

**NTNU**  
Norges teknisk-naturvitenskapelige  
universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for bygg - og miljøteknikk

Kristina Fjeldstad Olsen

## Kjøleeffekten av regn- og smeltevann i omvendte takkonstruksjoner

Juli 2020





Kunnskap for en bedre verden

# Kjøleeffekten av regn- og smeltevann i omvendte takkonstruksjoner

**Kristina Fjeldstad Olsen**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juli 2020

Hovedveileder: Tore Kvande

Medveileder: Erlend Andenæs

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg - og miljøteknikk



# Sammendrag

I denne oppgaven blir kjøleeffekten av regn- og smeltevann i omvendte tak studert ved hjelp av laboratoriemålinger og simuleringer i programvaren WUFI. I omvendte tak plasseres takmembranen under isolasjonslaget, som fører til at regnvann vil renne forbi isolasjonen og ned på varm side av konstruksjonen. Resultatene viser at det største varmetapet kommer fra nedbør som absorberer varme fra takmembranen, og øker takets U-verdi med opptil 62,9 %. Deretter kommer varmetapet av fuktopptak i plastisolasjon, som bidrar til å øke U-verdien med 11,2 %.

I følge forskningslitteraturen anbefales det å plassere et vannavstøtende og dampåpent separasjonssjikt mellom isolasjon og topplaget, for å holde vann ute og dermed bidra til at begge disse varmetapene reduseres. Et slikt sjikt inngår ikke i dagens anbefalinger. Sjiktet ble utprøvd i simuleringen, og bidro til en kraftig reduksjon i fuktopptaket i isolasjonen. Det anbefales derfor å plassere et slikt sjikt mellom isolasjon og topplag i omvendte takkonstruksjoner for å bedre imøtekomme fremtidens energikrav.

Lekkasjeraten beskriver forholdet mellom regnvann som dreneres over og under isolasjonslaget. I laboratoriet ble lekkasjeraten ( $f$ ) målt for ulike oppbygning og utførelse av isolasjonslaget. Økt lekkasjerate gir økt kjøleeffekt fordi regnvannet absorberer varme fra takmembranen. For å bestemme lekkasjeraten gjennom isolasjonslaget ble det bygget et omvendt tak i laboratorium, som ble påført en simulert nedbørsmengde ved hjelp av en vannspray-rigg. En takmembran ble ikke tatt med i oppbygningen, ut fra antagelsen at den ikke ville påvirke lekkasjeraten. Isolasjonen var derfor lagt direkte oppå den plane stålblaten som utgjorde bunnen i takriggen. Basert på at ujevnheter påvirket lekkasjeraten, vil trolig også en takmembran ha påvirket lekkasjeraten i samme retning

I beregningsstandarder blir isolasjonens varmemotstand korrigert med et antatt fuktopptak. I kapittel 4.2 blir det langsiktige fuktopptaket simulert og kvantifisert i simuleringsverktøyet WUFI. Det ble tatt utgangspunkt i to takmodeller fra håndbøkene til WUFI: Et ballastert tak og et grønt tak. I håndbøkene blir innstillinger, materialer og oppbygninger foreslått, basert på feltmålinger utført i Holzkirchen. Ideelt skulle det blitt utført feltmålinger på tak i de simulerte klimaene. For å simulere et omvendt tak blir det i tillegg lagt inn en vannfilm på isolasjonens underside, for å simulere at regnvann kan komme forbi isolasjonslaget. Videre blir fuktopptaket i isolasjonen studert ved ulike klimaer, innetemperaturer og forskjellige topplag. Dessuten blir det testet med et nytt vannavstøtende og dampåpent separasjonssjikt (WSL) plassert oppå isolasjonen, for å se hvordan dette påvirker kjøleeffekten.

Resultatet av laboratoriemålingene viser at lekkasjeraten øker for lavere nedbørintensiteter, økt gap mellom isolasjonsplatene, ved parallelle skjøtekanter og ujevnt underlag. Det er mulig å simulere kjøleeffekten basert på WUFI sine takmodeller. Resultatene viser at det er større fuktopptak i grønne tak enn ballasterte tak. Videre øker dette fuktopptaket ved høyere innetemperaturer og i klima med større nedbørsmengder og lavere utetemperaturer.

# Abstract

This master thesis studies the cooling effect of rain- and melt water in inverted roofs using laboratory measurements and simulations in the WUFI software. In inverted roofs, the roof membrane is placed under the insulation layer, which causes rainwater to flow past the insulation and down on the warm side of the structure. Heat loss occurs due to this, where the results show that the greatest heat loss comes from precipitation which absorbs heat from the roof membrane, increasing the U-value of the roof by up to 62.9%. Then comes the heat loss due to moisture accumulation in the insulation, which increase the U-value by 11.2%.

