NTNU
Det skapende universitet

Smarte dampsperrer - betydningen av vinterforhold

Eirik Thorsrud

Bygg- og miljøteknikk
Innlevert: juni 2013
Hovedveileder: Stig Geving, BAT

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

NORGES TEKNISK-
NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET
INSTITUTT FOR BYGG, ANLEGG OG TRANSPORT

Oppgavens tittel: Smarte dampsperrer - betydningen av vinterforhold	Dato: 04.06.2013 Antall sider (inkl. bilag): 121			
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave	
Navn: Stud.techn. Eirik Thorsrud				
Faglærer/veileder: Stig Geving				
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere:				

Ekstrakt:

Tidligere studier har konkludert med at bruk av smarte dampsperrer i kompakttak kan medføre et stort uttørkingspotensiale i sommerhalvåret og dermed redusere fuktproblemer knyttet til slike tak. Det er imidlertid ikke studert hvordan de samme smarte dampsperrene vil fungere under nordiske vinterforhold - en periode hvor potensialet for utadrettet fukttransport er stort.

Denne rapporten har derfor til hensikt å undersøke hvordan ulike smarte dampsperrer fungerer under vinterforhold – altså om de er damptette nok til å forhindre kondens eller om takkonstruksjonene vil få en økning i fuktnivået?

I den forbindelse er det utført et litteraturstudie, en parameterstudie med WUFI 1-D og et laboratorieforsøk. Parameterstudien søker å kartlegge sensitive parametere for fuktopptak vinterstid, mens laboratorieforsøket vurdere effekten av lavt, middels eller høyt fukttilskudd i innelufta, for 12 takprøver med ulike typer smarte dampsperrer, ved vinterforhold.

Stikkord:

1. Smarte dampsperrer
2. Vinterforhold
3. WUFI
4. Laboratorieforsøk

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Norges Tekniske Naturvitenskapelige Universitet, våren 2013. Studiet er skrevet innenfor hovedprofilen Bygnings- og Materialteknikk ved Institutt for Bygg, Anlegg og Transport.

Studiet bygger videre på sivilingeniør Markus Stellanders masteroppgave våren 2012 og stud.tech Eirik Thorsruds prosjektoppgave høsten 2012. Begge disse studiene hadde til hensikt å undersøke en del aspekter knyttet til virkemåte, muligheter og begrensninger i forbindelse med bruk av smarte dampsperrer i kompakte tretak. Resultatene fra disse arbeidene var positive, spesielt med tanke på uttørkings-potensialet som oppstår om sommeren ved bruk av smarte dampsperrer. Studiene undersøkte imidlertid ikke sammenhengen mellom smarte dampsperrer og inn-virkning av vinterforhold. Hensikten med dette studiet er derfor å fullføre under-søkelsene, ved å gjennomføre simuleringer og labforsøk med smarte dampsperrer under vinterforhold.

Arbeidet med denne oppgaven har vært en lærerik og spennende prosess, med en god kombinasjon av praktisk arbeid i lab og teoretiske litteraturstudier og data-simuleringer. Med prosjektoppgave inne samme tema, skrevet høsten 2012, har jeg fått god kontinuitet og bred innsikt i arbeidet. Totalt sett har begge oppgavene gitt meg inngående kunnskap om smarte dampsperrer, et produkt som i byggebransjen fortsatt er nisjepreget og som enda ikke har fått ordentlig fotfeste.

Takk rettes til avdelingsingeniør Ole Aunrønning i forbindelse med laboratorieforsøket, forskningsassistent Anette Thomassen for en hjelpende hånd når jeg var bortreist, samt Bjørn Sætnan og Lars Askgaard for ekstern veiledning. En stor takk må også rettes til Oda Vardenær Lunder for mye tålmodighet og god forpleining i innspurten.

I tillegg ønsker jeg å rette en spesielt stor takk til veileder og professor Stig Geving ved Institutt for Bygg, Anlegg og Transport ved NTNU for stødig og god veiledning.

Trondheim, 04.06.2013

Eirik Thorsrud

Sammendrag

Tidligere studier av Stellander (2012) og Thorsrud (2012) har konkludert med at anvendelse av visse typer smarte dampsperrer, brukt i flate kompakttak, kan medføre et stort uttørkingspotensiale i sommerhalvåret og dermed redusere fuktproblemer knyttet til slike tak. Det er imidlertid ikke studert hvordan de samme smarte dampsperrene vil fungere under nordiske vinterforhold. I denne perioden vil det ofte være et potensiale for utadrettet fukttransport, på grunn av damptrykkforskjeller som oppstår når innelufta er varmere enn utelufta – altså mesteparten av tiden i Norge.

Denne rapporten har derfor til hensikt å undersøke hvordan ulike smarte dampsperrer som finnes på markedet i dag fungerer under vinterforhold – altså om de er damptette nok til å forhindre kondens eller om takkonstruksjonene vil få en økning i fuktnivået?

For å vurdere dette er det uført et litteraturstudie, en parameterstudie med WUFI 1-D og et laboratorieforsøk.

Litteraturstudie
Litteraturstudiet tar for seg tidligere undersøkelser knyttet til bruken av smarte dampsperrer om vinteren og hvordan dette påvirker fuktopptak i takkonstruksjoner. Resultater fra disse undersøkelsen tyder på at smarte dampsperrer generelt ikke fører til kritisk fuktopptak, men at dette er svært avhengig av uttørkingspotensialet som oppstår ved gunstige sommerforhold. Undersøkelsene viser også at dampmotstanden må være tilstrekkelig høy i de kaldere årstidene for å forhindre fuktopptak. For nordiske uteklimaer viser en av studiene betenkelige resultater med tanke på fuktnivå og i den samme studien anbefales det ikke å benytte smarte dampsperrer av polyamidfolie (PA-folie) folie nord for Bodø.

Parameterstudie
Parameterstudien ble gjennomført med det endimensjonale simuleringsprogrammet WUFI 1-D Pro 5.1, for å undersøke hvilke parametere en takkonstruksjon med smart dampsperre er spesielt sårbar for med tanke på fuktopptak. Det ble definert tre sensitive parametere som ble variert i forhold til en standardvariant, bestående av standard konstruksjonsoppbygging, uteklima Oslo, middels innvendig fukttilskudd og enten polyetylenfolie (PE-folie) eller en av de tre smarte dampsperrene Intello, Novaflexx eller AirGuard Smart.

Parameterstudien viste at parametervalget *uteklima* kan medføre betydelige forskjeller i fuktopptak. Spesielt fikk uteklimaene Tromsø, Røros og Trondheim et svært ugunstig fuktopptak vinterstid, i første omgang med tanke på redusert isolasjonsevne, men også i forhold til risiko for mugg- og råtevekst ved rette temperaturforhold.

For variasjoner av paremateren *innvendig fukttilskudd* viste simuleringene at betydningen av økt fukttilskudd må vurderes nøye og i kombinasjon med ugunstig klima, kan det medføre risiko for råte- og muggvekst i taktroa til slike kompakttak.

Ved å simulere en *konstruksjonsoppbygging* med innvendig nedforing på 5 cm økte fuktopptaket noe sammenlignet med standardvarianten, grunnet økt relativ fuktighet (RF) i sperresjiktet. Økningen medfører imidlertid ikke risiko i forhold til mugg- og råteskader, men fører til redusert isolasjonsevne.

For takkonstruksjonen med malt himling ble fuktopptaket vinterstid litt mindre sammenlignet med standardvarianten, samtidig som uttørkingen om sommeren ble noe redusert. Forskjellene var imidlertid så små at effekten av malt himling for uteklima Oslo, med middels fukttilskudd, er ubetydelig med tanke på fuktopptak.

Laboratorieforsøk

Hensikten med laboratorieforsøket var å undersøke hvordan 12 takprøver med forskjellige smarte dampsperrer, plassert i en rigg med konstant vinterklima på utsiden, reagerte på lavt, middels eller høyt fukttilskudd i innelufta. Basert på ukentlige veiinger av takprøvene over en ni ukers periode, ble fuktopptaket målt og en forenklet beregning av dampmotstanden til de ulike smarte dampsperrene utført.

Resultatene fra forsøket viste at effekten av innvendig fukttilskudd gir store utslag i fuktopptaket for de ulike smarte dampsperrene og at det er en sammenheng mellom fuktopptak og oppgitt dampmotstand fra produsentene. Videre viste det seg at den beregnete dampmotstanden jevnt over ble vesentlig lavere enn den oppgitte, trolig på grunn av forenklet beregningsmetode. Likevel viste også den beregnete dampmotstanden enn sammenheng med fuktopptaket, ettersom produktene med høyest beregnet dampmotstand fikk det laveste fuktopptaket.

Generelt viser denne studien at betydningen av vinterforhold må vurderes fra sted til sted, ettersom forskjellige uteklimaer gir svært ulikt potensiale for utadrettet fukt-transport. Videre har de forskjellige smarte dampsperren svært ulik dampmotstand for gitte RF-nivåer, hvilket medfører at noen av produktene generelt er bedre egnet for kaldt vinterklima, samtidig som andre ikke er like sensitive for variasjoner i innvendig fukttilskudd. Det er anbefalt at smarte dampsperrer bør ha en ekvivalent luft-lagstykkelse (S_d-verdi) på minimum 10 meter, i perioder der utadrettet damptrykk-gradient er høy og det følgelig oppstår et stort potensiale for fukttransport ut i takkonstruksjonen ved diffusjon.

Summary

Earlier studies by Stellander (2012) and Thorsrud (2012) have concluded that the application of certain types of smart vapour barriers, used in flat compact roofs, can lead to a high drying potential during the summer months and hence help to reduce moisture problems related to these types of roofs. However, no studies have been performed on how these smart vapour barriers will perform under a Nordic winter climate. This period will often produce a high potential for outward moisture transportation, caused by differences in water vapour pressure arising when inside air is warmer than outside air - i.e. most of the time in Norway.

Therefore, the purpose of this report is to investigate how different types of smart vapour barriers available in the market today will perform when subjected to winter conditions - are they vapour retardant enough to resist moisture accumulation, or will the roof structures experience an elevation of the moisture content?

To evaluate the former, a literary survey, a parameter study with WUFI 1-D and a laboratory experiment has been carried out.

Literature survey

The literature survey covers previous studies that have examined the use of smart vapour barrier during winter and how this affects the moisture content in a roof construction. The results from these studies suggests that smart vapour barriers generally do not lead to critical accumulation of moisture, but that this is strongly dependant on the drying potential that arises at certain conditions during summer. The studies also show that the water vapour resistance must be at an adequate level during the cold winter months, to prevent accumulation of moisture. One of the studies shows significant high results regarding moisture levels for Nordic outdoor climates, and in the same study, it is recommended not to use smart vapour barrier made up of polyamide foil (PA-foil) north of Bodø.

Parameter study

The parameter study was performed using the one dimensional numerical calculation program WUFI 1-D Pro 5.1, to see which parameters a roof construction using a smart vapour barrier is especially vulnerable to, regarding moisture accumulation. Three sensitive parameters were defined and were varied in relation to a standard variant, consisting of a standard construction, Oslo outdoor climate, and either a polyethylene foil (PE-foil) or one of the three smart vapour barriers; Intello, Novaflexx or AirGuard Smart.

The study showed that varying the parameter *outdoor climate* could induce significant changes in the moisture content. Especially the outdoor climates for Tromsø, Røros and Trondheim resulted in very undesirable levels of moisture content in wintertime, firstly regarding reduced insulation performances, but also regarding a high risk of rot and mold growth, appearing at certain temperatures.

By variation of the parameter *internal moisture supplement* the simulations showed that the effect of increased moisture supplement has to be considered carefully, and when combined with a unfavourable outdoor climate, this can lead to risk of rot and mold growth in the wooden sheating.

The simulations of the roof construction with 5 cm extra insulation on the inside, showed increased moisture accumulation compared with the standard variant, because of a higher relative humidity (RH) in the membrane. However this increase does not lead to risk of mold or rot damages, but will cause a reduced insulation performance.

For roof constructions with painted celling, the moisture accumulation during winter was lower compared to the standard variant, but at the same time the drying to the interior during summer was slightly reduced. However, the difference was insignificant and a painted celling, for outdoor climate Oslo with medium moisture supplement, therefore has a very low effect on the moisture content.

Laboratory experiments

The purpose of the laboratory experiments was to investigate how 12 roof configurations with different smart vapour barriers, placed in a test rig with constant winter climate on the outside, would react to low, medium or high moisture supplement in the indoor air. Based on weekly weighing over a test period of nine weeks, the moisture accumulation was measured and a simplified calculation of the water vapour resistance vas carried out.

The result from the experiment showed that the effect of moisture supplement causes big variations in moisture accumulation for the different types of smart vapour barriers and that there is as correlation between moisture accumulation and the given water vapour resistance from the manufactures. Further, the calculated water vapour resistance was consistently significant lower than the given water vapour resistance, likely due to the simplified calculations. Nevertheless, the calculated water vapour resistance showed a clear correlation with the moisture accumulation, since the smart vapour barrier with the highest calculated water vapour resistance also got the lowest moisture uptake.

Generally this study shows that the importance of winter conditions must be considered from place to place, since various outdoor climates give very different potential for outward moisture transportation. Further, the various types of smart vapour barriers have very different water vapour resistance for given levels of RH, with the result that some of the products is better suited for cold winter climates, while others are not that sensitive for different indoor moisture supplement. Because of this, it is recommended that a smart vapour barrier should have an equivalent air layer thickness (S_d-value) of at least 10 meters, during periods where the outward vapour pressure gradient is high, thus resulting in a high potential for moisture transportation into the roof construction by diffusion.

Innhold

Forord i

Sammendrag iii

Summary v

1. Innledning 1
- **1.1 Bakgrunn** 1
- **1.2 Tidligere arbeider** 1
- **1.3 Formål** 2
- **1.4 Begrensninger og avklaringer** 3
- **1.5 Rapportens oppbygning** 3

2. Innføring 5
- **2.1 Tradisjonell dampsperre** 5
- **2.2 Dampbremser** 6
- **2.3 Smarte dampsperrer** 7
  - 2.3.1 Generelt 7
  - 2.3.2 Intello 8
  - 2.3.3 Novaflexx 9
  - 2.3.4 Hygrodiode 9
  - 2.3.5 AirGuard Smart 9
- **2.4 Kompakte tretak** 10

3. Litteraturstudie 11
- **3.1 Begynnelsen** 11
- **3.2 Smarte dampsperrer i tak** 12
  - 3.2.1 Hygrodiode 12
  - 2.3.2 PA-folier 13
- **3.4 Oppsummering** 17

4. Parameterstudie i WUFI 18
- **4.1 Bakgrunn** 18
- **4.2 Beregningsprogram** 19
  - 4.2.1 Transportmekanismer og forenklinger 19
- **4.3 Beregningsoppsett** 20
  - 4.3.1 Takkonstruksjonen 20
  - 4.3.2 Starbetingelser 21
  - 4.3.3 Beregningsperiode 21
  - 4.3.4 Uteklima 21
  - 4.3.5 Inneklima 22
  - 4.3.6 Materialvalg 23
- **4.4 Parametervalg** 24
  - 4.4.1 Valg av parametere 24
  - 4.4.2 Beskrivelse av parametere 24
- **4.5 Beregningsvarianter** 26
- **4.6 Kritisk fukttilstand** 27
- **4.7 Resultater** 28

4.7.1 Standardvarianten 28
4.7.2 Uteklima 30
4.6.3 Fukttilskudd 41
4.6.4 Konstruksjonsoppbygging 46
4.7 Oppsummering og konklusjon 48

5. Laboratorieforsøk 51
5.1 Hensikt 51
5.2 Forsøksriggen 51
5.3 Takprøvene 52
5.3.1 Taktekning - IKEA oppbevaringsboks 54
5.3.2 Fuktabsorberende materiale 54
5.3.3 Isolasjon 54
5.3.4 Dampsperrer 55
5.3.5 Himling 55
5.4 Klimaforhold 56
5.5 Målemetoder 57
5.5.1 Veiing 57
5.5.2 RF- og temperatursensorer 58
5.6 Måleusikkerheter og forenklinger 58
5.7 Resultater og vurdering 59
5.7.1 Syklus 1 – lavt fukttilskudd 61
5.7.2 Syklus 2 – middels fukttilskudd 67
5.7.3 Syklus 3 – høyt fukttilskudd 72
5.8 Oppsummering og konklusjon 77

6. Konklusjon 79

7. Videre arbeider 81

Referanser 83

Vedlegg A 87
Beregningsvariant 2 – Trondheim 87
Beregningsvariant 3 – Bergen 87
Beregningsvariant 4 – Røros 88
Beregningsvariant 5 – Tromsø 88
Beregningsvariant 6 – Holzkirchen 89
Beregningsvariant 7 – Stockholm 89
Beregningsvariant 8 – lavt fukttilskudd 90
Beregningsvariant 9 – høyt fukttilskudd 90
Beregningsvariant 10 – inntrukket dampsperre 91
Beregningsvariant 11 – malt himling 91

Vedlegg B 92
Intello i Trondheim - 10 års beregningstid 92
Intello i Røros - 10 års beregningstid 93
Intello i Tromsø - 10 års beregningstid 94
Novaflexx i Røros - 10 års beregningstid 95
Novaflexx i Tromsø - 10 års beregningstid 96

Vedlegg C **97**
Intello i Trondheim - RF og temperatur i taktro 97
Intello i Bergen - RF og temperatur i taktro 98
Intello i Røros - RF og temperatur i taktro 99
Intello i Tromsø - RF og temperatur i taktro 100
Novaflexx i Trondheim - RF og temperatur i taktro 101
Novaflexx i Bergen - RF og temperatur i taktro 102
Novaflexx i Røros - RF og temperatur i taktro 103
Novaflexx i Tromsø - RF og temperatur i taktro 104

Vedlegg D **105**
RF i sperresjiktet ved lavt fukttilskudd 105
RF i innelufta ved høyt og lavt fukttilskudd 106

Vedlegg E **107**
Snittegning av forsøksrigg 107

Vedlegg F **108**
Beregnete S_d-verdier for syklus 1 108
Beregnete S_d-verdier for syklus 2 109
Beregnete S_d-verdier for syklus 3 109

1. Innledning

Dette kapittelet omhandler rammene og bakgrunnen for studiet. Først presenteres bakgrunnen for studiet og tidligere arbeider knyttet til samme tema. Deretter blir studiets formål presentert, med påfølgende avgrensninger og avklaringer. Tilslutt presenteres strukturen og kapittelinndelingen for oppgaven.

1.1 Bakgrunn

Det norske klimaet er svært variert, med tidvis mye kulde og nedbør, og byr derfor på forholdsvis store utfordringer når det gjelder varmeisolering og fuktsikring av bygninger. Ved anvendelse av tilnærmet damptette materialer på begge sider av en konstruksjon, vil eventuelt lekkasjevann eller innebygget fukt ha svært begrenset muligheten til å tørke ut – verken utover mot utelufta eller innover mot innelufta. Bruken av mer dampåpne sperresjikt på innsiden, med mulighet for uttørking innover om sommeren, samtidig som de er tilstrekkelig damptette til å hindre kondens om vinteren, har derfor fått økt fokus de senere år. Slike sperresjikt omtales gjerne som smarte dampsperrer, ettersom de har evnen til å variere dampmotstand avhengig av luftas relative fuktighet (RF).

1.2 Tidligere arbeider

Stellander skrev høsten 2011 prosjektoppgaven ”Litteratundersøkelse vedrørende smarte dampsjikt med uttørkingsmulighet mot innelufta” og våren 2012 master-oppgaven ”Smarte dampsperrer med uttørkingsmulighet mot innelufta”. Stellanders prosjektoppgave hadde til hensikt å skaffe en oversikt over hvilke smarte dampsperrer som er kommersielt tilgjengelig og vurdere aktuelle bruksområder for disse. I tillegg ble måleresultater fra tidligere felt- og beregningsstudier undersøkt.

I Stellanders masteroppgave ble uttørkingsevnen til kompakte lette tretak med forskjellige dampsperrer testet i et laboratorieforsøk. Smarte dampsperrer viste gjennomgående bedre uttørkingsevne sammenlignet med bruk av tradisjonell poly-etylenfolie (PE-folie), ettersom de smarte dampsperrer tillot uttørking mot innelufta om sommeren (Stellander, 2012). Det ble imidlertid konkludert med at uttørkings-potensialet er svært avhengig av uteklima, og særlig mengde solinnstråling, for at innadrettet fukttransport skal forekomme.

Thorsruds prosjektoppgave, skrevet høsten 2012, videreførte arbeidet gjort av Stellander, ved å undersøke hvorvidt de samme smarte dampsperrene oppnår tilstrekkelig uttørking ved redusert soloppvarming. Hovedformålet for å benytte smarte dampsperrer er mulighet det gir en oppfuktet konstruksjonen til å tørke ut til innelufta i sommerperioder eller mer generelt; i perioder der overflatetemperaturen på taktekningen er høyere enn temperaturen i innelufta og det dermed skapes et innadrettet uttørkingspotensiale.

For å undersøke effekten av redusert soloppvarming ble det derfor utført en parameterstudie med fuktbergeningsprogrammet WUFI 1-D og utført forsøk i laboratorium. I laboratorium ble det kjørt forsøk på 12 takprøver som simulerte kompakte lette tretak med høyt innebygde vanninnhold i taktroa (ca. 30 vektprosent). Disse takprøvene ble påmontert fire forskjellig forskjellige smarte dampsperrer.

Resultatene fra labforsøket viste at to av de smarte dampsperrene (AirGuard Smart og Novaflexx) ga meget god uttørking og dermed fungerte hensiktsmessig. De to andre smarte dampsperrene (Hygrodiode og Intello) ga ikke like god uttørking. Det ble imidlertid ikke testet hvordan de smarte dampsperrene vil fungere under vinterforhold, der innetemperaturen normalt er vesentlig høyere enn utetemperaturen og det dermed oppstår potensiale for utadrettet fukttransport.

1.3 Formål

Hovedhensikten med denne masteroppgaven er derfor å undersøke virkemåte, muligheter og begrensninger ved bruk av smarte dampsperrer i kompakte lette tretak under vinterforhold.

Under vinterforhold er det svært viktig at den smarte dampsperra fungerer som en tradisjonell dampsperre, med høy vanndampmotstand. Er ikke vanndampmotstanden til den smarte dampsperra høy nok, vil fuktig inneluft kunne trenge ut i ytterkonstruksjonen, med fare for kondens og påfølgende risiko for mugg- og råteskader.

Generelt skal smarte dampsperrer ha størst dampmotstand om vinteren, når RF i innelufta er lavest. Men dersom luftfuktigheten inne er høy, samtidig som innetemperaturen er vesentlig høyere enn utetemperaturen, vil det oppstå et potensiale for utadrettet fuktransport. Dampmotstanden kan i slike tilfeller bli så lav at den ikke lenger er tett nok til å forhindre vanndampdiffusjon fra innelufta.

Videre vil det være flere faktorer som kan ha betydning for vanndampmotstand og fuktopptak vinterstid. Ulike konstruksjonsoppbygninger, som for eksempel nedforing på innsiden (varm side) av sperresjiktet med ekstra isolasjon, vil for eksempel kunne føre til høyere RF ved den smarte dampsperra og dermed lavere dampmotstand. Forskjellige typer smarte dampsperrer har også forskjellig dampmotstand ved gitte RF-nivåer og dermed varierende risiko for kondens. Hvilke uteklima takkonstruksjonen er plassert i vil også kunne påvirke fuktopptaket, ettersom forskjellige uteklimaer kan har store variasjoner i utetemperatur og globalstråling.

For å kunne vurdere slike faktorer er det utført et litteraturstudie, en parameterstudie med WUFI 1-D og et laboratorieforsøk, der fuktopptak vinterstid ved bruk av ulike smarte dampsperrer er undersøkt, testet og vurdert.

1.4 Begrensninger og avklaringer

Dette studiet er skrevet i løpet av perioden 14. januar til 3. juni og følgelig stammer de fleste avgrensinger fra et tidsperspektiv. Selv om dette er en selvstendig rapport, som skal kunne leses uavhengig av tidligere arbeider, bygger den på sentrale deler av studiene til både Stellander og Thorsrud.

I kapitel 2 presenteres ulike typer sperreprodukter og oppbygningen av kompakttak. Dette bygger direkte på stoff fra Thorsruds "Smarte Dampsperrer – betydningen av skyggeforhold" (2012) og siden det ikke har skjedd vesentlige forandringer knyttet til disse temaene siden oppgaven ble skrevet, er dette stoffet i stor grad uendret.

Kapitel 3 tar for seg tidligere studier knyttet til bruken av smarte dampsperrer. Mesteparten av dette er stoff er tidligere omtalt av Stellander (2011 & 2012), men presenteres også her, for å gi denne oppgaven den nødvendige bakgrunns-informasjonen.

Av hensyn til studiets totale tidsomfang er datasimuleringene i kapitel 4 begrenset til 11 beregningsvarianter. Omfanget av labforsøket i kapitel 5 er begrenset noe på grunn av ressursbegrensinger.

1.5 Rapportens oppbygning

Etter dette innledende kapitelet, er resten av studiet inndelt i fem hovedkapitler (nivå 1), med tilhørende underkapitler (nivå 2 og 3), slik figur 1 viser.

Kapitel 2 gir en innføring i ulike sperreprodukter ment for innvendig bruk og opp-byggingen til et kompakt lett tretak, og bygger direkte på Thorsruds prosjektoppgave (2012).

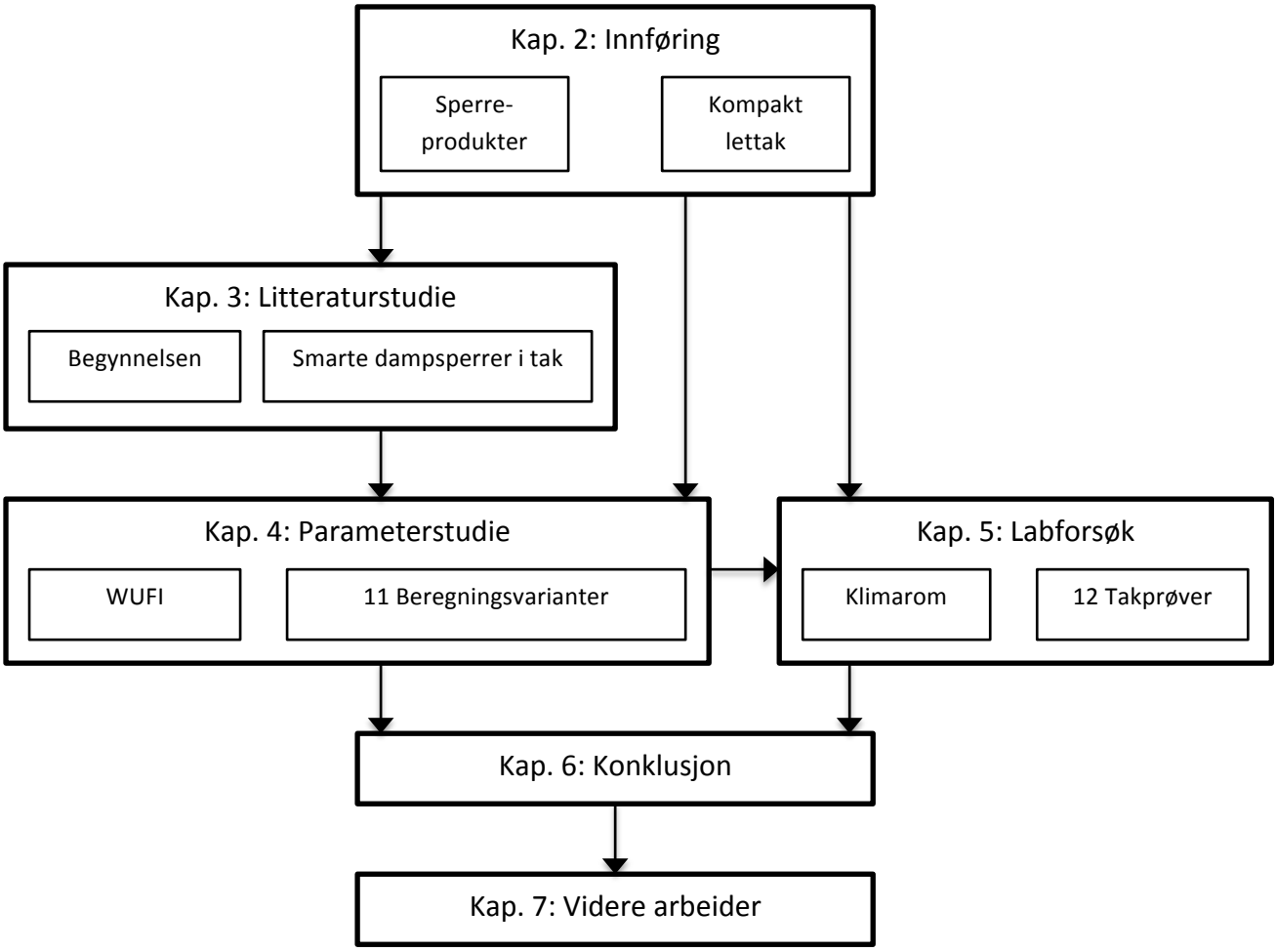
Kapitel 3 tar for seg et litteraturstudie knyttet til bruken av smarte dampsperrer brukt eller testet under vinterforhold.

Kapitel 4 presenterer beregninger gjort med simuleringsprogrammet WUFI 1-D. Denne delen søker å kartlegge forventet fuktakkumulasjon i kompakte lette tretak ved bruk av forskjellige smarte dampsperrer under vinterforhold og definere sensitive parametere for et slikt fuktopptak.

Data fra simuleringene blir videre brukt som grunnlag og kontroll for oppsett av laboratorieforsøket, presentert i kapitel 5. I laboratorieforsøket blir ulike smarte dampsperrer, samt tradisjonell PE-folie, testet for å se hvordan de fungerer under vinterforhold og ved tre forskjellige nivåer av innvendig fukttilskudd.

Avslutningsvis følger kapitel 6 med oppsummering og konklusjon.

I kapitel 7 blir tilslutt muligheter for videre arbeider rundt temaet smarte dampsperrer belyst.



Figur 1: Struktur for studiet.

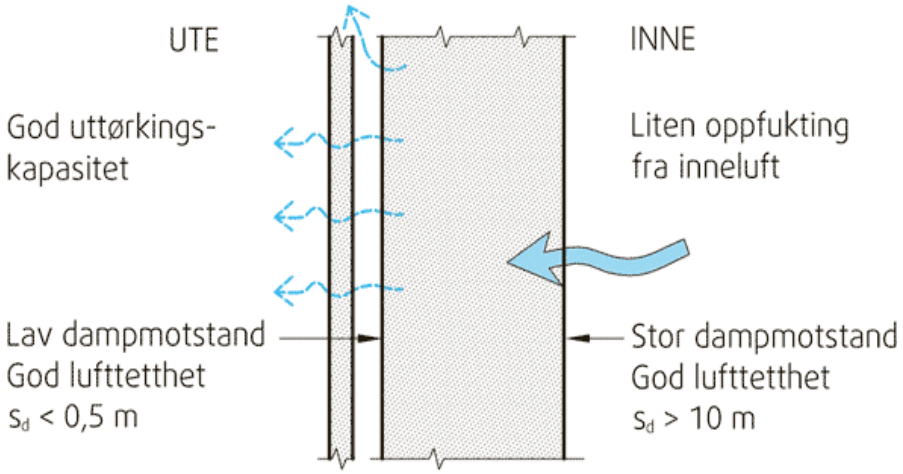
2. Innføring

I det følgende vil ulike sperreprodukter for innvendig bruk presenteres. Først presenteres tradisjonell dampsperre, deretter dampbrems og tilslutt generelt om smarte dampsperrer, med en spesifikk innføring i de smarte dampsperrene benyttet i dette studiet. Avslutningsvis blir oppbygning til et kompakt lett tretak vist.

2.1 Tradisjonell dampsperre

I de fleste konstruksjoner er det i dag vanlig å benytte en dampsperre på varm side (innsiden) av konstruksjonen, for å hindre fuktransport fra innelufta inn i ytter-konstruksjonen. Oppfukting av konstruksjonen vil i første omgang føre til redusert isolasjonsevne og dermed økt varmetap fra bygningen. I større omfang kan økt fukt-innhold føre til mugg- og råteskader, med ytterste konsekvens at den berørte bygningsdelen må rives.

Fuktig inneluft kan transporteres inn i ytterkonstruksjoner ved luftlekkasjer (konveksjon) og vanndampdiffusjon. For å stoppe slike fuktransporter anbefaler Sintef Byggforsk at det for generell bruk i bygningskonstruksjoner brukes en dampsperre med vanndampmotstand (diffusjonsmotstand, *z*) på minst 50 x 10^9 m^2sPa/kg, tilsvarende ekvivalent luftlagstykkelse (S_d-verdi) på minst 10 meter (Byggforskserien, 2003). Videre bør forholdstallet mellom samlet vanndampmotstand på varm og kald side være større en 10 (se figur 2).



Figur 2: Prinsipp for tetting mot luft- og vanndamptransport (Byggforskserien, 2003).

Tradisjonelt brukes dampsperre av PE-folie i yttervegger og tak på 0,15 eller 0,2 mm, med henholdsvis 70 og 90 meter ekvivalent luftlagtykkelse (Byggforskserien, 2003). I de fleste tilfeller vil dette være en god løsning, som forhindrer vanndamp å trenge inn i ytterkonstruksjonen. I noen typer konstruksjoner vil det imidlertid kunne være behov for en mer "åpen" konstruksjon i forhold til dampmotstand, med uttørkingsmulighet mot innelufta. Dette kan gjelde konstruksjoner hvor det er fare for å bygge inn fukt eller ved utvendige lekkasjer.

Mesteparten av året vil trykk- og temperaturforskjeller føre til at potensialet for fukt-transport er fra innsiden av konstruksjonskallet til utsiden (fra varm til kald side). Men for noen typer konstruksjoner og i noen perioder av året vil disse forskjellene føre til at man får et potensial for innadrettet fukttransport. Dette gjelder for eksempel flate tak med mørkt takbelegg under ideelle sommerforhold. Solinnstrålingen vil i disse tilfellene føre til høy utvendig overflatetemperatur på tekningen. Resultater fra feltforsøk ved Voll i Trondheim, under sommerforhold, viste overflatetemperatur på over 60 °C for kompakte tretak med mørk taktekking (Geving & Holme, 2009). Differansen mellom ute- og innetemperatur vil i slike tilfeller føre til høyere damp-trykk i ytre del av konstruksjonen enn i innelufta og dermed være drivkraften for innadrettet fukttransport.

Ved bruk av tradisjonell dampsperre i kompakte tretak i slike tilfeller, vil ikke konstruksjonen ha lav nok dampmotstand på varm side til å kunne slippe gjennom innebygget fukt. Det har derfor vært behov for å utvikle alternative løsninger med variabel dampmotstand. På den måten vil konstruksjonen kunne transportere fukt innover ved behov, men ellers være damptett.

2.2 Dampbremser

Betegnelsen dampbrems brukes om produkter som har lavere dampmotstand enn den tradisjonelle dampsperra, samtidig som de er tettere enn vindsperrer (Byggforskserien, 2003). I henhold til Sintef Byggforsk sine anbefalinger vil damp-bremser dermed ha verdier i følgende intervall; 0,5 m < S_d < 10 m. S_d-verdien til dampbremser er konstant, men varier for ulike kommersielt tilgjengelige produkter på det europeiske markedet fra S_d-verdi 2 til ca. 6 meter. For Nord-Amerikanske forhold definerer Listiburek (2002) dampbremser til å ha S_d-verdier mellom 0,34 og 3,4 m.

Hensikten med å benytte en dampbrems er ideen om at den vil kunne tillate noe uttørking til innelufta om sommeren, men være damptett nok i de kaldere årstidene. Studier utført av Geving, Holme og Uvsløkk (2010) konkluderte imidlertid med at dampbremser har relativt liten nytteverdi med tanke på å øke uttørkingshastigheten i bindingsverkkonstruksjoner i nordisk klima med ordinær vindsperre. Årsaken til dette er at mesteparten av uttørkingen uansett vil være utadrettet. Beregninger utført viser for eksempel at dampmotstanden på varm side i de fleste tilfeller bør være lavere enn ca. S_d= 1-2 m for å oppnå en viss innadrettet uttørking (Geving, Holme, & Uvsløkk, 2010). Selv da går kun en begrenset andel av den totale uttørkingen innover, i størrelsesorden ca. 25 %.

For å bedre uttørkingen av byggfukt og fukt fra tilfeldige lekkasjer vil det i slike tilfeller være klart mer effektivt å redusere dampmotstanden på vindsperra enn å redusere dampmotstanden på varm side. Hovedkonklusjonen fra den ovennevnte studien er derfor at dampbremser må ha en relativ lav S_d-verdi for å oppnå innadrett uttørking, men at dette også vil gjøre konstruksjonen mer utsatt for kondens-problemer.

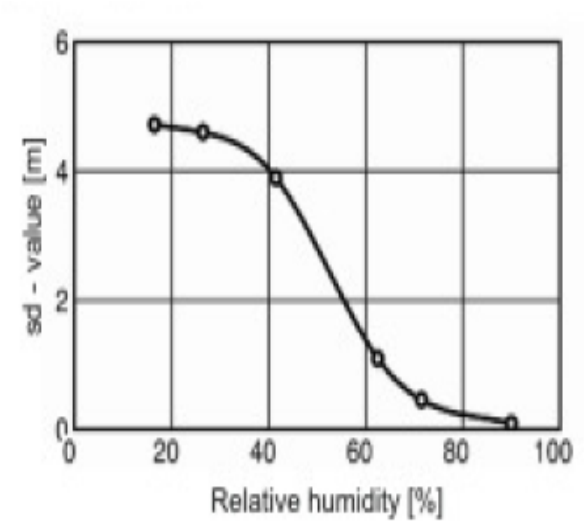
2.3 Smarte dampsperrer

I de følgende fem underkapitlene vil det først gis en generell innføring i virkemåte og prinsipp for smarte dampsperrer. Deretter vil de ulike smarte dampsperrene benyttet i dette studiet bli presentert.

2.3.1 Generelt

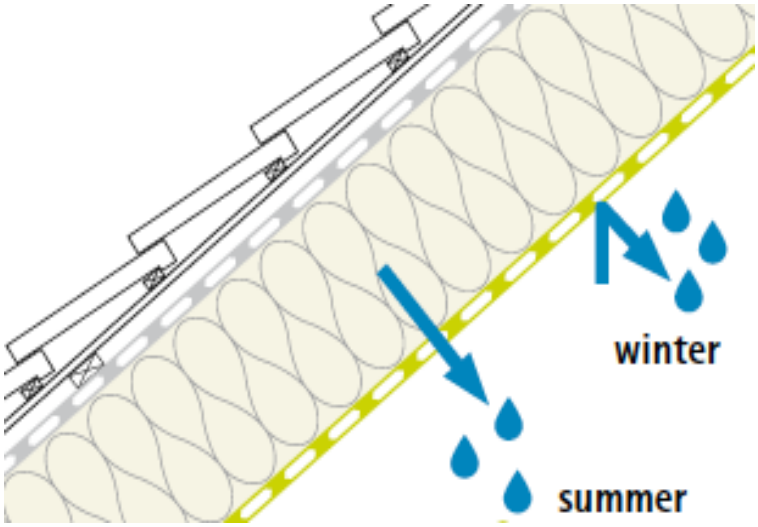
For konstruksjoner med liten eller ingen uttørkingsmulighet utover, som innvendig isolerte kjellervegger eller lette kompakte tretak, vil et mer dampåpent sperreprodukt en PE-folie kunne være nyttig med tanke på uttørkingsevnen innover. Løsningen som virke mest lovende er såkalte smarte dampsperrer. Prinsippet for slike dampsperrer er hovedsakelig å fungere som en ordinær dampsperre, med høy dampmotstand mesteparten av året. Men ved høy RF på utsiden av dampsperra (kald side), som følge av for eksempel lekkasjer eller byggfukt, vil imidlertid den smarte dampsperra få redusert vanndampmotstand, slik at fuktighet kan tørke innover (Geving, Holme, & Uvsløkk, 2010).

Figur 3 viser prinsippet for variabel vanndampmotstand, som funksjon av RF, for en smart dampsperre.



Figur 3: Dampmotstand utrykt ved S_d-verdi som funksjon av RF (Bludau & Künzel, 2009).

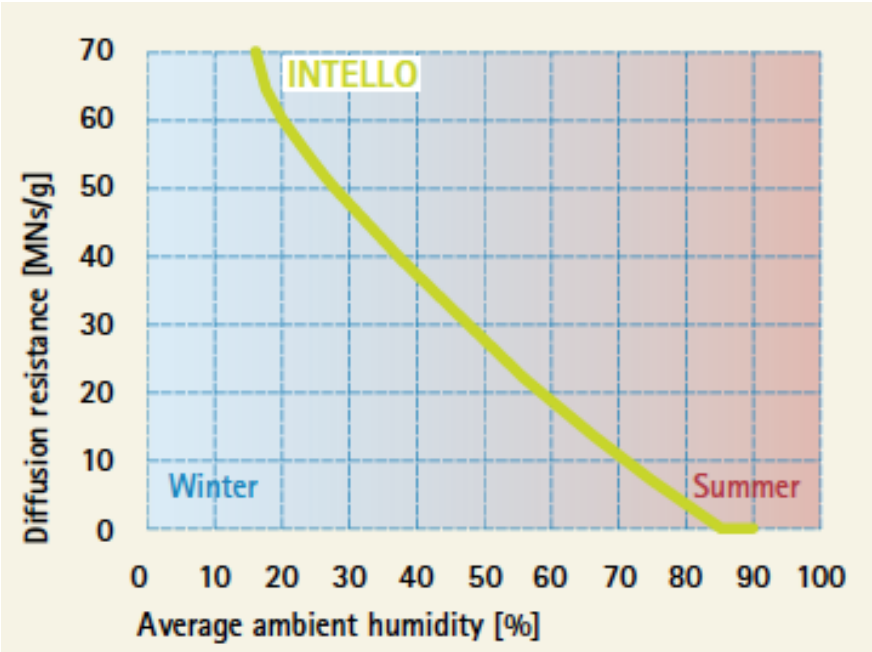
I skandinaviske strøk vil inneluftas RF normalt være under 40 % om vinteren og den smarte dampsperra vil dermed yte maksimal motstand mot fukttransport fra innelufta og ut i konstruksjonen (Geving & Thue, 2002). Om sommeren vil som regel inneluftas RF være betraktelig høyere, typisk mellom 50 - 70 % for skandinaviske forhold, og den smarte dampsperra vil følgelig få redusert dampmotstand og tillate fukt i konstruksjonen å tørke ut til innelufta, slik figur 4 viser. Ettersom det er gjennomsnittet av RF på inn- og utsiden av dampsperra som avgjør S_d-verdien, vil i tillegg en eventuell innadrette fuktransport være med på å heve RF på utsiden av dampsperra, slik at dampsperra blir maksimal åpen.



Figur 4: Variabel vanndampmotstand tillater uttørking mot innelufta om sommeren og hindrer fuktransport ut i konstruksjonen i de kaldere årstidene (Pro Clima, 2012).

2.3.2 Intello

Intello er et polyetylenbasert materiale, produserte av Pro Clima (Pro Clima, 2012). Pro Clima benytter enheten MNs/g for å angi diffusjonsmotstanden for produktet. For å regne om fra diffusjonsmotstand til S_d-verdi, divideres diffusjonsmotstanden med en faktor på 5,1 (Moll & Raamsdonk, 2011). Stellander (2012) fant at for Intello gir det S_d-verdier mellom 0,25 til 26 m. Figur 5 viser diffusjonsmotstanden som funksjon av RF for Intello.



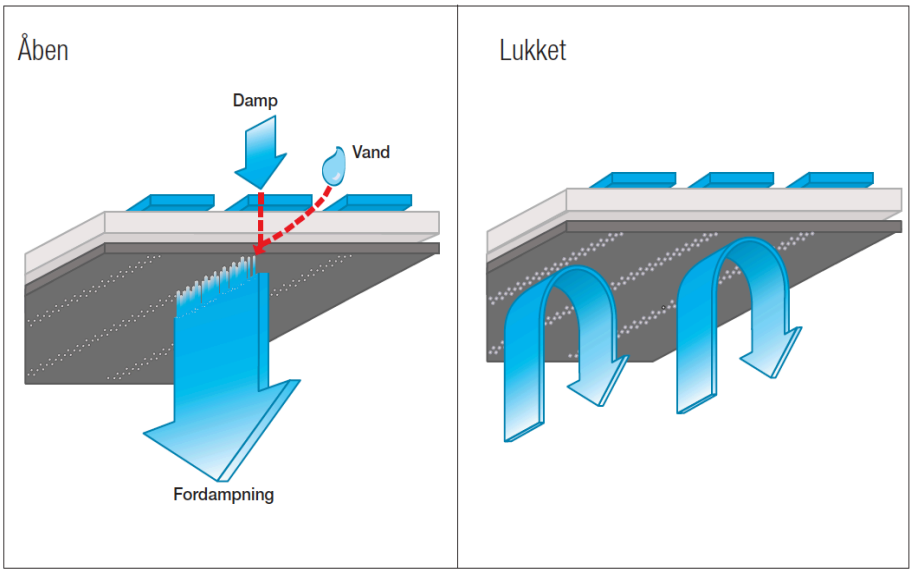
Figur 5: Varierende dampmotstand utrykt ved diffusjonsmotstand og RF (Moll & Raamsdonk, 2011).

