukttetthet for yttervegg i lavenergi og passivhus

stud. techn. Øyvind Johansen (500968)

*UiT Norges arktiske universitet  
Master studieprogram for Integrert bygningsteknologi*

*Våren-2016*

This document is the formal assignment and task description for a master's thesis project at University of Tromsø (UiT). The master's thesis project may be given in collaborating with industry partner or external research institute.

Changes may be done with respect to the content and extent of the project. The given title of this master thesis project is to be regarded as a working title and may be slightly change during this project. However, such changes should be discussed with all parties and must be approved by the main supervisor at the UiT.

## Bakgrunn

Passivhus er et begrep og et konsept som ble lansert i Tyskland på 1990-tallet. Passivhus instituttet (Passivhaus Institut) ved dr. Wolfgang Feist har stått bak denne utviklingen.

Konseptet har etter hvert fått stor utbredelse over en rekke land i Europa og deriblant Norge. Passivhus-konseptet benytter passive tiltak som ekstra varmeisolasjon, ekstra god tetthet, gode vinduer, utnyttning av solenergi og varmegjenvinning. Disse tiltakene skal redusere energibehovet på en helhetlig og god måte uten å gå på bekostning av innemiljøet. I 2010 fastsatte Norge en egen Norsk standard for passivhus og lavenergibygninger som omhandler boliger, og i 2012 kom det en tilsvarende Norsk standard som gjelder for yrkesbygninger. Standardene inneholder kriterier for blant annet passivhus og kan benyttes for prosjektering, sertifisering og dokumentasjon. I dag (2016) er det et frivillig valg om man ønsker å bygge passivhus, eller lavenergibygning.

Norge har i dag en målsetting om å føre en aktiv nasjonal klimapolitikk og det forsøkes et bredt sett av virkemidler for å redusere de nasjonale utslippene.

Historisk så har energireglene i byggeteknisk forskrift vært knyttede til varmegjennomgangstall (U-verdi) i ulike bygningsdeler. Ved revideringer av forskriftskravene begynte man etter hvert å åpne for muligheten ved å bruke funksjonskrav, parallelt med de mer detaljerte spesifikasjonskravene til bygningsdeler.

Den ytre klimaskjermen er av stor betydning for energiregnskapet i bygningen. Nye byggeregler for lavenergi og passivhus vil stille større krav til vind- og fukttetthet og konstruksjonens varmeisolerende evner. I denne sammenhengen ønsker Consto AS å få undersøkt tetthet for aktuelle veggkonstruksjoner som følge av lokalisering i ulike klimasoner (kystklima, innlandsklima, ved varierende temperatursoner, små temperaturforskjeller) og orientering av vegg ift himmelretning.

## Hovedproblemstilling

Markedet har allerede til stor grad tilpasset seg å bygge i henhold til passivhusstandard. **Hovedproblemstillingen i denne masteroppgaven er å undersøke/analysere vind- og fuktighet for aktuelle veggkonstruksjoner ved ulike klimatisk påvirkning. Dette i forhold til vegger av tre og betong.**

**Utgangspunktet er belastning som følge av lokalisering i norske klimasoner og orientering av vegg ift himmelretning.**

**Det skal gjøres en vurdering ift om det er bærekraftig og hensiktsmessig og ha lik utforming av yttervegg for lavenergi/passivhus over hele Norge eller om det bør være lokal tilpasning.**

## Prosjektbeskrivelse masteroppgave

✳ **Innledende arbeid & forstudie** relatert til den aktuelle oppgaven, en naturlig forberedelse og klargjøring av det videre arbeid i prosjektet:

- Generell analyse av oppgavens problemstillinger.
- Undersøkelse/analyse av aktuelle kravspesifikasjoner, retningslinjer, praktiske erfaringer og anbefalinger ift til oppbygning av yttervegg for lavenergi og passivhus.
- State-of-the-art undersøkelse med hensyn til eventuelle alternative byggtekniske tekniske løsninger.
- Klarere definisjon i forhold til begrensinger og omfang av oppgaven.
- Klargjøring/beskrivelse av de arbeidsoppgaver som må gjennomføres for løsning av oppgaven med definisjoner av arbeidsoppgavens innhold og omfang.
- Tidsplan for framdriften av prosjektet.

✳ **Vurdere varmetransport i aktuelle veggkonstruksjoner (U-verdi).** Der hvor oppgitt U-verdi er usikker, utføres det kontrollerende/verifiserende beregninger med Simien.