According to the research literature, it is recommended to place a water-repellent and vapor-open separation layer between the insulation and the top layer, in order to keep water out and thus help reduce both of these heat losses. Such a layer is not included in today's recommendations. The layer was tested in the simulation and contributed to a sharp reduction in moisture absorption in the insulation. It is therefore recommended to place such a layer in inverted roof structures as further energy savings will be demanded in the future.

The leakage rate describes the ratio of rainwater drained above and below the insulation layer. In the laboratory, the leakage rate ( $f$ ) was measured for different structure and construction of the insulation layer. Increased leakage rate gives increased cooling effect because the rainwater absorbs heat from the roof membrane. In order to determine the leakage rate through the insulation layer, an inverted roof was constructed in the laboratory, which was applied to a simulated rainfall using a water spray rig. A roof membrane was not included in the build-up, on the assumption that it would not affect the leakage rate. The insulation was therefore laid directly on the flat steel plate which formed the bottom of the roof rig. Based on the unevenness affecting the leakage rate, a roof membrane is likely to have also affected the leakage rate in the same direction.

In calculation standards, the heat resistance of the insulation is corrected by an assumed moisture absorption. In chapter 4.2, long-term moisture absorption is simulated and quantified using the simulation tool WUFI. Two roof models were based on the WUFI manuals: A ballasted roof and a green roof. In the manuals, settings, materials and structures are proposed, based on field measurements carried out in Holzkirchen. Ideally, field measurements should be performed on roofs in the simulated climates. In order to simulate a reverse roof, a water film is also added on the underside of the insulation, to simulate that rainwater can get past the insulation layer. Furthermore, moisture absorption in the insulation is studied at different climates, indoor temperatures and different top layers. In addition, a new water-repellent and vapor-separated separation layer (WSL) is being placed on top of the insulation to see how this affects the cooling effect.

The results of the laboratory measurements show that the leakage rate increases for lower rainfall intensities, increased gap between the insulation boards, at parallel joint edges and uneven ground. It is possible to simulate the cooling effect based on the suggested roof models from the WUFI handbooks. The results show that there is greater moisture absorption in green roofs than ballasted roofs. Furthermore, the moisture absorption increases at higher indoor temperatures and in climates with higher rainfall and lower outdoor temperatures.

# Forord

Denne masteroppgaven er forfattet våren 2020, og utgjør besvarelsen på faget TBA4521 Bygnings- og materialteknikk, innen fordypningsretningen bygnings- og materialteknikk, for instituttet bygg og miljøteknikk ved NTNU. Masteroppgaven utgjør 30 studiepoeng og er utført i løpet av ett semester. Masteroppgaven er en fortsettelse av prosjektoppgaven (Olsen, 2020), som ble skrevet høsten 2019 og deler av januar 2020. I prosjektoppgaven ble det utført et litteraturstudie som gav flere interessante funn omkring kjøleeffekten av regn- og smeltevann i omvendte takkonstruksjoner, som vil bli blir kort oppsummert i denne oppgaven.

Materoppgaven omfatter laboratorieforsøk for å avdekke størrelsen på vannstrømmene gjennom isolasjonslaget i tillegg til numeriske beregninger av kjøleeffekten dette representer i programvaren WUFI. Videre blir WUFI simuleringene brukt for å se hvordan fuktopptaket i XPS isolasjon varierer for ulike klimaer, innetemperaturer og for varierende ballasterende topplag.

En presentasjon av viktige funn fra denne masteroppgaven ble forfattet som en artikkel sammen med veiledere Erlend Andenæs. Denne ble publisert i Byggeindustrien nr. 10 2020, og er lagt ved som vedlegg C.

Jeg ønsker å utrette en stor takk til min veileder Tore Kvande og med-veileder Erlend Andenæs og Silje Kathrin Asphaug for rettledning og god hjelp underveis. I tillegg vil jeg takke Jan Ove Busklein, Ole Aunrønningen og Øystein Holmberget for god hjelp med utførelsen av labarbeidet, da COVID 19 førte til at jeg ikke kunne gjøre det selv. Til slutt vil jeg også takke SINTEF Byggforsk for teknisk tegning av illustrasjon som ble brukt i oppgaven.