2.3.3 Novaflexx

Novaflexx er et polyamidbasert produkt, produsert av Doerken, med markedsføring i Norge av Nortett Bygg. I følge importøren varierer S_d -verdien mellom 0,2 og 5 meter (Nortett, 2012), men i materialdatabasen til WUFI ligger Vario KM Duplex UV, som er det samme produktet markedsført under ett annet navn, med S_d-verdi mellom 0,08 og 4,38 meter. For å kunne sammenligne resultater fra dette studiet med Stellanders (2012) resultater, velges sistnevnte verdier for vanndampmotstand.

2.3.4 Hygrodiode

Hygrodiode er et filtbasert produkt med en perforert PE-folie på innsiden (mot varm side) og tre striper av PA-folie på oversiden (mot kald side) (Icopal, 2008). Oversiden vil variere diffusjonsmotstanden (z) mellom 5 - 100 $GPam^2s/kg$, avhengig av tørr eller våt tilstand. Dette tilsvarer S_d-verdier mellom 0,98 - 19,6 meter (omregnet med faktor 5,1). Tidligere studier utført av Rode, Christensen, & Vesterløkke (1993) viser imidlertid at vanndampmotstanden kan være betydelig lavere enn ved uttørkings-forhold (RF > 98 %). Figur 6 viser den prinsipielle virkemåten til Hygrodiode.



Figur 6: Virkemåten til nye Hygrodiode, med vanndamptransport fra konstruksjonen gjennom de RF-avhengige filmstrippene, sideveis kapillærtransport ved sommerkondens og fordamping til interiøret gjennom den perforerte PE-folien (Icopal, 2008).

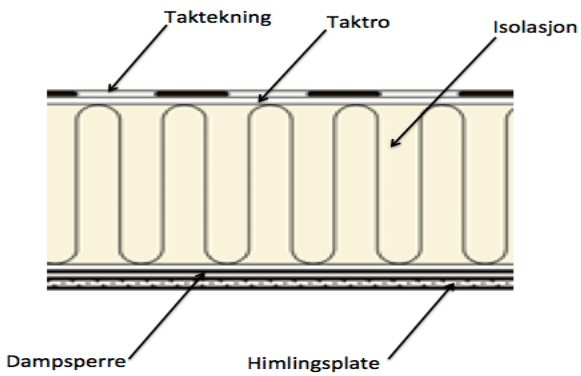
2.3.5 AirGuard Smart

AirGuard Smart produseres av DuPont og har ifølge informasjon på produsentens hjemmesider S_d-verdi mellom 0,05 i våt tilstand og 30 meter i tør tilstand (DuPont, 2012). Stellander fikk imidlertid via mailutveksling med *Technical Marketing Specialist* Robert Frey hos DuPont oppdatert materialinformasjon. Korrekt S_d-verdi for produktet varierer mellom 102,5 meter i tørr tilstand og 0,02 meter i våt tilstand.

2.4 Kompakte tretak

En type konstruksjoner som har stort potensiale for innadrettet fukttransport er kompakte, lette tretak, slik figur 7 viser. Slike flate tak, i form av elementer, er gunstige i forhold til pris og produksjonsprosess og brukes mye i dagens nybygg. Men det har vist seg at slike konstruksjoner også er spesielt utsatt for innebygget fukt og lekkasjer, ettersom den tradisjonelle oppbygningen av disse takene beror på en svært damptett utvendig taktetting og den tradisjonelle PE-folien på innside (Byggforskserien, 2012).

Ved en slik konstruksjonsoppbygging vil innebygget fukt, lekkasje- eller kondens-vann bli ”stengt” inne i konstruksjonen mellom to damptett sjikt. Taktekkingen vil ha en dampmotstand som ofte langt overgår dampsperras motstand og fukt vil verken kunne transporteres til ute- eller innelufta, hvis en ser bort fra eventuell sideveis diffusjon eller tilfeldig lufttransport. Dette vil kunne føre til råte- og muggskader, der spesielt taktro og den øvre delen av trebjelkene er utsatt (Byggforskserien, 2012).



Figur 7: Kompakt tretak med to damptette sjikt (Byggforskserien, 2012).

Hovedfokus for dette studiet er å undersøke virkemåte, muligheter og begrensninger i forbindelse med bruken av smarte dampsperrer og ikke selve oppbygningen av et kompakt lett tretak, selv om oppbygningen i mange tilfeller er det underliggende problemet for mange av fuktskadene. Det må derfor presiseres at det opprinnelige problemet som ofte oppstår ved bruk av slike tak, nemlig oppfukting av taktroa i byggefasen eller lekkasjer i driftsfasen, ikke løses ved å benytte smarte dampsperrer. Men ved å anvende smarte dampsperrer isteden for den tradisjonelle PE-folien, viser tidligere studier at det kan tillates en del fukt i taket uten at det vil føre til skader, siden den smarte dampsperra tillater uttørking til innelufta.

For en nærmere innføring i kompakttak og spesielt typen «rettvendt tak», som er den typen kompakttak de smarte dampsperrene i denne rapporten blir testet og vurdert mot, henvises det til Stellander (2012).

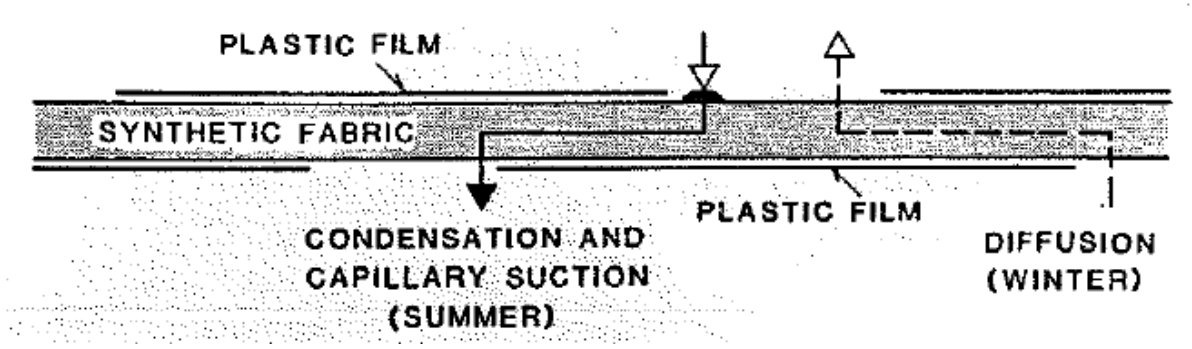
Det må også påpekes at denne studien ikke bare gjelder for kompakttak, men også som et verst tenkelig tilfelle for en generell konstruksjon, det være seg vegg eller tak, med damptett utside og minimal uttørkingsevne mot innelufta på grunn av PE-folie.

3. Litteraturstudie

I dette kapittel vil tidligere undersøkelser av konstruksjoner med smarte dampsperrer bli presentert, med hovedfokus på hvordan slike dampsperrer fungerer under vinterforhold.

3.1 Begynnelsen

Det første produktet som kan anses som en smart dampsperre ble introdusert av Korsgaard i 1985 og ble utviklet ved Det Tekniske Universitet i Danmark (Korsgaard, 1985). Produktet var første generasjon av det kapillæraktive filtproduktet Hygrodiode, med striper av PE-folie på hver side av syntetisk filt. Denne oppbygningen muliggjorde fukttransport gjennom Hygrodiode, slik figur 8 viser.



Figur 8: Skjematisk oppbyggingen av første generasjons Hygrodiode som viser hvordan fukttransport foregår avhengig årstid (Korsgaard, 1985).

Hygrodiode har siden den første utgaven gjennomgått flere oppgraderingen og fremstår i dag slik den er beskrevet i kapittel 2.3.4. Den første testen av Hygrodiode i et flatt kompakttak ble utført av Korsgaard (1987) ved hjelp av datasimulering med programmet MATCH.

Simuleringen tok utgangspunkt i et flatt tak med utvendig takbelegg, taktro av tre, 175 mm mineralull og enten Hygrodiode eller PE-folie med 25 mm trefiber sementplate på innsiden. Uteklima var TRY fra Danmark og startfuktnivået i taktroa var 26 vektprosent. Konstruksjonen med Hygrodiode viste klart bedre uttørking enn konstruksjonen med den tradisjonelle PE-foliene det første året og også fukt-svingningene gjennom de neste årene var klart lavere for konstruksjonen med Hygrodiode enn for konstruksjonen med den tradisjonelle dampsperra.

Produktet som imidlertid satte fart på utviklingen og bruken av smarte dampsperrer var polyamidfilmen (PA-folie) Difunorm Vario, utviklet ved Fraunhofer-Institute i Holzkirchen i Tyskland, på midten av 1990-tallet (Künzel, 1996). Dette produktet er senere kjent under flere navn avhengig av hvor produktet blir markedsført. I Europa går produktet under navnene Vario KM og Vario KM Duplex (Isover Saint-Gobain, 2013) og Delta Novaflexx i Norge (Nortett, 2012), mens det i USA selges under navnet MemBrain (CertainTeed, 2013).

Dette produktet har gjennomgått en rekke tester i forskjellige konstruksjoner, blant annet i Tyskland, Canada og USA og har generelt vist gode resultater i forhold til uttørking av takkonstruksjoner med fukt. Etterhvert har flere produsenter kommet på banen og det finnes i dag et titalls produkter fra en rekke produsenter. Stellander (2011) gir en skjematisk fremstilling av de fleste kommersielt tilgjengelige produktene på markedet i dag.

3.2 Smarte dampsperrer i tak

Det har siden starten av 90-tallet blitt uført en rekke simuleringer og fullskalatester knyttet til bruken av smarte dampsperrer i forskjellige konstruksjoner. I det følgende vil resultater fra noen av disse simuleringene og testene presenteres. Først gjennomgås resultater fra tester av Hygrodiode i tak, før de mest interessante funnene knyttet til Difunorm Vario og andre PA-folier, blir presentert.

3.2.1 Hygrodiode

Etter den første testen av Hygrodiode i 1987, utførte Pedersen (1990) laboratorieforsøk kombinert med simuleringer ved det storskala klimaforsøkssenteret i Oak Ridge National Laboratory, i Tennessee USA. Forsøket tok utgangspunkt i flate tak med tekning, 13 mm kryssfiner taktro, 110 mm mineralull eller 51 mm EPS, dampsperre (Hygrodiode, PE-folie eller ingenting) og himlingsplate av gips. Forsøket strakk seg over 21 dager med tre forskjellige sykluser på temperaturen i toppen av konstruksjonen (mot utsiden), for å simulere ulike temperaturer på taktekningen som kan oppstå ved soloppvarming. Taktroa ble tilsatt 1 kg/m^2 fukt, i tillegg til jevnt RF-nivå i konstruksjonen på 60 %. Målinger viste at all tilsatt fukt i konstruksjonene med Hygrodiode tørket ut i løpet av testperiodens 21 dager, mens bare en liten andel tørket ut i variantene med PE-folie.

Pedersen, i samarbeid med Korsgaard, utførte også et feltstudie på en testhytte ved det Tekniske Universitet i København, Danmark, med svært lik oppbygning (Korsgaard & Pedersen, 1990). Hytta hadde flatt tak med taktekning, 13 mm kryssfiner eller ingenting, 150 mm mineralull eller EPS, Hygrodiode og en av fire varianter av himlingskledning. Hytta ble delt opp med to inneklimaer, begge med konstant 20 ℃ (med mulighet for høyere temperaturer ved varme sommerdager), men med forskjellige nivåer av inneluftas fuktinnhold (henholdsvis konstant 60 % RF eller konstant 3 g/m^3 fuktoverskudd). Taktroa ble oppfuktet med ca. 500 g/m^2 (tilsvarende 24 vektprosent). Testperioden strakk seg over ett og et halvt år, med oppstart i mai.

Feltstudien viste at alle takelementene med Hygrodiode fikk god uttørking sammenlignet med PE-folie. Takelementene med mineralull og uten trematerialer tørket raskere enn trakteelementene med kryssfiner, og takelementer med EPS fikk ca. halve uttørkingshastigheten som tilsvarende elementer med mineralull.

I 1993 ble et nokså likt feltstudie utført i Danmark, men med langt dårligere resultater i forhold til uttørkingspotensialet ved bruk av Hygrodiode (Rode, Christensen, & Vesterløkke, 1993). Forsøket ble utført på et testhus med flatt tak og følgende oppbygning: taktekning, 13 mm kryssfiner, 100/195 mm mineralull, Hygrodiode og treullsement på innsiden. Inneklimaet hadde konstant 22 ℃ (med mulighet for økning om sommeren) og to nivåer av RF, på henholdsvis 40 % og 60 %, mens taktroa ble oppfuktet med omtrent 3 kg/m^2 eller ingenting.

Resultatene fra denne feltstudien viste vesentlig mindre uttørking og det ble indikert at det ville ta to til tre sesonger for å tørke ut all tilsatt fukt. Det ble i tillegg funnet et nokså høyt fuktopptak vinterstid for de tørre elementene og det ble derfor stilt spørsmål ved Hygrodiodes virkelige dampmotstand i tørr tilstand, sammenlignet med den bestemt ut ifra laboratorieforsøk.

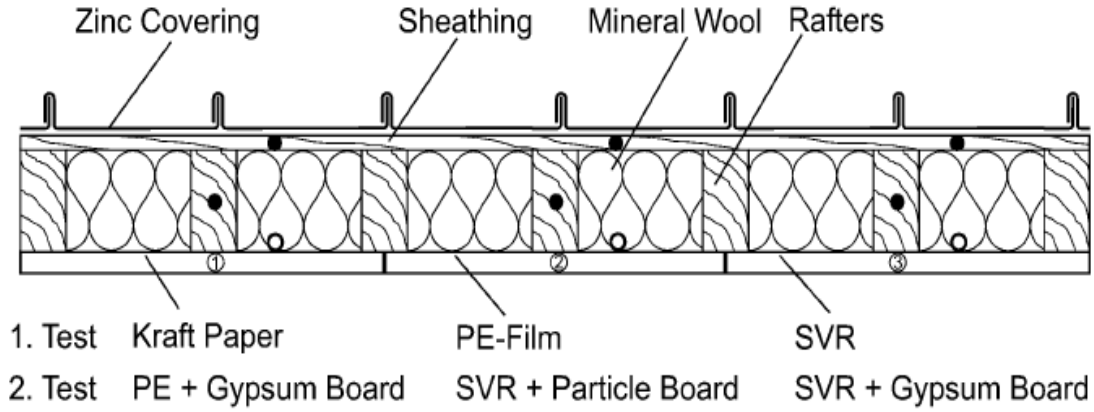
En oppsummering av praktisk bruk av Hygrodiode ble gjennomført i 2006 og konkluderte med at i de fleste tilfellene har Hygrodiode blitt anvendt med gode resultater (Brandt & Bunch-Nielsen, 2006). Det ble imidlertid påpekt at det for mange av konstruksjonene ikke har vært stort nok fokus på solas effekt for uttørkingspotensialet. Det har i flere tilfeller ført til akkumulering av fukt i taktroa, med mugg- og råteskader som resultat.

2.3.2 PA-folier

Difunorm Vario er som tidligere nevnt det samme produktet som markedsføres i Norge under navnet Novaflexx og et av produktene som denne rapporten studerer nærmere i parameterstudien og labforsøket. Det har vært gjennomført en rekke simuleringer og tester av denne RF-avhengige PA-folien og i det følgende vil de mest interessante funnene rundt bruken av Difunorm Vario bli presentert.

Den første studien med Difunorm Vario ble utført av Künzel (1996), med simuleringsprogrammet WUFI. Studien sammenlignet Difunorm Vario mot en dampsperre med konstant dampmotstand på 2 meter, i et tak med 28° helning vendt mot nord og 80 % startfukt. Taket med konvensjonell dampsperre fikk fuktakkumulasjon, mens taket med Difunorm Vario, selv under konservative uttørkingsforhold, fikk redusert fuktinnholdet i taktroa til under 20 vektprosent hver sommer og unngikk dermed risiko for mugg- og råtevekst.

Künzel (1998) videreførte simuleringsstudien med testforsøk av tak med helning 50°, orientert mot nord og sør og tre forskjellige oppbygninger, slik figur 9 viser. Forsøket foregikk ved Fraunhofer-Institute i Holzkirchen, Tyskland, og varte i ett år. Inneklimaet varierte mellom 20 ℃ og 40 % RF om vinteren og 23 ℃ og 60 % RF om sommeren. Takbjelkene ble ikke tørket ut tilstrekkelig før oppstart og taktroa ble oppfuktet ved direkte påføring av vann, slik at man fikk simulert byggfukt og dermed kunne undersøke de ulike konstruksjonenes uttørkingsevne. Over 20 vektprosent fukt i taktroa og takbjelkene ble ansett som kritisk fuktnivå.



Figur 9: Takkonstruksjonen inndelt i tre seksjoner med kraftpapir (S_d = 2,3 m), PE-folie (S_d = 48,5 m) og PA-folie (SVR - S_d = 0,08 - 4,38 m) (Künzel, 1998).

Resultatene viste at takets orientering er svært betydningsfull i forhold til uttørking. Det sørvendte taket hadde allerede før oppstart et fuktnivå i taktroa på under 20 vektprosent, mens fuktnivået i takbjelkene falt til under 20 vektprosent etter få måneder, for alle de tre dampsperrene. Dette skyldtes at det sørvendte taket fikk store mengder solinnstråling og dermed høy temperatur på taktekningen, med tilhørende innadrettet damptrykkgradient og følgelig stort potensiale for uttørking til innelufta.

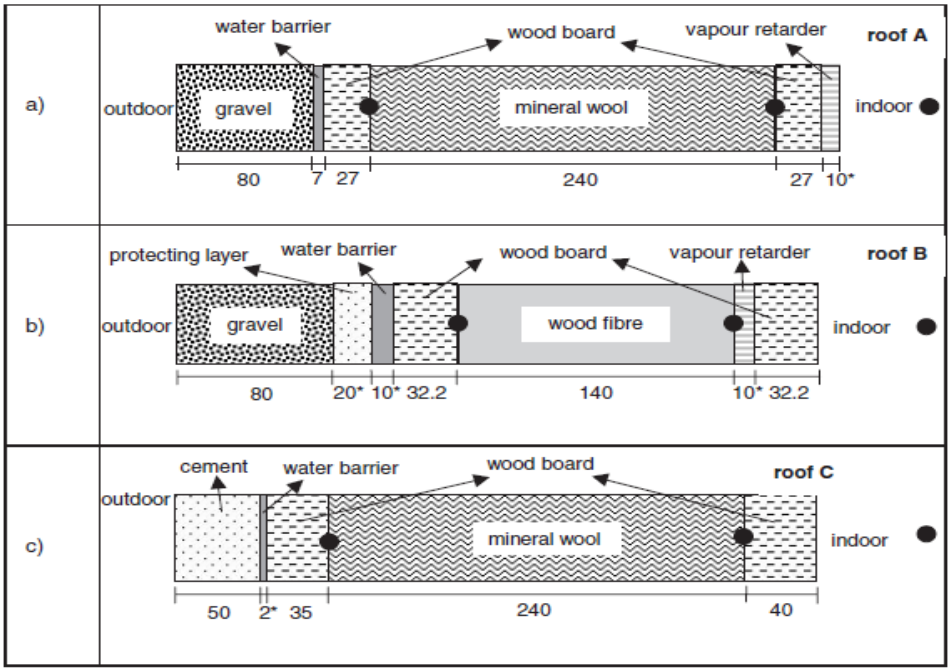
Det nordvendte taket fikk derimot langt tregere uttørking og det tok tre måneder for seksjonen med PA-folie å oppnå et fuktnivå i takbjelkene som ikke var kritisk og fire måneder for de andre seksjonene. Ved forsøkets slutt var det kun seksjonen med PA-folie som hadde et tilfredsstillende fuktnivå. Totalt sett viste forsøket at takets orientering er avgjørende for å oppnå innadrettet uttørking og at PA-folie gir langt større uttørkingspotensialet enn PE-folie.

Året etter undersøkte Künzel (1999) effekten av forskjellige himlinger for det samme testtaket, ved å benytte enten gips- eller sponplate. Resultatene viste at valg av himling påvirker uttørkingen, ettersom de ulike himlingspaltene har forskjellig damp-motstand. Varianten med PA-folie og gipsplate fikk klart bedre uttørking enn varianten med PA-folie og sponplate.

Ghazai Wakili og Frank (2004) gjennomførte feltmålinger og kontrollberegninger av tre takkonstruksjoner i Zurich-regionen av Sveits, der to av takene hadde PA-folie, mens ett bare hadde trefiberplate som innvendig dampsperre. Figur 10 viser takenes ulike oppbygning. Takene var plassert over et klasserom, en gymsal og et lite privathus. Det ble ikke tilsatt fukt under byggingen av takelementene og resultatene viste at takene generelt ikke akkumulerte fukt.

Taket plassert over klasserommet viste imidlertid svært høy, både feltmålt og beregnet, RF i den ytre delen av isolasjonen, trolig på grunn av det høye fukt-tilskuddet i klasserommet. Ved kontrollberegninger av feltmålingene med Glaser-

metoden og WUFI, viste Glaser-metoden seg uegnet til å vurdere slike konstruksjoner. WUFI-simuleringene viste derimot mer realistiske resultater sammenlignet med feltmålingene og det ble på bakgrunn av feltmålingene og WUFI-beregningene konkludert med at bruk av smarte dampsperrer ikke vil påvirke fuktfordelingen i slike tak av betydelig grad.



Figur 10: Tverrsnittet av takkonstruksjonene undersøkte ved feltmålinger og datasimuleringer (Ghazii Wakili & Frank, 2004).

En videreutviklet smart dampsperre ble testet ved laboratorieforsøk i et lett kompakt tretak av Kloch et al. (2008) og sammenlignet med PA-folie. Den nye folien skilte seg fra PA-folien ved å ha variabel dampmotstand avhengig av diffusjonsretning. Dette ble oppnådd ved å laminere en perforert PE-folie sammen med PA-folie. Hensikten med studien var å se på oppfukting i vinterhalvåret og uttørking om sommeren, sammenlignet med bruk av PA-folie.

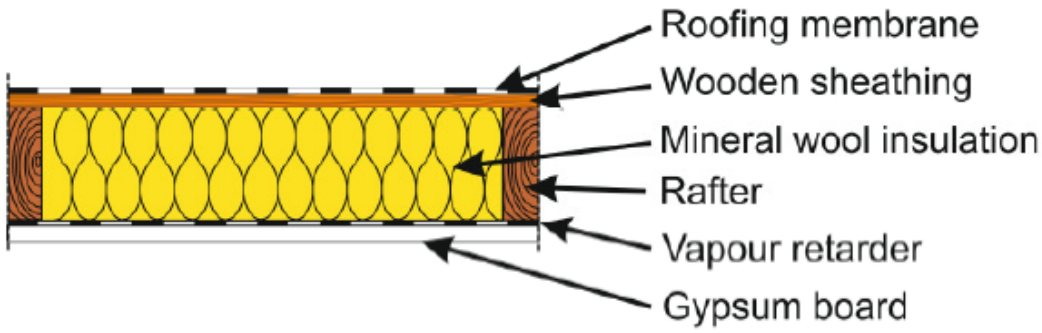
Vinterforhold ble simulert med 3 °C og 90 % RF på utsiden (kald side) og 22 °C og 50 % RF på innsiden (varm side) av takkonstruksjonen. Konstruksjonen inneholdt normal startfukt. I løpet av de fire måneden vinterforsøket pågikk viste konstruksjonen med den nye folien mindre oppfukting sammenlignet med PA-folien. Årsaken til redusert oppfukting skyldes den nye foliens høye S_d-verdi på 163 meter ved tørre forhold, sammenlignet med PA-foliens relativ lave S_d-verdi på 4,38 meter for tilsvarende forhold.

For å simulere sommerforhold med solinnstråling og dermed høy temperatur på tak-tekningen, ble temperaturen på takoverflaten styrt til å holde omtrent 55 °C én time hvert døgn, mens temperaturen for de resterende timene var 12 °C. Inneklimaet var innstilt på 22 °C og 50 % RF. For å undersøke uttørkingsevnen for de to produktene ble taktroa oppfuktet til 30 vektprosent og forsøket satt til to måneder.

Resultatene viste at den nye folien ikke hadde like gode uttørkingsegenskaper som PA-folien, da den brukte lengre tid på uttørkingen. De to smarte dampsperrene oppnådde imidlertid omtrent likt fuktnivå ved forsøkets slutt.

Årsaken til tregere uttørking for den nye folien skyldes den nye foliens forholdsvis høye S_d-verdi på 1,4 meter ved fuktige forhold, sammenlignet med PA-foliens betydelig lavere S_d-verdi på 0,08 meter for tilsvarende forhold. Det ble konkludert med at den nye folien reduserer risikoen for oppfukting ved vinterforhold, samtidig som uttørkingsevnen er tilstrekkelig.

Studiene omtalt så langt har tatt utgangspunkt i uteklimaer typisk for Sentral-Europa. Bludau og Künzel (2009) har imidlertid studert effekten av redusert solinnstråling og utetemperatur ved bruk av smarte dampsperrer i nordlige klimasoner. Beregninger ble utført for flere steder i Skandinavia, på et kompakttak slik figur 11 viser, med enten smart dampsperre (PA-folie) eller dampbrems med konstant S_d-verdi på 3 meter.



Figur 11: Oppbyggingen til kompakttaket benyttet i klimastudiet (Bludau & Künzel, 2009).

Inneklimaet varierte fra 20 °C og 40 % RF om vinteren til 22 °C og 60 % RF om sommeren. Det ble ikke tilsatt ekstra startfukt, men fuktinnholdet ble satt til 80 % RF jevnt over hele konstruksjonen for å simulere driftsfase. Fuktpåvirkningen for de ulike klimaene ble vurdert ut ifra totalt vanninnhold i konstruksjonen og vektprosent fukt i taktroa, som skulle være under 20 % for å være tilfredsstillende.

Konstruksjonen med PA-folie viste seg å fungere lenger nord enn den med dampbrems, mest på grunn av betydelig lavere dampmotstand for PA-folien i uttørkingsperioden. Generelt viste studien at jo lenger nord konstruksjonen ble plassert, jo høyere ble fuktopptaket vinterstid og desto lavere ble uttørkingen om sommeren, både for PA-folien og dampbremsen.

Beregninger utført for norske klimaer viste at både PA-folie og dampbrems fungerer tilfredsstillende i Lund, mens bare PA-folie fungerer i Trondheim. For uteklima som i Tromsø viste også konstruksjonen med PA-folie uakseptabelt fuktinnhold. Basert på disse beregningene ble det trukket opp geografiske grenser for bruk av dampbremser og smarte dampsperrer i Skandinavia, slik figur 12 viser. Det ble understreket at disse retningslinjene er veiledende.

Figur 12: Geografiske grenser for bruk av dampbrems og PA-folie i Skandinavia (Bludau & Künzel, 2009).

3.4 Oppsummering

Litteraturstudiet viser at kompakttak generelt får et forbedret uttørkingspotensiale i sommerhalvåret, sammenlignet med bruk av tradisjonell PE-folie, og at størrelsen på fuktopptaket vinterstid ikke fører til fuktakkumulasjon eller kritisk fuktnivå. Flere av studiene påpeker imidlertid at for å oppnå et tilfredsstillende lavt fuktnivå, må ute-klimaene ha betydelig mengde solinnstråling og relativt høye utetemperaturer i sommerhalvåret, slik at god uttørking oppnås. Dette vil normalt være tilfellet for mellomeuropeiske klimaer, mens nordiske forhold kan by på problemer, ettersom slike klimaer har betydelig kaldere vintre og ikke like varme somre.

I forhold til oppfukting viser studiet at effekten av innvendig fukttilskudd kan være kritisk og at bruken av smarte dampsperrer må vurderes særskilt ved høyt innvendig fukttilskudd. Effekten av himling er også undersøkt og viser at forholdsvis damptette trefiberplater reduserer uttørkingen om sommeren, sammenlignet med bruk av gipsplater.

Generelt viser studien at en ideell smart dampsperre bør har svært lav dampmotstand ved fuktige forhold, for å oppnå maksimal uttørking. Samtidig bør dampmotstanden være høyest mulig for relativt tørre forhold, som oppstår om vinteren, slik at risikoen for skadelig fuktopptak reduseres.

4. Parameterstudie i WUFI

I dette kapitelet presenteres parameterstudien, utført med beregningsprogrammet WUFI I-D. Hensikten med studien er hovedsakelig to ting; for det første å undersøke hvorvidt det kan forventes fuktakkumulasjon i kompakte lett tretak med smart dampsperrer under vinterforhold. For det andre vil studien prøve å gi svar på hvilke parametere et slikt fuktopptak er spesielt sensitiv for, som for eksempel inneluftas fukttilskudd eller innvirkningen av hvilke uteklima konstruksjonen er plassert i.

Kapitelet starter med en innføring i bakgrunnen for parameterstudien. Deretter presenteres beregningsprogrammet og beregningsoppsettet, før valg av sensitive parametere begrunnes. Tilslutt presenteres og vurderes resultatene fra simulering av 11 beregningsvarianter.

4.1 Bakgrunn

Denne studien er basert på antagelsen om at det kan oppstå en utadrettet fuktransport gjennom den smarte dampsperra i de kaldere årstidene. Når temperaturen er vesentlig lavere ute enn inne, vil trykkforskjellen mellom inne- og uteluftas vanndampkonsentrasjon være drivkraften for utadrettet fuktransport. Dersom den smarte dampsperra i slike tilfelle ikke har høy nok vanndampmotstand vil fuktig inneluft kunne diffundere gjennom den smarte dampsperra, med påfølgende kondens ute i konstruksjonen. Årsaken til at dampmotstanden kan bli kritisk lav, kommer av de forskjellige smarte dampsperrenes ulike verdier for vanndampmotstand ved gitte RF-nivåer, slik tabell 1 viser. Verdiene er oppgitt av de ulike produsentene.

Tabell 1: Vanndampmotstand til Intello, Novaflexx og AirGuard Smart ved gitte RF-nivåer.

Intello		Novaflexx		AirGuard Smart	
RF [%]	S_d $[m]$	RF [%]	S_d $[m]$	RF [%]	S_d $[m]$
0	26	0	4,38	12,5	102,5
17,5	26	26,5	4,35	25	34,2
25	16	41,5	3,7	37,5	18,2
50	6,9	62,5	1	41,5	3,4
72,5	1,5	71,5	0,44	62,5	1,5
90	0,32	90	0,09	75	0,17
97,5	0,25	100	0,08	87,5	0,07
				95	0,03
				97,5	0,02

Om vinteren er inneluftas RF i skandinaviske strøk normalt godt under 40 % (Geving, Holme, & Uvsløkk, 2010). I henhold til Sintef Byggforsk bør tradisjonell dampsperre ha S_d-verdi på minst 10 meter for å være tilstrekkelig damptett. Tabell 1 viser imidlertid at flere av S_d-verdiene for gitte RF-nivåer kan være kritisk lav, og underbygger teorien om at det kan oppstå utadrettet fuktransport gjennom de smarte dampsperrene under visse klimaforhold vinterstid.

4.2 Beregningsprogram

Beregningene i dette kapitelet er basert på data fra det endimensjonale simuleringsprogrammet WUFI 1-D pro 5.1. WUFI er et PC-program for beregning av koblet varme- og fukttransport i bygningskomponenter, med realistisk beregning av instasjonære hygrotermiske forhold, i bygningsdeler av flere sjikt og med varierende klimabelastning (WUFI.no, 2010).

4.2.1 Transportmekanismer og forenklinger

Det fysiske og numeriske grunnlaget for beregningene i WUFI er utviklet av Dr. ing. Hartwig M. Künzel ved Fraunhofer-Institute, i Tyskland (Künzel, 1995). Tabell 2 gir oversikt over hvilke transportmekanismer som er inkludert i WUFI. For en mer utførlig innføring i transportmekanismene og forenklingene henvises det til Stellander (2012).

Tabell 2: Oversikt over hvilke transportmekanismer som inkluderes i WUFI og hvilke som er utelatt (Stellander, 2012).

	Transportmekanismer	
	Inkluderes i WUFI	Inkluderes ikke i WUFI
Varmetransport	- Varmeledning - Entalpiendringer ved faseovergang i fukt - Kort- og langbølget stråling	- Varmetransport ved konveksjon
Damptransport	- Dampdiffusjon - Løsningsdiffusjon	- Fukttransport ved konveksjon
Væsketransport	- Kapillærledning - Overflatekryping	- Hydraulisk strømning - Dreneringsstrømning - Elektrokinetiske og osmotiske effekter

I henhold til Stellanders (2012) vurderinger vil dominerende mekanisme for fuktopptak i simuleringene være vanndampdiffusjon. En slik fukttransport skyldes vanndampmolekyllenes bevegelser i retning lavere damptrykk og kalles diffusjon (Geving & Thue, 2002). Potensialet for utadrettet diffusjon er damptrykkgradienten, som i tilfellet med kompakttak oppstår når temperaturen på takningen er lavere enn temperaturen i innelufta. Denne fukttransporten (g) vil under isoterme forhold og ved endimensjonal strøm kunne utrykkes ved hjelp av Ficks lov:

$$g = -\delta_p \times \frac{dv}{dx} \; [kg/m^2 s]$$

I virkeligheten vil fukttransport i et kompakttak også kunne foregå ved konveksjon, på grunn av utettheter i tekningen eller dampsperra (Oustad & Gustavsen, 2005). Ettersom simuleringer er utført med WUFI 1-D tar denne parameterstudien kun for seg vertikal vanndampdiffusjon ved endimensjonale forhold.

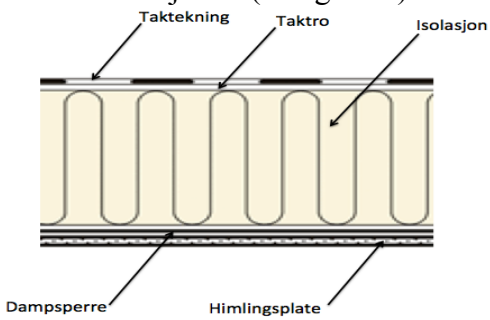
4.3 Beregningsoppsett

Endimensjonale fuktberegninger er gjort på et flatt, kompakt tretak og i dettet underkapittelet vil først selve konstruksjonsoppbygningen til det simulerte taket presenteres. Deretter følger en innføring i startbetingelser og valg av beregningsperiode og ute- og inneklima.

4.3.1 Takkonstruksjonen

I samsvar med Stellander (2012) og Thorsrud (2012) sitt arbeid er det definert en standardkonstruksjon for de ulike beregningsvariantene. Standardkonstruksjonen har følgende oppbygning, fra utside til innside av takkonstruksjonen (se figur 13):

- Taktekning
- Taktro (21 mm kryssfiner av gran)
- Isolasjon (350 mm mineralull)
- Smart dampsperre (ulike typer)
- Himlingsplate (gips)



Figur 13: Standardkonstruksjonens oppbygning

Taktekning

Til taktekning av kompakte tretak er det vanlig å benytte ett- eller to-lags asfalt takbelegg, eventuelt en PVC-membran. Asfalt takbelegg vil typisk ha S_d-verdi fra ca. 100 m (ett-lags asfalt) og oppover. Takbelegg av PVC vil ha en del lavere dampmot-stand. Det er valgt å simulere taktekningen med en brukerdefinert S_d-verdi på 300 meter under parametervalget *"Exterior surface (left side)"* i WUFI. Med andre ord er taktekningen simulert som en utvendig overgangskoeffisient, med høy vann-dampmotstand uten tykkelse.

Taktro

I kompakte tretak er det vanlig å bruke kryssfiner som taktro (Byggforskserien, 2011). Dette materialet er godt egnet som underlag for tekningen, men er samtidig et kapil-læraktivt materiale og dermed svært senestivt for nedbør i byggeperioden eller lekkasjer i driftsfasen, siden det holder godt på fukt. Det ble valgt kryssfiner på 22 mm fra NTNU sin materialdatabase i WUFI.

Isolasjon

Det er vanlig å bruke mineralull som isolasjonsmateriale og faktorer som varmekonduktivitet og sorpsjonskurve vil være essensielle for uttørking av slike tak. Stellander (2012) gir en god innføring i forskjellen ved bruk av standard eller egen-definert sorpsjonskurve for mineralull. I denne datasimuleringen er imidlertid hensikten å se på fuktopptak og prøveberegninger viser at valg av sorpsjonskurve ikke har innvirkning på fuktopptaket. Det er derfor ikke lagt inn sorpsjonskurve for mineralull. Det er valgt standard mineralull med tykkelse 350 mm og varme-konduktivitet på 0,04 W/mK fra Fraunhofer-Institute sin materialdatabase.

Smarte dampsperrer
Per dags dato finnes et titalls forskjellige smarte dampsperrer tilgjengelig på det kommersielle markedet (Stellander, 2011). Det er valgt å avgrense parameterstudien til tre smarte dampsperrer, som både Stellander (2012) og Thorsrud (2012) testet i labforsøk. Denne parameterstudien vil derfor benytte Intello, AirGuard Smart og Novaflexx, samt tradisjonell PE-folie som referanse.

Både Intello og Novaflexx var allerede lagt til i databasen i WUFI, med S_d-verdier som vist i tabell 1. Novaflexx tilsvarer materialet polyamid i databasen. Basert på S_d-verdier oppgitt av produsenten av AirGuard Smart (Tyvek), ble dette produktet lagt til manuelt i den egendefinerte materialdatabasen i WUFI.

Himling
Gips er valgt som kledning i himlingen, fra Fraunhofer-Institute sin materialdatabase. Standard gips for innvendig bruk er 12,5 mm.

4.3.2 Starbetingelser
Det er valgt å angi startfuktigheten i konstruksjonen som et gjennomsnitt over hele konstruksjonen. Startfuktnivået er satt til 60 % RF og er et konservativt estimat for startfukt. Testsimuleringer viser at dette tilsvarer rundt 12 vektprosent startfukt i taktroa, hvilket er langt under kritisk grense (20 vektprosent).

Starttemperaturen for materialsjiktene er satt til 20 °C for hele konstruksjonen. Denne temperaturen vil raskt utjevnes i forhold til temperaturen i inne- og utelufta og vil derfor ha liten betydning for de videre beregningene.

4.3.3 Beregningsperiode
For å kunne vurdere fuktlikevektsnivå i de forskjellige konstruksjonene, ble simuleringene utført for en periode på fem år, med start 1. oktober 2013. På den måten vil beregningene vise om konstruksjonene oppnår fuktlikevekt eller om de fortsetter å akkumulerer fukt, og hvilke parametere et slikt fuktopptak er sensitivt for.

4.3.4 Uteklima
Det er brukt uteklima fra syv forskjellige steder, med Oslo som standardklima. Klimadata fra disse stedene er hentet via kartfunksjonen *Map/file* i WUFI og tar utgangspunkt i et såkalt referanseår (*Moisture Design Referance Year* – MDRY). Klimadataene er basert på reelle målinger utført tre ganger i døgnet og omregnet til timesverdier ved lineær interpolasjon.

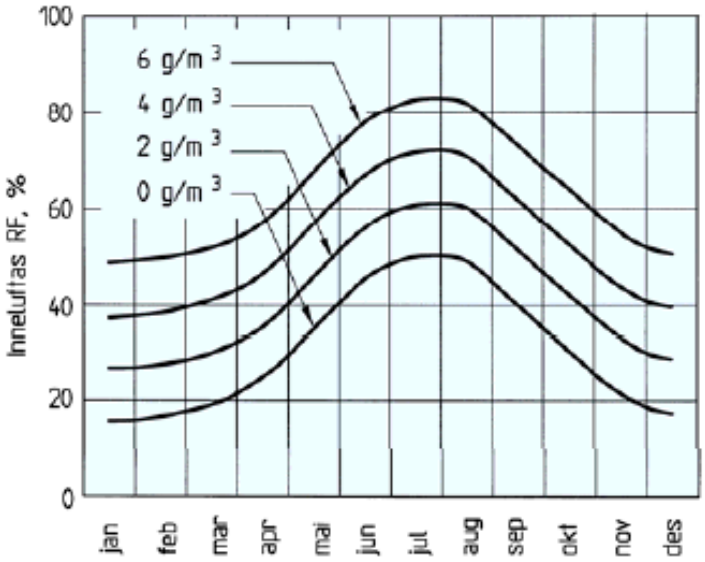
4.3.5 Inneklima

Inneklimaet er av spesiell interesse for dette forsøket, ettersom de smarte dampsperrene har ulik dampmotstand ved ulike RF-nivåer. Inneklimaet er definert ved hjelp av funksjonen *innvendig fukttilskudd* og *temperatur*. Det valgt å basere inneklima på NS-EN 13788.

Fukttilskudd

For å definere inneluftas fuktnivå er det valgt å simulere inneluftas vanndampinnhold ved hjelp av funksjonen *innvendig fukttilskudd* i WUFI. Fukttilskuddet er definert som forskjellen mellom vanndampkonsentrasjonen inne og ute og bestemmes av innvendig fuktproduksjon og ventilasjonsgrad (Geving & Thue, 2002).

Fukttilskuddet gir et direkte mål på hvor stor fuktbelastning konstruksjonen er utsatt for og påvirker også inneluftas RF, slik figur 14 viser. Fukttilskuddet ble lagt inn manuelt som tabulerte verdier, basert på verdier for lavt, middels og høyt fukttilskudd, i henhold til figur 15.



Figur 14: RF i innelufta i Trondheim for forskjellige fukttilskudd. Gjelder for konstant fukttilskudd over året og innetemperatur på 21 °C (Geving & Thue, 2002).

Temperatur

Innetemperaturen er satt til 23 °C for alle beregningene, slik også Stellander (2012) gjorde for sine beregninger. I virkeligheten vil antagelig temperaturen være noe høyere om sommeren, samtidig som den vil kunne være vesentlig lavere om vinteren, med tilhørende økende RF-verdier. Innetemperatur på 23 °C vil derfor være et konservativt anslag, ettersom den smarte dampsperras dampmotstand reduseres ved økende RF.

4.3.6 Materialvalg

Materialparameterne i WUFI sin database er delt inn i basis- og fuktavhengige parametere. Basisparameterne angir materialegenskaper i tørr tilstand og består av:

- Romdensitet $[kg/m^3]$
- Porøsitet $[m^3/m^3]$
- Spesifikk varmekapasitet tørr $[m^3/m^3]$
- Varmekonduktivitet tørr, 10 °C $[m^3/m^3]$
- Vanndampdiffusjonsmotstandstall $[\mu]$

For et gitt materialsjikt er μ lik sjiktets S_d-verdi dividert på tykkelsen d [m].

For en nærmere innføring i disse parameterne henvises det til Stellander (2012), kapitel 4.3.6. Tabell 3 og 4 viser henholdsvis basisparametere for de valgte materialene og øvrige parametere benyttet i WUFI-beregningene.

Tabell 3: Basisparametere for materialer brukt i WUFI-beregningen.

Material	Densitet $[kg/m^3]$	Porøsitet $[m^3/m^3]$	Spesifikk varmekapasitet [J/kgK]	Varme-konduktivitet [W/mK]	Ekvivalent luftlagstykkelse S_d-verdi [m]
Taktekning:					
Ytre overflate	-	-	-	-	300
Taktro:					
Kryssfiner av gran	410	0,5	1600	0,12	1,1- 4,4
Isolasjon:					
Mineralull	60	0,95	850	0,04	0,455
Dampsperre:					
PE-folie	130	0,001	2200	1,65	87
Intello	115	0,086	2500	2,4	0,25 - 26
AirGuard Smart	65	0,001	2300	2,9	0,02 - 102,5
Novaflexx	65	0,001	2300	2,9	0,08 - 4,38
Himling:					
Gips	850	0,65	850	0,2	0,1

Tabell 4: Øvrige parametere av betydning for WUFI-beregningene.

Overflaters overgangsganskoeffisient	Enhet	Verdi	Merknader
Ute:			
Varmemotstand	$[m^2K/W]$	0,0526	Tak
S_d-verdi	[m]	300	Taktekning
Kortbølget strålings-absorpsjonstall	[−]	0,8	Konstant
Langbølget strålingsemissivitet	[−]	0,9	Konstant
Regnabsorpsjonstall	[−]	-	Ingen regnabsorpsjon
Inne:			
Varmemotstand	$[m^2K/W]$	0,125	Tak
S_d-verdi	[m]	-	Ingen overflatebehandling
Helning	[°]	0	Flatt tak
Orientering	[−]	sør	-

4.4 Parametervalg

For parameterstudien er det valgt å se på tre sentrale inputparametere i WUFI-beregningene, som blir variert i forhold til et sett med definerte standardparametere. I det følgende vil det bli gitt en begrunnelse for valg av parametere og en beskrivelse av disse.