✳ **Vurdere effekter av fukt og utettheter på varmetransport i aktuelle veggkonstruksjoner**

- a. Innsamling av tilgjengelige erfaringsdata
- b. Modellering av varmetransport med simuleringsprogram (hvis tilgjengelig)
- c. Fysiske forsøk i klimalab på utvalgte veggelementer

✳ **Vurdering og analyse av resultater**

✳ **Forslag til eventuelt fremtidig/gjenstående arbeid**

***En mer detaljert prosjektbeskrivelse vil følge av det innledende arbeide & forstudie.***

## Begrensning av oppgaven/prosjekt

Oppgaven tar for seg et begrenset antall veggtyper. Dette i samråd med veiledere. Det skal ikke utføres vurdering/analyse av total energi økonomiske- og kostnadmessige konsekvenser som følge av valg av løsning. Kostnadmessige betraktninger kan der det er hensiktsmessig, inkluderes mht. den enkelte byggetekniske løsning.

En videre beskrivelse av begrensninger i oppgaven vil bli utarbeidet i det innledende arbeid & forstudie.

## Innledende arbeid & forstudie

Innen 4 uker etter at oppgaveteksten er utlevert skal resultatene fra det innledende arbeid og litteraturstudium være ferdigstilt og diskuteres med veilederne. Arbeidsplan og planlagte arbeidsoppgaver skal godkjennes av veilederne før kandidaten fortsetter med resten av hovedoppgaven. **Resultater fra det innledende arbeid inkluderes naturlig inn i innledningen og andre kapitler i masteroppgaven, dvs det trenger ikke være utformet en egen forstudierapport.**

## Generelle krav til rapportering/besvarelse

Besvarelsen redigeres som en forskning/utviklingsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, referanser, innholdsfortegnelse etc. Påstander skal begrunnes ved bevis, referanser eller logisk argumentasjonsrekker. Måleresultatene vedlegges i både skriftlig og digitalt format.

Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig, velskrevet og godt dokumentert.

Materiell som er utviklet i forbindelse med oppgaven, så som programvare/kildekoder eller fysisk utstyr, er å betrakte som en del av besvarelsen. Dokumentasjon for korrekt bruk av dette skal så langt som mulig også vedlegges besvarelsen. Oppgaveteksten skal vedlegges besvarelsen.

## Generelle retningslinjer

Dersom oppgaven utføres i samarbeid med en ekstern aktør, skal kandidaten rette seg etter de retningslinjer som gjelder hos denne, samt etter eventuelle andre pålegg fra ledelsen i den aktuelle bedriften.

Kandidaten har ikke anledning til å foreta inngrep i den eksterne aktørs informasjonssystemer, produksjonsutstyr o.l. Dersom dette skulle være aktuelt i forbindelse med gjennomføring av oppgaven, skal spesiell tillatelse innhentes fra ledelsen.

Eventuelle reiseutgifter, kopierings- og telefon-/telefaksutgifter må bæres av studenten selv med mindre andre avtaler foreligger.

Hvis kandidaten, mens arbeidet med oppgaven pågår, støter på vanskeligheter som ikke var forutsatt ved oppgavens utforming, og som eventuelt vil kunne kreve endringer i eller utelatelse av enkelte spørsmål fra oppgaven, skal dette umiddelbart tas opp med veileder på UiT.

Arbeidet skal resultere i en sluttrapport med vedlagt CD/DVD som er grunnlag for evaluering og karaktersetting. Rapporten med tilhørende materiale skal leveres i en uinnbundet signert original som lett kan kopieres, samt tre innbundne kopier (evt. ekstern(e) samarbeidspartner(e)s materiell kommer i tillegg og skal overleveres av studenten selv), samt ett eksemplar av rapporten i pdf-format, fortrinnsvis på den vedlagte CD/DVD. Det skal benyttes standard forside som finnes på HiNs nett. **Det henvises forøvrig til skrevet «Generelle retningslinjer for hovedoppgaven, samt emnebeskrivelsen for hovedoppgave».**

Rapporten med tilhørende materiale skal innleveres (eventuelt poststemples) senest innleveringsdatoen til avdelingskontoret ved Avdeling for teknologi ved UiT.

Utleveringsdato (starttidspunkt): 11.01.2016

Innleveringsdato (deadline): 20.06.2016

### Kontaktinformasjon

Hovedveileder ved Høgskolen i Narvik

Professor Per-Arne Sundsbø, Dr. Ing.  
Telefon: (+47) 769 66257 / 92 46 34 30  
e-mail: psu002@uit.no

Med-veileder bedrift

Petter Wollan-Berg  
Prosjektleder Consto AS - Tromsø  
Telefon: (+47) 40 21 80 77  
e-mail: petter.berg-wollan@consto.no

Kandidat

Øyvind Johansen (500968)  
Telefon: (+47) 99 45 34 80  
e-mail: ojo005@post.uit.no / oyv.johansen@gmail.com