[Blank side]



# Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrunn . . . . .	1
1.2	Funn fra fordypningsoppgave . . . . .	2
1.3	Mål og omfang . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>4</b>
2.1	Omvendte tak . . . . .	4
2.1.1	Teoretisk beregning av varmetap til kompakte tak . . . . .	4
2.2	Plastisolasjon . . . . .	6
2.2.1	XPS og EPS . . . . .	6
2.2.2	Krav og målemetoder for plastisolasjon . . . . .	6
2.2.3	Varmekonduktivitet og varmemotstand til plastisolasjon . . . . .	7
2.2.4	Fuktopptak i plastisolasjon . . . . .	8
2.2.5	Varmekonduktivitet ved fuktopptak . . . . .	8
2.2.6	Beregning av varmekonduktivitet til våt plastisolasjon . . . . .	9
2.3	Grønne tak . . . . .	9
2.4	Regnkjøling av omvendte tak . . . . .	11
2.4.1	U-verdi korreksjoner for omvendte tak (NS ISO 6946:2017) . . . . .	12
2.4.1.1	Korreksjon for regnkjøling av omvendte tak . . . . .	13
2.4.2	Bestemmelse av lekkasjerate (f) og varmetapsfaktor (x) . . . . .	13
2.4.3	Reduksjon i lekkasjerate med et vannavstøtende separasjonsjikt . . . . .	15
2.4.4	Korreksjon av fuktopptak i plastisolasjon for omvendte tak (NS-EN ISO 10456) . . . . .	17
2.5	Simulering av regnkjøling av omvendte tak med WUFI . . . . .	18
2.5.1	Simulering basert på feltmålinger fra Holzkirchen . . . . .	18
2.5.2	Modellering av flate, kompakte tak i WUFI . . . . .	20
2.5.2.1	Overkjøling om natten - Forenklet metode . . . . .	21
2.5.2.2	Overkjøling om natten - eksplisitt strålingsbalanse . . . . .	21
2.5.3	WUFI . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Metode</b>	<b>25</b>

3.1	Laboratorieforsøk . . . . .	25
3.1.1	Oppbygning av testtak . . . . .	25
3.1.2	Planlagt og utført laboratoriearbeid . . . . .	26
3.1.3	Nedbørsimulering etter tysk metode . . . . .	28
3.1.4	Beregning av lekkasjerate . . . . .	28
3.1.5	Korreksjon for regnkjøling på omvendte tak . . . . .	29
3.2	WUFI simuleringer . . . . .	30
3.2.1	Test scenarier . . . . .	30
3.2.2	Generelt om simuleringene . . . . .	31
3.2.3	Materialvalg og oppbygning av omvendt tak med ballast . . . . .	31
3.2.4	Materialvalg og oppbygning av omvendt, grønt tak . . . . .	34
3.2.5	Initialbetingelser . . . . .	35
3.2.6	Beregningsperiode . . . . .	36
3.2.7	Inne- og uteklima . . . . .	36
3.2.8	Kalkulasjon av ny varmekonduktivitet . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Resultater</b>	<b>37</b>
4.1	Laboratoriemålinger . . . . .	37
4.1.1	Bestemmelse av lekkasjerate (f) . . . . .	37
4.1.2	Avrenningskurver . . . . .	38
4.1.3	Varmetapskorreksjon for lekkasjerate . . . . .	39
4.2	WUFI simuleringer . . . . .	40
4.2.1	Fukt- og temperatur distribusjoner gjennom omvendt tak . . . . .	40
4.2.2	Langsiktig simulering av vanninnhold i XPS . . . . .	42
4.2.3	Korreksjon av varmekonduktivitet grunnet fuktopptak i XPS . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>50</b>
5.1	Lekkasjerate i omvendte tak . . . . .	50
5.2	Lekkasjeratens betydning for kjøleeffekten . . . . .	52
5.3	WUFI simuleringer . . . . .	53
5.3.1	WUFI film av omvendte tak . . . . .	53
5.3.2	Fuktopptak i XPS . . . . .	54

5.3.3	Forenkling og usikkerhet i forbindelse med WUFI modellen . . . . .	56
5.3.4	Korreksjon for fuktopptak i XPS . . . . .	57
5.4	Forslag til revisjon av anbefalingene i Byggforskserien . . . . .	58
<b>6</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>60</b>
<b>7</b>	<b>Fremtidig arbeid</b>	<b>61</b>
7.1	Supplerende forsøk . . . . .	61
7.2	Varmetapsvurderinger . . . . .	62
	<b>Referanser</b>	<b>63</b>
	<b>Appendices</b>	<b>I</b>

[Blank side]

# Definisjoner

## **Termisk konduktivitet, $\lambda$ (W/(mK)):**

Varmekonduktivitet,  $\lambda$  (W/(mK)), er den varmetransporten som oppstår ved ledning og stråling i materialer. Varmekonduktiviteten angir hvor mye varme per tidsenhet, målt i watt (W), som strømmer gjennom et areal på 1 m<sup>2</sup> av et materialsjikt ved en konstant temperaturgradient gjennom materialet på 1 K per meter tykkelse (1 K = 1 °C) (Byggdetaljer 471.008, 2018).