4.4.1 Valg av parametere

Parameterne ble valgt basert på antagelsen om at nettopp disse parameterne vil ha størst påvirkning på fuktopptaket i konstruksjonen. Parameteren *uteklima* er første parameter som blir variert, både for å kunne sammenligne med tidligere studier og for å se om noen steder vil være uegnet for bruk av smarte dampsperrer.

Videre ble parameteren *inneklima* valgt, siden dampmotstanden til de smarte dampsperrene er avhengig av luftas RF. Denne parameteren vil derfor ha stor betydning for hvordan de smarte dampsperrene oppfører seg og følgelig også fuktopptaket.

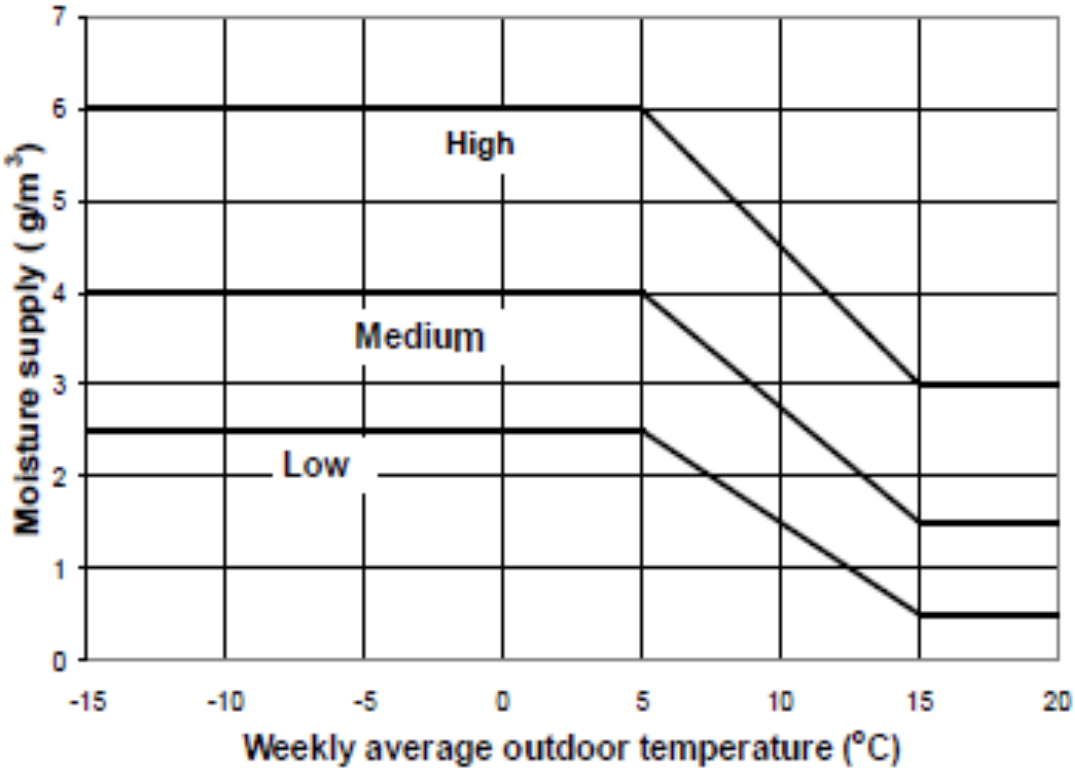
Selve *konstruksjonsoppbygningen* av kompakttaket ble variert på to måter. Den første varianten simulerer effekten av *inntrukken dampsperre*, som trolig vil føre til høyere RF ved dampsperra og dermed redusert S_d-verdi. Den andre parametervariasjonen har *malt himling*, som vil gi et tilskudd til takkonstruksjonens totale dampmotstand på innvendige side og trolig føre til redusert fuktopptak.

4.4.2 Beskrivelse av parametere

I det følgende vil standarder og varianter for de tre valgte parameterne *inneklima*, *uteklima* og *konstruksjonsoppbygging* bli beskrevet.

Inneklima – innvendig fukttilskudd

I samsvar med Stellanders (2012) parameterstudie er det valgt å variere inneklimaet ved hjelp av funksjonen *innvendig fukttilskudd* i WUFI. Dette fukttilskuddet tar utgangspunkt i forslag til dimensjonerende verdier for henholdsvis lavt, middels og høyt fukttilskudd for husstander i Norge, basert på såkalte 10 % kritiske verdier (Geving & Holme, 2008). Det innebærer at fukttilskudd høyere enn de gitte verdiene ikke skal forekomme for mer enn 10 % av målingene som utføres. Lavt og høyt fukt-tilskudd vil bli sammenlignet mot middels fukttilskudd, som er definert som standard-parameter. Figur 15 viser lavt, middels og høyt fukttilskudd som funksjon av utetemperatur.



Figur 15: Lavt, middels og høyt fukttilskudd som funksjon av utetemperatur (Geving & Holme, 2008).

Uteklima

For standardkonstruksjon er Oslo valgt som referanseklima. Ettersom klimaet i Norge er svært variert, fra mildt og regnfullt kystklima til kaldt og tørt innlandsklima, ble fire andre steder i Norge (Trondheim, Bergen, Røros og Tromsø) tatt med for å se på innvirkningen av forskjellig typer klima. I tillegg ble Holzkirchen i Tyskland og Stockholm i Sverige inkludert, for å kunne sammenligne med andre studier.

Konstruksjonsoppbyggning

Standardkonstruksjonen har oppbygging som vist i figur 13. Undersiden av et slikt tak konstrueres ofte med nedlekting på 50 mm, slik at kabler og rørføringer kan trekkes fritt, uten fare for å punktere dampsperra. For å simulere en slik konstruksjons-oppbygging ble en variant simulert med 50 mm ekstra isolasjon på innsiden av dampsperra. Denne oppbygningen vil trolig føre til lavere temperatur ved dampsperra og dermed høyere RF, for ellers like betingelser. I tillegg ble det valgt en variant som simulerer malt himling, ved å legge til en brukerdefinert S_d-verdi på 0,5 meter under parametervalget *"Interior surface (left side)"* i WUFI. Med andre ord er malingen simulert som en innvendig overgangskoeffisient uten tykkelse.

4.5 Beregningsvarianter

Basert på standardparameterne er det valgt å definere en standard beregningsvariant. Følgelig har denne beregningsvarianten standard konstruksjonsoppbygging, er plasserte i Oslo og har middels fukttilskudd. For hver av de andre beregnings-variantene er det valg å variere én av parameterne i forhold til standardvarianten, hvilket fører til totalt 11 beregningsvarianter. Ettersom alle beregningsvariantene simuleres med både PE-folie og de tre smarte dampsperrene, utgjør dette oppsettet 44 simuleringer, slik det fremgår av tabell 5.

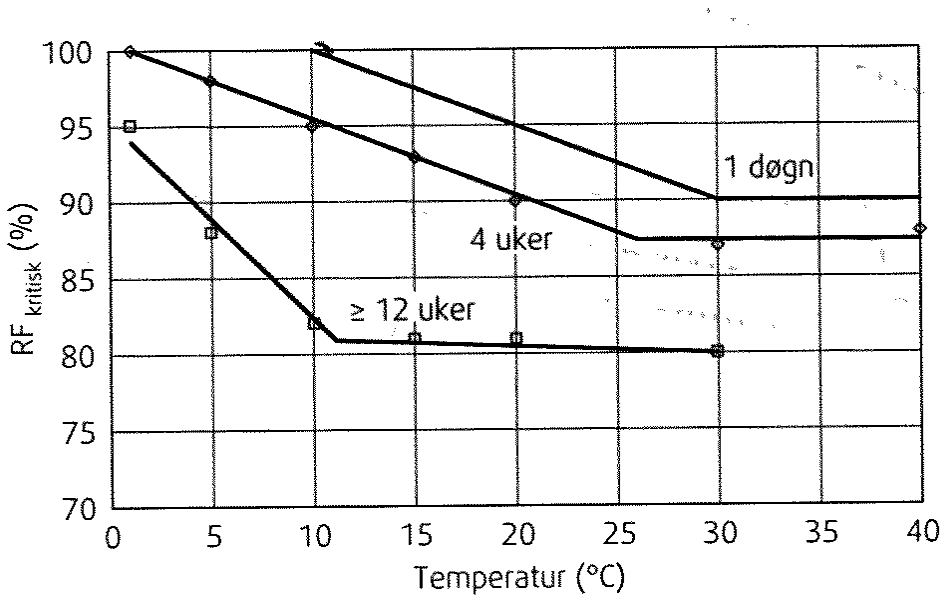
Tabell 5: Beregningsvarianter for parameterstudien. Standardparametere i fet skrift.

Parameter	Varianter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Dampsperre/ Smart dampsperre	**PE-folie S_d=87 m**	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Intello S_d=0,25-26 m	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Novaflexx S_d=0,08-4,38 m	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	AirGuard Smart S_d=0,02-102,5 m	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Uteklima	**Oslo**	X							X	X	X	X
	Trondheim		X									
	Bergen			X								
	Røros				X							
	Tromsø					X						
	Holzkirchen						X					
	Stockholm							X				
Fukttilskudd	2,5 - 0,5 g/m³								X			
	4 - 1,5 g/m³	X	X	X	X	X	X	X			X	X
	6 - 3 g/m³									X		
Konstruksjon soppbygging	**Standard**	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	Inntrukket 50 mm										X	
	Maling, S_d = 0,5											X

4.6 Kritisk fukttilstand

For å kunne gjøre en kvantitativ vurdering av risiko for fuktskader, basert på vanninnholdet i taktroa for de forskjellige beregningsvariantene, kan en bruke et sett med definerte kriterier for kritisk fuktnivå. I henhold til *Håndbok 3 – Fuktskader* oppgis vanligvis kritisk fukttilstand i et materiale i RF [%] (Geving, 2011). Muggvekst vil typisk finne sted ved en RF mellom 80 - 100 % for forskjellige materialer, men kan også oppstå for verdier ned mot 70 - 75 % RF. For trebaserte materialer, som taktro av kryssfiner, oppstår kritisk fuktnivå når $RF_{kritisk}$ er større enn 75 - 80 %. Kritisk fuktnivå kan også angis som vektprosent fukt i et materiale. For kryssfiner er et slikt fuktinnhold definert som kritisk for verdier over 20 vektprosent.

Videre er det to faktorer som må ligge til rette for at vekst av mugg- eller råtesopp skal forekomme. Først og fremst må temperaturforholdene vær riktige. Det vil si at temperaturen i materialet må være mellom 0 °C og +40 °C, med optimale vekst-betingelser mellom +20 °C og + 35 °C. I tillegg må fukt- og temperaturforholdene være gunstige over en viss periode, kalt eksponeringstiden. Figur 16 viser kritisk fuktnivå for utvikling av muggvekst på treverk av gran eller furu, avhengig av temperatur og eksponeringstid.



Figur 16: Kritisk fuktnivå for muggvekst på treverk avhengig av temperatur og eksponeringstid (Nilsson, 2009).

De tre kriteriene fuktnivå ($RF_{kritisk}$ eller vektprosent), temperaturforhold og eksponeringstid vil i det følgende bli brukt for å vurdere om fuktinnholdet i konstruksjonene er kritisk eller ikke.

4.7 Resultater

I dette kapitelet vil resultater fra simuleringene bli presentert og konsekvensene av parametervariasjonene vurdert. Først presenteres beregningsvarianten med *standard-paremeterne*, med vurdering av de smarte dampsperrenes S_d-verdier og betydningen denne har for fuktopptak og RF i sperresjiktet.

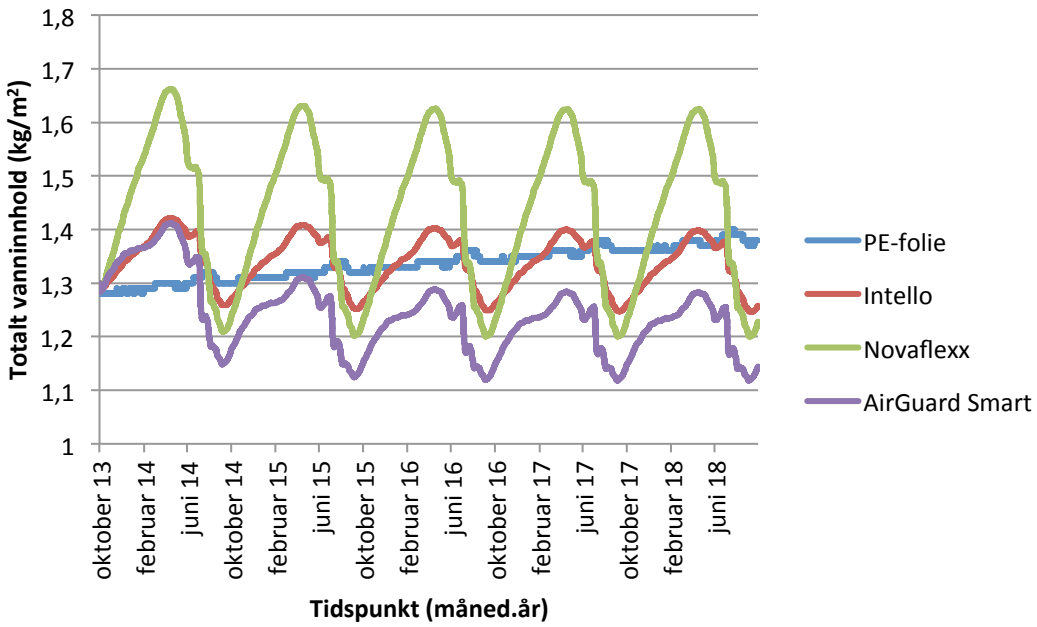
Så følger resultater fra beregningsvariantene med forskjellig *uteklima*, med spesielt fokus på hvilken innvirkning uteklimaet har på RF innendørs om vinteren og utviklingen av fuktinnholdet i taktroa.

Deretter sammenlignes beregningsvariantene med *lavt og høyt fukttilskudd* med standardvarianten og effekten av fukttilskudd vurderes spesielt i forhold til fuktopptak og dampmotstanden til de smarte dampsperrene.

Tilslutt blir resultatene fra de *ulike konstruksjonsoppbyggingene* presentert og effekten av inntrukken dampsperre eller maling blir vurdert opp mot standardkonstruksjonen.

4.7.1 Standardvarianten

Beregningsvariant 1 benytter standardparameterne og har følgelig oppbygning i henhold til standardkonstruksjonen, er plassert i Oslo og har middels høyt fukttilskudd. Figur 17 viser hvordan totalt vanninnhold i takkonstruksjonen varierer gjennom året og hvilket likevektsnivå fuktinnholdet stabiliserer seg på. Vedlegg A viser totalt vanninnhold for beregningsvariantene 2 - 11.



Figur 17: Totalt vanninnhold for beregningsvariant 1 (standardparametere) med PE-folie og de tre smarte dampsperrene.

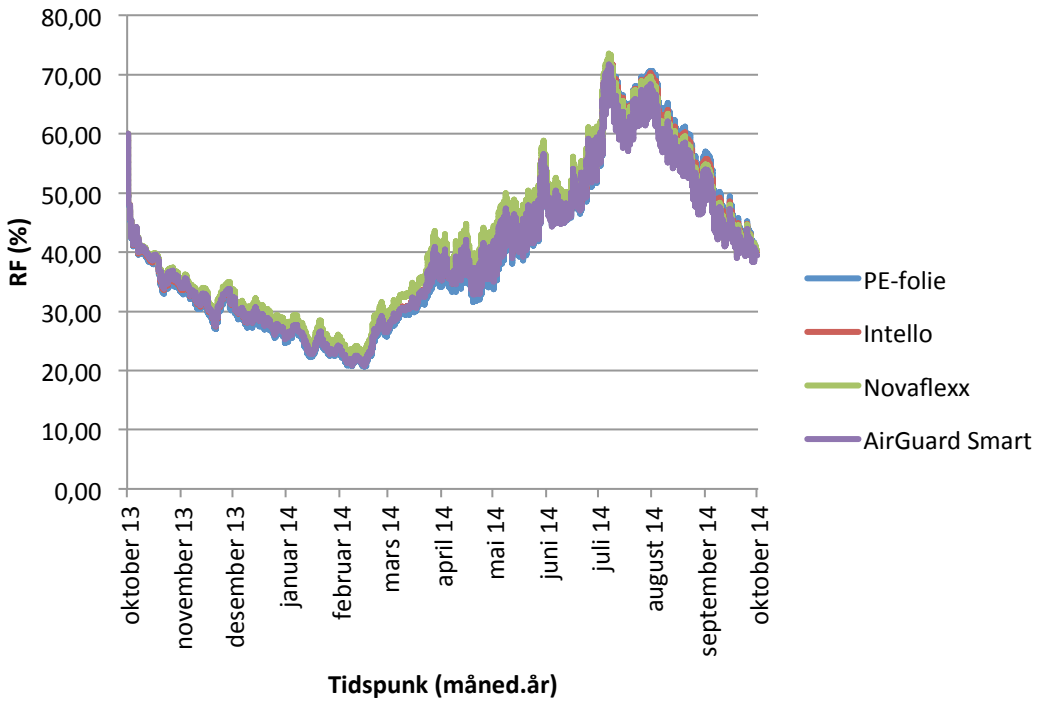
Resultat

Figur 17 viser tydelig hvordan fuktinnholdet i takkonstruksjonene med smarte dampsperrer varierer over året, med lavest fuktinnhold i slutten av august, grunnet uttørking i de varme vår- og sommermånedene, og påfølgende fuktopptak i de kaldere årstidene. Totalt sett stabiliserer takkonstruksjonene med smart dampsperre seg på et lavere fuktnivå enn startfuktnivået. Konstruksjonen med PE-folie øker derimot sitt fuktinnhold jevnt for hvert år og oppnår ikke fuktlikevekt etter fem års beregningsperiode.

Konstruksjonen med AirGuard Smart oppnår klart lavest fuktlikevekt (bunn på 1,12 og topp på 1,28 kg/m^2) og stabiliserer seg rundt dette nivået etter to år. Varianten med Intello har tilnærmet like svingninger i fuktinnholdet over året som AirGuard Smart, men ca. 0,1 kg/m^2 høyere. Konstruksjonen med Novaflexx oppnår klart høyest maksimalverdier for vanninnholdet, grunnet stort fuktopptak i vintermånedene, men tørker likevel ut til et lavere vanninnhold i løpet av sommermånedene enn Intello.

Vurdering

Årsaken til at variantene har svært ulikt vanninnhold over beregningsperioden henger sammen med S_d-verdiene de forskjellige produktene har for gitte RF-nivåer. Figur 18 viser hvordan snittverdien av RF over sperresjiktet (inn- og utside av dampsperrene) varier over året. RF-nivået er forholdsvis likt for alle variantene, med lavest RF (rundt 20 %) i februar og høyest RF (rundt 70 %) i juli, hvert år.



Figur 18: Gjennomsnittlig RF på inn- og utside av sperresjiktet for bergeningsvariant 1.

For RF-nivå mellom 40 - 70 % viser tabell 1 at Novaflexx har klart lavest dampmotstand. I perioden april til utgangen av august ligger RF-verdiene til Novaflexx mellom disse verdiene, slik figur 18 viser. Dette stemmer godt overens med at Novaflexx har vesentlig høyere uttørkingshastighet enn både AirGuard Smart og Intello i denne perioden. Varianten med Novaflexx oppnår også høyest RF, på rundt 72 %, grunnet den store fuktransporten midtsommers.

Problemet for Novaflexx oppstår i perioden september til mai, der snittverdien for RF i sperresjiktet ligger mellom 20 - 40 %. For disse verdiene har Intello og AirGuard Smart betydelig høyere vanndampmotstand og følgelig får disse et langt lavere fuktopptak enn Novaflexx.

For RF-nivå på 26,5 % har Novaflexx S_d-verdi på 4,35 meter, hvilket er betydelig lavere en Sintef Byggforsk sine anbefalinger til vanndampmotstand på 10 meter. Denne verdien er spesielt viktig i de kaldere årstidene, ettersom temperaturforskjellene mellom inne- og utelufta fører til potensiale for utadrettet fukttransport. For Novaflexx vises dette tydelig gjennom økt vanndamptransport ut i konstruksjonen i vinterhalvåret.

Beregningsvariant 1 viser tydelig viktigheten av høye S_d-verdier i perioder der RF i sperresjiktet ligger mellom 20 - 40 %. Et slikt RF-nivå oppstår normalt i vinterhalvåret og skal takkonstruksjonen motstå eller få minimalt fuktopptak, bør S_d-verdiene tilsvare verdiene til AirGuard Smart eller Intello. Beregningsvariant 1 er imidlertid plassert i Oslo, der mengde globalstråling for perioden juli og august totalt utgjør 378,5 W/m^2 og uteluftas middeltemperatur i samme periode er 17,4 °C, slik henholdsvis tabell 9 og 7 viser. Potensialet for innadrettet uttørking er dermed stort og det medfører at konstruksjonene med smart dampsperre ikke får kritisk fuktnivå, selv om vanninnholdet, spesielt for Novaflexx, er uheldig med tanke på isolasjonsevne om vinteren.

4.7.2 Uteklima

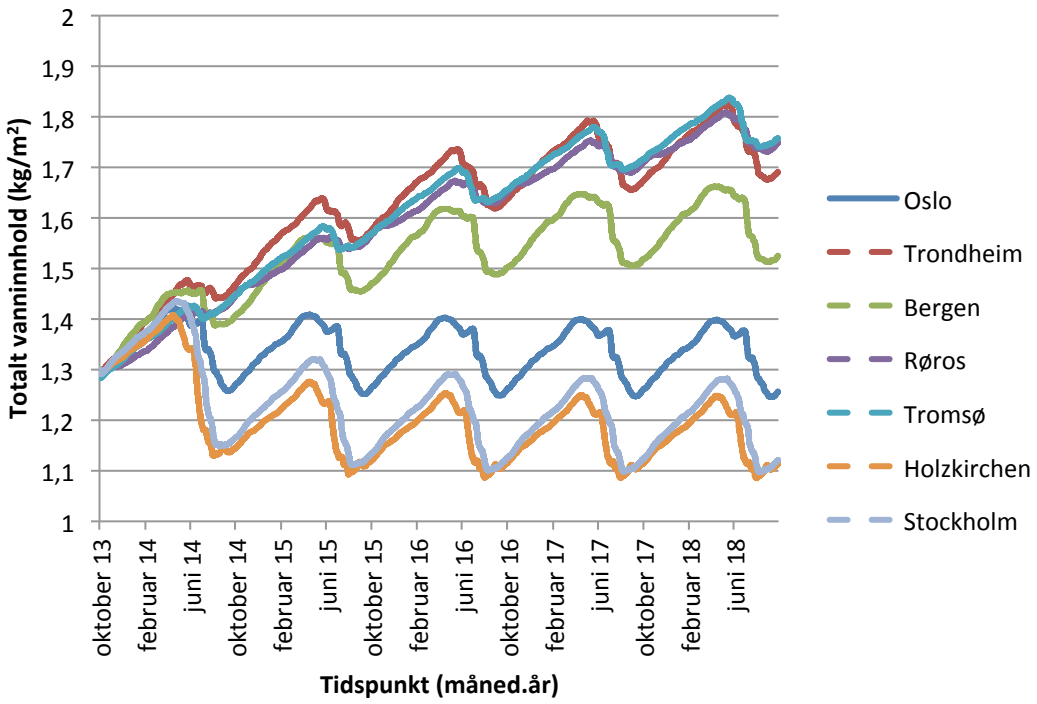
I dette kapitelet er effekten av å plassere takkonstruksjonen i forskjellige uteklimaer vurdert. Valg av uteklima påvirker både potensialet for utadrettet fukttransport i vinterhalvåret, grunnet store differanser i utetemperatur mellom de forskjellige stedene, og RF innendørs, på grunn av lufttilskuddet.

Beregningsvariantene 2 til 7 bruker klimadata for henholdsvis Trondheim, Bergen, Røros, Tromsø, Holzkirchen og Stockholm. I det følgende presenteres først *resultater,* i form av totalt vanninnhold for takkonstruksjonen, for hver av de smarte dampsperren i de ulike klimaene. Deretter følger en tilhørende *vurdering* av vanninnholdet og hvilken effekt klimavalg har for fuktinnholdet i taktroa.

Basert på disse resultatene avsluttes kapitel 2.4.7 med en generelle vurdering av *betydningen av ulike klimafaktorer,* for de forskjellige uteklimaene, og effekten disse klimafaktorene har for fuktopptak vinterstid.

Parametervariasjon uteklima – Intello

Figur 19 viser utviklingen av totalt vanninnhold i standardkonstruksjonen, ved bruk av Intello, for de ulike uteklimaene sammenlignet med Oslo.



Figur 19: Totalt vanninnhold (kg/m^2) for standardkonstruksjonen med Intello, for de ulike uteklimaene sammenlignet med Oslo.

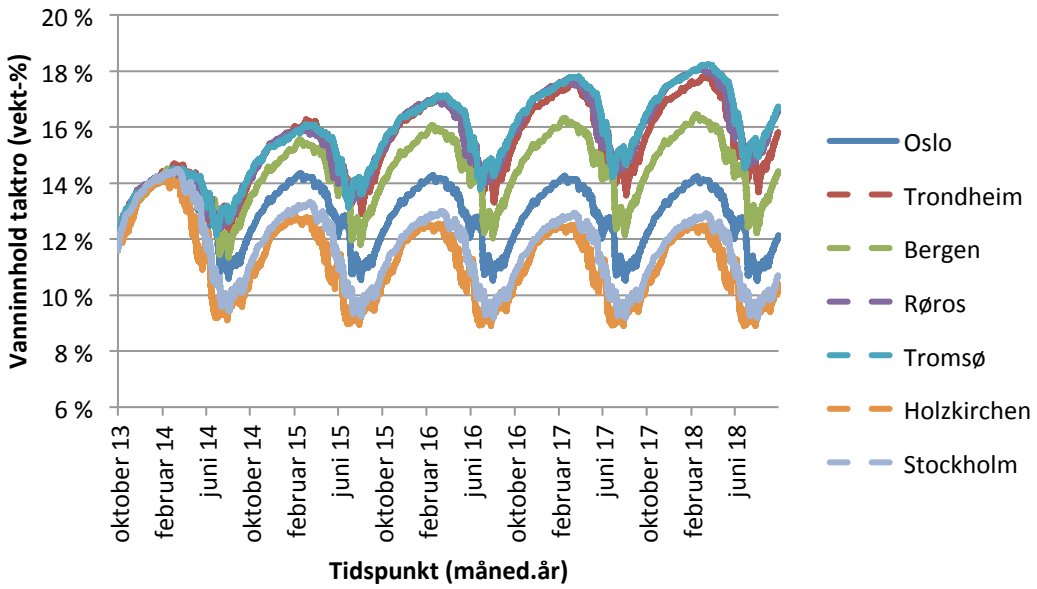
Resultat

Ved å benytte Intello i Trondheim, Tromsø eller Røros øker det totale vanninnholdet i konstruksjonen betydelig i forhold til startfuktnivået (60 % RF jevnt over hele konstruksjonen) og fuktinnholdet når ikke likevektsnivå etter fem års beregning. Plasseres konstruksjonen i Bergen reduseres vanninnhold noe, men heller ikke for dette klimaet oppnår konstruksjonen fuktlikevekt. Med uteklima som for Holzkirchen eller Stockholm stabiliserer imidlertid konstruksjonen seg på fuktlikevekt etter to år, med et vanninnhold noe lavere enn startfuktnivået.

Vurdering

Resultatene fra figur 19 viser at differansen mellom fuktopptak og uttørking for variantene plassert i Trondheim, Tromsø og Røros, fører til fuktakkumulasjon og at disse klimaene dermed kan anses som kritiske for Intello. Kontrollberegninger viser at Intello i Trondheim oppnår fuktlikevekt etter 7 år, med maksimalverdi for totalt vanninnhold på 1,86 kg/m^2, mens Tromsø og Røros nærmer seg likevekt etter ti år, med maksimalverdi det siste året på henholdsvis 1,95 kg/m^2 og 1,91 kg/m^2, slik vedlegg B viser.

Figur 20 viser fuktinnholdet i taktroa ved bruk av Intello i de ulike klimaene. Slik også det totale fuktinnholdet økte, akkumulere taktroa vesentlig mengder fukt når uteklima er Trondheim, Røros eller Tromsø. Fuktinnholdet for taktroa i disse klimaene svinger mellom 15 og 18 vektprosent etter endt beregningsperiode, hvilket er under det kritiske nivået på 20 vektprosent. Det må likevel understrekes at fuktlikevekt for de tre ovennevnte variantene ikke er oppnådd etter fem års beregningen og at en økning i vanninnholdet kan bli kritisk, hvis den fortsetter i samme tempo over flere år. Vedlegg C viser både fuktinnholdet (målt i RF) og temperaturen i taktroa, for Intello i Trondheim, Bergen, Røros og Tromsø og kan brukes for å vurdere kritisk fuktnivå på en mer nøyaktig måte.



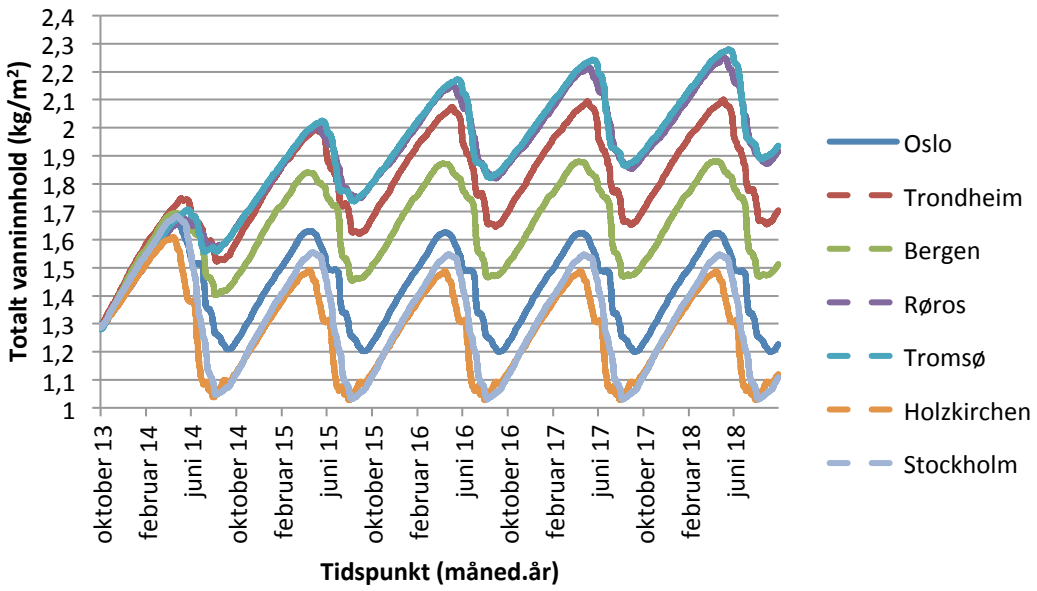
Figur 20: Fuktinnhold (vektprosent) i taktroa ved bruk av Intello, for de ulike uteklimaene sammenlignet med Oslo.

Varianten plassert i Bergen oppnår heller ikke fuktlikevekt, slik figur 20 viser, og har etter fem år et maksimalt fuktinnhold på rundt 16 vektprosent. Dette nivået er rundt to vektprosent lavere enn for ovennevnte varianter og ca. to vektprosent høyere en for Oslo. Oslo oppnår likevektsnivå på maksimalt 14 vektprosent etter omtrent tre år, hvilket støtter vurderingen om at fuktopptaket vinterstid for beregningsvariant 1 ikke er kritisk.

For Holzkirchen og Stockholm går fuktinnholdet i taktroa ned og etter to år har vanninnholdet stabilisert seg på et nivå med maksimal- og minimalverdier på henholdsvis 13 og 9 vektprosent. Generelt er fuktopptaket, som for de fleste variantene begynner i september, forholdsvis likt. Det som skiller disse variantene fra de øvrige, er mengde fukt som tørker ut til innelufta i perioden april til august. Slik også Stellander (2012) konkluderte, fører den årlige globalstrålingen i Holzkirchen på 1233 W/m^2 og årsmiddeltemperatur på 6,6 °C, til høyt uttørkingspotensial. Til sammenligning har Oslo årlig globalstråling på 1187,4 W/m^2 og årsmiddeltemperatur på 6,4 °C, hvilket forklarer høyere uttørking i Holzkirchen enn i Oslo.

Parametervariasjon uteklima - Novaflexx

Figur 21 viser utviklingen av totalt vanninnhold i standardkonstruksjonen, ved bruk av Novaflexx, for de ulike uteklimaene sammenlignet med Oslo.



Figur 21: Totalt vanninnhold (kg/m^2) for standardkonstruksjonen med Novaflexx, for de ulike uteklimaene sammenlignet med Oslo.

Resultat

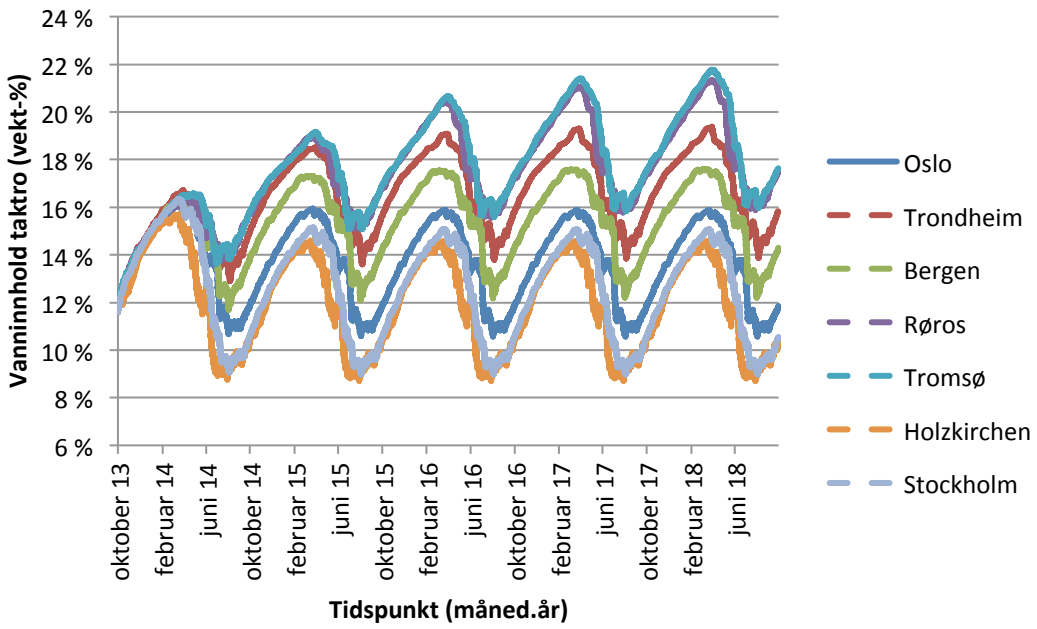
Ved å benytte Novaflexx øker det maksimale totale vanninnholdet betraktelig for alle uteklimaene sammenlignet med Intello, hvilket understreker at vanndampmotstanden til Novaflexx ikke er høy nok i oppfuktingsperioden. Spesielt for Tromsø og Røros øker det totale vanninnholdet betydelig og fuktinnholdet når ikke likevektsnivå etter fem års beregning. Vedlegg B viser at disse oppnår fuktlikevekt etter syv til åtte år, med maksimalnivå for totalt vanninnhold på ca. 2,3 kg/m^2 for begge variantene. Også Trondheims- og Bergensklimaet gir høyt maksimalt vanninnhold, men til forskjell fra ovennevnte klimaer, oppnås fuktlikevekt for Bergen og nesten for Trondheim.

For Trondheim og Bergen er riktignok fuktinnholdet etter hver uttørkingsperiode litt lavere enn for Intello, hvilket stemmer godt med Novaflexx sin store uttørkingsevne sammenlignet med Intello. Men på grunn av den forholdsvis lave dampmotstand i vinterhalvåret får Novaflexx for disse klimaene vesentlig større fuktopptak – for eksempel får Novaflexx i Bergen et fuktopptak det siste året på 0,41 kg/m^2 mot 0,14 kg/m^2 for Intello.

Med uteklima Holzkirchen eller Stockholm stabiliserer Novaflexx seg på fuktlikevekt etter to år, med et vanninnhold noe lavere enn startfuktnivået. I forhold til Intello viser disse klimaene høyere fuktnivå midtvinters, men også lavere fuktnivå etter hver uttørkingsperiode. Sammenlignet med Oslo viser disse to stedene litt lavere maksimal- og minimalverdier for totalt vanninnhold.

Vurdering

Resultatene fra figur 21 viser at det kan være kritisk å bruke Novaflexx i flate kompakttak plassert i Tromsø eller Røros, grunnet det store fuktopptaket vinterstid. Dette understrekes tydelig av vanninnholdet i taktroa, slik figur 22 viser, som er godt over 20 vektprosent på sitt høyeste de tre siste årene og dermed tilfredsstiller ett av to kriterier for mugg- og råtevekst (Byggforskserien, 2005).



Figur 22: Fuktinnhold (vektprosent) i taktroa ved bruk av Novaflexx, for de ulike uteklimaene sammenlignet med Oslo.

For at mugg- og råtevekst skal forekomme må også temperaturforholdene ligge til rette. For temperaturer under 10 °C vil veksten gå sakte, mens den er spesielt gunstig for temperaturer mellom 25 til 30 °C (Byggforskserien, 2005). I april, når fuktinnholdet er på sitt høyeste, er imidlertid månedsgjennomsnittet for utetemperaturene i Tromsø og Røros henholdsvis -0,7 °C og -2,2 °C (se tabell 6), hvilket tilsier at fuktinnholdet dermed ikke vil være kritisk (Geving & Thue, 2002).

Temperaturen i taktroa kan imidlertid bli vesentlig høyere enn uteluftas temperatur ved direkte soloppvarming. Dette vises tydelig i vedlegg C, der RF og temperatur i taktroa vises for Trondheim, Bergen, Røros og Tromsø. Ut ifra disse beregningene er det tydelig at alle disse uteklimaene fører til perioder der både RF og temperatur i taktroa er kritisk, med fare for mugg- og råtevekst. Disse beregningene viser også hvorfor det er nødvendig å gjøre grundige analyser av fuktnivå og temperaturforhold i taktroa, ettersom spesielt temperaturen i taktroa kan varier kraftig fra utelufta ved høy solinnstråling. Betydningen av mørkt eller lyst takbelegg bør i så måte vurderes ut ifra hva om er mest kritisk av høyt uttørkingspotensiale eller redusert temperatur i taktroa.

Årsaken til det store fuktopptaket vinterstid for Tromsø og Røros henger trolig sammen med disse klimaenes relativt lave månedsmiddeltemperaturer, kombinert med lite globalstråling, i perioden september til mars (se tabell 6 og 8).

Basert på ovennevnte vurderinger viser Novaflexx seg spesielt lite egnet for Tromsø og Røros, og lite egnet for Trondheim og Bergen, ved bruk av middels fukttilskudd og standard konstruksjonsoppbygging. Denne vurderingen er i samsvar med de funnene Bludau & Künzel (2009) gjorde i en lignende studie, der de konkluderte med at PA-folie brukt nord for Bodø vil medføre et uakseptabelt fuktinnhold.

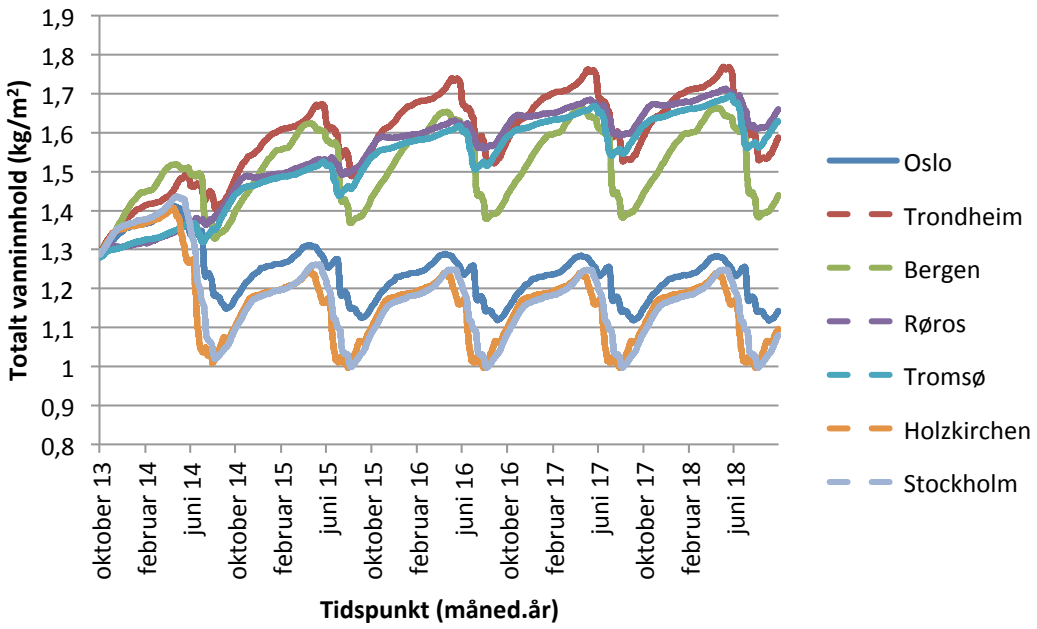
Uteklimaet i Oslo fører til likevektsnivå på maksimalt 16 vektprosent fukt i taktroa etter omtrent to år, hvilket er to prosent høyere en tilsvarende variant med Intello, og tydeliggjør effekten av stort fuktopptak for Novaflexx.

For taktroa i Holzkirchen og Stockholm stabiliserer fuktinnholdet seg etter to år, for maksimal- og minimalverdier på rundt 15 og 9 vektprosent. Sammenlignet med Intello i samme klima, viser Novaflexx et høyere maksimalt vanninnhold i taktroa, men omtrent samme minimalnivå.

Generelt viser Novaflexx et svært uheldig fuktnivå vinterstid, både for det totale vanninnholdet i takkonstruksjonene og fuktinnholdet i taktroa. Fuktopptaket vinterstid kommer av Novaflexx sin lave S_d-verdi på mellom 4,35 - 3,7 meter for RF-nivåer mellom 20 - 40 %, hvilket er betydelig lavere enn anbefalt 10 meter. I første omgang fører det totale vanninnholdet til redusert isolasjonsevne, med tilhørende varmetap. Videre er fuktinnholdet i taktroa kritisk for uteklimaene Tromsø, Røros, Trondheim og Bergen, da RF i perioder er godt over 75 %, samtidig som temperaturforholdene ligger til rette for vekst av mugg- og råtesopp.

Parametervariasjon uteklima – AirGuard Smart

Figur 23 viser utviklingen av totalt vanninnhold i standardkonstruksjonen, ved bruk av AirGuard Smart, for de ulike uteklimaene sammenlignet med Oslo.



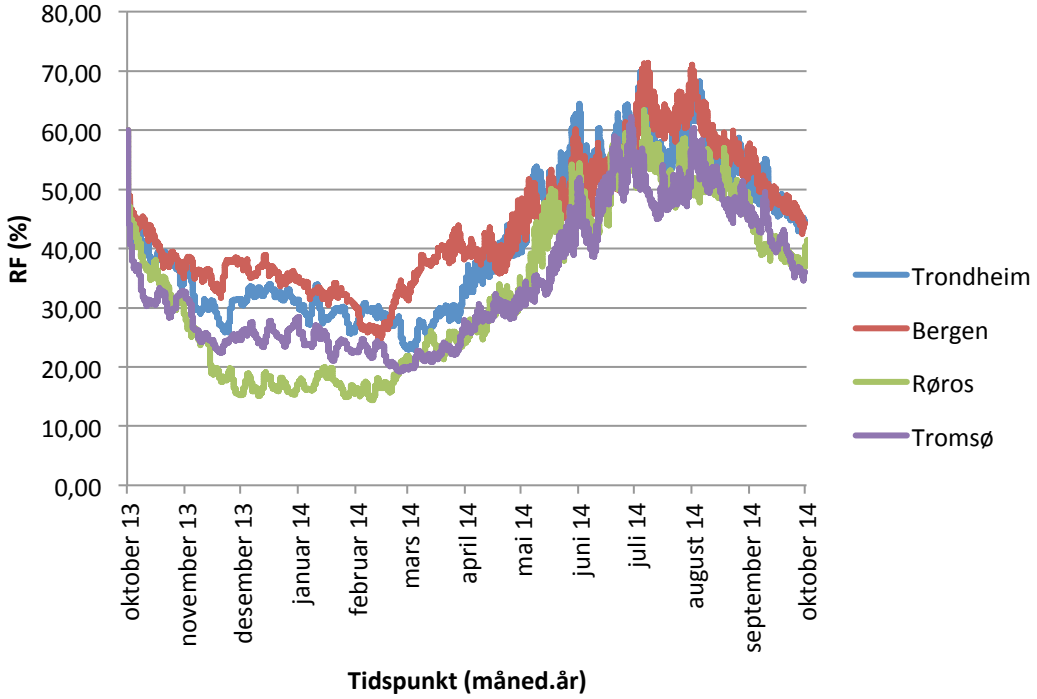
Figur 23: Totalt vanninnhold (kg/m^2) for standardkonstruksjonen med AirGuard Smart, for de ulike uteklimaene sammenlignet med Oslo.

Resultat

Generelt viser resultatene fra figur 23 at AirGuard Smart medfører både minst fuktopptak og lavest maksimalt vanninnhold. For alle de fire norske klimavariantene er maksimalt vanninnhold nokså likt, men uttørkingsperioden i Bergen fører til at dette klimaet får klart lavest fuktinnhold på sensommeren. Riktignok oppnår ingen av disse uteklimaene fuktlikevekt, men utvikling av grafen tyder på at fuktnivået er i ferd med å stabilisere seg.

I likhet med standardklimaet oppnår uteklimaene Holzkirchen og Stockholm fukt-likevekt etter tre år, på et lavere nivå enn startfuktnivået.

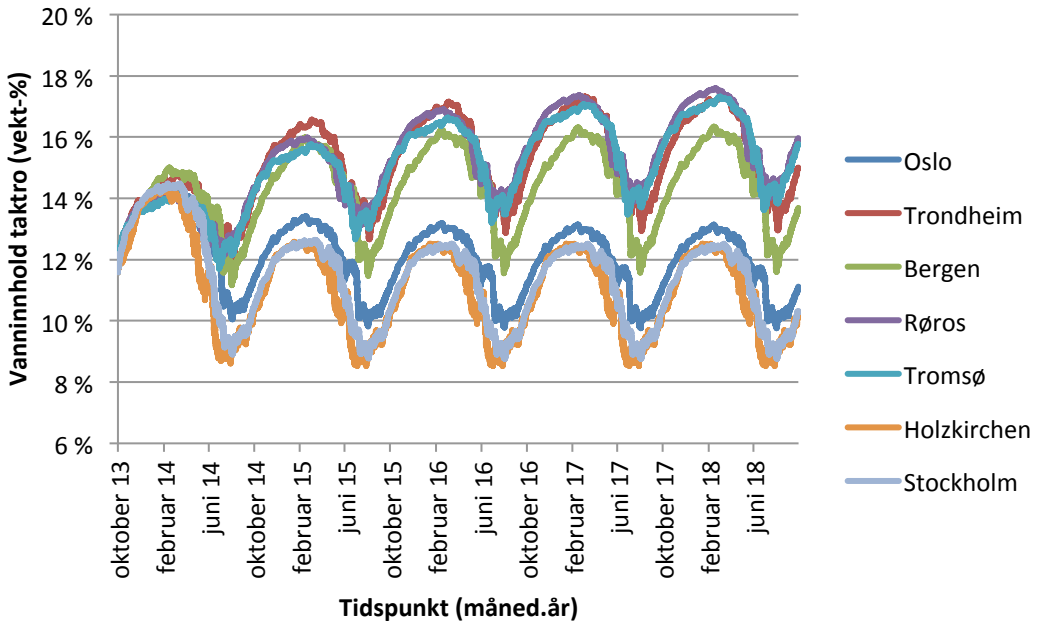
For AirGuard Smart kommer Trondheimsklimaet dårligst ut, med maksimalt vanninnhold på 1,75 kg/m^2 i slutten av april. Som diskutert tidligere er høyt RF-nivå i sperresjiktet, kombinert med lave utetemperatur og lite globalstråling, ugunstig med tanke på reduserte S_d-verdier og oppfukting i vinterhalvåret. Figur 24 viser snittet av RF på inn- og utside av sperresjiktet for AirGuard Smart, for de fire norske klimavariantene. Figur 24 viser at Trondheim og Bergen oppnår høyre RF en Røros og Tromsø i oppfuktingsperioden (september til april). Videre har Trondheim betydelig lavere årlig middeltemperatur og mengde globalstråling enn Bergen (slik tabell 6 og 7 viser) og dette er trolig årsaken til at Trondheimsklimaet får det største totale vanninnholdet.



Figur 24: Gjennomsnittlig RF på inn- og utside av AirGuard Smart for de fire norske klimavariantene.

Vurdering

Figur 25 viser vanninnholdet i taktroa ved bruk av AirGuard Smart i de ulike klimaene, sammenlignet med Oslo.



Figur 25: Fuktinnhold (vektprosent) i taktroa ved bruk av AirGuard Smart, for de ulike uteklimaene sammenlignet med Oslo.

Resultatene fra figur 25 viser at ingen av uteklimaene fører til kritisk fuktnivå og for Oslo, Holzkirchen og Stockholm stabiliserer vanninnholdet i taktroa seg på relativ likt nivå etter tre år, på mellom 13 og 9 vektprosent.

Selv om grafen for totalt vanninnhold viser høyest verdier for Trondheimsklimaet, viser det seg at vanninnholdet i taktroa for Trondheim, Røros og Tromsø er relativt likt. Årsaken til dette er trolig at Trondheimsklimaet har relativ høy årsmiddeltemperatur og mengde globalstråling sammenlignet med Tromsø og Røros, hvilket medfører større uttørkingspotensiale. Så selv om oppfukting for dettet klimaet hvert år er prosentvis størst, fører uttørkingsperioden i Trondheim til at disse tre klimaene kommer nokså likt ut når vanninnholdet i taktroa sammenlignes.

Bergensklimaet er i forhold til de tre ovennevnte klimaene spesielt gunstig med tanke på uttørking, grunnet høy årsmiddeltemperatur og mengde globalstråling. Så selv om figur 24 viser høye RF-verdier i oppfuktingsperioden, viser samme figur også at RF-nivået for Bergen er høyest ved endt uttørkingsperiode. Disse funnene stemmer godt overens med at AirGuard Smart plassert i Bergen viser de største svingningene i totalt vanninnhold over året, samtidig som maksimalt og minimalt vanninnhold er lavere enn for Trondheim, Tromsø og Røros.

Generelt kommer AirGuard Smart klart best ut av de tre smarte dampsperrene ved middels fukttilskudd og standard konstruksjonsoppbygging, både i forhold til fuktopptak og fuktinnhold i taktroa. Dette skyldes AirGuard Smart sin høye damp-motstand for normale vinterforhold, med S_d-verdier mellom 102,5 - 18,2 meter for RF mellom 0 - 37,5 %.

Betydningen av ulike klimafaktorer

Effekten av å plassere de smarte dampsperrene i forskjellige uteklimaer ga store utslag i vanninnhold, og det er derfor av interesse å gjøre en generell vurdering av klimafaktorer som påvirker fuktopptak. Faktorer som påvirker fuktopptaket og som kan variere sterkt fra sted til sted, er uteluftas temperatur og fuktinnhold, og mengde solinnstråling.

Lav utetemperatur om vinteren medfører store temperaturforskjeller over konstruksjonen, vesentlig damptrykkgradient og stort potensiale for utadrettet fukt-transport. Ettersom inneklimaet defineres ved hjelp av innvendig fukttilskudd og ventilasjonsgrad, vil uteluftas RF-nivå påvirke inneluftas RF-nivå og dermed også dampmotstanden til de smarte dampsperrene. Hvis konstruksjonen i tillegg mottar minimalt med solinnstråling i den normale uttørkingsperioden (sen vår og sommer), vil akkumulert fukt fra vinterhalvåret ikke tørke ut til innelufta og konstruksjonens totale vanninnhold vil øke fra år til år.

Tabell 6 og 7 viser månedsmiddeltemperaturer for uteklimaene. Siste kolonne i hver tabell viser summen av månedsmiddeltemperaturene og kan brukes for å vurdere de forskjellige uteklimaene opp mot hverandre. Tabell 8 og 9 viser månedlig globalstråling for tilsvarende steder.

Tabell 6: Månedsmiddeltemperaturer (°C) **for uteklimaene i oppfuktingsperioden september til mars (Geving & Thue, 2002), (Climate-data, 2013) & (Freemeteo, 2013).**

Sted/måned	September	Oktober	November	Desember	Januar	Februar	Mars	Sum
Trondheim	8,8	4,8	-0,6	1,9	-0,9	-0,4	-2,2	11,4
Tromsø	6,1	2,1	-3,4	-1,4	-4,4	-5,1	-5,2	-11,3
Røros	4,3	3,9	-9,3	-14,6	-13,4	-13,9	-5,4	-48,4
Bergen	11,1	8	5,5	4,6	3,2	0,2	5,4	38
Oslo	11,2	6,3	2,3	0	-2,9	-4,1	1,7	14,5
Holzkirchen	13,6	8,4	2,8	-1,1	-2,4	-1,1	3,2	24,4
Stockholm	11,9	7,5	2,6	-1,0	-2,8	-3,0	1,0	16,2

Tabell 7: Månedsmiddeltemperaturer (°C) **for uteklimaene i uttørkingsperioden april til august.**

Sted/måned	April	Mai	Juni	Juli	August	Sum
Trondheim	3	9,6	10,9	13	12,8	49,3
Tromsø	-0,7	3,6	10,4	10,2	10,8	34,3
Røros	-2,2	5,5	10,1	11,8	11	36,2
Bergen	6,9	8,9	10,8	16,9	15,2	58,7
Oslo	5,4	10,6	11,6	18,2	16,5	62,3
Holzkirchen	7,3	11,7	15	17	16,5	67,5
Stockholm	4,6	10,7	15,6	17,2	16,2	64,3

Tabell 8: Månedlig globalstråling for uteklimaene i oppfuktingsperioden september til mars (Geving & Thue, 2002) & (Sveriges metorologiske och hydrologiske institut, 2013).

Sted/måned	September	Oktober	November	Desember	Januar	Februar	Mars	Sum
Trondheim	76,9	33,8	8,7	2,2	5,9	26,2	56,4	210,1
Tromsø	57	17	1,6	0	0,3	14	56	145,9
Røros	65,5	33,7	10,9	3,6	5,4	25,5	64,1	209,7
Bergen	84,1	43,2	13,8	4,9	9,2	36,1	57,9	249,2
Oslo	114,8	42,7	14,8	8,6	11,3	38,5	58,2	288,9
Holzkirchen	Ikke funnet	-	-	-	-	-	-	-
Stockholm	76,4	37,1	13,6	6,9	10,3	26,5	66,5	237,3

Tabell 9: Månedlig globalstråling for uteklimaene i uttørkingsperioden april til august.

Sted/måned	April	Mai	Juni	Juli	August	Sum
Trondheim	127,7	180,2	172,1	171,7	146,1	797,8
Tromsø	105,5	185,9	234,5	148,2	111,1	785,2
Røros	129,6	185	164,3	152,5	113,6	745
Bergen	131	192	170,9	202,8	125,6	822,3
Oslo	136,8	229,1	154,1	218	160,5	898,5
Holzkirchen	Ikke funnet	-	-	-	-	-
Stockholm	107,1	162,4	176,5	159,9	126,3	732,2

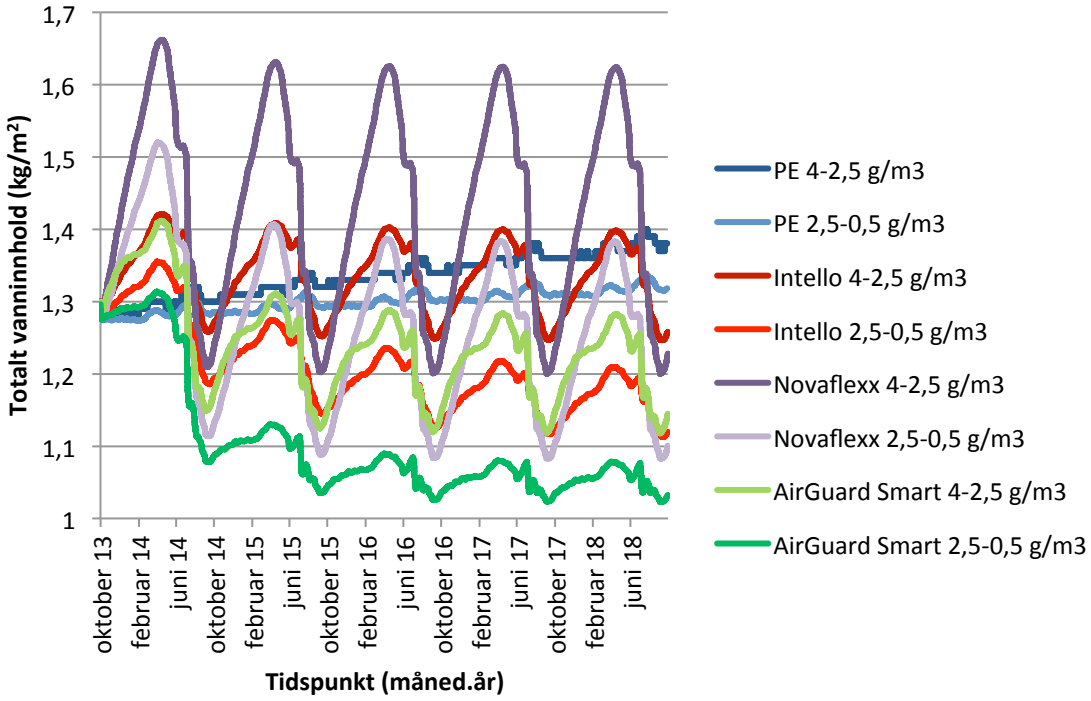
Ut ifra tabell 6, 7, 8 og 9 er det tydelig at spesielt uteklimaet i Trondheim, Tromsø og Røros kan være kritisk ved anvendelse av smarte dampsperrer. Dette kommer av kombinasjonen lav utetemperatur og lite globalstråling, som øker potensialet for utadrettet fukttransport om vinteren og reduserer uttørking til innelufta om sommeren. Denne vurderingen er i samsvar med funnene til Bludau & Künzel (2009).

4.6.3 Fukttilskudd

I det følgende er effekten av innvendig fukttilskudd vurdert. Beregningsvariantene 8 og 9 har henholdsvis lavt og høyt fukttilskudd og vil hver for seg bli sammenlignet med beregningsvariant 1, med middels fukttilskudd.

Lavt fukttilskudd

Figur 26 viser utviklingen av totalt vanninnhold for lavt fukttilskudd (2,5 - 0,5 g/m^3), sammenlignet med middels fukttilskudd (4 - 2,5 g/m^3), for standardkonstruksjonen plassert i Oslo.



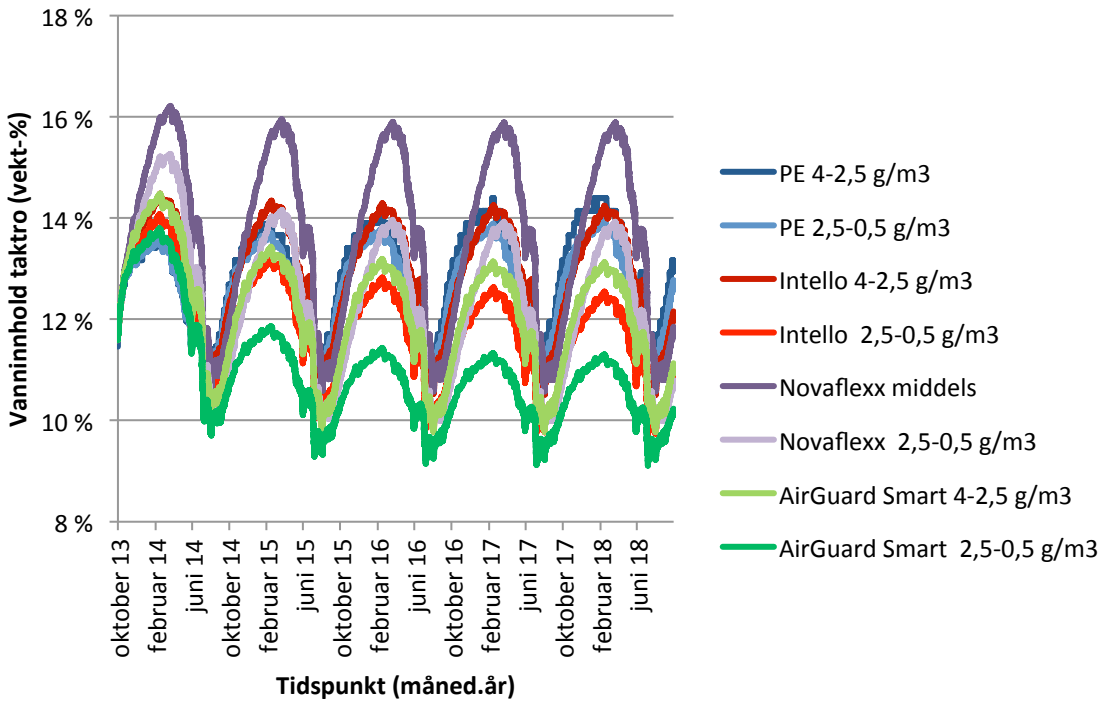
Figur 26: Totalt vanninnhold ved middels og lavt fukttilskudd for beregningsvariant 1 og 8.

Resultat

Resultatene fra figur 26 viser tydelig effekten av redusert fukttilskudd, da alle variantene får en kraftig reduksjon i totalt vanninnhold sammenlignet med middels fukttilskudd. For de smarte dampsperrene er reduksjonen omtrent lik, på ca. 0,2 kg/m^2. Variantene med smart dampsperre innstiller seg på fuktlikevekt etter to år. Varianten med PE-folie blir derimot ikke like påvirket av redusert fukttilskudd og får en økning av fuktinnholdet gjennom hele beregningsperioden. Reduksjonen i totalt vanninnhold for PE-folie ved å bruke lavt fukttilskudd, er på ca. 0,08 kg/m^2.

Vurdering

Figur 27 viser vanninnhold i taktroa med lavt fukttilskudd, sammenlignet med taktroa med høyt fukttilskudd.

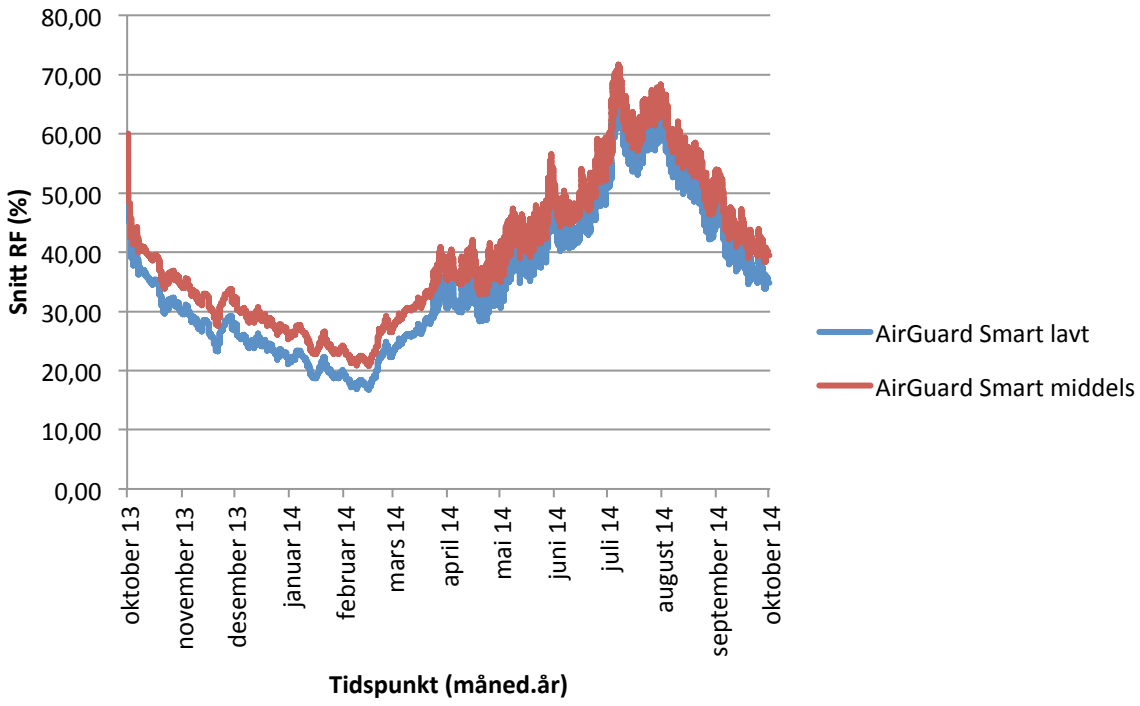


Figur 27: Vanninnhold (vektprosent) i taktroa for middels og lavt fukttilskudd.

Resultatene fra figur 27 viser at uttørkingen i taktroa om sommeren ikke er særlig påvirket av middels eller lavt fukttilskudd, siden taktroa med lavt og middels fukttilskudd oppnår omtrent samme minimalverdier for vanninnhold for samme dampsperretype. Derimot blir oppfuktingen i vinterhalvåret kraftig redusert ved lavt fukttilskudd, på grunn av det reduserte RF-nivået som oppstår i innelufta ved mindre fukttilskudd. Som tidligere diskutert skyldes den utadrettete fukttransporten damptrykkforskjeller over konstruksjonen og ved redusert innvendig damptrykk, som kommer med lavere RF, blir følgelig potensialet for fukttransport også redusert.

Spesielt viser konstruksjonen med AirGuard Smart seg å fungere godt ved redusert fukttilskudd. AirGuard Smart har lavest vanndampmotstand i fuktig tilstand (se tabell 1) og oppnår følgelig også lavest vanninnhold i taktroa etter endt uttørkingsperiode. I kombinasjon med høy vanndampmotstand for lave RF-nivåer, som oppstår i vinterhalvåret med lavt fukttilskudd (se figur 28), kommer AirGuard Smart til sin fulle rett og viser seg som det beste alternativet i forhold til fuktopptak.

Figur 28 viser gjennomsnittlig RF på inn- og utside av AirGuard Smart, ved lavt og middels fukttilskudd. I perioden november til mars, da potensialet for utadrettet fukt-ransport normalt er størst pga. lave utetemperaturer, har AirGuard Smart for lavt fukt-tilskudd et RF-nivå mellom 17 og 25 % og følgelig vil dampmotstanden være langt over kravet på 10 meter.



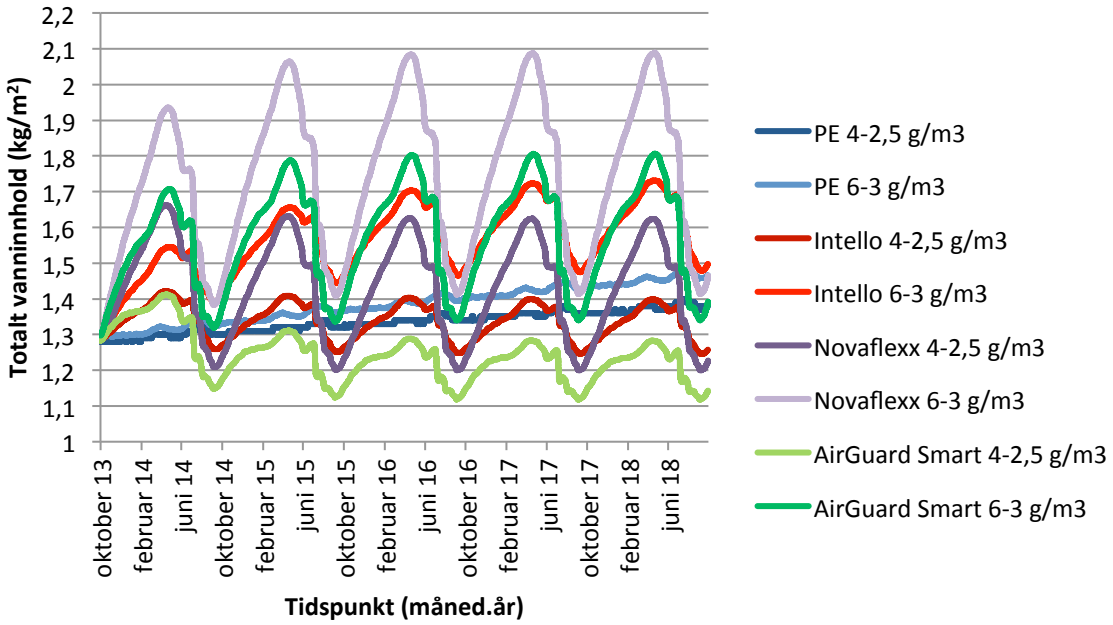
Figur 28: Gjennomsnittlig RF på inn- og utsiden av AirGuard Smart, ved lavt og middels fukttilskudd.

For taktroa med Intello og Novaflexx er uttørkingsnivået forholdsvis likt, men begge viser betydelig høyere fuktopptak i vinterhalvåret enn AirGuard Smart. Som vurdert tidligere kommer dettet av lavere dampmotstand i oppfuktingsperioden. I perioden november til mars, der AirGuard Smart har RF mellom 17 - 25 %, har Novaflexx og Intello henholdsvis 25 - 36 % RF og 17 - 31 % RF, slik vedlegg D viser. For disse nivåene er det ikke tilgjengelig eksakte S_d-verdier, men basert på tabell 1 vil Novaflexx ha dampmotstand på rundt 4 meter, mens Intello vil ha S_d-verdier mellom 26 til ca. 10 meter og følgelig er det årsaken til at disse får et høyere fuktopptak .

Generelt viser vanninnholdet i taktroa at ingen av de smarte dampsperrene vil by på fuktproblemer ved bruk i takkonstruksjoner der det er lavt fukttilskudd i innelufta. Alle de smarte dampsperrene kan derfor trygt benyttes for standardkonstruksjonen plassert i Oslo ved lavt fukttilskudd i innelufta, selv om AirGuard Smart vil vært mest gunstig med tanke på isolasjonsevne og den negative påvirkningen oppfukting har for denne.

Høyt fukttilskudd

Figur 29 viser utviklingen av totalt vanninnhold for høyt fukttilskudd sammenlignet med middels fukttilskudd, for PE-folie og de tre smarte dampsperrene, ved bruk av standardkonstruksjonen plassert i Oslo.



Figur 29: Totalt vanninnhold for middels og høyt fukttilskudd for beregningsvariant 1 og 9.

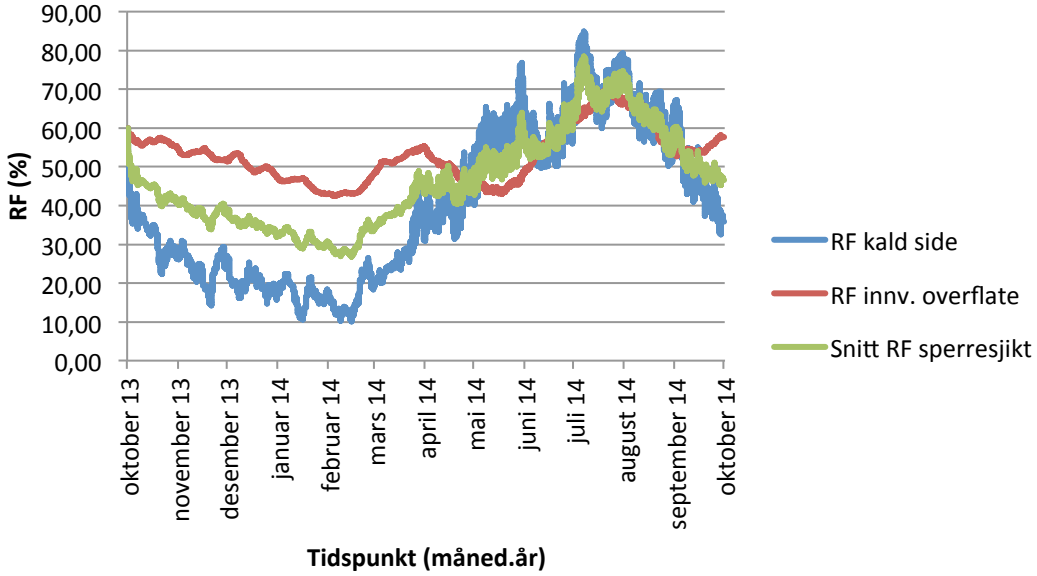
Resultat

Resultatene fra figur 29 viser en kraftig økning i fuktopptaket ved en økning til høyt fukttilskudd. De smarte dampsperrene responderer i større grad ulikt på økningen enn ved reduksjon fra middels til lavt fukttilskudd, hvilket tyder på at det forhøyede RF-nivået i innelufta ligger i et område der de smarte dampsperrene har svært ulike S_d-verdier. Fuktlikevekt innstilles etter to år for alle konstruksjonene med smart dampsperre, mens konstruksjonen med PE-folie fortsatt akkumulerer fukt etter fem år.

Konstruksjonen med Novaflexx stabiliserer seg på et maksimalt vanninnhold på ca. 2,1 kg/m^2, mens AirGuard smart ligger på 1,8 kg/m^2. Lavest maksimalt vanninnhold får Intello med 1,75 kg/m^2. Vedlegg D viser forskjellen mellom RF i innelufta for lavt og høyt fukttilskudd.

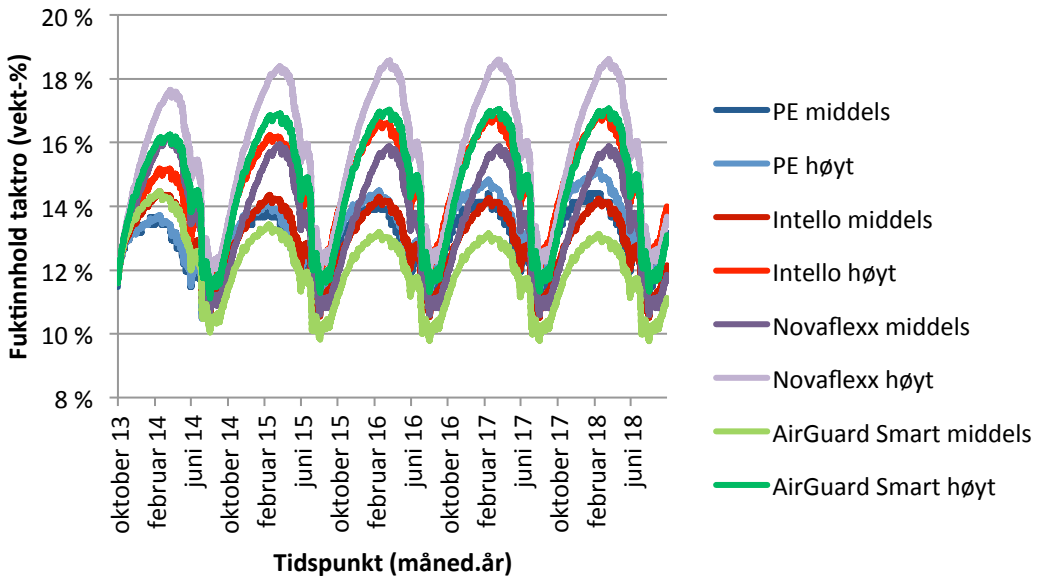
Vurdering

Resultatene viser at spesielt AirGuard Smart er sårbar for høyt fukttilskudd, da den får den største økningen i vanninnhold, med 0,5 kg/m^2. Årsaken til dette er AirGuard Smart sin lave dampmotstand for RF-verdier mellom 40 - 50 %, som oppstår i oppfuktingsperioden september til desember, slik figur 30 viser. For RF-nivåer mellom 41,5 - 62,5 % har AirGuard Smart S_d-verdier mellom 3,4 og 1,5 meter. Tilsvarende har Novaflexx og Intello henholdsvis S_d-verdier mellom 3,7 og 1 meter for 41,5 - 62,5 % RF og 16 og 6,9 meter for 25 - 50 % RF.



Figur 30: RF nivået på utsiden (kald side) av sperresjiktet, RF ved innvendig overflate og snittet av RF over sperresjiktet for AirGuard Smart, ved høyt fukttilskudd.

Ved å studere vanninnholdet i taktroa, slik figur 31 viser, får AirGuard Smart og Intello en betydelig økning i maksimalt vanninnhold sammenlignet med middels fukt-tilskudd. AirGuard Smart og Intello er likevel trygt under kritisk vanninnhold i forhold til mugg- og råtevekst. Den samme vurderingen gjelder for Novaflexx, men skulle denne konstruksjonen for eksempel plasseres i Tromsø, kan fuktopptaket bli kritisk. Generelt viser det seg at de smarte dampsperrene er følsomme for høyt fukt-tilskudd og for konstruksjoner med unormal fuktbelastning, som baderom eller svøm-mehaller, bør det gjøres særskilte vurderinger hvis smarte dampsperrer skal benyttes.



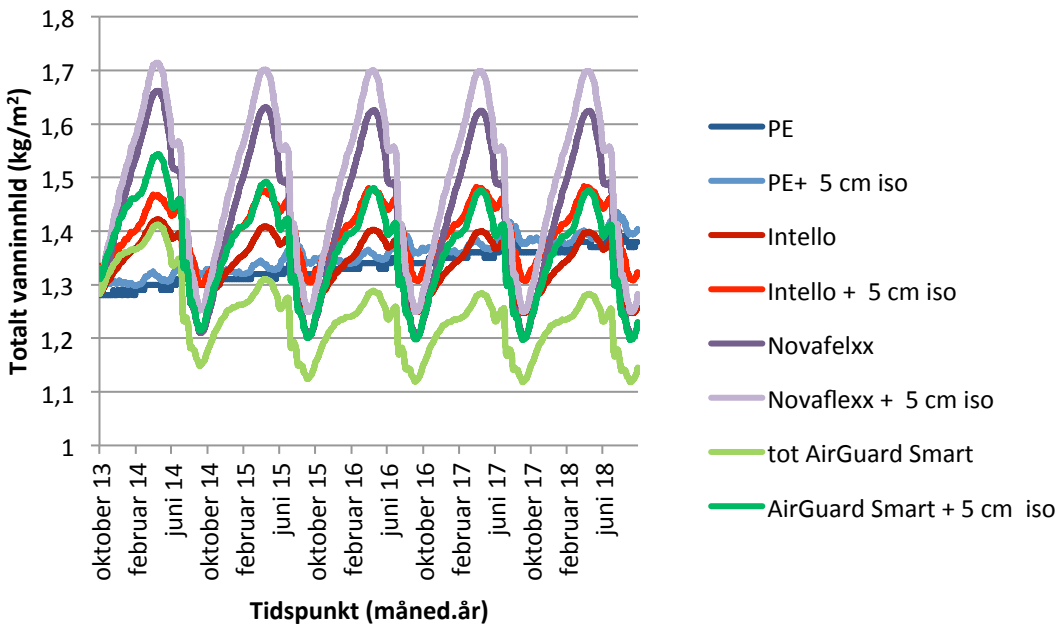
Figur 31: Vanninnhold (vekt- %) i taktroa for middels og høyt fukttilskudd.

4.6.4 Konstruksjonsoppbygging

I det følgende er effekten av to varianter av konstruksjonsoppbygging vurdert. Beregningsvariantene 10 og 11 har henholdsvis 50 mm ekstra innvendig isolering og malt himling og vil hver for seg bli sammenlignet med standardkonstruksjonen (beregningsvariant 1).

50 mm innvendig isolering

Figur 32 viser total vanninnhold for konstruksjonen med 50 mm innvendig isolering sammenlignet med standardkonstruksjonen, begge plassert i Oslo og med middels fukttilskudd.



Figur 32: Total vanninnhold for konstruksjonen med 50 mm innvendig isolering sammenlignet med standardkonstruksjonen.

Resultat

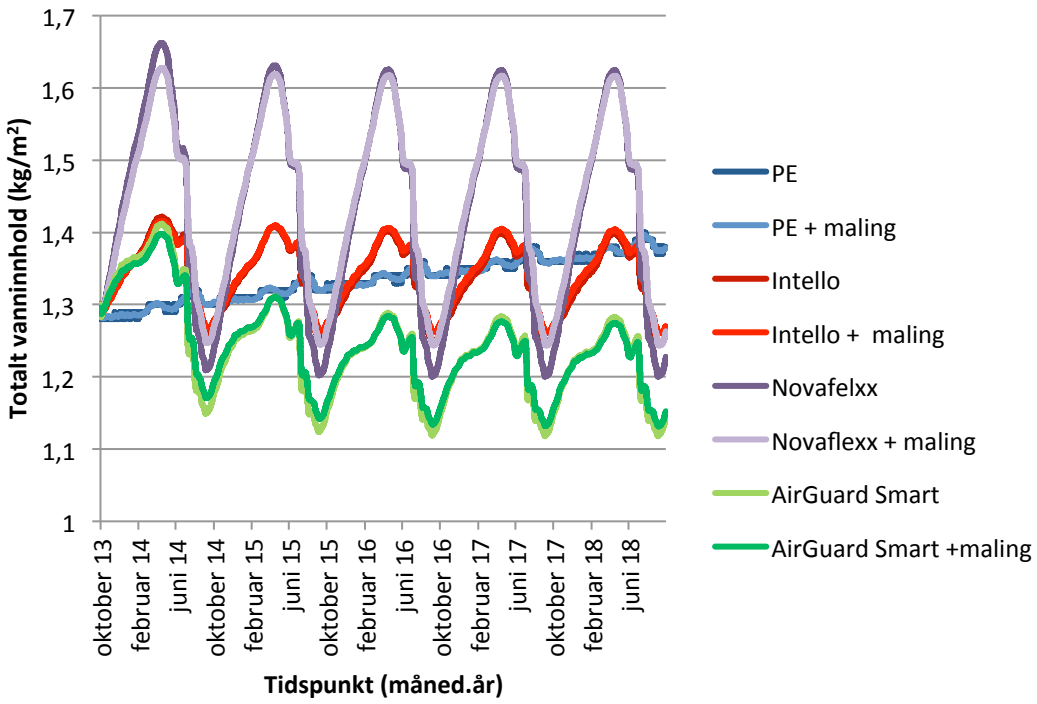
Resultatene fra figur 32 viser i varierende grad en økning i det totale vanninnholdet. AirGuard Smart er mest påvirket av effekten 5 cm ekstra isolasjon på varm side gir og får en økning i maksimalt vanninnhold på 0,2 kg/m^2. Intello får en økning på rundt 0,08 kg/m^2, mens Novaflexx er minst påvirket med en økning på 0,05 kg/m^2. Etter endt uttørkingsperioden er ikke forskjellene like store.

Vurdering

Som tidligere antydet fører 5 cm ekstra isolasjon til lavere temperatur ved sperre-sjiktet og følgelig en økning av RF-nivået. Dette fører igjen til en reduksjon av damp-motstanden og dermed får alle de smarte dampsperrene økt fuktopptak sammenlignet med standardkonstruksjonen. Økningen er imidlertid ikke kritisk med tanke på vann-innholdet i taktroa, så nedforing på 5 cm vil ikke medføre annet enn redusert isolasjonsevne, spesielt i vinterhalvåret.

Malt himling

Figur 33 viser total vanninnhold for konstruksjonen med malt himling sammenlignet med standardkonstruksjonen, begge plassert i Oslo og med middels fukttilskudd.



Figur 33: Total vanninnhold for konstruksjonen med malt himling sammenlignet med standardkonstruksjonen.

Resultat

Resultatene fra figur 33 viser en minimal forskjell mellom å benytte standard-konstruksjonen uten malt himling sammenlignet med konstruksjon med malt himling. Malt himling fører til at maksimalt fuktopptak blir noe redusert, samtidig som malt himling fører til litt mindre uttørking i sommerhalvåret.

Vurdering

Malt himling tilsvarer en økning i innvendig dampmotstand på 0,5 meter og gir dermed takkonstruksjonen et konstant tillegg i S_d-verdi for alle årstidene. Dette medfører at konstruksjonen i vinterhalvåret slipper gjennom litt mindre fukt, samtidig som malingen medfører at mindre fukt får tørke ut til innelufta om sommeren. Disse forskjellene er imidlertid så små at for maling som ikke er tettere enn 0,5 meter, vil effekten være ubetydelig for alle de smarte dampsperrene.

4.7 Oppsummering og konklusjon

I parameterstudien ble det valgt å vurdere parameterne *uteklima*, *lufttilskudd* og *konstruksjonsoppbygging*, basert på antagelsen om at disse parameterne vil ha størst påvirkning på fuktopptaket i et kompakttak vinterstid. Følgende parametervarianter ble valgt, med standardvariantene uthevet:

- *Uteklima*: **Oslo**, Trondheim, Bergen, Røros, Tromsø, Holzkirchen og Stockholm.
- *Fukttilskudd*: Lavt, **middels** og høyt.
- *Konstruksjonsoppbygging*: **standard**, 5 cm innvendig isolasjon, malt himling.

Dette oppsettet medførte 11 beregningsvarianter og totalt 44 simuleringer, ettersom alle beregningsvariantene ble simulert med PE-folie, Intello, Novaflexx og AirGuard Smart. Det er vurdert hvordan de forskjellige parameterne påvirker oppfuktingen til konstruksjonen, ved å analysere svingningene i konstruksjonenes totalt fuktinnhold over en beregningsperiode på fem år. Fuktinnholdet i taktroa ble også vurdert, med tilhørende analyse for mugg- og råtevekst. Den generelle betydningen av uteklimaforhold som temperatur, RF og globalstråling ble vurdert opp mot fuktopptak og hvilket fuktlikevektsnivå de ulike variantene stabiliserte seg på.

Uteklima

Klimaet i Norge er svært variert og den første parametervariasjonen vurderte derfor innvirkning av å plassere standardkonstruksjonen forskjellige steder, over en periode på 5 år, med middels innvendig fukttilskudd. Resultatene viser at bruk av Novaflexx og Intello i Trondheim, Tromsø eller Røros er kritisk, i første omgang på grunn av redusert isolasjonsevne, men også for mugg- og råtevekst i taktroa ved bestemte temperaturforhold.

Til sammenligning viste Bergensklimaet seg forholdsvis gunstig, mye på grunn av høyere årsmiddeltemperatur og større mengde globalstråling. Referanseklimaet Oslo kom best at av de norske klimaene, takket være høye årlige utetemperaturer og mengde solinnstråling, men viste fortsatt høyere fuktopptak enn Holzkirchen og Stockholm.

AirGuard Smart viste for alle klimaene klart lavest fuktopptak, hvilket skyldes den høye dampmotstanden AirGuard Smart har ved lave RF-nivåer (0 - 40 %). Den høye dampmotstanden, sammen med lavest S_d-verdi i fuktig tilstand, gjør AirGuard Smart best egnet for alle uteklimaene ved middels innvendig fukttilskudd og standard konstruksjonsoppbygging.

Fukttilskudd

Inneluftas fuktnivå er avgjørende for dampmotstanden til de ulike smarte dampsperrene og henger blant annet sammen med fukttilskudd. Det ble derfor vurdert hvilken påvirkning lavt, middels og høyt fukttilskudd vil ha for standardkonstruksjonen plassert i Oslo.

Resultatene viser at lavt fukttilskudd reduserer oppfuktingen i vinterhalvåret for samtlige sperreprodukter, sammenlignet med middels fukttilskudd, men at uttørkingen om sommeren omtrent er uendret. Ved redusert fukttilskudd synker inneluftas RF og dermed også differansen mellom inne- og uteluftas vanndamp-konsentrasjon i vinterhalvåret. Følgelig blir potensialet for utadrettet fuktransport redusert, samtidig som snittet av RF på inn- og utsiden av sperresjiktet minker og dampmotstanden økes.

Ved å sette fukttilskudd til høyt, øker fuktopptaket i vinterhalvåret betydelig sammenlignet med middels fukttilskudd, og spesielt AirGuard Smart viser seg sensitiv for det økte RF-nivået i innelufta. Årsaken til dette er AirGuard Smarts dampmotstand for RF-verdier mellom 40 - 50 %, som er noe lavere en for Novaflexx og betydelig lavere enn for Intello. Likevel viser vanninnholdet i taktroa at bare Novaflexx har perioder midtvinters nærmer 20 vektprosent, mens AirGuard Smart og Intello har maksimalnivå på rundt 17 vektprosent, grunnet gode uttørkingsevne.

Generelt fører økt fukttilskudd til kraftig økning i fuktopptaket vintertid, og selv om alle de smarte dampsperrene når fuktlikevektsnivå etter to år, vil høyt fukttilskudd fører til redusert isolasjonsevne og risiko for mugg- og råteskader hvis konstruksjonen plasseres i et ugunstig uteklima med vesentlig dårligere uttørkingsforhold en Oslo.