## **Varmemotstand, R (m<sup>2</sup>K/W):**

Varmemotstanden, R, er hvor godt materialsjiktet isolerer mot varmegjennomgang og angir temperaturforskjell dividert med varmestromtetthet ved stasjonære forhold (Byggdetaljer 471.008, 2018).

## **U-verdi W/(m<sup>2</sup>K):**

U-verdi (varmegjennomgangskoeffisient) angir hvor mye varme per tidsenhet (målt i watt) som kan strømme gjennom et areal på 1 m<sup>2</sup> ved en konstant temperaturforskjell på 1 K. U-verdi er ett mål på hvor lett en byggingskomponent slipper gjennom varme fra varm til kald side av en konstruksjon. En godt isolert konstruksjon har en lav U-verdi (Byggdetaljer 471.010, 2018).

## **Termisk isolasjon:**

Er et material som er ment for å redusere varmetransport (Stagrum, 2018).

## **Entalpi (J/m<sup>3</sup>):**

Er definert som varmeinnholdet i et materiale under isobare betingelser (Künzel, 1995).

## **Vanndamppermeabilitet, $\delta_p$ (kg/msPa):**

Er en materialeegenskap som uttrykker et evnen et materiale har til å slippe gjennom vanndamp på grunn av vanndamptrykkgradienten i materialet (Byggdetaljer 573.430, 2003).

## **Vanndampmotstand, $Z_p$ (m<sup>2</sup>sPa/kg):**

Er motstanden i et materialsjikt har mot diffusjon av vanndamp på grunn av forskjell i vanndamptrykk over materialsjiktet. Vanndampmotstanden beregnes ut fra materialets vanndamppermeabilitet (kg/msPa) og tykkelse (d) (Byggdetaljer 573.430, 2003).

## **sd-value (m):**

sd-verdien til et materiale angir hvor tykt et stillestående luftlag må være for å ha samme diffusjonsmotstand som materialsjiktet (Byggdetaljer 573.430, 2003).

## **free water saturation ( $W_f$ ):**

Når et kapillært aktivt materiale absorberer vann til det når enn viss metning, kalt kapillært metningsnivå. En høyere metninger kan bare oppnås ved å tilføre trykk eller ved vanndampdiffusjon med temperaturgradient (totalt metningsnivå,) (Künzel, 1995).

## **Relativ fuktighet, RF %:**

Relativ luftfuktighet (RF) er forholdet (angitt i prosent) mellom den vanndampmengden luft inneholder ved en gitt temperatur, og den maksimale vanndampmengden luften kan inneholde ved samme temperatur. Ved metning er RF = 100 % (Byggdetaljer 421.132, 2018).

## **Spesifikk varmekapasitet (J/KgK):**

Energimengden som tas opp eller avgis ved temperaturendring (Byggdetaljer 573.344, 2004).

# 1 Introduksjon

## 1.1 Bakgrunn

Bygningssektoren er ansvarlig for tilnærmet 40 % av CO<sub>2</sub> utslippene, som gjør dem til den største energiforbrukeren i Europa, hvor 75 % av eksisterende bygningsmassen energi-ineffektiv (European Commission, 2020). EU har derfor som mål at alle nye bygninger skal være null-utslipps bygninger (nZeb) innen 31. desember 2020. Det økte fokuset på energieffektive bygninger har gitt strenge U-verdi krav til de forskjellige bygningskomponentene, som gjør det desto viktigere å gjøre en riktig bestemmelse av de termiske egenskapene (Lakatos, 2016).