Konstruksjonsoppbyggning
En vanlig konstruksjonsoppbyggning for tak er innvendig nedforing på 5 cm under sperresjiktet, slik at kabler og lignende kan trekkes fritt uten risiko for å punktere dampsperra. Parameterstudien viser at en slik oppbygning fører til økt RF ved den smarte dampsperra og dermed redusert dampmotstand, sammenlignet med standardoppbyggingen plassert i Oslo for middels fukttilskudd. AirGuard Smart er mest påvirket av effekten innvendig isolering gir og får den største prosentvise økningen i maksimalt vanninnhold. Etter endt uttørkingsperiode er fuktnivået forholdsvis likt som for standardvarianten og totalt sett er økningen i vanninnhold vinterstid ikke kritisk med tanke på mugg- og råtevekst i taktroa.

Effekten av malt himlingen er også vurdert, siden en slik overflatebehandling vil gi et konstant tilskudd til den totale innvendige dampmotstanden for alle årstider. Resultatet av å øke innvendig dampmotstand med 0,5 meter er en liten reduksjon i fuktopptaket for alle de smarte dampsperrene, samtid som det medfører en noe dårligere uttørking. Forskjellene er imidlertid så små at effekten av malt himling anses som ubetydelig.

Konklusjon
Generelt viser parameterstudien at effekten av vinterforhold kan være kritisk ved kombinasjon av de «rette» parameterne og type smart dampsperre. Det viste seg at spesielt uteklimaene i Trondheim, Tromsø og Røros er ugunstige med tanke på fukt-opptak i de kaldere årstidene, hovedsakelig på grunn av forholdsvis liten mengde globalstråling og lave utetemperaturer.

Disse forholdene medfører en høy damptrykkgradient over takkonstruksjonen i vinterhalvåret, med tilhørende potensiale for utadrettet fuktransport. Ved å bruke Novaflexx eller Intello i disse uteklimaene vil risikoen for mugg- og råtevekst i taktroa være betydelig.

Effekten av høyt innvendig fukttilskudd ga i tillegg en kraftig økning i fuktopptaket vinterstid og kombineres dette med et ugunstig uteklima, som for Tromsø eller Røros, vil det være stor risiko for mugg- og råtevekst i taktroa. Hvis konstruksjonen i tillegg har 5 cm isolert nedforing, vil RF-nivået i sperresjiktet øke og S_d-verdien synke, og resultatet vil være en ytterligere økning av fuktopptaket.

5. Laboratorieforsøk

I dette kapitelet vil laboratorieforsøket bli presentert, ved først å introdusere hensikten med forsøket. Videre følger en beskrivelse av forsøksriggen og takprøvene, og en gjennomgang av målemetoder og usikkerhet knyttet til forsøket. Avslutningsvis blir resultatene fra de tre syklusene presentert og diskutert.

5.1 Hensikt

Hensikten med laboratorieforsøket er å se om fire ulike smarte dampsperrer har tilstrekkelig høy vanndampmotstand ved vinterforhold – altså når innelufta er betydelig varmere enn utelufta og det dermed oppstår et potensiale for utadrettet fukt-transport. Ut ifra produsentenes materialopplysninger er det tydelig at noen av produktene kan ha kritisk lave S_d-verdier for gitte RF-nivåer, som typisk oppstår om vinteren, gjerne i kombinasjon med høyt fuktnivå i innelufta. Dette kom også tydelig frem i parameterstudien, der økt innvendig fukttilskudd medførte en betydelig økning i fuktopptaket.

Forsøket deles derfor opp i tre sykluser, hver på tre uker, med forskjellig innvendig fukttilskudd for ellers konstant uteklima (temperatur og RF), tilsvarende vinter-forhold. Fukttilskuddet for de tre syklusen tilsvarer henholdsvis lavt, middels og høyt fukttilskudd, som presentert i kapitel 4.4.2 På den måten kan fuktopptak ved forskjellige fukttilskudd vurderes og S_d-verdier for gitte RF-nivåer, oppgitt av produsentene, kan kontrolleres mot beregnede S_d-verdier, basert på måleresultater fra forsøket.

Forsøket fant sted i klimarom tilhørende Institutt for Bygg, Anlegg og Transport i Trondheim, i perioden 26. april 2013 - 28. mai 2013.

5.2 Forsøksriggen

For å simulere kaldt uteklima på den ene siden av takprøvene og varmt inneklima på den andre, med mulighet for å holde fukttilskuddet konstant, ble en allerede oppsatt vegg i klimarommet modifisert og benyttet som forsøksrigg, slik figur 34 viser. Dette innebærer at takprøvene under forsøksperioden ble montert vertikalt istedenfor horisontalt. En slik veggmontering kan tenkes å gi for eksempel internkonveksjon, men det vurderes at denne orienteringen av takprøvene har liten betydning for forsøket. Figur 52 i vedlegg E viser snittegning av forsøksriggen.

Figur 34: Forsøksriggen med de tolv takprøvene montert, sett fra varm side (inneklima).

Veggen deler av klimarommet på langs, med klimaskapet som styrer fukttilskuddet på varm side. For å minimere varmetapet fra varm til kald side og dermed gjøre klimaforholdene optimalt stabile, ble veggen isolert i sin helhet, med 300 mm tykk mineralull. På kald side ble Hunton vindsperre montert kontinuerlig over veggen.

For å forenkle utakk av takprøver i riggen og gjøre hver takprøve mest mulig uavhengig, ble fire av fakkene i stenderveggen delt opp med tre utsparinger i hver, som tilsammen ga plass til tolv takprøver i riggen, slik figur 34 viser. Inndelingen ble utført med trykkfast isolasjon av 5-10 cm tykkelse, på alle de fire sidekantene i de tolv utsparingene. Innenfor den trykkfaste isolasjonen ble det montert 5 cm mineralull. Se figur 52 i vedlegg E for snittegning av forsøksriggen.

5.3 Takprøvene

Det ble testet syv ulike varianter av takkonstruksjoner i riggen, hvorav de fem første variantene ble testet med to paralleller for hver oppbygning, for økt målesikkerhet (takprøve nummer 1-10). Disse fem variantene har lik konstruksjonsoppbyggning, men varieres med enten PE-folie eller en av de fire smarte dampsperrene. Figur 37, 38 og 39 viser henholdsvis takprøve uten dampsperre, med dampsperre og med himlingsplate. De resterende to variantene (nummer 11 og 12) er bygget opp med ekstra innvendig isolering, for å simulere 5 cm innvendig nedforing.

Takprøvene er konstruert ved hjelp av samme type IKEA-bokser som Stellander (2012) og Thorsrud (2012) brukte, men nye ble kjøpt inn for dette forsøket. Tabell 10 og 11 viser henholdsvis materialparameter for produktene benyttet i takprøvene og materialsammensetningen for de 12 takprøvevariantene.

Tabell 10: Basisparametere for materialer brukt i takprøvene.

Materiale	Densitet [kg/m³]	Porøsitet [m³/m³]	Spesifikk varmekapasitet [J/kgK]	Varme-konduktivitet [W/mK]	S_d-verdi [m]
Taktekning:					
Polypropylenplast	-	-	-	-	Høy
Fuktabsorberende materiale:					
Bomull-cellulose	-	-	-	-	Lav
Isolasjonsmateriale:					
Glassull	23,5	0,99	840	0,033	Lav
Dampsperrer:					
Intello	115	0,086	2500	2,4	0,25 - 26
Novaflexx	65	0,001	2300	2,9	0,08 - 4,38
Hygrodiode	0,12 kg/m²	-	-	-	0,98 - 19,6
AirGuard Smart	115	0,086	2500	2,4	0,02 - 102,5
Himling:					
Gipsplate	625	-	-	-	0,035 – 0,11

Tabell 11: Oppbygningen til de 12 takprøvene.

Takprøve	Taktekning	Fukt-absorberende materiale	Isolasjon	Dampsperre	Himling
1	Polypropylenplast	Bomull-celluloseklut	Glassull (200 mm)	PE-folie	Gipsplate
2	Polypropylenplast	Bomull-celluloseklut	Glassull (200 mm)	Intello	Gipsplate
3	Polypropylenplast	Bomull-celluloseklut	Glassull (200 mm)	Hygrodiode	Gipsplate
4	Polypropylenplast	Bomull-celluloseklut	Glassull (200 mm)	Novaflexx	Gipsplate
5	Polypropylenplast	Bomull-celluloseklut	Glassull (200 mm)	AirGuard Smart	Gipsplate
6	Polypropylenplast	Bomull-celluloseklut	Glassull (200 mm)	PE-folie	Gipsplate
7	Polypropylenplast	Bomull-celluloseklut	Glassull (200 mm)	Intello	Gipsplate
8	Polypropylenplast	Bomull-celluloseklut	Glassull (200 mm)	Hygrodiode	Gipsplate
9	Polypropylenplast	Bomull-celluloseklut	Glassull (200 mm)	Novaflexx	Gipsplate
10	Polypropylenplast	Bomull-celluloseklut	Glassull (200 mm)	AirGuard Smart	Gipsplate
11	Polypropylenplast	Bomull-celluloseklut	Glassull (200 + 50 mm)	Novaflexx	Gipsplate
12	Polypropylenplast	Bomull-celluloseklut	Glassull (200 + 50 mm)	AirGuard Smart	Gipsplate

I det følgende vil materialene benyttet i oppbyggingen av takprøvene listes opp med en kort beskrivelse. Materialene er beskrevet i rekkefølge etter plassering i IKEA-boksene, regnet utenfra og inn, slik tabell 11 viser.

5.3.1 Taktekning - IKEA oppbevaringsboks

For både å tillate enkel inn- og uttakning av takprøvene og simulere asfalt takbelegg, ble det benyttet IKEA oppbevaringsbokser av polypropylenplast. Polypropylenplast er tilnærmet damptett og vil gi en tilfredsstillende etterligning av taktekningsmaterialer typisk brukt for kompakte tak. IKEA-boksene er 23,5 cm dype og har en lysåpning på 0,1053 m^2.

5.3.2 Fuktabsorberende materiale

For dette forsøket ble det besluttet ikke å benytte taktro, ettersom takprøvene ikke skulle inneholde startfukt og det dermed ikke var behov for taktro til å holde på startfukt. Men ettersom takprøvene ble orientert vertikalt ble det besluttet å benytte bomull cellulosekluter med god oppsugningsevne, i bunn av boksene, med den hensikt å kunne absorbere eventuelt fuktopptak takprøvene måtte få. Klutene ble klippet til slik at bunn av boksene ble dekket med ett lag klut, slik figur 35 viser. Det ble i tillegg lagt en remse med fugemasse (Tech7) i bunn av boksene, for å forsikrer seg om at vann ikke ville kunne renne ut av boksene, slik figur 36 viser.

Figur 35: Fuktabsorberende materiale av bomull cellulosekluter.

Figur 36: Remse med fugemasse for å forhindre fukt i å renne ut av takprøvene.

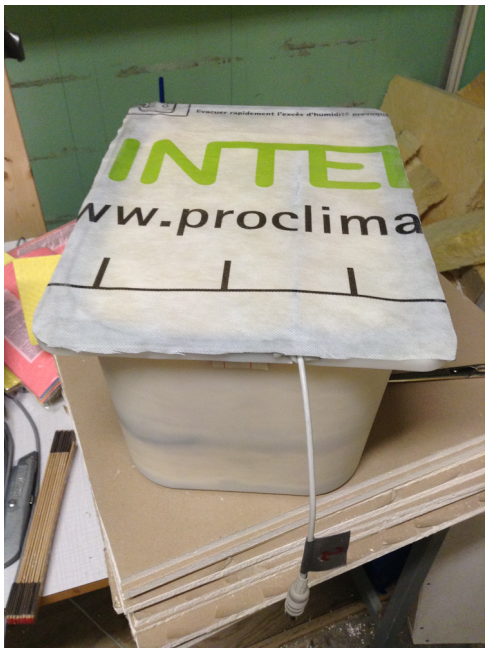
5.3.3 Isolasjon

Det ble benyttet glassull fra Glava som isolasjonsmateriale i alle de tolv takprøvene (se figur 37), for å etterligne en virkelig oppbygning av et kompakt lett tretak (Glava, 2012). I slike elementkonstruksjoner er mineralull godt egnet, ettersom bærlaget for tekningen er taktroa og isolasjonslaget derfor ikke trenger å være trykkfast. Glassull har en vanndampmotstandsfaktor, μ, på 1 og for tykkelser på 200 mm, som ble brukt i takprøvene, tilsvarer det en S_d-verdi på 0,2 m (Byggforskserien, 2004).

5.3.4 Dampsperrer

De samme smarte dampsperrene som Stellander (2012) og Thorsrud (2012) undersøkte, ble også benyttet i dette forsøket. Dampsperrene ble festet med dobbeltsidig teip til IKEA-boksene, slik figur 37 og 38 viser.

Figur 37: Takprøve av IKEA-boks med dobbeltsidig teip for feste av sperreprodukt.



Figur 38: Takprøve med påmontert smart dampsperre og RF- og temperatursensor ført ut gjennom forseglet gjennomføring.

5.3.5 Himling

For å simulere himling er det montert tilpassede gipsplater med tykkelse 12,5 mm, som et lokk over åpningen på IKEA-kassen, slik figur 39 viser. Gipsplater for innvendig bruk, med densitet 625 kg/m^3, vil ha en S_d-verdi mellom 0,035 - 0,11 meter. Gipsplatene ble festet til oppbevaringsboksene med tape, som også hindrer to-dimensjonal uttørking gjennom sidekantene.

Figur 39: Takprøve med påmontert smart dampsperre og RF- og temperatursensor ført ut gjennom forseglet gjennomføring.

5.4 Klimaforhold

Laboratorieforsøket fant sted i Institutt for bygg, anlegg og transport sitt klimarom, der det er mulig å styre romtemperatur og RF, samt utføre kontinuerlig logging av disse forholdene. Ved hjelp av sensorer (se 5.5.2) ble rommets temperatur og RF-nivå registrert og loggfør på en stasjonær PC plassert i rommet.

For å undersøke robustheten til de ulike smarte dampsperrene under vinterforhold, ble det bestemt å kjøre forsøket med tre forskjellige sykluser for inneluftas RF, basert på tilsvarende nivåer for innvendig fukttilskudd. I samsvar med parameterstudien, ble det samme forslaget for dimensjonerende verdier for fukttilskudd valgt. For å beregne inneluftas RF ut ifra fukttilskuddet og temperatur ble følgende formler benyttet (Geving & Thue, 2002):

1) $RF = \frac{V}{V_{set}} \times 100\% \; [g/m^3]$

2) $\Delta V = V_{inne} - V_{ute} \; [g/m^3]$

der RF = luftas RF-nivå ved gitt temperatur [%]

V_{set} = metningskonsentrasjon ved gitt temperatur $[g/m^3]$

V = luftas fuktinnhold (metningskonsentrasjon) for gitte temperatur og RF $[g/m^3]$

V_{inne} = fuktinnhold i inneluft $[g/m^3]$

V_{ute} = fuktinnhold i uteluft $[g/m^3]$

ΔV = fukttilskudd $[g/m^3]$

Innelufta ble satt til konstant 23 °C, slik også Stellander (2012) og Thorsrud (2012) gjorde det for sine labforsøk. Denne innetemperaturen tilsvarer fuktinnhold på 20,54 g/m^3 ved 100 % metning (Geving & Thue, 2002).

Utelufta ble satt til konstant -5 °C, for å simulere vinterforhold. Drivkraften for utadrettet fukttransport er damptrykkforskjellen over konstruksjonen, som oppstår når utetemperaturen er lavere enn innetemperaturen. Dette skjer hovedsakelig fra høst til vår og konstant utetemperatur på -5 °C tilsvarer omtrent månedsnormalen for januar, for både Trondheim og Oslo (har henholdsvis -3,3 °C og -4,3 °C) (Geving & Thue, 2002). Denne utetemperaturen tilsvarer fuktinnhold på 3,24 g/m^3 ved 100 % metning (Geving & Thue, 2002). Uteluftas RF vil normalt være høyest om vinteren og basert på månedsnormaler ble denne satt til å være konstant 80 %. For den gitte utetemperaturen og RF-nivået, blir V_{ute} :

$$1)\; V_{ute} = \frac{80\%}{100\%} \times 3{,}24 = 2{,}59 \left[\frac{g}{m^3}\right]$$

For å opprettholde de tre fastsatte nivåene for fukttilskudd, ble nødvendige RF-nivå for innelufta for de tre syklusene beregnet til å være:

Syklus 1
For syklus 1 gjelder lavt fukttilskudd, tilsvarende 2 g/m^3.

$$1)\ V_{inne} = X \times 20{,}54, \text{ der X = inneluftas RF [\%]}$$

$$2)\ 2\ g/m^3 = X \times 20{,}54 - 2{,}59\ g/m^3$$

$$2)\ X = \frac{4{,}59}{20{,}54} = \mathbf{22{,}3}\ \%$$

Syklus 2
For syklus 2 gjelder middels fukttilskudd, tilsvarende 4 g/m^3.

$$1)\ V_{inne} = X \times 20{,}54, \text{ der X = inneluftas RF [\%]}$$

$$2)\ 4\ g/m^3 = X \times 20{,}54 - 2{,}59\ g/m^3$$

$$2)\ X = \frac{6{,}59}{20{,}54} = \mathbf{32{,}1}\ \%$$

Syklus 3
For syklus 3 gjelder høyt fukttilskudd, tilsvarende 6 g/m^3.

$$1)\ V_{inne} = X \times 20{,}54, \text{ der X = inneluftas RF [\%]}$$

$$2)\ 6\ g/m^3 = X \times 20{,}54 - 2{,}59\ g/m^3$$

$$2)\ X = \frac{8{,}59}{20{,}54} = \mathbf{41{,}8}\ \%$$

5.5 Målemetoder

For å vurdere fuktopptaket til de ulike smarte dampsperrene under vinterforhold ble det utført målinger underveis i laboratorieforsøket. I det følgende vil det bli redegjort for de ulike målemetodene.

5.5.1 Veiing

For å fastslå takprøvenes evne til å motstå oppfukting på grunn av vanndampdiffusjon fra innelufta, ble prøvenes vektøkning brukt som mål. Takprøvene ble veid før forsøkets start og deretter en gang i uken gjennom forsøksperioden. Veiing ble utført til samme tidspunkt hver gang og på vekt av typen *Mettler PE16* (Mettler Toledo, 2012), se figur 39. Vektøkning (gram) fra forsøkets start til slutt angir netto fuktakkumulasjon i takprøvene, som følge av vanndampdiffusjon gjennom de ulike smarte dampsperrene. Vektøkningen ble også brukt for å beregne S_d-verdier.

5.5.2 RF- og temperatursensorer

For å kunne si noe om damptettheten til de ulike smarte dampsperrene underveis i forsøket, ble det montert RF- og temperaturersensorer på utsiden (mot isolasjonen) av dampsperrene. Ved hjelp av måledata fra sensorene, vil produsentenes opplysninger om S_d-verdier for gitte RF-nivåer, både kunne vurderes og sees i sammenheng med vektøkning og beregnede S_d-verdier.

Det ble benyttet 12 sensorer, slik at hver takprøve var utstyrt med én sensor. Sensorene er av typen *EE06* (E+E Elektronikk, 2012). Målinger av RF og temperatur ble logget kontinuerlig, med seks minutters intervall, gjennom hele forsøksperioden.

5.6 Måleusikkerheter og forenklinger

I det følgende vil det bli redegjort for forhold som kan ha påvirket måleresultatene eller forenklinger.

RF- og temperatursensorer

Seks av sensorene som ble brukt, er tidligere benyttet av både Thorsrud (2012), Stellander (2012) og Uvsløkk & Vågen (2012). Sensorene ble kontrollert før forsøkets oppstart. I tillegg ble seks nye sensorer innkjøpt. Disse ble også kontrollert før oppstart. Sensorene har imidlertid en målerusikkerhet på +/- 3 % og måleresultatene tyder det på at de nye og gamle sensorene ligger i hver sin ende av skalaen.

PC

Det ble benyttet samme stasjonære PC for logging av måledata, som Stellander (2012) og Thorsrud (2012) benyttet. Denne er tilkoblet 16 kanaler og ettersom hver sensor trenger to kanaler (én til RF og én til temperatur) og fire av kanalene ble brukt til å logge inne- og uteklimaet, ble det anskaffet en bærbar PC med mulighet for å logge de resterende seks sensorene. Den stasjonære PCen logget resultater fra takprøve 1-6 og ble startet opp først, hvilket innebar at logging av måledata fra takprøve 1-6 startet opp et par minutter før loggingen fra den bærbare. Ved importering av data til excel-ark ble denne tidsdifferansen sett bort i fra, for å kunne sortere og samle data fra begge PCene i samme fil.

Inneklima

Inneklimaet i laboratoriet var innstilt med konstant innetemperatur på 23 ℃ og RF i forhold til beregnet fukttilskuddnivå. Hver gang prøvene skulle veies måtte døren til klimarommet åpnes og det er årsaken til at reell RF varierte litt i forhold til innstilt RF. Over forsøksperioden som helhet ble gjennomsnittet for RF for syklus 1, 2 og 3 henholdsvis 22,4 %, 32,8 % og 42,6 %. Dette avviket er imidlertid så lite at de ikke vektlegges videre.

Veiing

Takprøvene ble med jevne mellomrom tatt ut av riggen for å veies, for på den måten å kunne fastslå fuktopptaket. Dette førte til at det i kortere perioder ikke ble utført logging av RF og temperatur, siden takprøvene må frakobles sensorene ved veiing.

Med tanke på oppfukting kan det tenkes at tiden som medgikk til veiing kan ha ført til redusert eller økt oppfuktingshastighet. Veiingene ble imidlertid utført på ca. 30 min hver gang og det antas derfor at dette i minimale grad kan ha påvirket resultatene. Måleusikkerhet på grunn av veiing er derfor ikke viet nærmere oppmerksomhet.

Utettheter
Ledningene til sensorene er ført gjennom et hull øverst i IKEA-boksene. Denne gjennomføringen kan påvirke oppfuktingen ved at det oppstår en lokal utetthet. Det ble derfor tettet med ekstra butyl tettebånd rundt gjennomføringene.

5.7 Resultater og vurdering

For å bestemme fuktopptaket til takprøvene ble de veid jevnlig, slik det er beskrevet i kapittel 5.5.1. Fuktopptaket er definert som *vektøkning* $[M]$ for hver syklus og tilsvarer vektdifferansen mellom takprøvene ved oppstart syklus (M_{start}) og etter endt syklus ($M_{slutt,}$), slik formel 3 viser for syklus 1:

3) *Vektøkning*: $M_1 = M_{slutt,1} - M_{start,1}\ [g]$

For å kunne sammenligne fuktopptaket med resultatene fra WUFI-beregningene, vises også vektøkningen som mengde vann som i har diffundert gjennom lysåpningen $[A]$ til takprøvene. I samsvar med WUFI-simuleringene kalles dette for *vanninnhold* $[V]$ og beregnes etter formel 4:

4) *Vanninnhold*: $V_1 = \frac{[M_1]}{[A]} \times \frac{1}{1000}\ [kg/m^2]$, der A= 0,1053 m^2

Basert på fuktopptaket for hver syklus og målt RF-nivå i sperresjiktet, ble også S_d-verdier for de smarte dampsperrene beregnet. Dermed kan de beregnete S_d-verdiene fra forsøket, vurderes og kontrolleres mot oppgitte S_d-verdier fra produsentene. S_d-verdier ble beregnet i henhold til ISO 12527 og følgende formler:

(1) Hastighet for masseendring: $G_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1}$, der

G er forandring i masse per tidsenhet for en enkelt veiing, i kg/s.

m_1 er masse til takprøven ved tiden t_1, i kg.

m_2 er masse til takprøven ved tiden t_2, i kg.

t_1 og t_2 er tiden mellom veiingene, i s.

I henhold til testprosedyren skal G bestemmes ut ifra gjennomsnittet av 5 etterfølgende målinger, når de 5 etterfølgende målingene har verdier mellom 0,95G-1,05G. Ettersom takprøvene ble veid ukentlig er det bare tilgjengelig tre målinger for hver syklus og G er derfor snittet av disse tre målingene (veiinger).

(3) Vanndamppermeansen: $W = \frac{G}{A \cdot \Delta p_v} [kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa]$, der

A er det eksponerte arealet (lysåpningen) til takprøvene, i m^2, med verdi 0,1053 m^2.

Damptrykkgradienten Δp_v er differansen i metningstrykk, i Pa, over de smarte dampsperrene for hver av syklusene. Metningstrykket på ut- og innside av sperre-sjiktet er basert på tabulerte verdier fra *Håndbok 50 - Fukt i bygninger* (Geving & Thue, 2002) og bestemmes ved hjelp av gjennomsnittlig målt (logget med sensor) temperatur og RF på utsiden (kald side) av sperresjiktet og tilsvarende målinger for innelufta.

(4) Diffusjonsmotstand: $Z = \frac{1}{W} [M \cdot m^2 \cdot s \cdot Pa/kg]$, der M=10^9

Ved å dele diffusjonsmotstanden på faktoren 5,1 slik tidligere diskutert, finner man *beregnet S_d-verdi* på en forenklet måte, slik formel 5 viser:

5) Beregnet Sd-verdi: $S_d = \frac{Z}{5,1} [m]$

Denne fremgangsmåten er utført for hver av de tre syklusene, hvilket gir tre beregnete S_d-verdier for tilhørende RF-nivå, for hver av de smarte dampsperrene.

RF-nivået er snittverdien av gjennomsnittlig målt RF på utsiden av sperresjiktet og gjennomsnittlig målt RF i inneluften, for hver syklus. Ettersom 10 av takprøvene har en gipsplate på innsiden (varm side) av sperresjiktet, vil RF i innelufta trolig varier litt fra RF mellom sperresjiktet og gipsplaten, hvilket ville vært den korrekte RF-verdien å benytte for å regne snittverdi over sperresjiktet. Men siden det ikke er foretatt målinger av RF i dette sjiktet og dampmotstanden til gipsplaten er svært lav, antas disse RF-verdiene å være tilstrekkelig like og en slik forenkling kan derfor forsvares.

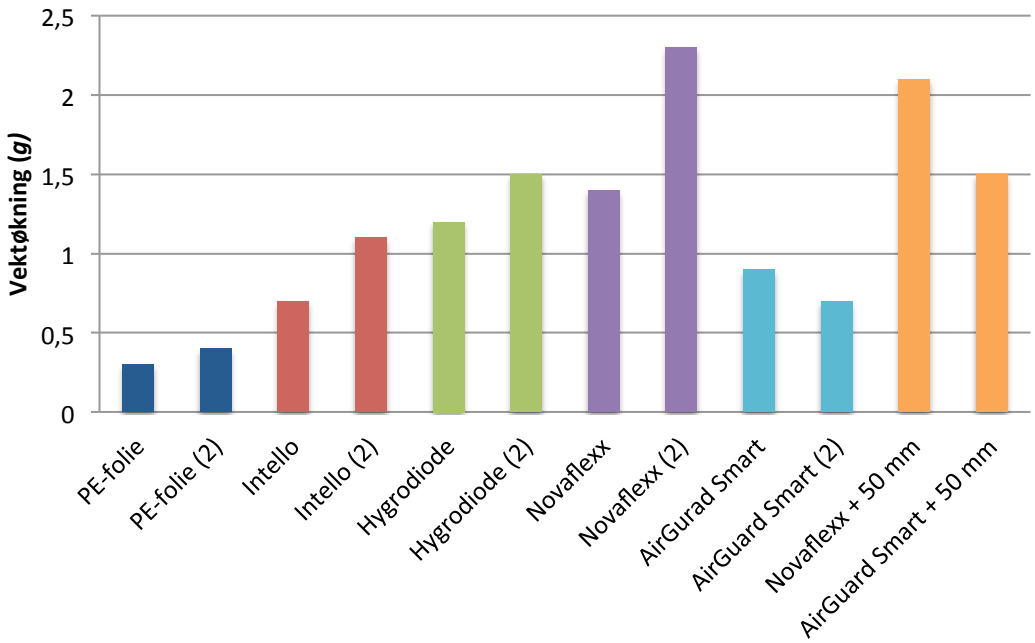
I de følgende tre underkapitlene vil syklus 1, 2 og 3 presenteres hver for seg. For hvert kapitel vil først resultatene bli presentert, ved å vise *vektøkning* og *vanninnhold* grafisk og *beregnet S_d-verdi* i tabellform, sammen med tilhørende *kommentarer*. I samme underkapittel følger så en *generell vurdering* av disse resultatene, før en *spesifikk analyse* av de ulike sperreproduktene avslutter underkapittelet. Tilslutt avsluttes kapitel 5 med oppsummering og konklusjon.

5.7.1 Syklus 1 – lavt fukttilskudd

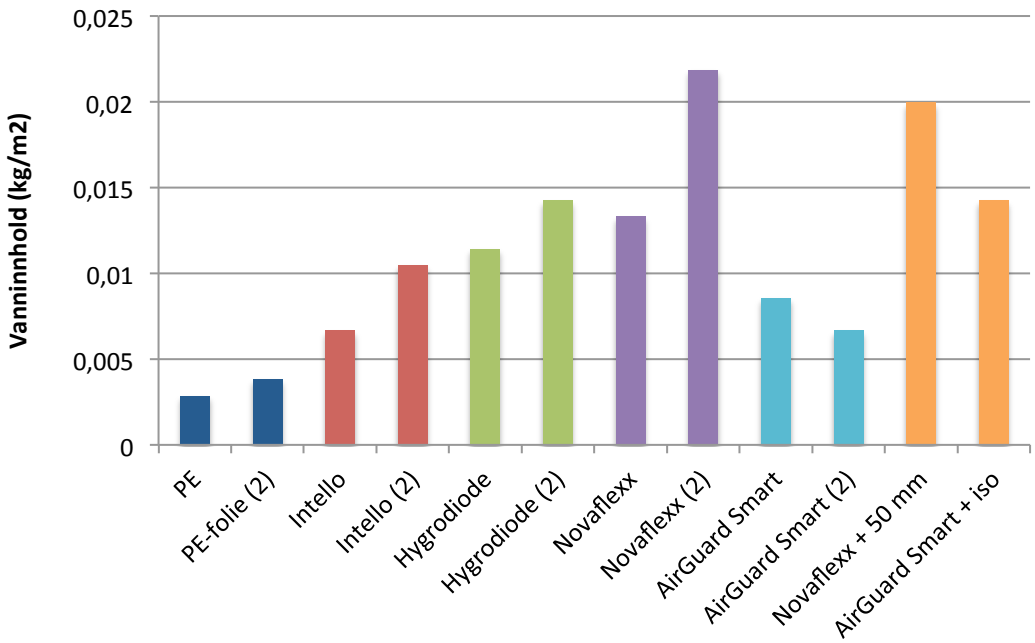
Syklus 1 ble kjørt med lavt fukttilskudd, tilsvarende 22,3 % RF i innelufta, i henhold til beregningene i kapitel 5.4. Syklus 1 foregikk over tre uker, i perioden 26. mars - 16. april 2013.

Vektøkning og vanninnhold

Figur 40 og 41 viser henholdsvis vektøkning og vanninnhold for syklus 1.



Figur 40: Vektøkning $[g]$ for alle takprøvene etter syklus 1, med fukttilskudd 2 g/m^3.



Figur 41: Vanninnhold $[kg/m^2]$ for alle takprøvene etter syklus 1, med fukttilskudd 2 g/m^3.

Kommentar
Resultatene gir forholdsvis lik økning i fuktakkumulasjon for takprøvene i hver parallell, hvilket tilsier at resultatene ikke er heftet med målefeil av større betydning og dermed kan anses som troverdige.

Resultatene fra syklus 1 viser at blant takprøveparallellene 1-10 oppnår takprøve-parallellene med Novaflexx og Hygrodiode høyest fuktakkumulasjon, i snitt henholdsvis 1,85 og 1,35 gram. Videre følger takprøvene med Intello og AirGuard Smart, med gjennomsnittlig fuktopptak på henholdsvis 0,9 og 0,8 gram. Takprøvene med tradisjonell dampsperre, PE-folie, oppnår lavest fuktøkning, i snitt 0,35 gram. Takprøvene med 50 mm ekstra innvendig isolasjon, Novaflexx og AirGuard Smart, akkumulerer henholdsvis 2,1 og 1,5 gram fukt.

Beregnet S_d-verdi
I det følgende vises først et eksempel for utregning av S_d-verdi for Intello, for syklus 1. Deretter følger tabell 12 med alle beregnete S_d-verdier for syklus 1, sammenlignet med nærmeste oppgitt S_d-verdi og RF-nivå fra produsent. Vedlegg F viser mellom-beregninger i samsvar med ISO 12527 for de alle de beregnete S_d-verdiene.

Eksempel utregning av S_d-verdi for Intello etter syklus 1, basert på tre veiinger:

$$(1)\ G_{1,1-0} = \frac{m_1 - m_0}{t_1 - t_0} = \frac{(2898{,}3 - 2898{,}1)g}{7\times24\times60\times60\ s} \times \frac{1\ kg}{1000\ g} = \frac{0{,}0002\ kg}{604800\ s} \approx 3{,}307\times10^{-10}\ kg/s$$

$$(1)\ G_{1,2-1} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} = \frac{(2898{,}2 - 2898{,}3)}{7\times24\times60\times60} \times \frac{1\ kg}{1000\ g} = \frac{-0{,}0001\ kg}{604800\ s} \approx -1{,}653\times10^{-10}\ kg/s$$

$$(1)\ G_{1,3-2} = \frac{m_3 - m_2}{t_3 - t_2} = \frac{(2898{,}8 - 2898{,}2)g}{7\times24\times60\times60\ s} \times \frac{1\ kg}{1000\ g} = \frac{0{,}0006\ kg}{604800\ s} \approx 9{,}921\times10^{-10}\ kg/s$$

$$G_{snitt} = \frac{G_{1,1-0} + G_{1,2-1} + G_{1,3-1}}{3} \approx 3{,}858 \times 10^{-10}$$

I henhold til prøveprosedyren skal $G_{1,1-0}$, $G_{1,2-1}$ og $G_{1,3-2}$ (og egentlig to etter-følgende målinger til) ligge innenfor $0{,}95G_{snitt}$ til $1.05G_{snitt}$ for å gå videre med beregningene. De tre $G_{1,2}$ ligger imidlertid ikke innenfor dette spekteret, men på grunn av varigheten av hver syklus og antall veiinger som ble utført, er disse de eneste tilgjengelig måleverdiene og må derfor benyttes. G_{snitt} anses som et brukbare estimat og blir brukt i de videre beregningene:

$$(3)\ W_1 = \frac{G_{snitt}}{A \cdot \Delta p_v} = \frac{3{,}858\times10^{-10}}{0{,}1053 \cdot \Delta p_v}\ kg/m^2 \cdot s \cdot Pa$$

For å finne damptrykkgradienten over sperresjiktet (Δp_v) brukes målt temperatur på utsiden av sperresjiktet og i innelufta til å bestemme tilhørende metningstrykk fra tabell D.1 i *Håndbok 50 - Fukt i bygninger* (Geving & Thue, 2002).

Verdiene for metningstrykk multipliseres så med målt RF på utsiden av sperresjiktet og i innelufta, og differansen mellom disse er den resulterende damptrykkgradienten (Δp_v):

- $T_{utside} = 20{,}6\ °C \rightarrow p_{utside} = 2424\ Pa$
- $RF_{utside} = 19{,}8\ \% \rightarrow p_{utside,RF} = 2424 \times 0{,}198 \approx 480\ Pa$

- $T_{inneluft} = 21{,}4\ °C \rightarrow p_{inneluft} = 2546\ Pa$
- $RF_{inneluft} = 22{,}4\ \% \rightarrow p_{inneluft,RF} = 2546 \times 0{,}224 \approx 570\ Pa$

- $(\Delta p_v) = p_{inneluft,RF} - p_{utside,RF} = 570 - 480\ Pa = 90\ Pa$

(3) $W_1 = \frac{G_{12}}{A \cdot \Delta p_v} = \frac{3{,}86 \times 10^{-10}}{0{,}1053 \cdot 90} \approx 0{,}041 \times 10^{-9}\ kg/m^2 \cdot s \cdot Pa$

(4) $Z_1 = \frac{1}{W_1} = \frac{1}{0{,}041} \approx 24{,}4\ M \cdot m^2 \cdot s \cdot Pa/kg$

5) $\boldsymbol{S_{d,beregnet} = \frac{Z_{1,1}}{5{,}1}\ [\mathrm{m}] = \frac{24{,}4}{5{,}1} \approx\ 4{,}8\ meter}$

Denne S_d-verdien gjelder for snittverdien av RF_{utside} og $RF_{inneluft}$, beregnet slik:

- $RF_{snitt,målt} = \frac{RF_{utside} + RF_{inneluft}}{2} = \frac{19{,}8+22{,}4}{2} = 21{,}1\ \%$

Tabell 12: Beregnet S_d-verdi og målt RF over sperresjiktet, for syklus 1, sammenlignet med oppgitt S_d-verdi for tilsvarende RF-nivå.

Takprøve	$RF_{snitt,målt}$	$S_{d,beregnet}$	$RF_{oppgitt}$	$S_{d,oppgitt}$
PE-folie	19,2	-	-	87
AirGuard Smart	19,1	7	12,5 - 25	102,5 - 34,2
Intello	21,1	4,8	17,5 - 25	26 - 16
Hygrodiode	20,5	4,4	ikke oppgitt	19,6 - 0,98
Novaflexx	20,7	2,8	0 - 26	4,38 - 4,35
Novaflexx med 50 mm	19,9	-	0 - 26	4,38 - 4,35
AirGuard Smart med 50 mm	19,7	-	12,5 - 25	102,5 - 34,2

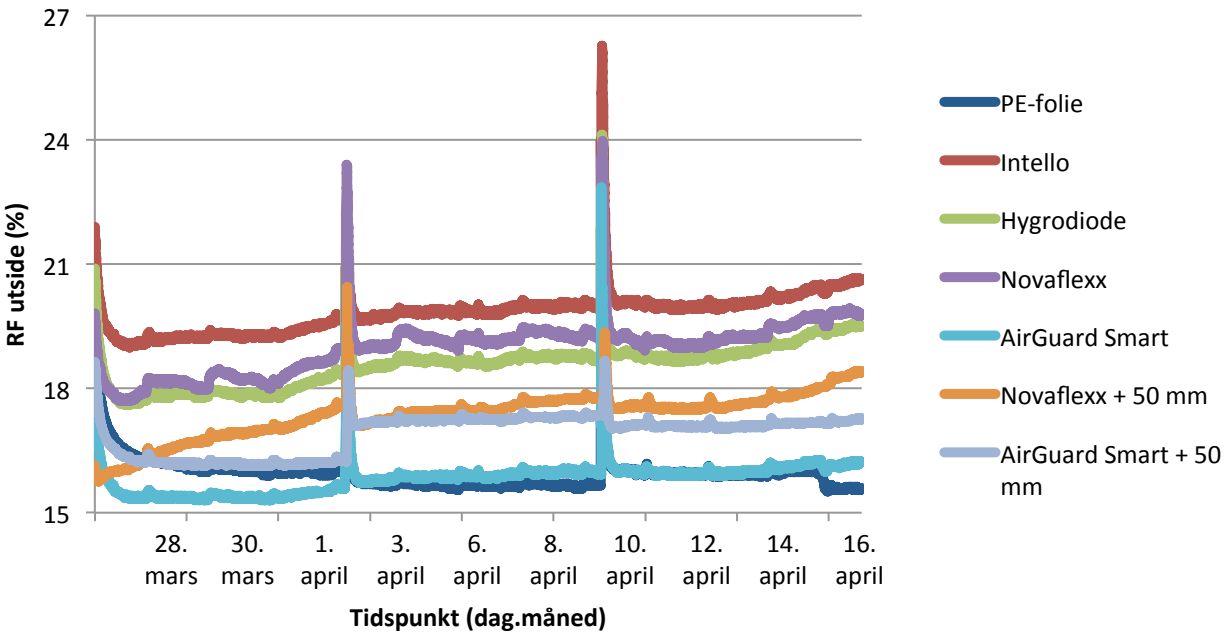
Kommentar

De beregnete S_d-verdiene gjelder for sperreproduktene benyttet i takprøvene 2-5. Det er ikke beregnet dampmotstand for de resterende takprøvene, både på grunn av tidshensyn og fordi sensorene benyttet til å registrer temperatur og RF ikke er kalibrert opp mot hverandre. Siden sensorene har en feilmargin på +/- 3 % gir det forholdsvis store utslag når de ligger i hver sin ende av skalaen. Måledataen fra de nyinnkjøpte sensorene lå jevnt lavere enn de gamle sensorene i takprøve 1-5. Det tyder på at resultatene er troverdige, men gjør sammenligning og tolkning av resultatene uoversiktlig og målingene fra de nye sensorene er derfor bare brukt for å kvalitetssikre resultatene. Takprøvene med 50 mm ekstra innvendig isolering benyttet de nye sensorene og det må derfor tas hensyn til ved vurdering av resultatene.

Generell vurdering

Ut ifra produsentenes oppgitte S_d-verdier for tørre forhold i sperresjiktet (RF ca. 0 % - 25 %), slik tabell 12 viser, er det åpenbart at de smarte dampsperrene, med unntak av Novaflexx, teoretisk sett har høy nok S_d-verdi (S_d > 10 meter) til å være tilstrekkelig damptette. De beregnete S_d-verdiene er imidlertid betydelig lavere og det må derfor settes spørsmålstegn ved oppgitt dampmotstand. Det er riktignok knyttet forholdsvis stor utsikkerhet til måledataene og da spesielt mangelen på antall godkjent etterfølgende veiinger i henhold til ISO 12527, så beregnede S_d-verdier må ansees som et grovt estimat.

Figur 42 viser logging av RF-nivå på utsiden (kald side) av sperresjiktet for syklus 1. S_d-verdien er som tidligere diskutert snittet av RF på inn- og utside av sperresjiktet, og som en forenkling er RF på innsiden satt lik målt RF i innelufta. Snittverdien for målt RF i innelufta for syklus 1 er 22,4 % (slik tabell 16 i vedlegg F viser).



Figur 42: Målt RF på utsiden av sperresjiktet for takprøve 1-5 og 11-12, syklus 1.

Figur 42 viser at alle RF-verdiene får en markant økning den 2. og 9. april. Denne økningen stammer fra tidspunktene for de to første veiingene under syklus 1. Ved veiing må prøvene ut av riggen og fraktes til et rom med normale temperatur- og RF-forhold, der vekten er plassert. Dette medfører at RF stiger for en kort periode, men med takprøvene tilbake i riggen, stabiliserer RF seg raskt i forhold til fukttilskuddet i klimarommet.

Som for tabell 12 er RF-målinger for prøve nummer to i hver parallell utelatt i figur 42, ettersom disse målingene gjør grafisk fremstilling uoversiktlig og vanskelig å tolke. Takprøvene med 50 mm ekstra innvendig isolering benyttet de nye sensorene og det må derfor tas hensyn til ved vurdering av resultatene.

AirGuard Smart

Tabell 12 og figur 42 viser at takprøven med AirGuard Smart har lavest målt RF over sperresjiktet, med 19,1 % i snitt. Ved et RF-nivå på 12,5 % vil oppgitt S_d-verdi være 102,5 meter og for neste oppgitte RF-nivå (25 %) er fortsatt S_d-verdien langt over anbefalt dampmotstand, med 34,2 meter. For syklus 1 skulle derfor dampmotstanden teoretisk sett ha ligget mellom disse S_d-verdiene, som gir høyest dampmotstand av de smarte dampsperrene. Denne vurderingen stemmer godt overens med at takprøvene med AirGuard Smart fikk det laveste fuktopptaket.

For det målte RF-nivå på 19, 1 % er beregnet S_d-verdi imidlertid bare 7 meter, hvilket er minst 4 ganger så lavt som den oppgitte S_d-verdien. Som den generelle vurderingen konkluderte med må det derfor settes spørsmålstegn ved oppgitt dampmotstand. Likevel gir den lave vektøkningen og den høyeste beregnete S_d-verdien en indikasjon på at AirGuard Smart har de beste forutsetningene for å hindre fuktopptak ved lavt innvendig fukttilskudd under vinterforhold.

Sammenlignet med resultatene fra Stellander (2012) og Thorsrud (2012) sine lab-forsøk, er fuktopptaket på 0,8 gram svært lite i forhold til uttørkingspotensialet for tilsvarende takprøver. Fra labforsøk under normale sommerforhold i én måned, fikk to takprøver med AirGuard Smart en gjennomsnittlig uttørking på 143,5 gram fukt (Stellander, 2012). For tilsvarende forsøk om sommeren, men med redusert sol-innstråling og over en periode på to måneder, ble uttørkingen for de to takprøvene i snitt 116 gram fukt (Thorsrud, 2012). Sett i sammenheng viser disse resultatene at kompakte lette treak med AirGuard Smart, for lavt innvendig fukttilskudd, vil være en svært god løsning, som ikke vil by på fuktproblemer.

Intello

Tabell 12 viser at Intello får ca. 3 ganger så lav beregnet dampmotstand som oppgitt, men den beregnete S_d-verdien er fortsatt nest høyest. Dette stemmer godt med at Intello fikk nest lavets oppfukting. Sammenlignet med resultatene fra Stellander (2012) og Thorsrud (2012) sine labforsøk, er et fuktopptak på 0,9 gram lite i forhold til uttørkingspotensialet og bruk av Intello kan derfor anses å være en god løsning.

Hygrodiode

Takprøve 3 med Hygrodiode fikk nest størst fuktøkning og det stemmer godt med at beregnet S_d-verdi for samme takprøve er nest lavest, med 4,4 meter for 20,5 % RF. Hygrodiode er et sammensatt produkt, med perforert PE-folie på innsiden og striper av PA-folie på utsiden, på hver sin side av et lag med filt. Vanndampmotstand vil variere mellom 0,98 -19,6 meter, avhengig av våt eller tørr tilstand. Det er imidlertid ikke oppgitt spesifikke S_d-verdier for gitte RF-nivåer, trolig pga. produktets komplekse oppbygging, som vanskeligjør nettopp en slik inndeling. Vektøkningen og beregnet S_d-verdi tyder på at den perforerte PE-folien ikke fungerer helt etter hensikt. Sammenlignet med resultatene fra Stellander (2012) og Thorsrud (2012) sine labforsøk, er fuktopptaket svært lite i forhold til uttørkingspotensialet og Hygrodiode kan derfor anses å være en grei løsning.

Novaflexx

Tabell 12 viser at takprøven med Novaflexx oppnår målt RF-verdi på 20,7 % i snitt. Ved RF-nivå fra 0 til 25 % vil Novaflexx ha en oppgitt S_d-verdi mellom 4,38 - 4,35 meter, som gir den laveste dampmotstanden. Dette stemmer godt overens med at takprøvene med Novaflexx fikk størst oppfukting og nokså godt med den laveste beregnet Sd-verdi på 2,8 meter. Sammenlignet med resultatene fra Stellander (2012) og Thorsrud (2012) sine labforsøk, er fuktopptaket på 1,85 gram svært lite i forhold til uttørkingspotensialet og bruk av Novaflexx kan derfor anses å være en grei løsning.

Takprøver med 50 mm innvendig isolering

Tabell 12 viser at takprøven med 50 mm ekstra innvendig isolering og Novaflexx, for syklus 1, har en gjennomsnittlig RF-verdi på 19,9 %. Ekstra innvendig isolering skulle tilsi at RF vil bli høyere enn for tilsvarende takprøve uten ekstra isolering, fordi mer isolasjon fører til lavere temperatur på innsiden av den smarte dampsperren, slik også parameterstudien viste. Figur 42 viser imidlertid at det ikke stemmer. Justeres RF-verdiene i forhold til at de nye sensorene brukt i denne takprøven, lå jevnt 3,5 - 4,5 % lavere enn verdiene fra de gamle sensorene, vil det tilsvare RF mellom 23,4 - 24,4 %, i så fall det høyest RF-nivået. Det stemmer godt overens med at takprøven akkumulerte 2,1 gram fukt i løpet av syklus 1 og dermed mest av alle takprøvene.

Figur 43: Oppbyggingen for takprøvene med 50 mm innvendig isolasjon.

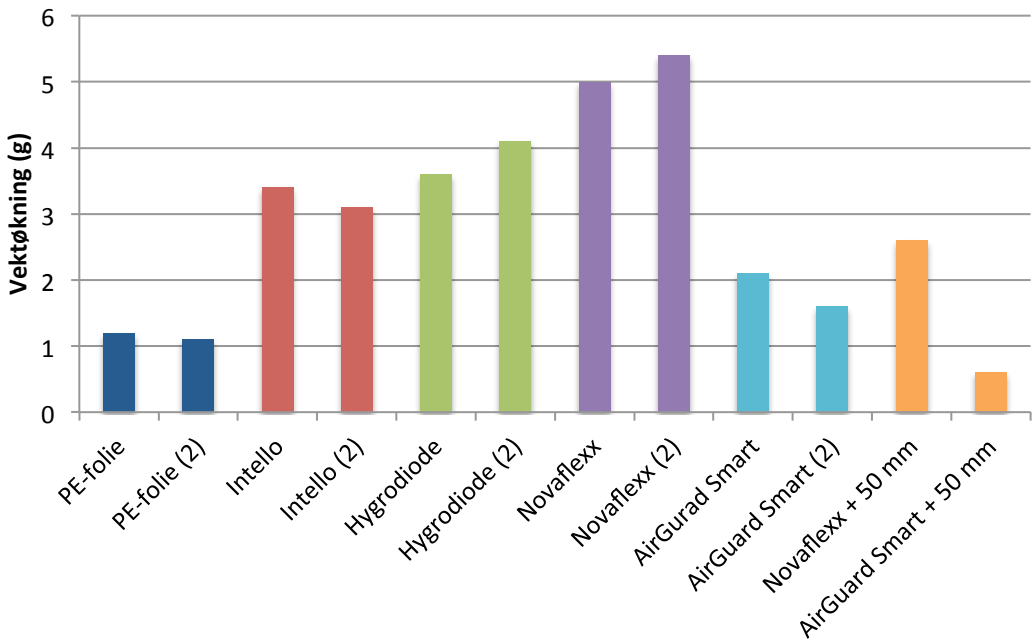
Tabell 12 viser at takprøven med 50 mm ekstra innvendig isolering og AirGuard Smart, har en gjennomsnittlig RF-verdi på 19,7 %. Sammenlignet med tilsvarende takprøve uten ekstra isolasjon er dette en beskjeden økning. Den samme oppjusteringen av RF gjelder imidlertid også for denne takprøven, hvilket tilsvarer RF mellom 23,2 - 24,2 %, i så fall det nest høyeste RF-nivået. I forhold til tilsvarende takprøve uten ekstra isolasjon gir dette omtrent en dobling av vektøkningen og viser tydelig effekten av økt RF og redusert dampmotstand.

5.7.2 Syklus 2 – middels fukttilskudd

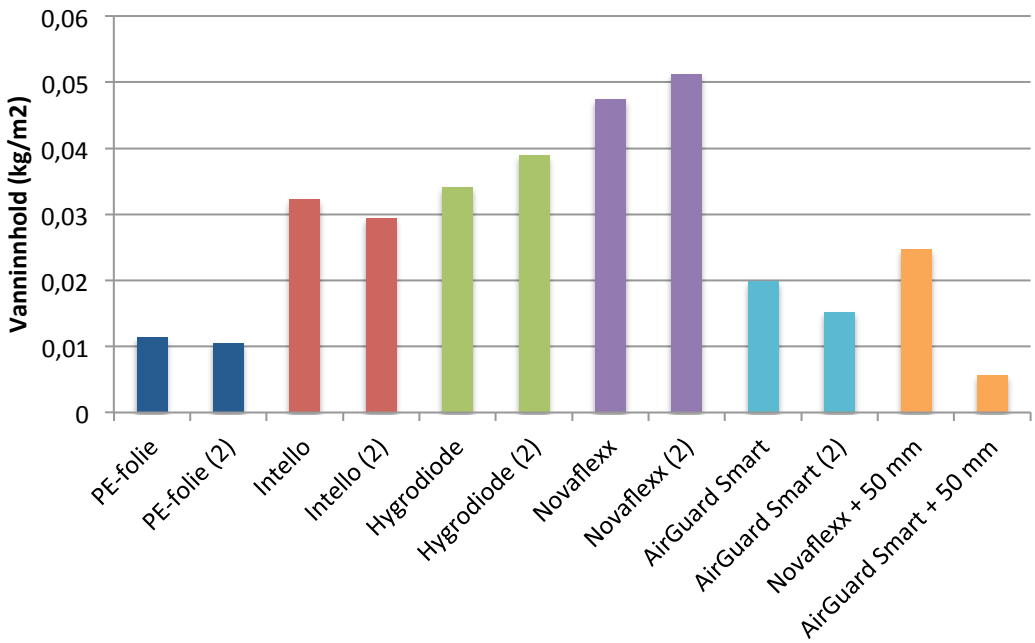
Syklus 2 ble kjørt med middels fukttilskudd, tilsvarende 32,8 % RF i innelufta, i henhold til beregningene i kapitel 5.4. Syklus 2 foregikk over tre uker, i perioden 16. april - 7. mai 2013.

Vektøkning og vanninnhold

Figur 44 og 45 viser henholdsvis vektøkning og vanninnhold for syklus 2.



Figur 44: Vektøkning $[g]$ for alle takprøvene for syklus 2, med fukttilskudd 4 g/m^3.



Figur 45: Vanninnhold $[kg/m^2]$ for alle takprøvene for syklus 2, med fukttilskudd 4 g/m^3.

Kommentar
Resultatene gir forholdsvis lik økning i fuktakkumulasjon for takprøvene i hver parallell, hvilket tilsier at resultatene ikke er heftet med målefeil av større betydning og dermed kan anses som troverdige.

Resultatene fra syklus 2 viser at blant takprøveparallellene 1-10 oppnår takprøvene med Novaflexx klart størst fuktakkumulasjon. I snitt får denne takprøveparallellene en vektøkning på 5,2 gram, tilsvarende nesten en tredobling i fuktopptaket sammenlignet med syklus 1 (1,85 gram). Videre følger takprøvene med Hygrodiode og Intello, med gjennomsnittlig vektøkning på henholdsvis 3,9 og 3,2 gram, også dette omtrent en tredobling i vektøkning sammenlignet med syklus 1. Takprøvene med AirGuard Smart oppnår en vektøkning på 1,8 gram i snitt, en dobling fra syklus 1. Takprøvene med tradisjonell dampsperre, PE-folie, oppnår lavest vektøkning, i snitt 1,2 gram. Takprøvene med 50 mm ekstra innvendig isolasjon, Novaflexx og AirGuard Smart, akkumulerer henholdsvis 2,6 og 0,6 gram fukt.

Beregnet S_d-verdi
Beregnete S_d-verdier og målt RF over sperresjiktet, for syklus 2, vises i tabell 13. Vedlegg F viser mellomberegninger i samsvar med ISO 12527 for beregning av S_d-verdier.

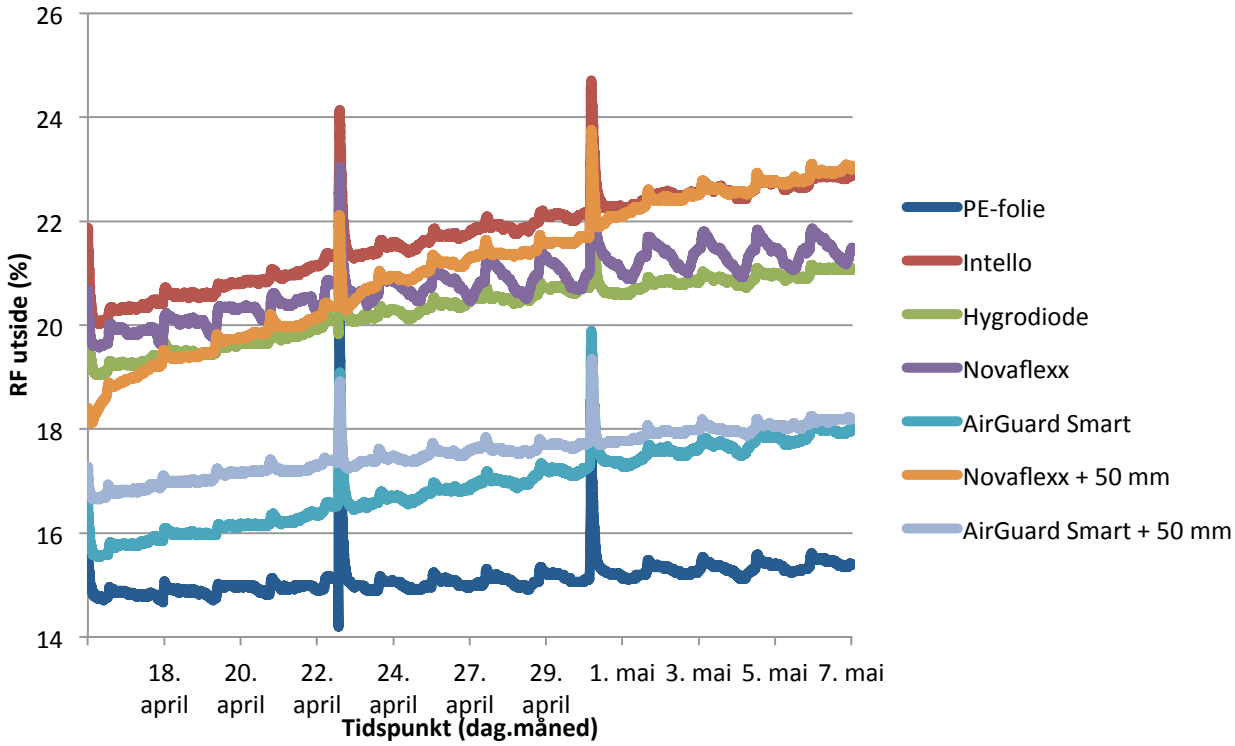
Tabell 13: Beregnet S_d-verdi og målt RF over sperresjiktet, for syklus 2, sammenlignet med oppgitt S_d-verdi for tilsvarende RF-nivå.

Takprøve	$RF_{snitt,målt}$	$S_{d,beregnet}$	$RF_{oppgitt}$	$S_{d,oppgitt}$
PE-folie	24	-	-	87
AirGuard Smart	24,9	8,5	12,5 - 25	102,5 - 34,2
Intello	27,3	3,8	25 - 50	16 - 6,9
Hygrodiode	26,6	4,3	ikke oppgitt	19,6 - 0,98
Novaflexx	26,8	2,7	26,5- 41,5	4,35 - 3,7
Novaflexx med 50 mm	27	-	26,5- 41,5	4,35 - 3,7
AirGuard Smart med 50 mm	25,2	-	25 - 37,5	34,2 - 18,2

Kommentar
De beregnete S_d-verdiene gjelder bare for sperreproduktene benyttet i takprøvene 2-5, av samme hensyn som kommentert for tabell 12.

Generell vurdering

Logging av RF på utsiden av sperresjiktet viser at RF-nivået er høyere for syklus 2 enn for syklus 1, slik det kommer frem av figur 46. Kombineres denne økningen med middels fukttilskudd i innelufta, tilsvarende målt RF i innelufta på 32,8 % (i kapitel 5.4 forhåndsberegnet til å være 32,1 %), øker også gjennomsnittsverdien over sperre-sjiktet betydelig, sammenlignet med syklus 1. Basert på de oppgitte S_d-verdiene for gitte RF-nivåer, skal i teorien det økte RF-nivået fører til at dampmotstanden reduseres. Dette resonnementet stemmer stort sett, da de beregnete S_d-verdiene for syklus 2, unntatt for AirGuard Smart, er redusert i forhold til beregnete S_d-verdier for syklus 1. En reduksjon av dampmotstanden, som følge av økt RF-nivå, støttes også av økningen i vanninnhold fra syklus 2 til syklus 1, slik figur 45 viser.



Figur 46: Målt RF-nivå på utsiden av sperresjiktet for takprøve 1-5 og 11-12, syklus 2.

Kommentar

Figur 46 viser at alle RF-verdiene gjør et markant sprang 23. og 30. april. Denne økningen stammer fra tidspunktene for de to første veiingene under syklus 2. Årsaken til disse sprangene har samme forklaring som ble gitt i kommentar til figur 42.

AirGuard Smart

Tabell 13 viser at takprøven med AirGuard Smart har lavest RF over sperresjiktet av takprøvene med smart dampsperre, med 24,9 % i snitt for syklus 2. For syklus 2 tilsier det at teoretisk S_d-verdi vil være mellom 102,5 og 34,2 m. Dette stemmer godt overens med at takprøvene med AirGuard Smart også for denne syklusen fikk det laveste fuktopptaket blant takprøvene med smart dampsperre, samtidig som AirGuard Smart fikk den høyeste beregnete S_d-verdien. I forhold til syklus 1, ga en dobling av fukttilskudd i innelufta, omtrent en dobling av fuktopptaket, fra 0,8 gram til 1,8 gram.

Sammenlignet med resultatene fra Stellander (2012) og Thorsrud (2012) sine lab-forsøk, er et fuktopptak på 1,8 gram fortsatt svært beskjedent sammenlignet med uttørkingspotensialet. Sett i sammenheng viser disse resultatene at kompakte lette treak med AirGuard Smart, for middels fukttilskudd, vil være en svært sikker løsning, som ikke vil by på fuktproblemer.

Intello

Tabell 13 viser at takprøven med Intello oppnår høyest RF, med 27,3 % i snitt, hvilket fører til at Intello vil ha en oppgitt S_d-verdi mellom 16 - 6,9 meter, som fortsatt er den nest høyeste oppgitte dampmotstanden. Den beregnet S_d-verdien på 3,8 meter er derimot lavere og bare tredje høyest, hvilket sår tvil om gyldigheten til den beregnete dampmotstanden. I forhold til syklus 1 får takprøveparallellen ca. tredoblet fukt-opptak, fra 0,9 til 3,2 gram i snitt, hvilket er nest lavest.

Sammenlignet med resultatene fra Stellander (2012) og Thorsrud (2012) sine lab-forsøk, er et fuktopptak på 3,2 gram fortsatt vesentlig mindre enn uttørkings-potensialet. Sett i sammenheng viser disse resultatene at kompakte lette treak med Intello, for middels fukttilskudd, vil være en god løsning.

Hygrodiode

Tabell 13 viser at takprøven med Hygrodiode oppnår RF-verdi på 26,6 % i snitt, med beregnet S_d-verdi på 4,3 meter. Beregnet dampmotstand for Hygrodiode er dermed nest høyest, samtidig som fuktopptaket er litt høyere enn for Intello og følgelig nest størst. I forhold til syklus 1 er fuktopptaket ca. tredoblet, fra 1,35 gram for syklus 1 til 3,9 gram for syklus 2.

Sammenlignet med resultatene fra Stellander (2012) og Thorsrud (2012) sine lab-forsøk, er et fuktopptak på 3,9 gram svært lite i forhold til uttørkingspotensialet. Sett i sammenheng viser disse resultatene at kompakte lette treak, med Hygrodiode og for middels innvendig fukttilskudd, ikke vil føre til et fuktopptak med kritisk effekt.

Novaflexx
Tabell 13 viser at takprøven med Novaflexx oppnår RF-verdi på 26,8 % i snitt. Dette fører til at takprøveparallellen med Novaflexx fortsatt har den laveste oppgitte dampmotstanden og følgelig størst oppfukting. Dette stemmer godt overens med at Novaflexx også får den laveste beregnete dampmotstanden på 2,7 meter. Fuktopptaket for syklus 2 ble 5,2 gram, nesten en tredobling fra fuktopptaket på 1,85 gram for syklus 1.

Sammenlignet med resultatene fra Stellander (2012) og Thorsrud (2012) sine labforsøk, er et fuktopptak på 5,2 gram svært lite i forhold til uttørkingspotensialet. Sett i sammenheng viser disse resultatene at kompakte lette treak med Novaflexx, for middels innvendig fukttilskudd, vil være en god løsning som ikke vil by på kritisk fuktopptak vinterstid.

Takprøver med 50 mm innvendig isolering
Tabell 13 viser at takprøven med 50 mm ekstra innvendig isolering og Novaflexx har en gjennomsnittlig RF-verdi på 27 %. Dette er en økning fra syklus 1, men målt RF i sperresjiktet er bare så vidt høyere enn for tilsvarende takprøve uten ekstra isolasjon. Ekstra innvendig isolering burde imidlertid tilsi at RF skal vært en god del høyere enn for tilsvarende takprøve uten ekstra isolering, jamfør tidligere vurderinger. Justeres verdiene i forhold til at de jevnt lå 3,5 - 4,5 % lavere enn verdiene fra de gamle sensorene, vil det tilsvare RF mellom 30,5 - 31,5 %.

Takprøven hadde imidlertid bare et fuktopptak på 2,6 gram, så prosentvis er denne økningen vesentlig mindre enn for tilsvarende takprøve med Novaflexx uten ekstra isolasjon. I teorien skulle økte RF for denne varianten føre til lavest dampmotstand og dermed størst fuktopptak. Årsaken til dette teoretiske avviket kan være at noe av fukttransporten forsvinner sideveis via utettheter.

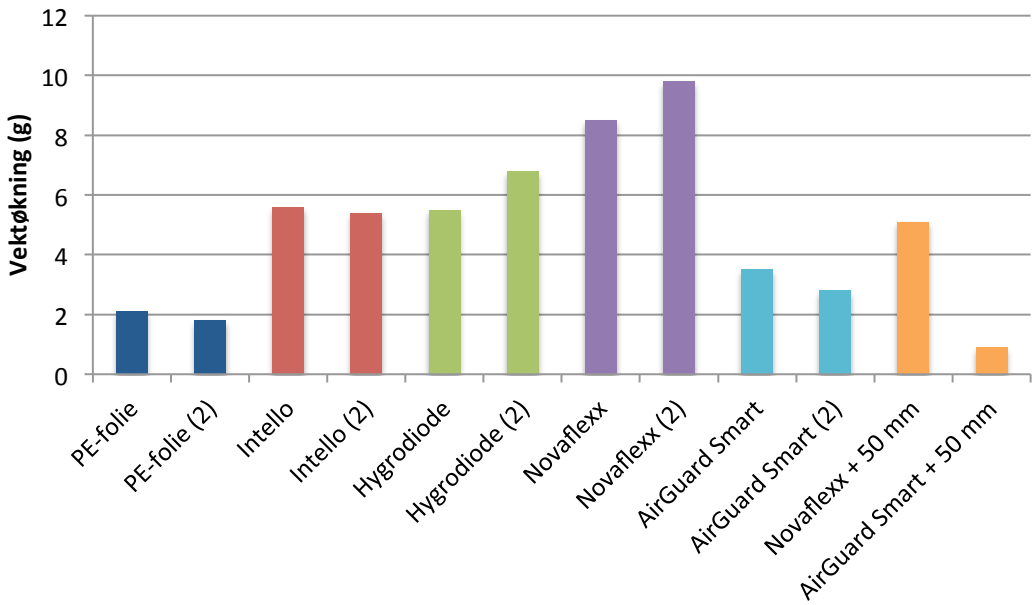
Tabell 13 viser at takprøven med 50 mm ekstra innvendig isolering og AirGuard Smart har en gjennomsnittlig RF-verdi på 25,2 %. Sammenlignet med tilsvarende takprøve uten ekstra isolasjon gir dette omtrent like verdier. Den samme oppjusteringen av RF gjelder imidlertid også for denne takprøven, hvilket tilsvarer RF mellom 38,7 - 29,7 %, i så fall den nest høyest RF-verdien. Fuktopptaket på 0,6 gram gir imidlertid til den minste prosentvise økning fra syklus 1. Den samme vurdering knyttet til sideveis utettheter gjelder også for denne takprøven, ettersom økt RF-nivå i sperresjiktet skulle tilsi større fuktopptak.

5.7.3 Syklus 3 – høyt fukttilskudd

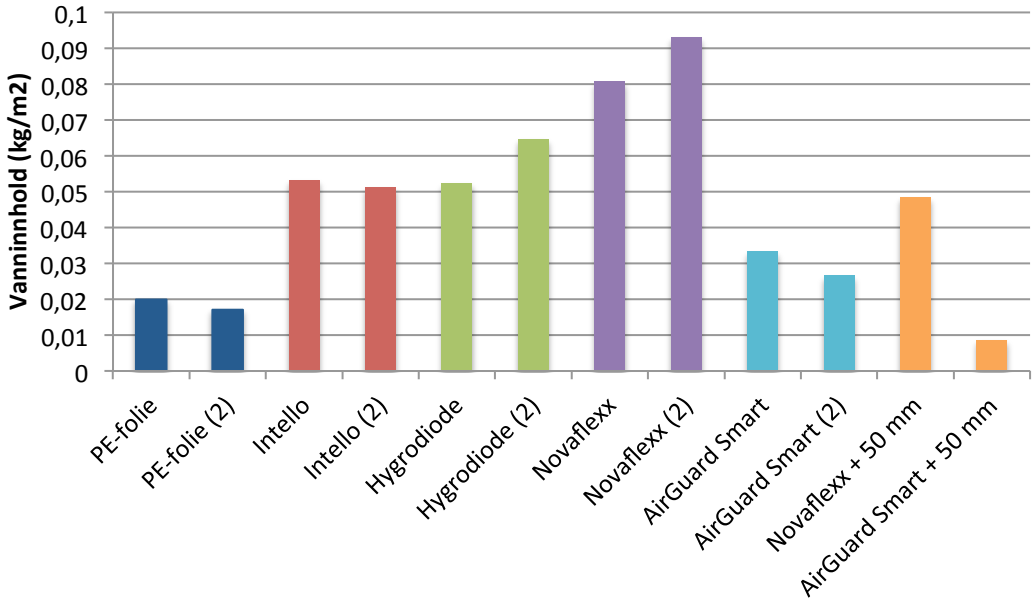
Syklus 3 ble kjørt med høyt fukttilskudd, tilsvarende 41,8 % RF i innelufta, i henhold til beregningene i kapitel 5.4. Syklus 3 foregikk over tre uker, i perioden 7. mai - 28. mai 2013

Vektøkning og vanninnhold

Figur 47 og 48 viser henholdsvis vektøkning og vanninnhold for syklus 3.



Figur 47: Vektøkning $[g]$ for alle takprøvene for syklus 3, med fukttilskudd 6 g/m^3.



Figur 48: Vanninnhold $[kg/m^2]$ for alle takprøvene for syklus 3, med fukttilskudd 6 g/m^3.

Kommentar
Resultatene gir forholdsvis lik økning i fuktakkumulasjon for takprøvene i hver parallell, hvilket tilsier at resultatene ikke er heftet med målefeil av større betydning og dermed kan anses som troverdige.

Resultatene fra syklus 3 viser at blant takprøveparallellene 1-10 oppnår takprøvene med Novaflexx størst fuktakkumulasjon. I gjennomsnitt får denne takprøve-parallellene en vektøkning på 9,15 gram, tilsvarende nesten en femdobling i fukt-opptak sammenlignet med syklus 1 (1,85 gram) og nærmere en dobling fra syklus 2 (5,2 gram). Videre følger takprøvene med Hygrodiode og Intello, med gjennom-snittlig vektøkning på henholdsvis 6,15 gram og 5,5 gram, også disse med en kraftig økning fra syklus 1. Takprøvene med AirGuard Smart oppnår en vektøkning på 3,15 gram i snitt, ca. en firedobling fra syklus 1 og nærmere en dobling fra syklus 2. Takprøvene med tradisjonell dampsperre, PE-folie, oppnår lavest vektøkning, i snitt 1,95 gram. Takprøvene med 50 mm ekstra innvendig isolasjon, Novaflexx og AirGuard Smart, akkumulerer henholdsvis 5,1 og 0,9 gram fukt.

Beregnet S_d-verdi
Beregnete S_d-verdier og målt RF over sperresjiktet, for syklus 3, vises i tabell 14. Vedlegg F viser mellomberegninger i samsvar med ISO 12527 for beregning av S_d-verdier.

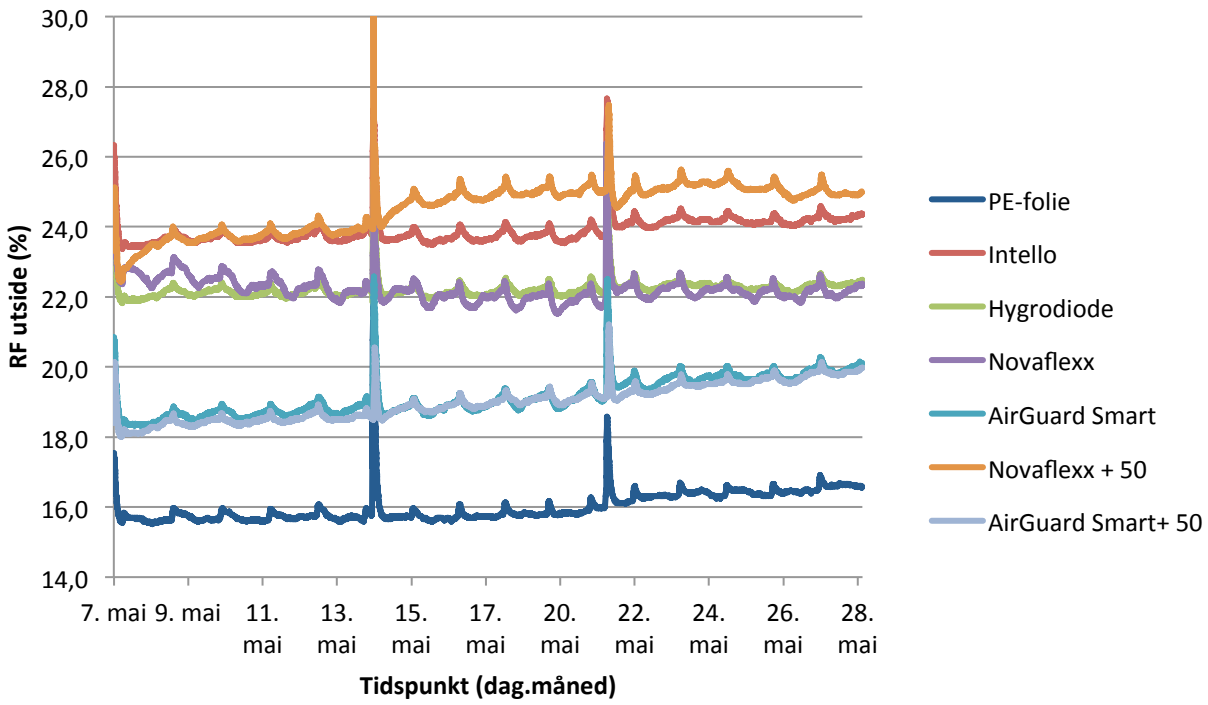
Tabell 14: Beregnet S_d-verdi og målt RF over sperresjiktet, for syklus 3, sammenlignet med oppgitt S_d-verdi for tilsvarende RF-nivå.

Takprøve	$RF_{snitt,målt}$	$S_{d,beregnet}$	$RF_{oppgitt}$	$S_{d,oppgitt}$
PE-folie	29,3	-	-	87
AirGuard Smart	30,9	7,5	25 - 37,5	34,2 - 18,2
Intello	33,3	3,8	25 - 50	16 - 6,9
Hygrodiode	32,4	4,5	ikke oppgitt	19,6 - 0,98
Novaflexx	32,4	2,4	26,5 - 41,5	4,35 - 3,7
Novaflexx med 50 mm	33,6	-	26,5 - 41,5	4,35 - 3,7
AirGuard Smart med 50 mm	30,8	-	25 - 37,5	34,2 - 18,2

Kommentar
De beregnete S_d-verdiene gjelder bare for sperreproduktene benyttet i takprøvene 2-5, av samme hensyn som kommentert for tabell 12.

Generell vurdering

Logging av RF på utsiden av sperresjiktet viser at RF-nivået er høyest for syklus 3, slik det fremkommer av figur 49. Kombineres denne økningen med høyt fukttilskudd i innelufta, tilsvarende målt RF i innelufta på 42,6 % (i kapitel 5.4 forhåndsberegnet til å være 41,8 %), øker også gjennomsnittsverdien over sperresjiktet betydelig, sammenlignet med syklus 1 og 2. Basert på de oppgitte S_d-verdiene for gitte RF-nivåer, skal i teorien det økte RF-nivået fører til at den beregnete dampmotstanden reduseres ytterligere, sammenlignet med beregnet dampmotstand for syklus 1 og 2. Dette resonnementet stemmer noenlunde, da de beregnete S_d-verdiene for syklus 3 er redusert eller omtrent like som de beregnete S_d-verdier for syklus 2, slik tabell 14 viser. En reduksjon av dampmotstanden, som følge av økt RF-nivå, støttes også av økningen i vanninnhold fra syklus 3 til syklus 2, slik figur 48 viser.



Figur 49: Målt RF-nivå på utsiden av sperresjiktet for takprøve 1-5 og 11-12, syklus 3.

Kommentar

Figur 49 viser at alle RF-verdiene gjør et markant sprang 14. og 21. mai. Denne økningen stammer fra tidspunktene for de to første veiingene under syklus 3. Årsaken til disse sprangene har samme forklaring som ble gitt i kommentar til figur 42.

AirGuard Smart
Tabell 14 viser at AirGuard Smart også for syklus 3 har lavets RF over sperresjiktet, med 30,9 % i snitt. For syklus 3 tilsier det at teoretisk S_d-verdi vil være mellom 34,2 - 18,2 meter. Dette stemmer godt overens med at takprøvene med AirGuard Smart også for denne syklusen fikk det laveste fuktopptaket blant takprøvene med smart dampsperre, samtidig som AirGuard Smart fikk den høyeste beregnete S_d-verdien, på 7,5 meter. Den beregnete Sd-verdien er imidlertid forholdsvis lav sammenlignet med den oppgitte, hvilket betyr at den beregnete dampmotstanden ikke må tillegges for stor betydning.

Sammenlignet med resultatene fra Stellander (2012) og Thorsrud (2012) sine labforsøk, er et fuktopptak på 3,15 gram fortsatt svært beskjedent sammenlignet med uttørkingspotensialet. Sett i sammenheng viser disse resultatene at kompakte lette treak med AirGuard Smart, for høyt fukttilskudd, vil være en sikker løsning, som ikke vil by på fuktproblemer.

Intello
Tabell 14 viser at takprøven med Intello oppnår nest høyest RF, med 33,3 % i snitt, hvilket fører til at Intello vil ha en oppgitt S_d-verdi mellom 16 - 6,9 meter. Den beregnet S_d-verdien er imidlertid bare 3,8 meter og lik som for syklus 2, hvilket sår tvil om gyldigheten til den beregnete dampmotstanden. I forhold til syklus 2 får takprøveparallellen en økning i fuktinnhold fra 3,2 gram til 5,5 gram i snitt, hvilket gir det nest laveste fuktopptaket.

Sammenlignet med resultatene fra Stellander (2012) og Thorsrud (2012) sine labforsøk, er et fuktopptak på 5,5 gram fortsatt vesentlig mindre enn uttørkingspotensialet og Intello vil være en grei løsning.

Hygrodiode
Hygrodiode oppnår RF-verdi over sperresjiktet på 32,4 % i snitt og beregnet S_d-verdi på 4,5 meter. Beregnet dampmotstand for Hygrodiode er dermed nest høyest og 0,2 meter høyere enn for syklus 2. I forhold til syklus 2 er fuktopptaket økt fra 3,9 gram for syklus 2 til 6,15 gram for syklus 3.

Sammenlignet med resultatene fra Stellander (2012) og Thorsrud (2012) sine labforsøk, er et fuktopptak på 6,15 gram svært lite i forhold til uttørkingspotensialet og Hygrodiode vil være en grei løsning.

Novaflexx
Tabell 14 viser at takprøven med Novaflexx oppnår RF-verdi på 32,4 % i snitt, den samme verdien som Hygrodiode. Dette RF-nivået fører til at takprøveparallellen med Novaflexx fortsatt har den laveste oppgitte dampmotstanden og følgelig størst oppfukting. Det forholdsmessig store fuktopptaket stemmer også godt overens med at Novaflexx får den laveste beregnete dampmotstanden på 2,4 meter, en reduksjon på 0,3 meter fra syklus 2.

Fuktopptaket for syklus 3 ble 9,15 gram, nesten en dobling fra fuktopptaket på 5,2 gram for syklus 2. Sammenlignet med resultatene fra Stellander (2012) og Thorsrud (2012) sine labforsøk, er fuktopptaket svært lite i forhold til uttørkingspotensialet. Sett i sammenheng viser disse resultatene at kompakte lette treak med Novaflexx, for høyt innvendig fukttilskudd, vil være en grei løsning dersom uttørkingsforholdene er gode.

Takprøver med 50 mm innvendig isolering

Tabell 14 viser at takprøven med 50 mm ekstra innvendig isolering og Novaflexx har en gjennomsnittlig RF-verdi på 33,6 %. Dette er en økning fra både syklus 1 og 2, men målt RF i sperresjiktet er bare så vidt høyere enn for tilsvarende takprøve uten ekstra isolasjon. Som tidligere diskutert justeres RF-nivået opp, hvilket tilsvarer RF mellom 37,1 - 38,1 %.

Takprøven hadde imidlertid bare et fuktopptak på 5,1 gram, vesentlig mindre enn for tilsvarende takprøve med Novaflexx uten ekstra isolasjon. Årsaken til dette teoretiske avviket kan som tidligere nevnt være at noe av fukttransporten forsvinner sideveis via utettheter.

For takprøven med 50 mm ekstra innvendig isolering og AirGuard Smart viser tabell 14 en gjennomsnittlig RF-verdi på 30,8 %. Sammenlignet med tilsvarende takprøve uten ekstra isolasjon gir dette omtrent like verdier. Den samme oppjusteringen av RF gjelder imidlertid også for denne takprøven, hvilket tilsvarer RF mellom 34,7 - 35,3 %, i så fall den nest høyest RF-verdien. Fuktopptaket på 0,9 gram tilsvarer bare en liten økning fra syklus 2 og den samme vurdering knyttet til sideveis utettheter gjelder også for denne takprøven, ettersom økt RF-nivå i sperresjiktet skulle tilsi større fuktopptak.

5.8 Oppsummering og konklusjon

I kapitel 5 er laboratorieforsøket beskrevet og resultatene presentert. Hovedhensikten med førsøket var å undersøke fuktopptak i kompakttak ved bruk av smarte dampsperrer, under norske vinterforhold. I den sammenheng ble effekten av innvendig fukttilskudd undersøkt, ved å kjøre forsøket med følgende tre RF-nivåer i innelufta:

- Syklus 1: lavt fukttilskudd (2 g/m^3), tilsvarende 22,3 % RF i innelufta.

- Syklus 2: middels fukttilskudd (4 g/m^3), tilsvarende 32,1 % RF i innelufta.

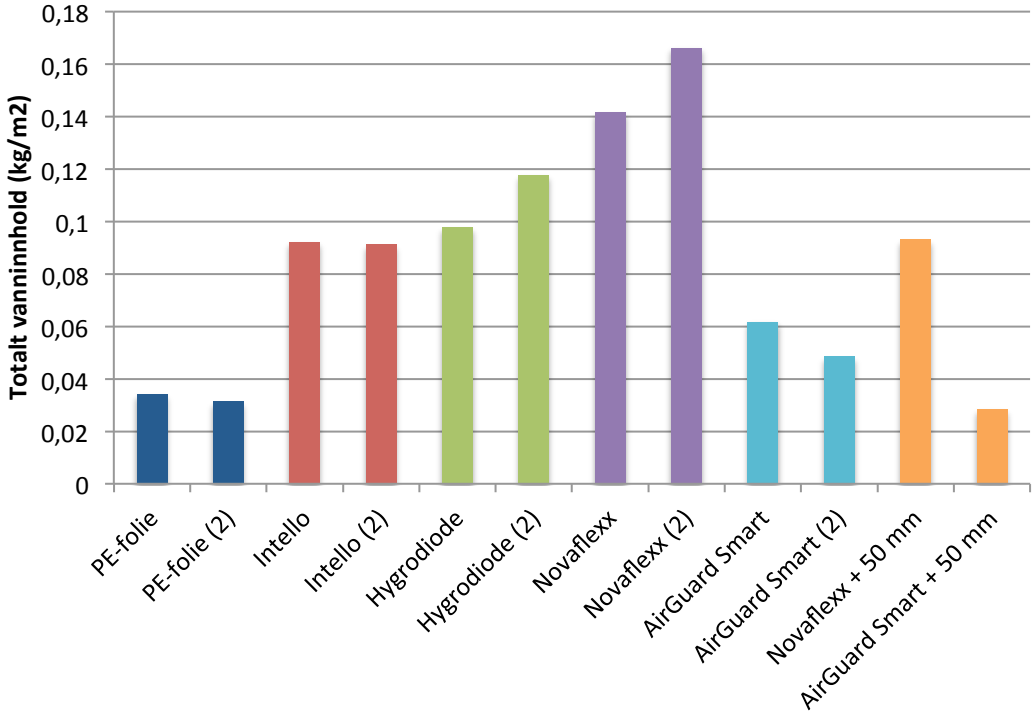
- Syklus 3: høyt fukttilskudd (6 g/m^3), tilsvarende 41,8 % RF i innelufta.

Uteklima ble holdt konstant på -5 °C og 80 % RF og hver syklus hadde varighet på tre uker. For å vurdere fuktopptaket ble takprøvene veid ukentlig og basert på disse målingene ble *vektøkning* (målt i gram) og *vanninnhold* (kg/m^2) for hver syklus beregnet. Temperatur og RF på utsiden av sperresjiktet i takprøvene og tilsvarende forhold i innelufta, ble logget hvert 6. minutt gjennom forsøksperioden og ble sammen med veiingene, brukt til å finne *beregnet S_d-verdi*.

Generelt viste resultatene fra forsøket at effekten av lavt, middels eller høyt fukttilskudd gir store utslag i fuktopptak for de ulike smarte dampsperrene og at det er en sammenheng mellom fuktopptak og oppgitt dampmotstand fra produsentene. Videre viste det seg at den beregnete dampmotstanden jevnt over ble vesentlig lavere enn den oppgitte, trolig på grunn av forenklet beregningsmetode. Likevel viste også den beregnete dampmotstanden enn sammenheng med fuktopptaket, ettersom produktene med høyest beregnet dampmotstand fikk det laveste fuktopptaket, slik tabell 15 og figur 50 viser.

Tabell 15: Beregnete S_d-verdier for målt RF-nivå over sperresjiktet, for syklus 1, 2 og 3.

	Intello		**Hygrodiode**		**Novaflexx**		**AirGuard Smart**	
Syklus	RF [%]	S_d [m]	RF [%]	S_d [m]	RF [%]	S_d [m]	RF [%]	S_d [m]
1	21,1	4,8	20,5	4,4	20,7	2,8	19,1	7
2	27,3	3,8	26,6	4,3	26,8	2,7	24,9	8,5
3	33,3	3,8	32,4	4,5	32,4	2,4	30,9	7,5



Figur 50: Totalt vanninnhold i alle takprøvene etter endt forsøksperiode på ni uker.

Av de smarte dampsperrene skilte AirGuard Smart seg ut, med klart lavets fuktopptak for alle nivåene av innvendig fukttilskudd og svært lavt totalt vanninnhold ved forsøkets slutt, slik figur 50 viser. Årsaken er trolig at AirGuard smart har betydelig høyere oppgitt dampmotstand for forholdsvis lave RF-nivåer (S_d-verdi mellom 102,5 - 18,2 meter for RF 0 - 37,5 %), sammenlignet med de andre smarte dampsperrene. Denne vurderingen stemmer for så vidt godt med at AirGuard Smart også fikk de høyeste beregnete S_d-verdiene for de tre syklusene, selv om disse verdiene er betydelig lavere enn de oppgitte S_d-verdiene.

Dårligst ut kom Novaflexx, som viser seg sårbar for RF-nivåer på rundt 20 % til 30 % over sperresjiktet. For disse verdiene har Novaflexx en oppgitt dampmotstand på rundt 4,3 meter, mens den beregnete dampmotstanden varierte mellom 2,8 meter til 2,4 meter for tilsvarende RF-nivå. Basert på disse resultatene er det tydelig at også smarte dampsperrer bør ha S_d-verdi på mer en 10 meter i perioder der utadrettet damptrykkgradient er høy og det følgelig oppstår et stort potensiale for fuktransport ut i takkonstruksjonen ved diffusjon.

6. Konklusjon

Resultatene presentert i denne rapporten viser at smarte dampsperrer brukt i kompakte tak, kan føre til et kritisk fuktopptak ved vinterforhold, men at dette vil variere sterkt, både i forhold til hvilken smart dampsperre som blir anvendt og for parametere som uteklima og inneluftas fukttilskudd. Forskjellige smarte dampsperrer har ulik dampmotstand (S_d-verdi) for gitte RF-nivåer og får følgelig ulikt fuktopptak for ellers like betingelser.

Parameterstudien viser at effekten av vinterforhold kan være kritisk ved kombinasjon av de «rette» parameterne og type smart dampsperre. Det viste seg at spesielt uteklimaene i Trondheim, Tromsø og Røros er ugunstige med tanke på fuktopptak i de kaldere årstidene, hovedsakelig på grunn av forholdsvis liten mengde globalstråling og lave utetemperaturer. Ved å bruke Novaflexx eller Intello i disse uteklimaene vil risikoen for mugg- og råtevekst i taktroa være betydelig.

Effekten av høyt innvendig fukttilskudd ble også studert og ga en kraftig økning i fuktopptaket vinterstid. Kombineres høyt fukttilskudd med et ugunstig uteklima, vil det være stor risiko for mugg- og råtevekst i taktroa. Hvis konstruksjonen i tillegg har 5 cm isolert nedforing, vil RF-nivået i sperresjiktet øke og S_d-verdien synke, og resultatet vil være en ytterligere økning av fuktopptaket.

Resultatene fra laboratorieforsøket viser at effekten av lavt, middels eller høyt fukttilskudd gir store utslag i fuktopptak for de tolv takprøvene, avhengig av hvilken type smarte dampsperrene som blir benyttet. Det ble også funnet en klar sammenheng mellom fuktopptak og oppgitt dampmotstand fra produsentene. Takprøvene med størst oppfukting er variantene med Novaflexx, som for RF-nivåer rundt 20 % - 40 % har oppgitt dampmotstand på ca. 4,3 meter.

Videre viste det seg at den beregnete dampmotstanden jevnt over ble vesentlig lavere enn den oppgitte, trolig på grunn av forenklet beregningsmetode. Likevel viste også den beregnete dampmotstanden enn sammenheng med fuktopptaket, ettersom produktene med høyest beregnet dampmotstand fikk det laveste fuktopptaket.

Labforsøket viser at AirGuard Smart er best egnet ved vinterforhold, med klart lavets fuktopptak for alle nivåene av innvendig fukttilskudd og svært lavt totalt vanninnhold ved forsøkets slutt. Resultatene fra parameterstudien bekrefter denne vurderingen, da AirGuard Smart jevnt over innstilte seg på lavest fuktlikevekt etter endt simuleringsperiode.

Basert på de ovennevnte resultatene er det anbefalt at smarte dampsperrer bør ha en ekvivalent luftlagstykkelse (S_d-verdi) på minimum 10 meter, i perioder der utadrettet damptrykkgradient er høy og det følgelig oppstår et stort potensiale for fuktransport ut i takkonstruksjonen ved diffusjon.

7. Videre arbeider

Denne rapporten har tatt for seg beregninger med simuleringsprogrammet WUFI 1-D og et laboratorieforsøk, der fukttransport på grunn av diffusjon er undersøkt. Videre arbeider bør også inkludere fukttransport ved konveksjon, som kan antas å gi et betydelig bidrag avhengig av konstruksjonens lufttetthet, i forhold til utføring og eventuelle lekkasjepunkter.

Bruken av smarte dampsperre kan tenkes å ha flere anvendelsesområder og undersøkelser knyttet til andre konstruksjoner er derfor aktuelt for videre arbeider. Dette kan for eksempel gjelde forblendingsvegger av tegl, som erfaringsmessig kan få sommerkondens og dermed har behov for uttørking. Andre konstruksjoner som kan være aktuelle å se videre på, er yttervegg mot terreng, konstruksjoner som bare tidvis er oppvarmet, som for eksempel hytter, eller høyisolerte konstruksjoner, som man finner i passivhus.

Ut i fra de beregnete S_d-verdien er det tydelig at de ulike smarte dampsperrene er sensitive for RF-nivåer typisk for vinterforhold, men at de beregnete verdien er unøyaktige på grunn av måledataen. Det bør derfor utføres korrekte beregninger av dampmotstanden for flere RF-nivåer, i henhold til ISO 12527, slik at de smarte dampsperrenes dampmotstand ved vinterforhold kan vurderes mer presist.

Referanser

AB Brookhuis Micro-Electronics. (u.d.). *http://www.brookhuis.com/en/home.php.* Hentet Desember 14, 2012 fra http://www.brookhuis.com/en/products/handheld-moisture-content/fme-moisture-meter.php

WUFI.no. (2010). Hentet November 18, 2012 fra http://www.wufi.no/

Byggforskserien. (2007). *525.207 Kompakte tak.* Oslo: Sintef Byggforsk.

Byggforskserien. (2011). *544.203 Asfalttakbelegg. Egenskaper og tekking.* Oslo: Sintef Byggforsk.

Byggforskserien. (2003). *573.121 Materialer til luft- og damptetting.* Oslo: Sintef Byggforsk.

Byggforskserien. (2004). *573.344 Varmeisolasjonsmaterialer. Typer og egenskaper.* Oslo: Sintef Byggforsk.

Byggforskserien. (2005). *701.401 Muggsopp i bygninger. Forekomst og konsekvenser for inneklimaet.* Oslo: Sintef Bygforsk.

Byggforskserien. (2012). *725.118 Skader i kompakte tak. Årsaker og utbedring.* Oslo: Sintef Byggforsk.

Bludau, C., Zirkelbach, D., & Künzel, H. M. (2008). *Surface Temperatures on Flat Roofs and Hygroterhmal Consequences.* Department of Hygrothermics, Fraunhofer Institute for Building Physics.

Bludau, C., & Künzel, H. M. (2009). Flat Roofs in Cold Climates - Climatic Limits for Building Flat Roofs with a Permeable Vapour Retarder. *Artikkel presentert på International Conference on Cold Climate, Heating, Ventilating and Air-Conditioning, 16. -19. mars.* Sisimut, Grønland.

Brandt, E., & Bunch-Nielsen, T. (2006). Mold in building constructions in the Nordic countries - With emphasis on roofs. Proceedings of the RCI 21st International Convention and Trade Show, March 1., (ss. 51-57). Phoenix, Arizona.

CertainTeed. (2013). Hentet Januar 20, 2013 fra http://www.certainteed.com/resources/30-28-080.pdf

Climate-data. (2013). Hentet Mai 27, 2013 fra Climate-data.org: en.climate-data.org/location/21999/

E+E Elektronikk. (2012). Hentet November 30, 2012 fra http://www.epluse.com/fileadmin/data/product/ee06/datasheet_EE06.pdf

DuPont. (2012). Hentet November 28, 2012 fra http://construction.tyvek.co.uk/Tyvek_Construction/en_GB/products/vcl/airguard_smart.html

Freemeteo. (2013). Hentet Mai 27, 2013 fra freemeteo.com: freemeteo.com/default.asp?pid=24&la=9&gid=2673730

Gatland, S., Karagiozis, A. N., Murray, C., & Ueno, K. (2007). The Hydrothermal Performance of Wood-Framed Wall Systems Using a Relative Humidity-Dependent Vapour Retarder in The Pacific Northwest. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings* (ss. 1-8). Clearwater Beach, Florida, USA: ASHRAE X International Conference.

Geving, S. (2011). *Fuktskader - Årsaker, utredning og tiltak.* Oslo: Sintef akademisk forlag.

Geving, S., & Holme, J. (2009). *Compact wood frame roofs with built-in-moisture: Test house measurements of the drying potential and risk of mould growth.* Oslo: Sintef Byggforsk.

Geving, S., & Holme, J. (2008). Indoor air humidity in Norwegian houses. *Paper presentert på 8th Nordic Symposium on Building Physics, 16-18 juni 2008.* København, Danmark.

Geving, S., & Thue, J. V. (2002). *Håndbok 50 Fukt i bygninger.* Oslo: Norges bygforskningsinstitutt.

Geving, S., Holme, J., & Uvsløkk, S. (2010). *Alternative dampsperrer med uttørkingsmulighet mot inelufta.* Oslo: Sintef Byggforsk.

Ghazii Wakili, K., & Frank, T. (2004). A humidity dependent vapour retarder in non-ventilated flat roofs. In site messurements and numerical analysis. *Indoor and Built Environment, Vol. 13* , 433-441.

Glava. (2012). Hentet November 30, 2012 fra http://www.glava.no/produkter/byggisolasjon/glava-extrem-33/

Glava. (2012). Hentet November 30, 2012 fra http://www.glava.no/bolig-fritidsbolig/vind-og-damptetting/smarte-tetteprodukter2/

Icopal. (2008, Desember). Hentet November 28, 2012 fra http://www.icopal.dk/upload/Products/5FD7E6C107FBAF7AC125724A0036B6A8/3001Hygrodiode1208lowres.pdf

Isover Saint-Gobain. (2013, Januar 20). Hentet fra Saint Gobain, http://www.isover.com/Our-solutions/Insulation-materials/Systems-and-accessories/VARIO

Karagiozis, A. N., Lstiburek, J., & Desjarlais, A. (2007). Scientific Analysis of Vapor retarder Recommendations for Wall Systems Constructed in North America. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings.* Clearwater Beach, Florida, USA: ASHRAE.

Künzel, H. M. (2005). Adapted vapour control for durable building enclosures. *10DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Components.* Lyon: Fraunhofer-Institut für Bauphysik.

Künzel, H. M. (1999, July). Flexible vapour control solves moisture problems of building assemblies - smart retarder to replace the conventional PE-film. *Journal of the Thermal Envelope and Building Science, Vol. 23* , 95-102.

Künzel, H. M. (1996). Humidity controlled vapour retarders reduce risk of moisture damages. *4th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, September 9-10*, (ss. 447-454). Espoo, Finland.

Künzel, H. M. (1998). More moisture load tolerance of construction assemblies through the application of a smart vapour retarder. *ASHRAE 7th International Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings*, (ss. 129-132). Clearwater Beach, Florida, USA.

Künzel, H. M. (1995). *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simlpe parameters.* Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Kloch, N. P., & Christensen, G. (2008). New type of "Moisture adaptive vapour barrier". *Nordic Symposium on Building Physics, 16. -18. juni.* København, Danmark.

Korsgaard, V. (1985). Hygro diode membrane: A new vaporbarrier. *ASHRAE/DOE/BTECC conference: Thermal Performance of the Exterior Envelpoes, Clearwater Beach, Florida, December*, (ss. 2-5).

Korsgaard, V. (1987). Hygro diode membrane: New vapour retarder for flat roofs. *1 st symposium of Building Physics in the Nordic Countries, August 24-27*, (ss. 166-171). Lund, Sweeden.

Korsgaard, V., & Pedersen, C. R. (1990). Moisture content and distribution in flat roofs with polyethylene or Hygro Diode vapour retarder. *Proceedings of the 2nd Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, August 20-22*, (ss. 253-258). Trondheim, Norway.

Listiburek, J. (2002, February). Moisture control for buildings. *ASHRAE Journal* .

Nilsson, L.-O. (2009). *Kunskapsläge och råd kring fuktsäker projektering och tillämpning av fuktkrav i BBR för träkonstruksjoner. Lägesrapport 2009, Woodbuild E1. Rapport TVBM-3151.* Lund, Sverige: Lunds Tekniska Högskola.

Nortett. (2012). *DELTA® Novaflexx*. Hentet November 28, 2012 fra http://nortett.no/delta-novaflexx

Mettler Toledo. (2012). Hentet Desember 14, 2012 fra http://no.mt.com/dam/mt_ext_files/Editorial/Generic/7/PE11

Moll, L., & Raamsdonk, T. v. (2011). *A New Zealand based study on airtightness and moisture management.* Wellington: Pro Clima NZ Limited.

Oustad, M., & Gustavsen, A. (2005). *Selvuttørking for kompakte tak - diffusjon. Prosjektrapport 386.* Oslo: Norges byggforsknigsinstitutt.

OMRON. (2012). Hentet November 28, 2012 fra http://www.ia.omron.com/data_pdf/cat/e5cn_e5cn-u_ds_e_5_2_csm137813-96689.pdf?id=165

Pedersen, C. R. (1990). *Combined heat and moisture transfer in building constructions.* PhD-theis, Technical University of Denmark, Report no. 214, Lyngby, Danmark.

Pro Clima. (2012). Hentet November 27, 2012 fra INTELLO PLUS vapour check: http://www.proclima.co.nz/airtightness-membrane-moisture

Sveriges metorologiske och hydrologiske institut. (2013, mai 27). *SMHI*. Hentet fra www.smhi.se/klimadata/meteorologi: data.smhi.se/met/climate/time_series/month/vov-pdf/

Stellander, M. (2011). *Litteraturundersøkelse vedrørende smarte dampsjikt med uttørkingsmulighet mot innelufta.* Trondheim: NTNU, Institutt for bygg, anlegg og transport.

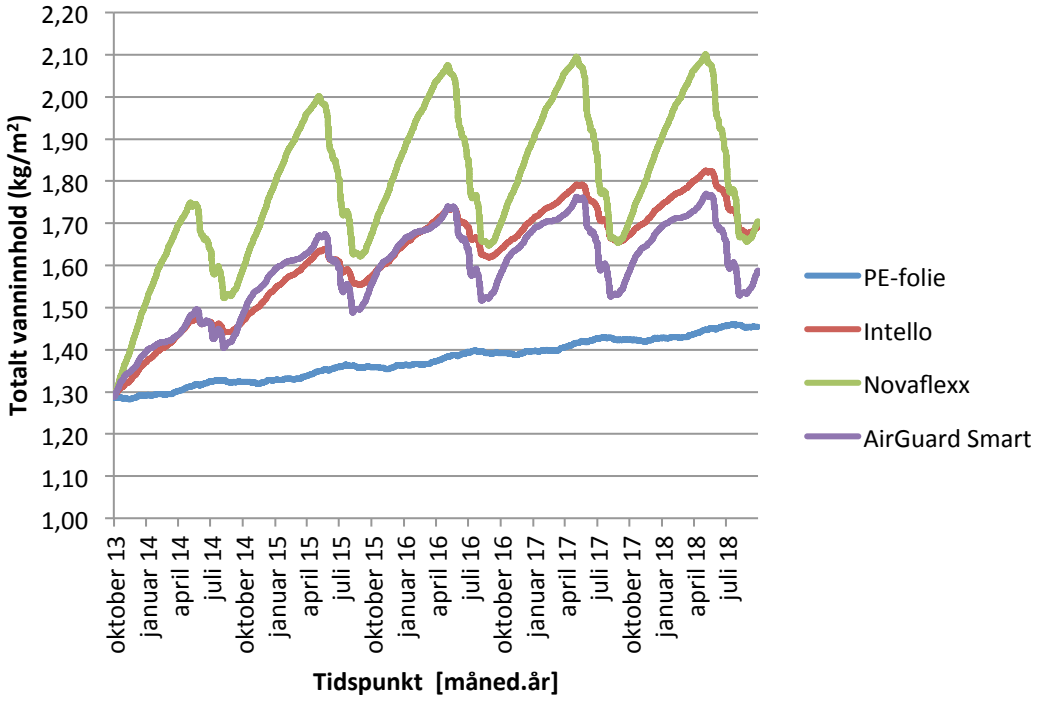
Stellander, M. (2012). *Smarte dampsperrer med uttørkingsmulighet mot innelufta.* Trondheim: NTNU, Institutt for bygg, anlegg og transport.

Rode, C., Christensen, G., & Vesterløkke, M. (1993). Moisture performance of flat, non-ventilated, wooden roof cassetts. *Proceedings of the 3rd Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Copenhagen, Denmark, September 13-15*, (ss. 623-631).

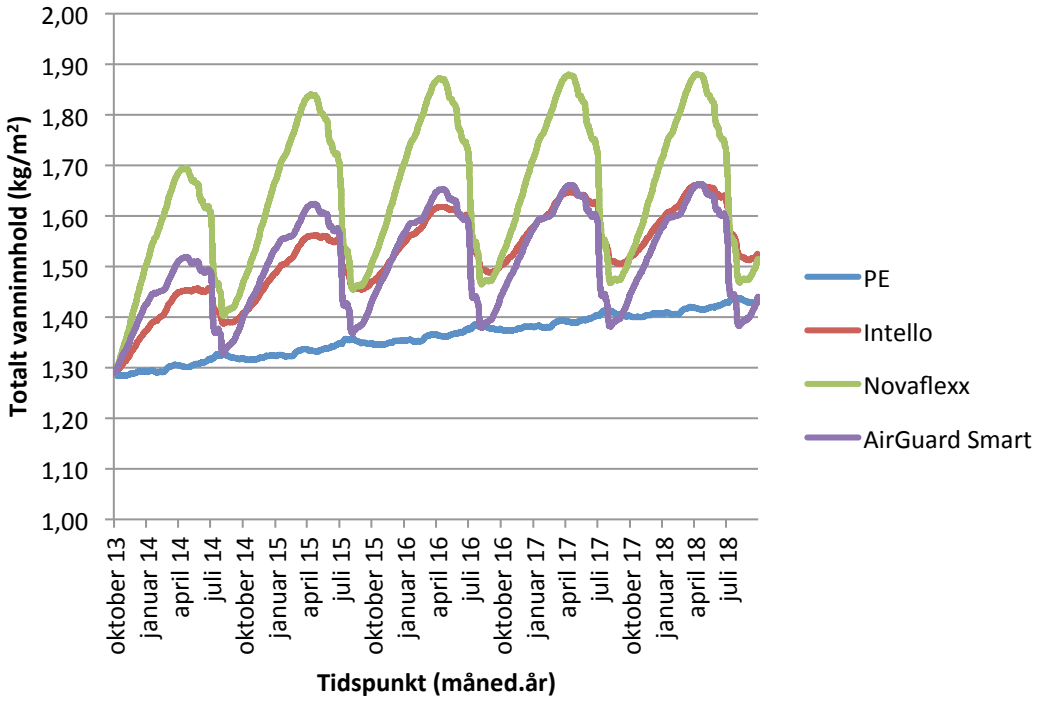
Thorsrud, E. (2012). *Smarte dampsperrer i kompakte tretak - betydningen av skyggeforhold.* Trondheim: NTNU, Institutt for bygg, anlegg og transport.

Vedlegg A

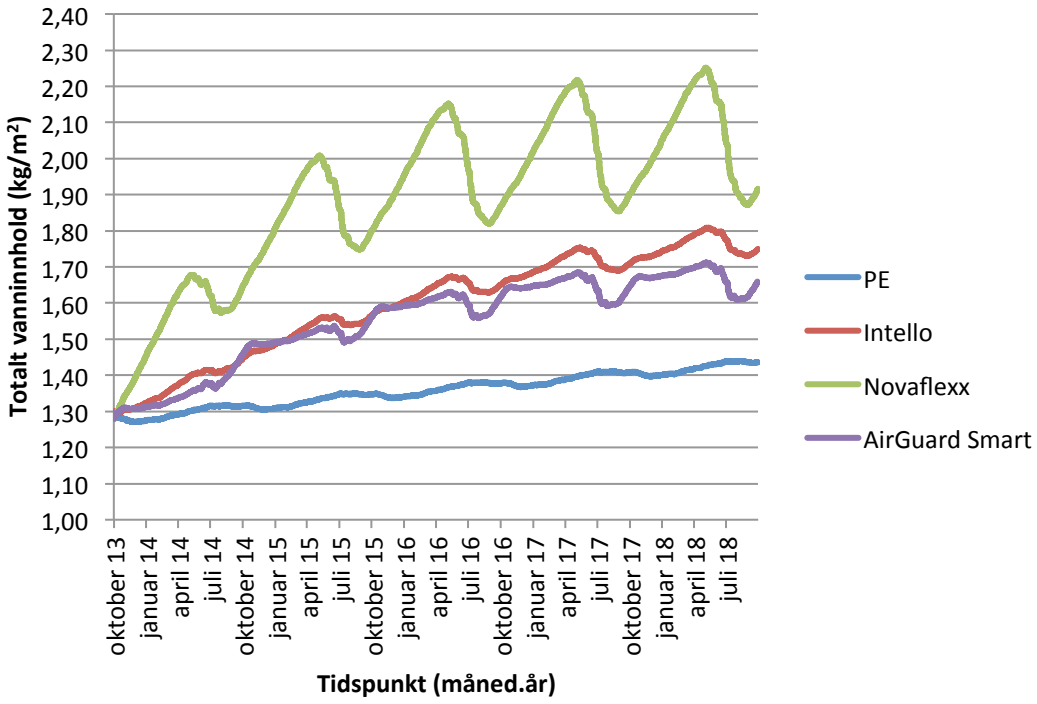
Beregningsvariant 2 – Trondheim



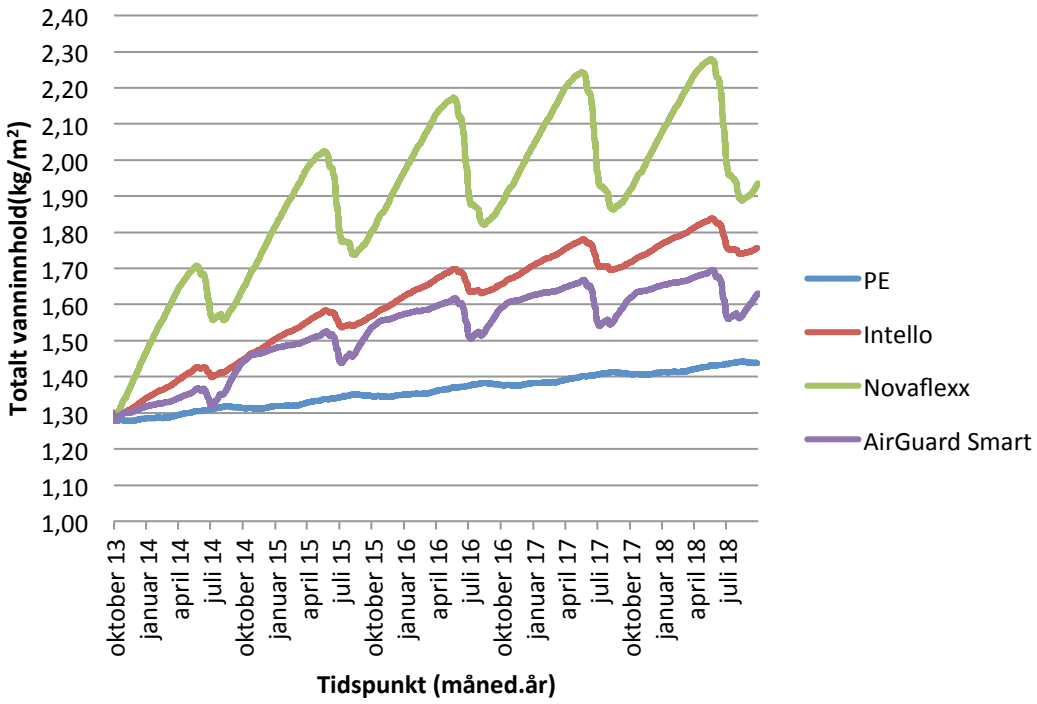
Beregningsvariant 3 – Bergen



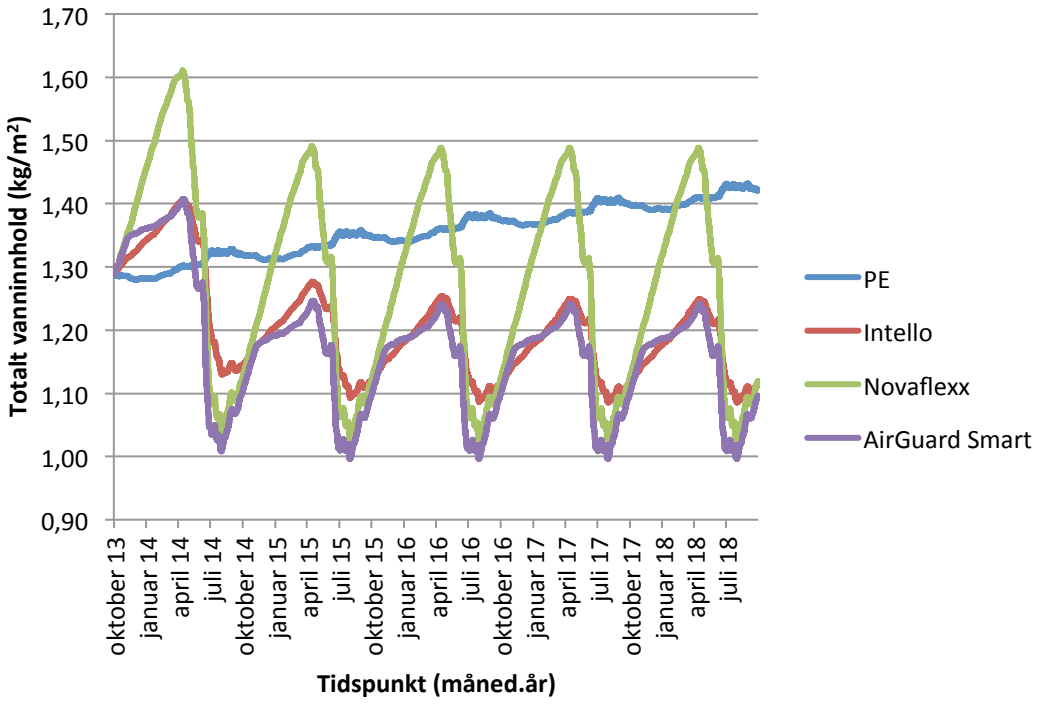
Beregningsvariant 4 – Røros



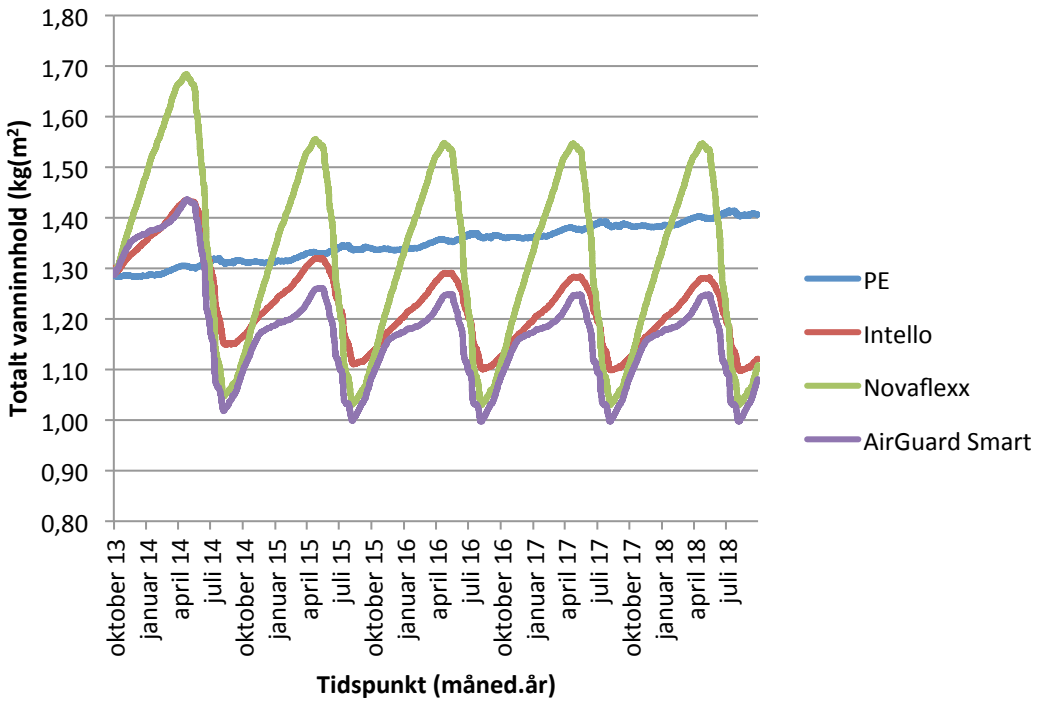
Beregningsvariant 5 – Tromsø



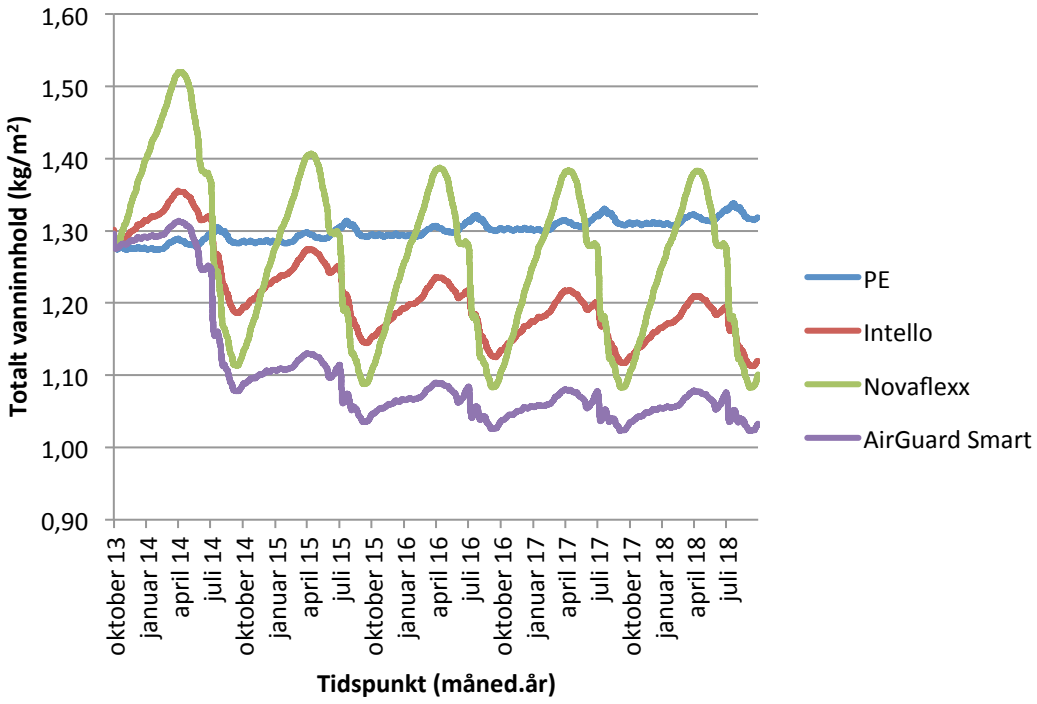
Beregningsvariant 6 – Holzkirchen



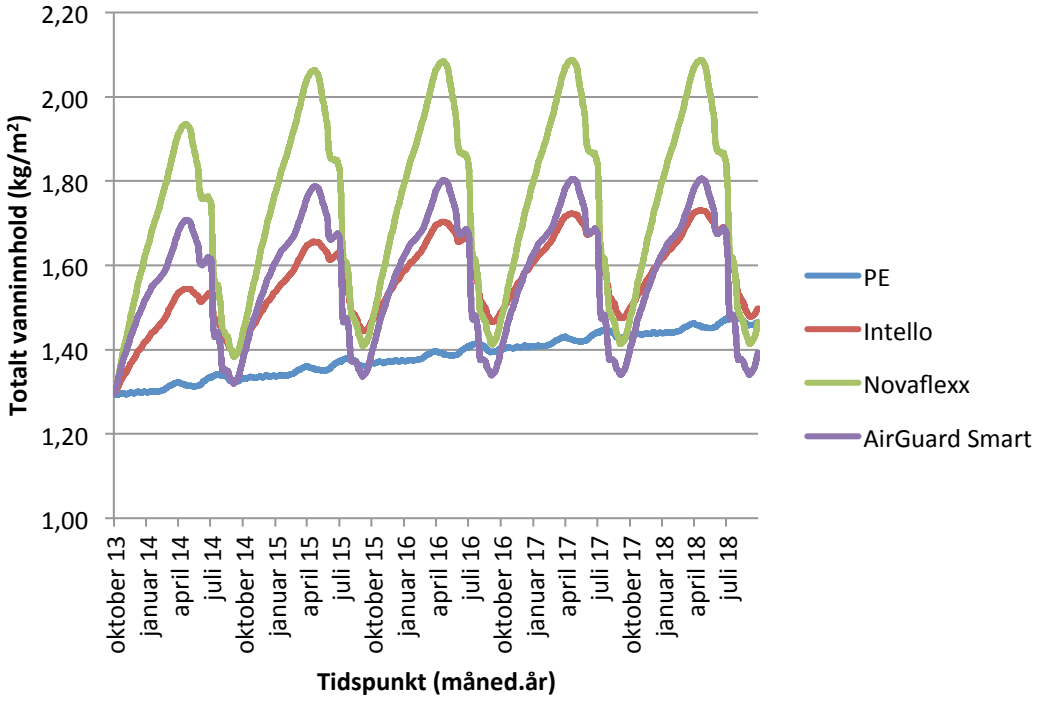
Beregningsvariant 7 – Stockholm



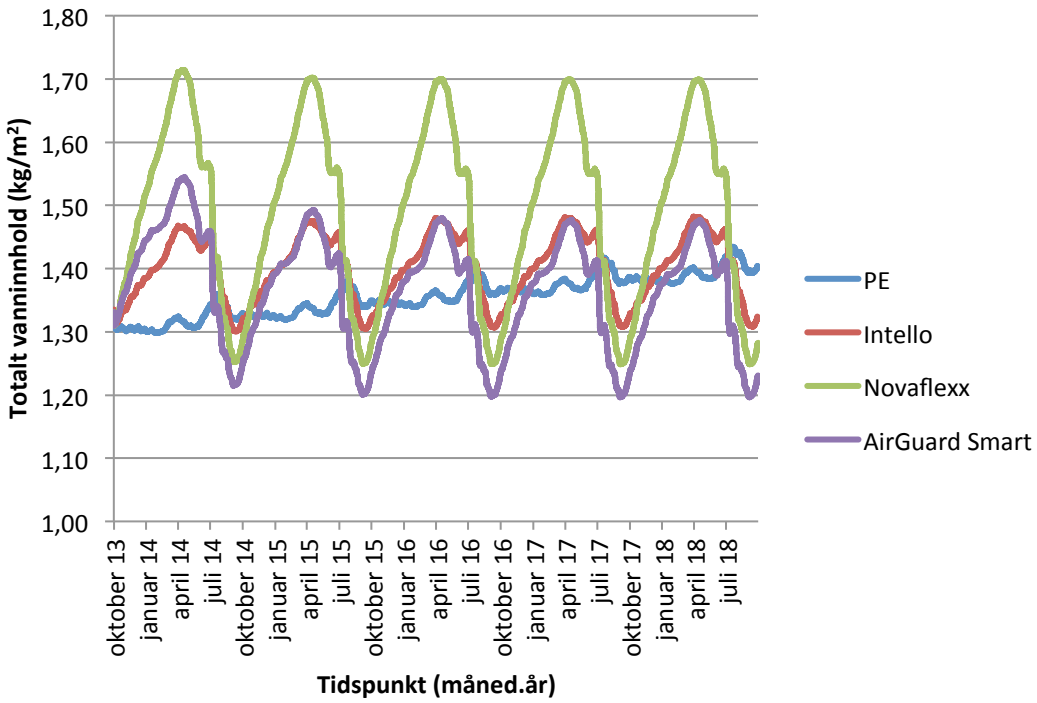
Beregningsvariant 8 – lavt fukttilskudd



Beregningsvariant 9 – høyt fukttilskudd

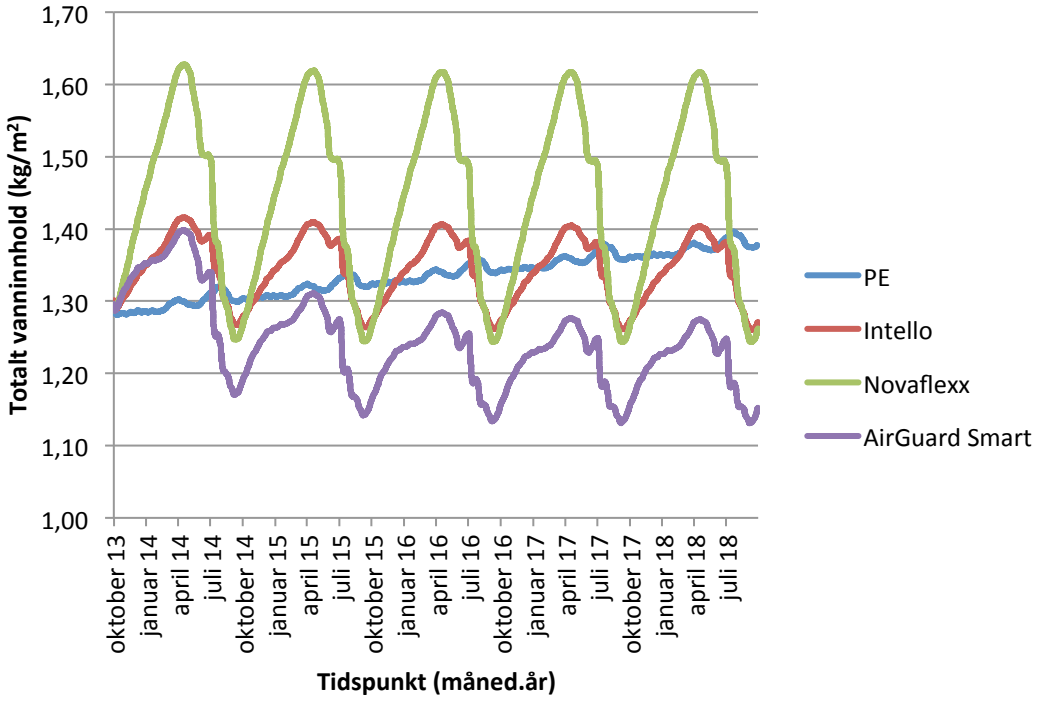


Beregningsvariant 10 – inntrukket dampsperre



Beregningsvariant 11 – malt himling

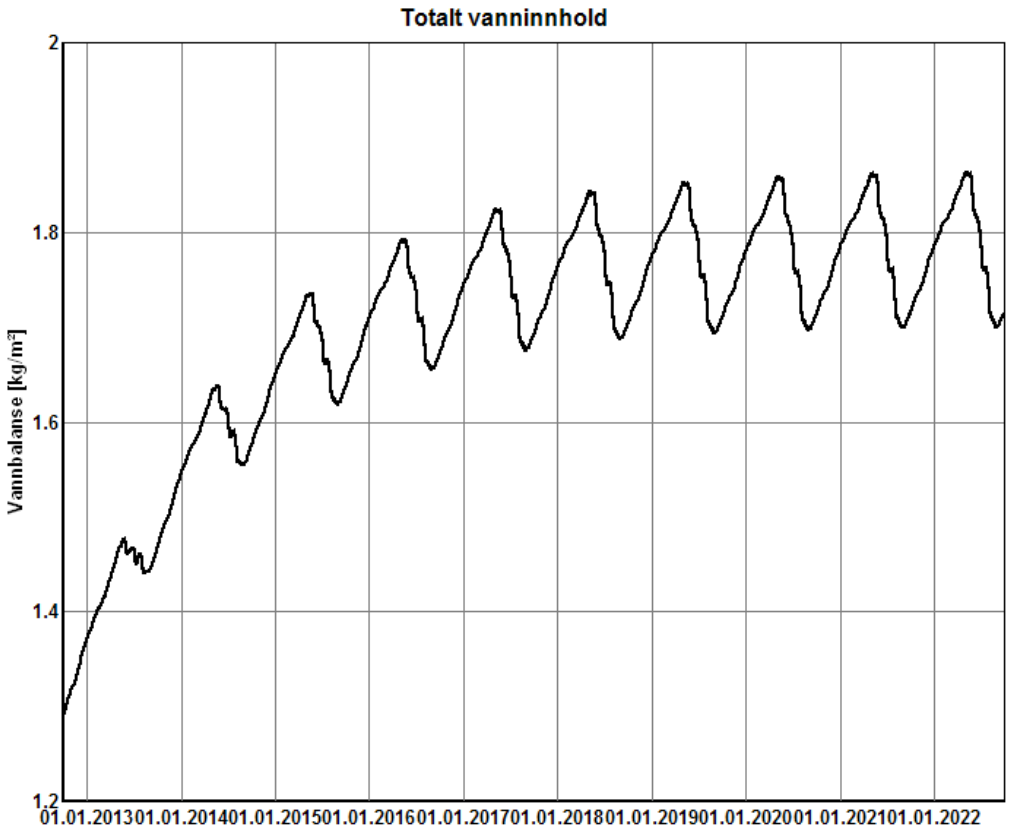
Malt himling tilsvarer innvendig overgangsmotstand med S_d = 0,5 meter.



Vedlegg B

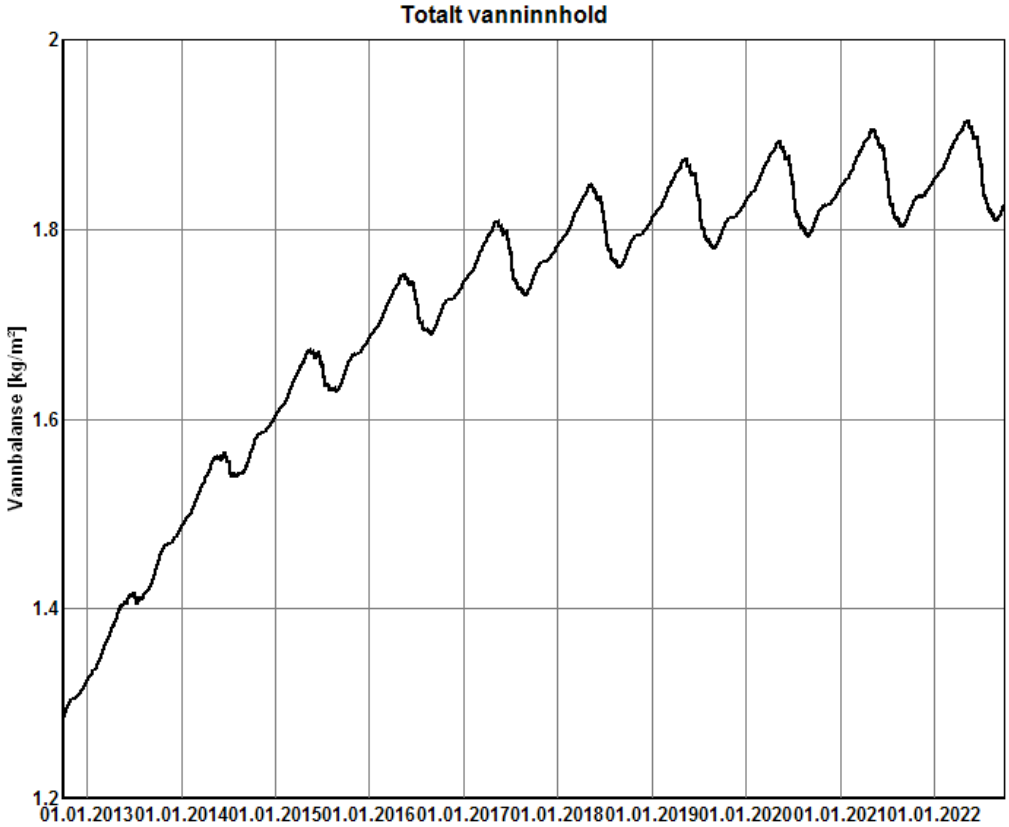
Intello i Trondheim - 10 års beregningstid

Beregningsvarianten med Intello, plassert i Trondheim, oppnår fuktlikevektsnivå etter syv år, med maksimalverdi for totalt vanninnhold på 1,86 kg/m^2.



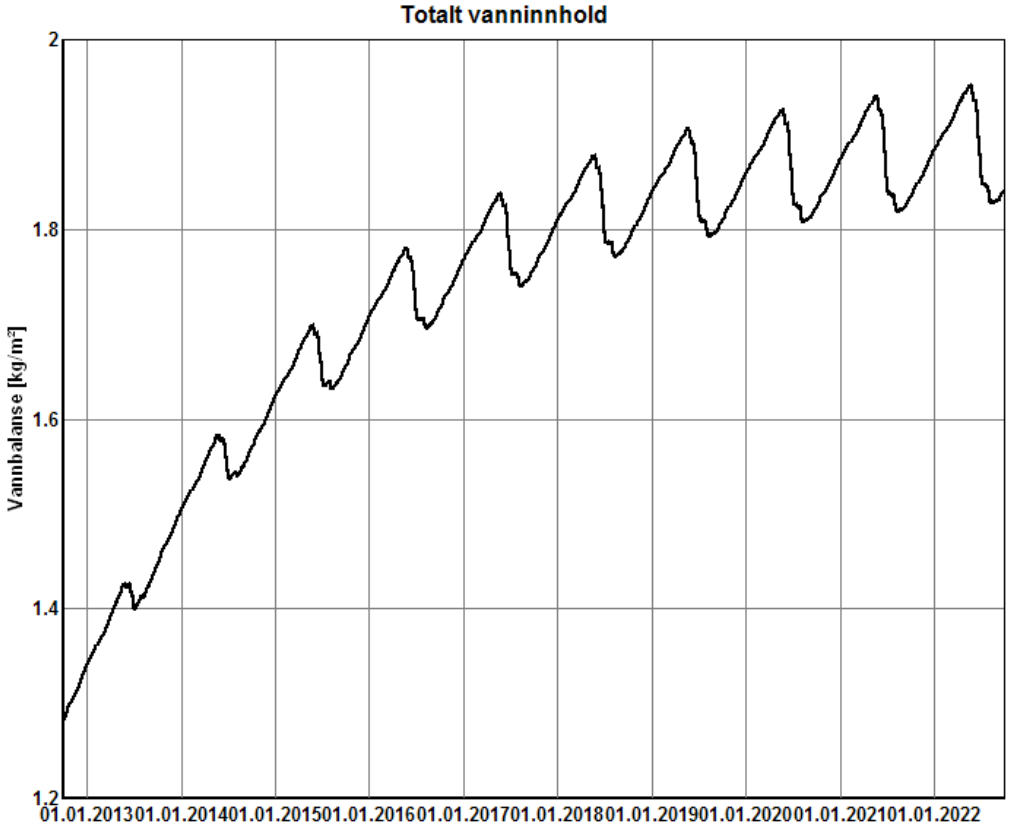
Intello i Røros - 10 års beregningstid

Beregningsvarianten med Intello, plassert i Røros, oppnår ikke fuktlikevektsnivå - maksimalverdi for totalt vanninnhold 10. året på 1,91 kg/m^2.



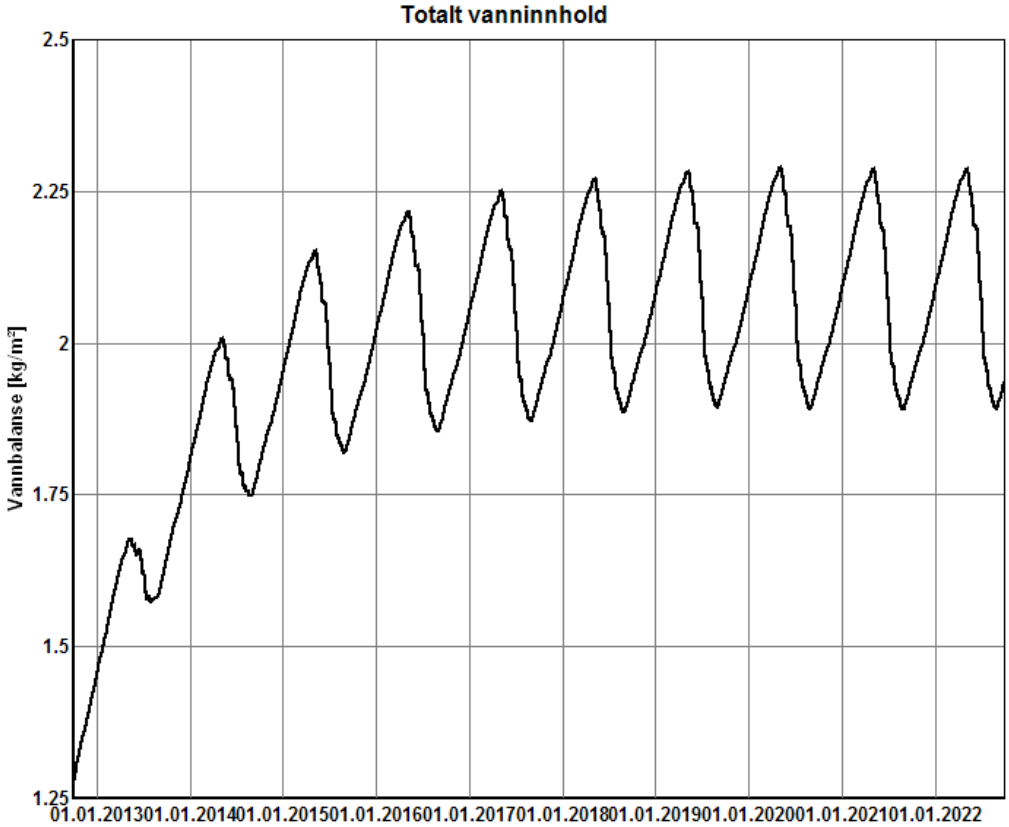
Intello i Tromsø - 10 års beregningstid

Beregningsvarianten med Intello, plassert i Tromsø, oppnår ikke fuktlikevektsnivå - maksimalverdi for totalt vanninnhold 10. året på 1,95 kg/m^2.



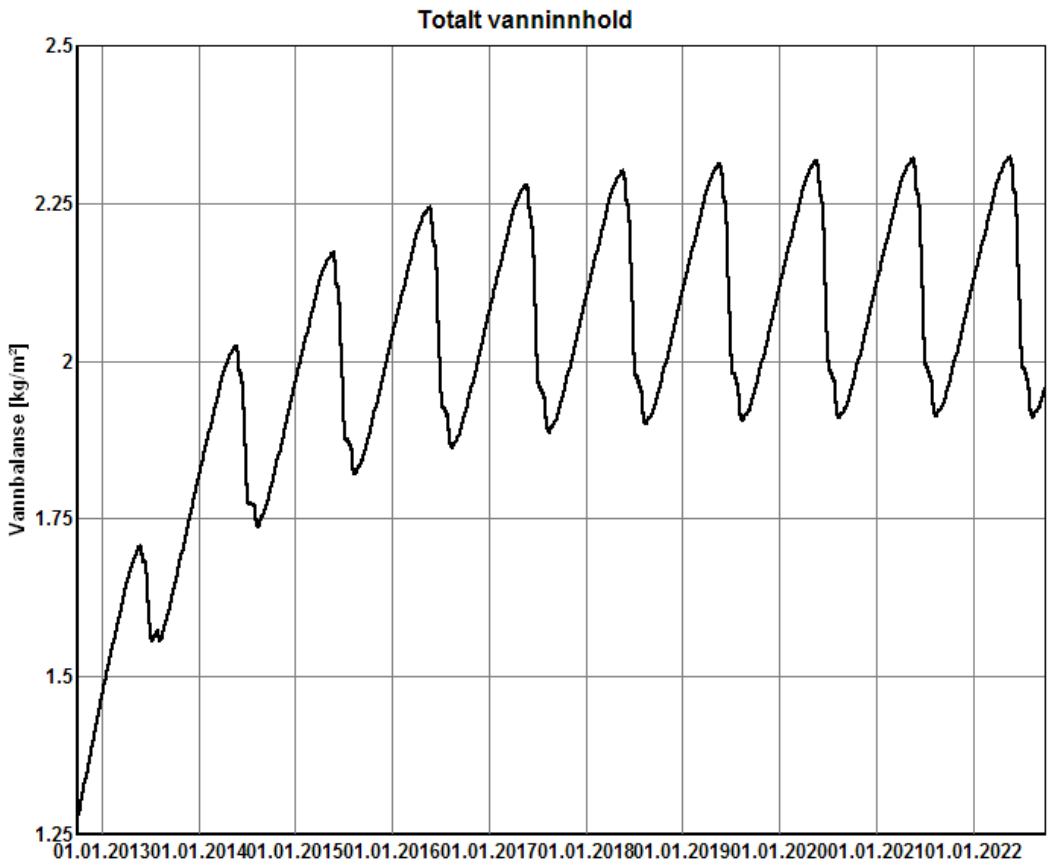
Novaflexx i Røros - 10 års beregningstid

Beregningsvarianten med Novaflexx, plassert i Røros, oppnår fuktlikevektsnivå etter åtte år, med maksimalverdi for totalt vanninnhold på 2,29 kg/m^2.



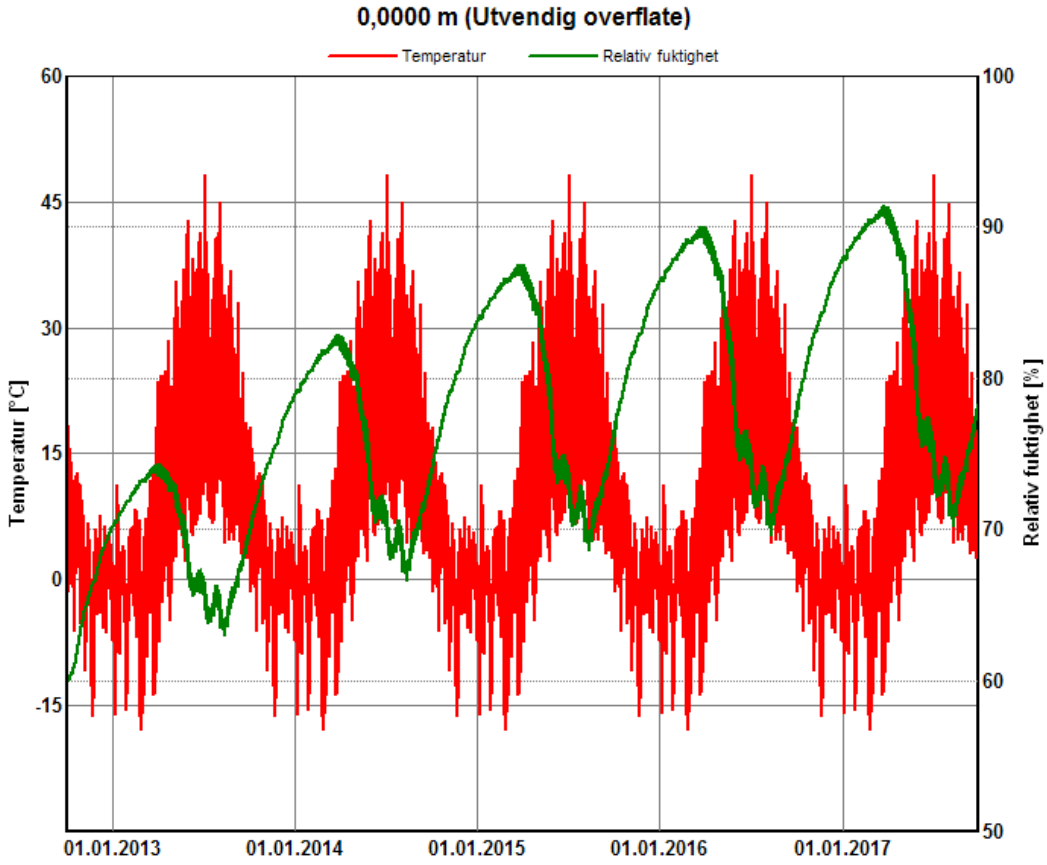
Novaflexx i Tromsø - 10 års beregningstid

Beregningsvarianten med Novaflexx, plassert i Tromsø, oppnår fuktlikevektsnivå etter syv år, med maksimalverdi for totalt vanninnhold på 2,33 kg/m^2.

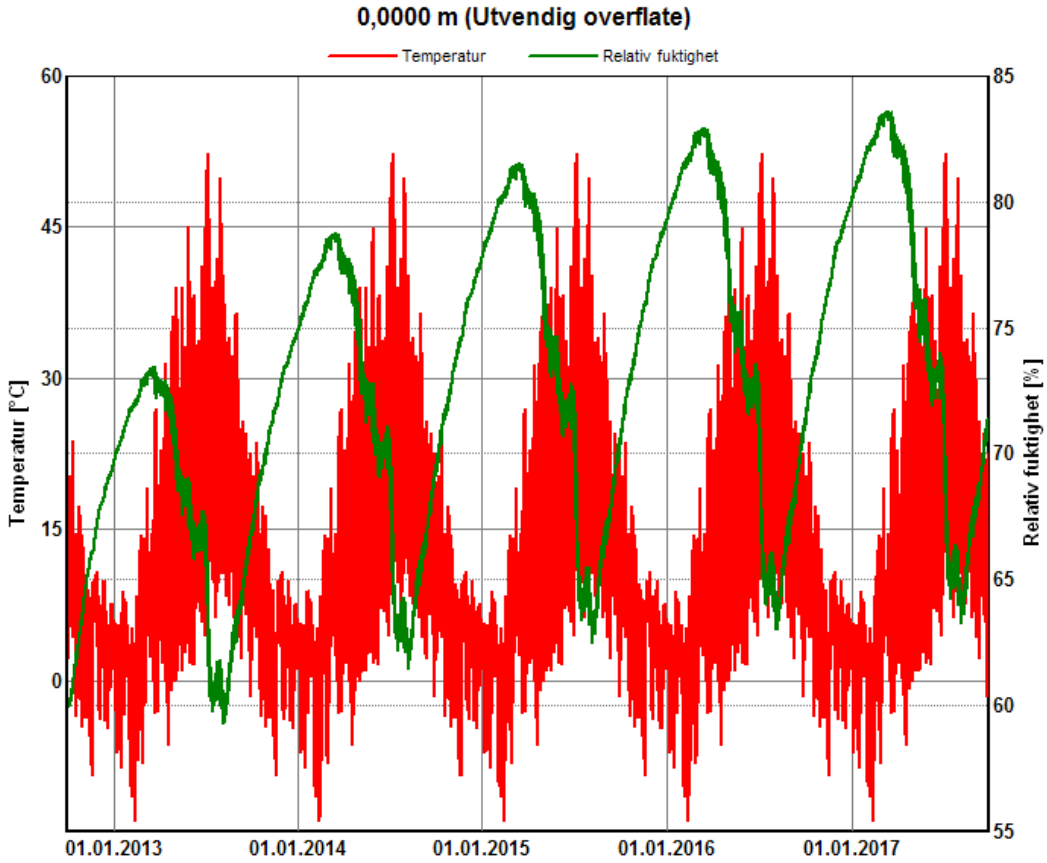


Vedlegg C

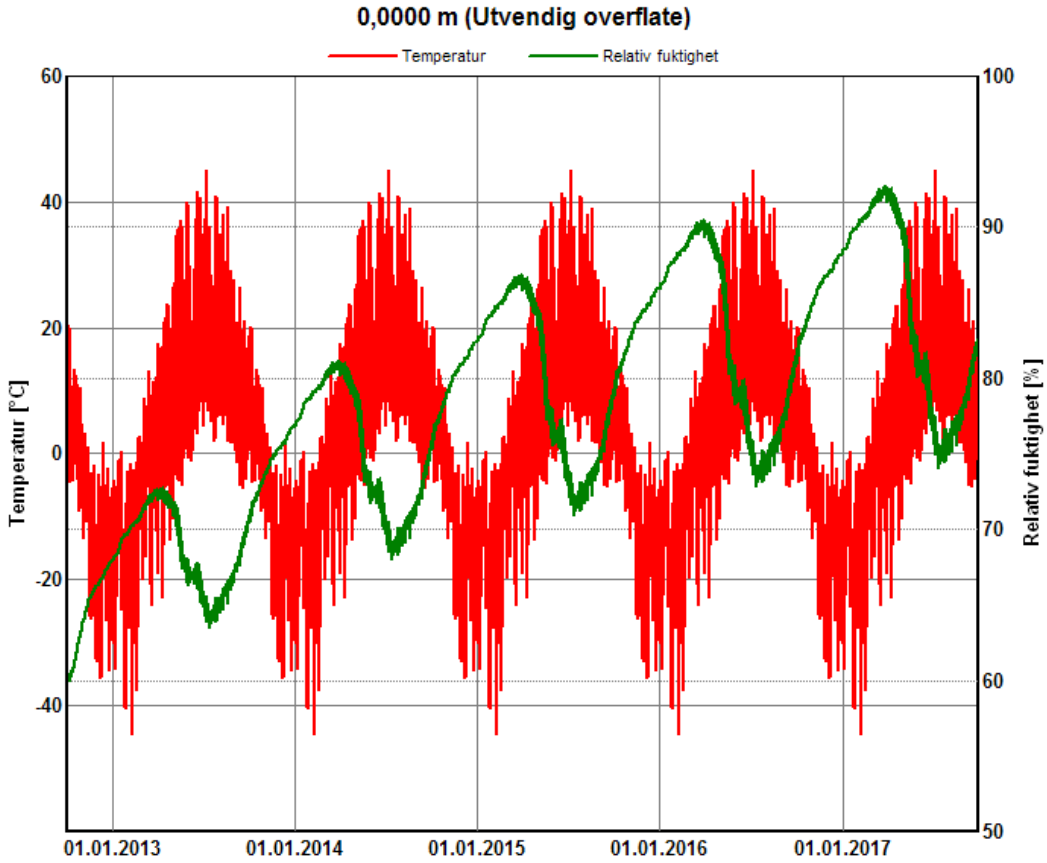
Intello i Trondheim - RF og temperatur i taktro



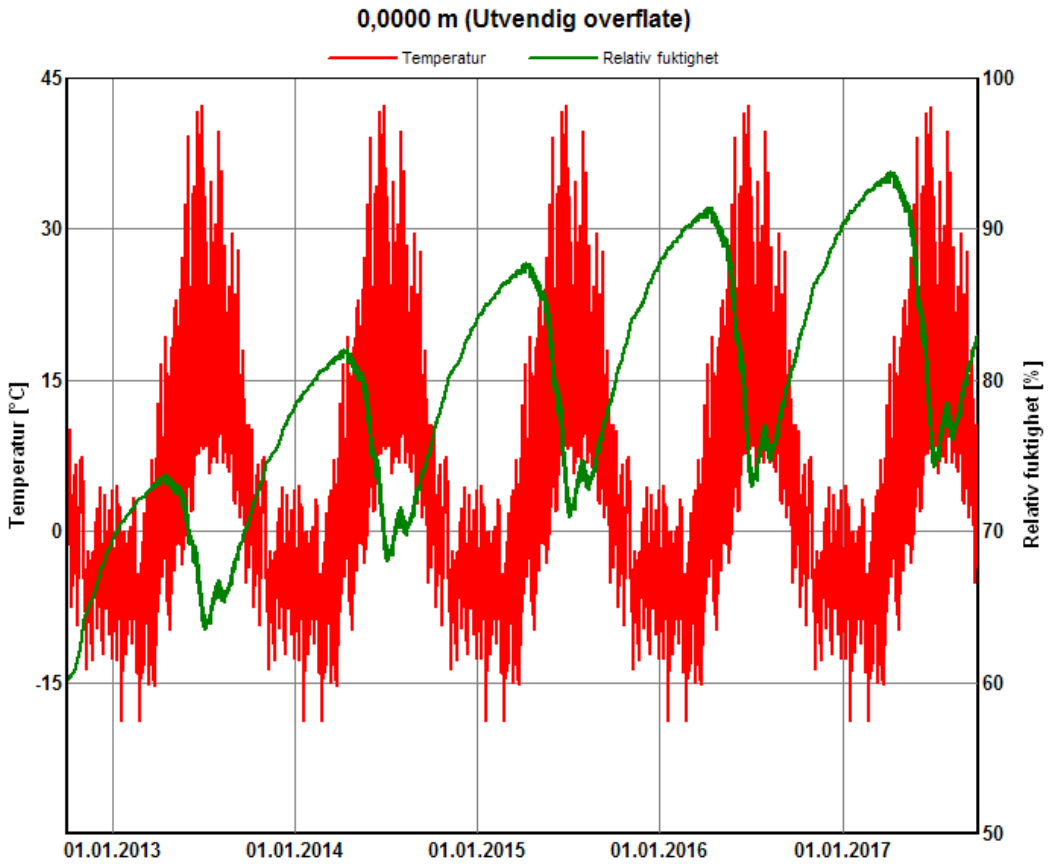
Intello i Bergen - RF og temperatur i taktro



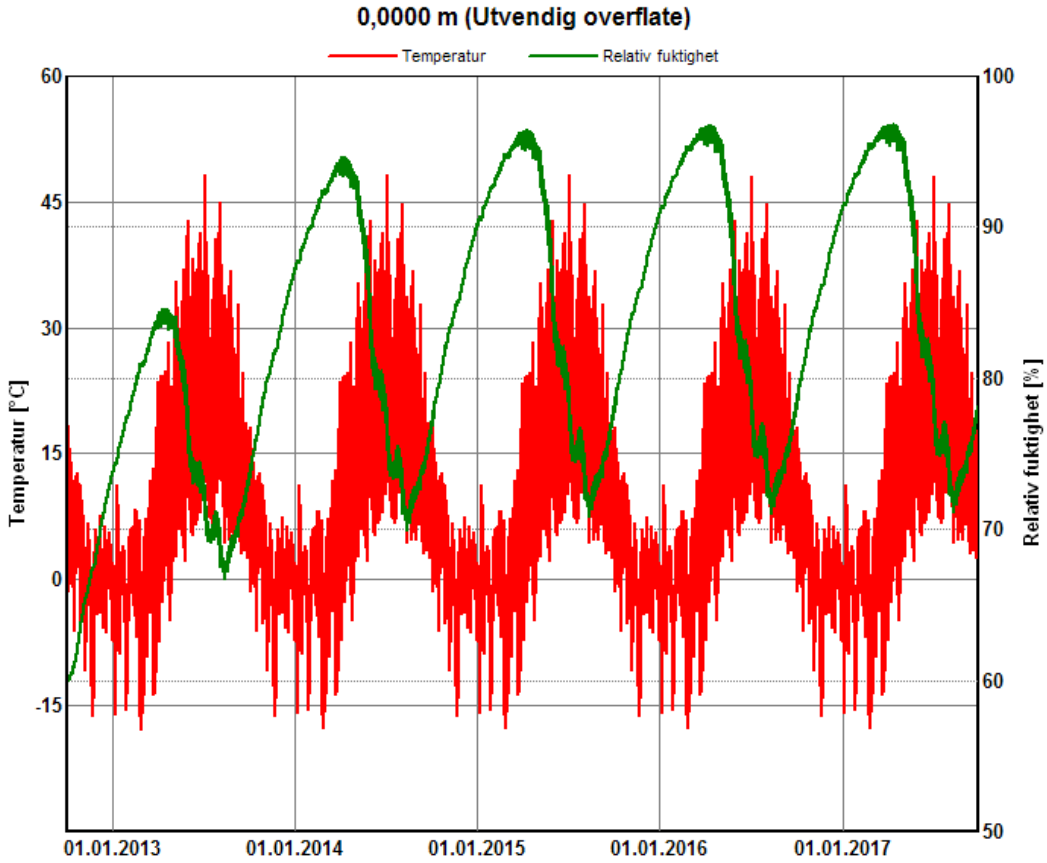
Intello i Røros - RF og temperatur i taktro



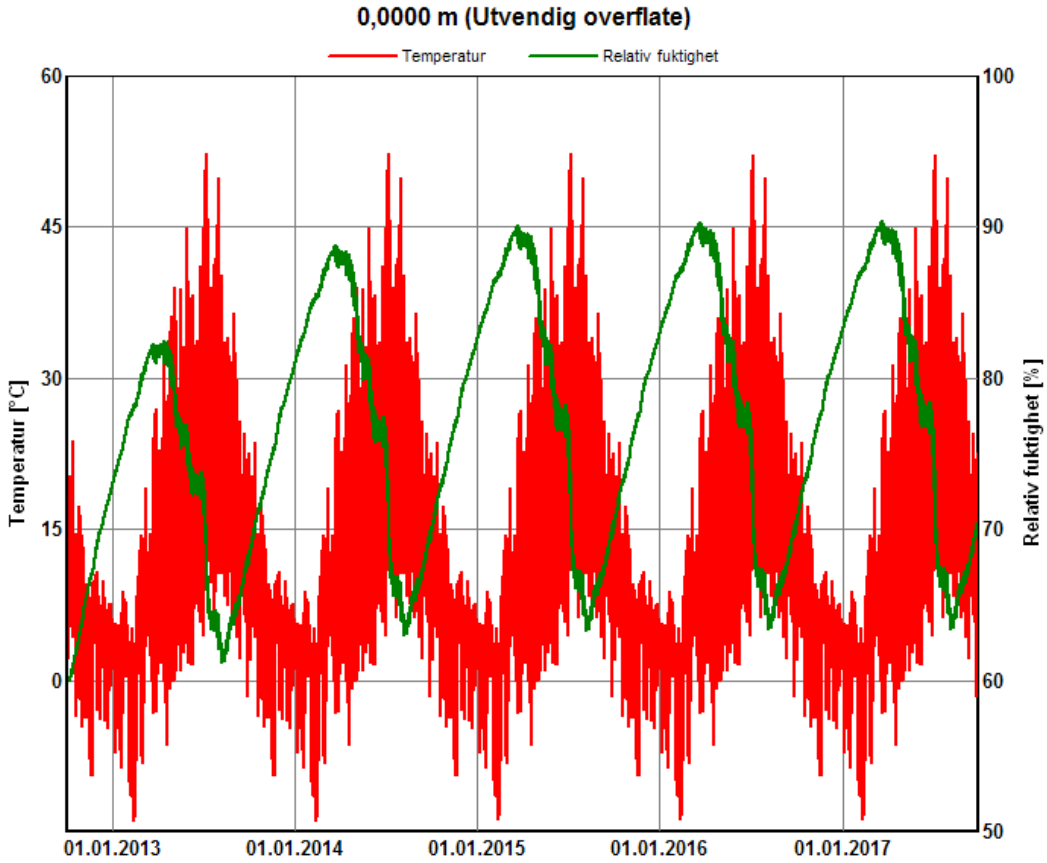
Intello i Tromsø - RF og temperatur i taktro



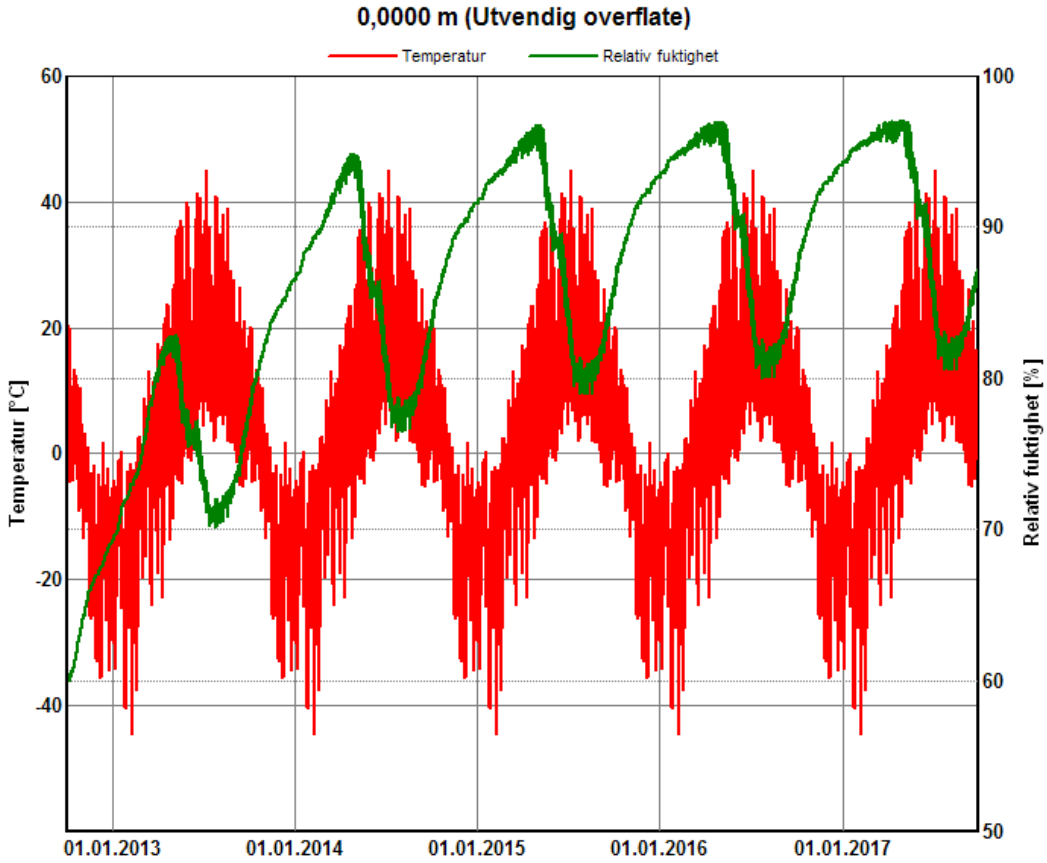
Novaflexx i Trondheim - RF og temperatur i taktro



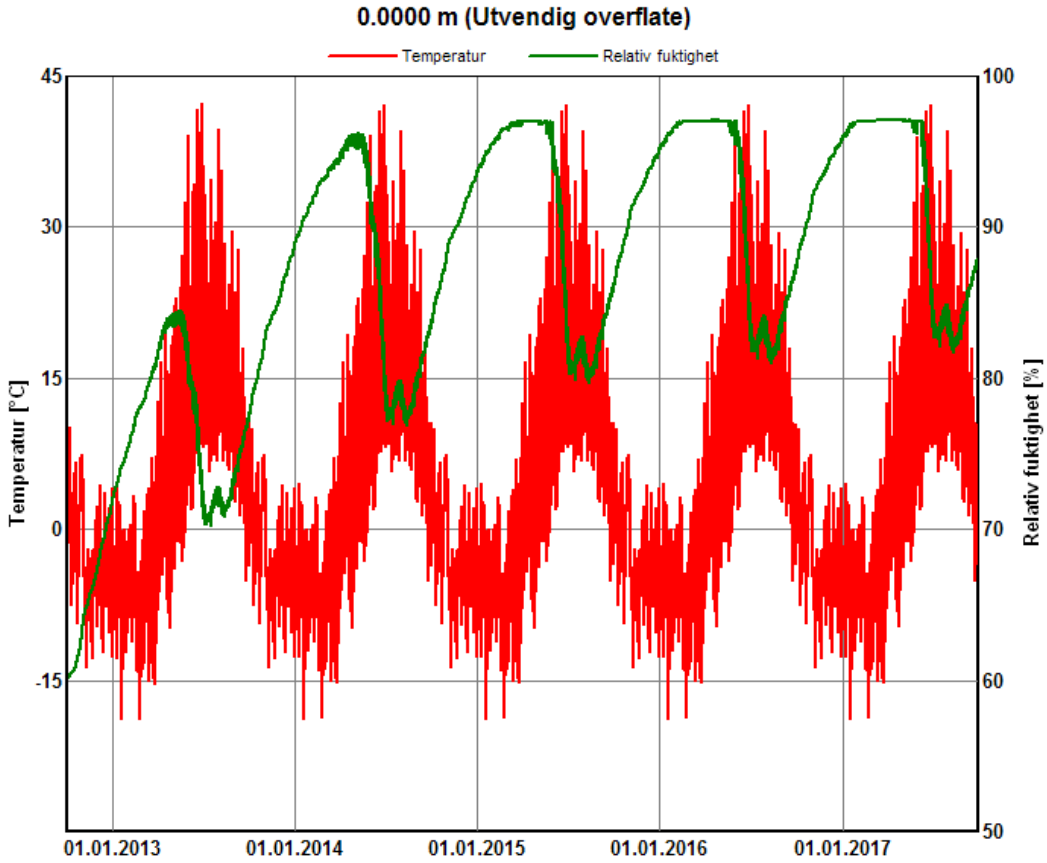
Novaflexx i Bergen - RF og temperatur i taktro



Novaflexx i Røros - RF og temperatur i taktro



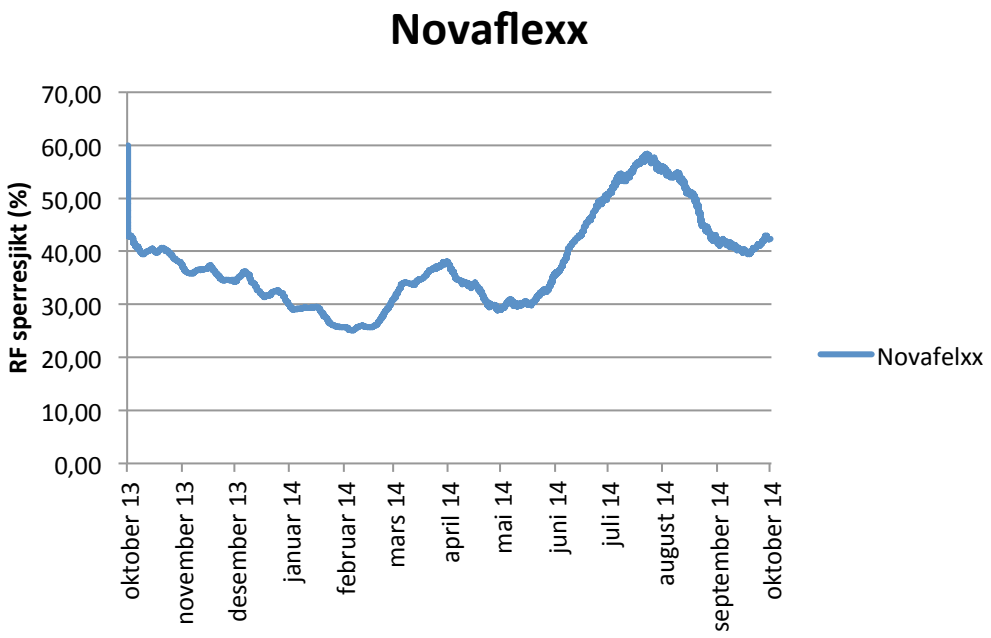
Novaflexx i Tromsø - RF og temperatur i taktro



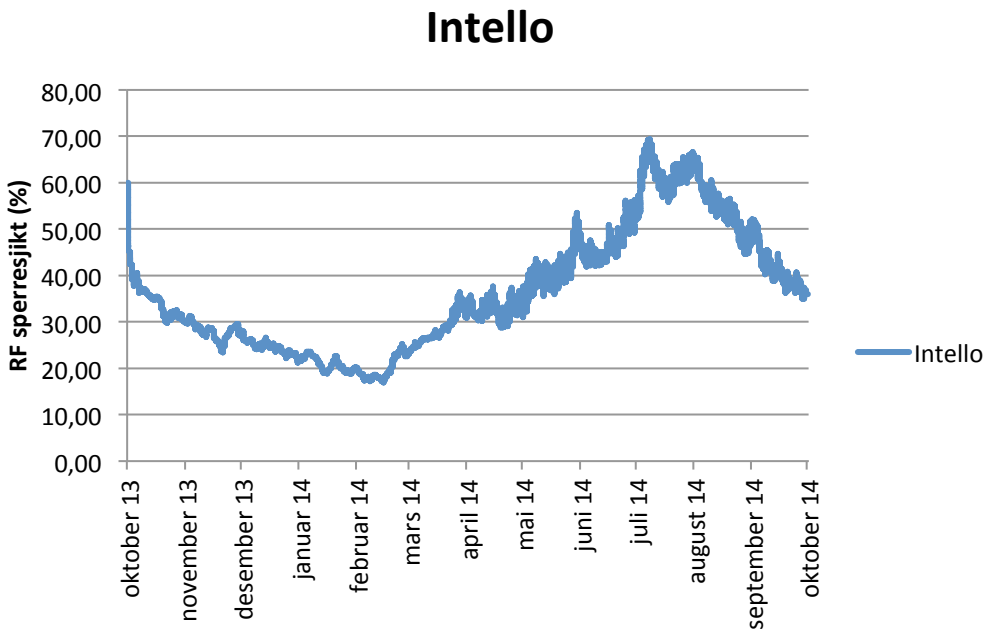
Vedlegg D

RF i sperresjiktet ved lavt fukttilskudd

Figur 51 og 52 viser henholdsvis gjennomsnittlig RF over sperresjiktet for Novaflexx og Intello ved lavt fukttilskudd, for standardkonstruksjonen plassert i Oslo.



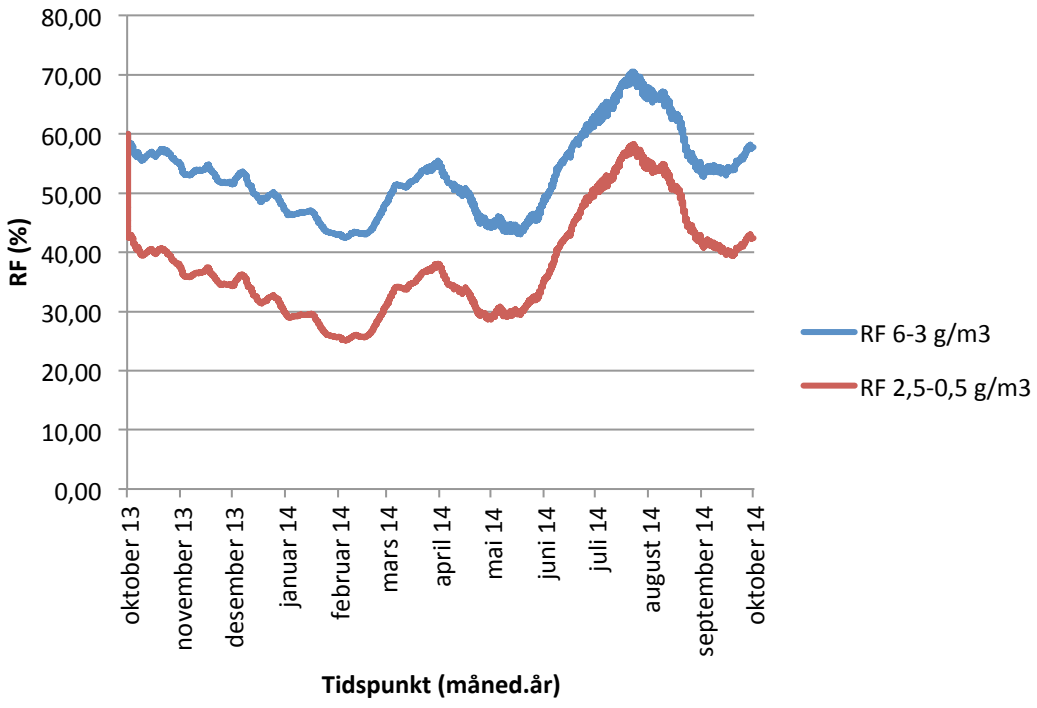
Figur 51: Gjennomsnittlig RF over sperresjiktet for Novaflexx ved lavt fukttilskudd.



Figur 52: Gjennomsnittlig RF over sperresjiktet for Intello ved lavt fukttilskudd.

RF i innelufta ved høyt og lavt fukttilskudd

Figur 53 viser forskjellen på RF i innelufta ved høyt og lavt fukttilskudd.

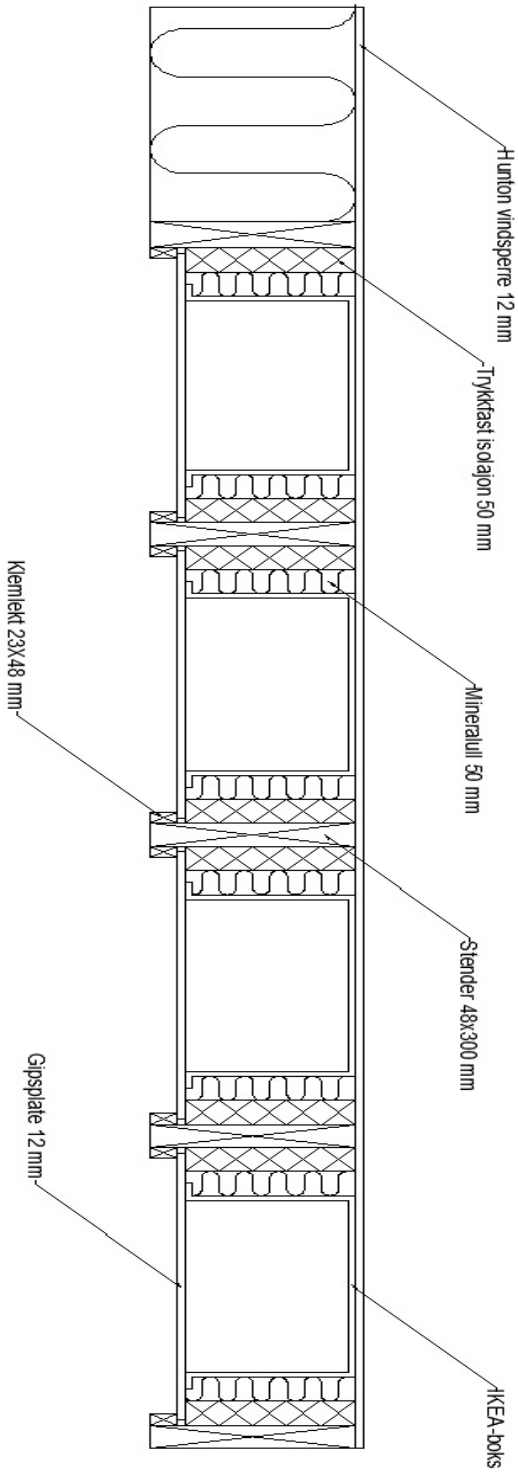


Figur 53: RF i innelufta ved høyt og lavt fukttilskudd.

Vedlegg E

Snittegning av forsøksrigg

Figur 54 viser snittegning av forsøksriggen (modifisert vegg) i klimarommet.



Figur 54: Snittegning av forsøksriggen.

Vedlegg F

Tabell 16, 17 og 18 viser parametere, med tilhørende verdier, for utregning av S_d-verdier og RF-nivå, for henholdsvis syklus 1, 2 og 3.

Beregnete S_d-verdier for syklus 1

Tabell 16: Beregnet S_d-verdi og RF, basert på måledata fra syklus 1.

Parameter	Intello	Hygrodiode	Novaflexx	AirGuard Smart
m_1-m_0 $[g]$	0,2	0,5	0,4	0,4
m_2-m_1 $[g]$	-0,1	0	0,2	-0,1
m_3-m_2 $[g]$	0,6	0,7	0,8	0,7
T_{utside} [°C]	20,6	19,8	20,8	20,5
RF_{utside} [%]	19,8	18,6	19	15,8
$p_{utside,\ RF}$ $[Pa]$	480	429	466	381
$T_{inneluft}$ [°C]	21,4	21,4	21,4	21,4
$RF_{inneluft}$ [%]	22,4	22,4	22,4	22,4
$P_{inneluftluft,\ RF}$ $[Pa]$	570	570	570	570
Δp_v $[Pa]$	90	141	104	189
$G_{1,1\text{-}0}$ $[\times 10^{-10}$ kg/s]	3,307	8,267	6,614	6,614
$G_{1,2\text{-}1}$ $[\times 10^{-10}$ kg/s]	-1,653	0	3,307	-1,653
$G_{1,3\text{-}1}$ $[\times 10^{-10}$ kg/s]	9,921	11,574	13,228	11,574
G_{snitt} $[\times 10^{-10}$ kg/s]	3,858	6,614	7,716	5,512
W_1 $[\times 10^{-9}$ kg/m^2sPa]	0,041	0,045	0,070	0,028
Z_1 [Mm^2sPa/kg]	24,4	22,2	14,3	35,7
S_d $[m]$	4,8	4,4	2,8	7
$RF_{snitt,målt}$ [%]	21,1	20,5	20,7	19,1

Beregnete S_d-verdier for syklus 2

Tabell 17: Beregnet S_d-verdi og RF, basert på måledata fra syklus 2.

Parameter	Intello	Hygrodiode	Novaflexx	AirGuard Smart
m_1-$m_0[g]$	1,7	1,8	2,1	1,1
m_2-$m_1[g]$	0,9	0,9	1,4	0,5
m_3-$m_2[g]$	0,8	0,9	1,5	0,5
T_{utside} [°C]	22,1	21,2	22,2	22
RF_{utside} [%]	21,7	20,3	20,8	16,9
$p_{utside,\ RF}$ $[Pa]$	577	511	556	446
$T_{inneluft}$ [°C]	23	23	23	23
$RF_{inneluft}$ [%]	32,8	32,8	32,8	32,8
$P_{inneluftluft,\ RF}$ $[Pa]$	921	921	921	921
Δp_v $[Pa]$	344	410	365	475
$G_{1,1\text{-}0}$ $[\times 10^{-10}$ kg/s]	28,108	29,762	34,722	18,188
$G_{1,2\text{-}1}$ $[\times 10^{-10}$ kg/s]	14,881	14,881	23,148	8,267
$G_{1,3\text{-}1}$ $[\times 10^{-10}$ kg/s]	13,228	14,881	24,802	8,267
G_{snitt} $[\times 10^{-10}$ kg/s]	18,739	19,841	27,557	11,574
W_1 $[\times 10^{-9}$ kg/m^2sPa]	0,052	0,046	0,072	0,023
Z_1 [Mm^2sPa/kg]	19,2	21,7	13,9	43,5
S_d $[m]$	3,8	4,3	2,7	8,5
$RF_{snitt,målt}$ [%]	27,3	26,6	26,8	24,9

Beregnete S_d-verdier for syklus 3

Tabell 18: Beregnet S_d-verdi og RF, basert på måledata fra syklus 3.

Parameter	Intello	Hygrodiode	Novaflexx	AirGuard Smart
m_1-$m_0[g]$	2,7	2,5	3,8	2
m_2-$m_1[g]$	1,8	1,8	2,6	1,1
m_3-$m_2[g]$	1,1	1,2	2,1	0,4
T_{utside} [°C]	22,4	21,5	22,5	22,3
RF_{utside} [%]	23,9	22,2	22,2	19,2
$p_{utside,\ RF}$ $[Pa]$	647	569	605	516
$T_{inneluft}$ [°C]	23,3	23,3	23,3	23,3
$RF_{inneluft}$ [%]	42,6	42,6	42,6	42,6
$P_{inneluftluft,\ RF}$ $[Pa]$	1218	1218	1218	1218
Δp_v $[Pa]$	571	649	613	702
$G_{1,1\text{-}0}$ $[\times 10^{-10}$ kg/s]	44,643	41,336	62,830	33,069
$G_{1,2\text{-}1}$ $[\times 10^{-10}$ kg/s]	29,762	29,762	63,913	18,188
$G_{1,3\text{-}1}$ $[\times 10^{-10}$ kg/s]	18,188	19,842	34,722	6,614
G_{snitt} $[\times 10^{-10}$ kg/s]	30,864	30,313	53,822	19,290
W_1 $[\times 10^{-9}$ kg/m^2sPa]	0,051	0,044	0,083	0,026
Z_1 [Mm^2sPa/kg]	19,61	22,73	12,05	38,46
S_d $[m]$	3,8	4,5	2,4	7,5
$RF_{snitt,målt}$ [%]	33,3	32,4	32,4	30,9