I løpet av de siste 100 årene har gjennomsnittlig nedbør i Norge er økt med hele 20 %, og dessuten er det forventet en betraktelig økning av ekstremvær gjennom det 21 århundre (Hanssen-Bauer et al., 2017). Kombinasjonen av økt urbanisering i byene med ekstremvær vil gi en større belastning på overvannsnettverket, som har ført til et voksende fokus på lokal håndtering av stormvann, som et virkemiddel i den lokale overvannshåndteringen (Thodesen et al., 2018). Såkalte “blå grønne tak” kan være en løsning på dette. Blå grønne tak, i motsetning til grønne tak, blir bygget med den hensikten å bidra i den lokale overvannshåndteringen. Plantene på taket forsinker transporten av regnvann ned til overvannsnettverket, i tillegg til at noe av vannet blir tatt opp av plantene og siden avgitt som fordampning til utelufta. Dessuten er det flere fordeler med grønne tak, som at kjølebehovet om sommeren reduseres. Takets kjølede effekt skyldes fordampning og skygge forårsaket av plantene (Andenæs et al., 2018). Det settes høye krav til utforming av blå grønne tak, og spesielt viktig er at vann ikke kommer forbi takmembranen og oppfukter underliggende konstruksjon.

Blå grønne tak kan enten bygges som rettvendte tak eller som omvendte tak. For omvendte tak plasseres takmembranen under isolasjonen, mens for rettvendte tak plasseres det over isolasjonen. Fordelen med en omvendt tak løsning er at membranen beskyttes for ekstreme temperaturvariasjoner, fuktvariasjoner og mekaniske belastninger, som potensielt kan føre til at fukt trenger gjennom membranen (Zirkelbach et al., 2013). For grønne tak er det helt avgjørende at takmembranen forblir vanntett, da det veldig vanskelig å oppdage en vannlekkasje i etterkant (Andenæs et al., 2018). Omvendte grønne tak kan gi en økt sikkerhet for at det ikke oppstår vannlekkasjer i takkonstruksjonen, siden det vanntette sjiktet beskyttes av det overliggende isolasjonslaget. Derimot kreves det at man benytter isolasjon som tåler høy fuktbelastning, eksempelvis ekstrudert polystyren (XPS) (Byggdetaljer 525.207, 2018). En annen fordel er at perioden takkonstruksjonen utsettes for nedbør, i mange tilfeller blir redusert, siden membranen legges direkte på bærekonstruksjonen (Petersson, 1982).

En stor ulempe med omvendte tak er at isolasjonen eksponeres for det ytre klima som medfører at det må foretas en rekke korreksjoner for å ta hensyn til økt varmestrøm gjennom taket. Dette skyldes at regn- og smeltevann kommer forbi isolasjonssjiktet og ned på membranen, på varm side av isolasjonen. Konsekvensen er at det må beregnes en  $\Delta U_r$  i henhold til (Standard Norge, 2017) og en korreksjon av varmekonduktiviteten til XPS grunnet økt fuktbelastning, i henhold til (Standard Norge, 2010). En økning i U-verdi er svært ugunstig sett i lys av fremtidens energieffektive bygninger.

## 1.2 Funn fra fordypningsoppgave

Høsten 2019, ble det utført et litteraturstudie av undertegnede (Olsen, 2020) for å besvare på problemstillingen *Kjøleeffekten av regn- og smeltevann i omvendte takkonstruksjoner*. Litteraturstudiet avdekket flere interessante funn omkring omvendte takkonstruksjoner. Utgangspunktet for studien var å få en dypere forståelse omkring  $\Delta U_r$ -korreksjonen som er presentert i NS standard (Standard Norge, 2017), vedlegg F.4. Denne korreksjonen tar høyde for kjøleeffekten av nedbør som kommer forbi isolasjonslaget og ned på den varmere takmembranen. Det ble funnet en rekke gode artikler, hvor det ble foreslått mange ulike fremgangsmåter for å beregne denne  $\Delta U_r$ -korreksjonen, samt alternative tilnærminger til det ekstra kjølebidraget tilknyttet omvendte tak. Se artikkel (Olsen, 2020) for videre detaljer.

Artiklene baserte seg på både feltmålinger, laboratoriemålinger og simuleringer, hvor utledninger av de ulike varmetapene og eksakte verdier på varmetap varierte. Faktorer som påvirker dette varmetapet er nedbør (hyppighet og intensitet), vind, temperatur (inne og ute), snødekke og lekkasjerate ( $f$ ). Videre påpekes det av én forfatter at dette varmetapet er større for “lette” takkonstruksjoner (bæring av tre eller korrugerte stålplater) enn for “tyngre” (eksempelvis betongdekke), grunnet den termiske tregheten (Beech and Saunders, 1985). Dessuten så har topplaget over isolasjonen en betydning for uttørkningsmuligheter, hvor vegetasjon gir dårligere uttørkning sammenlignet med ballast (Zirkelbach et al., 2013).

Det eksisterer flere kunnskaphull rundt omvendte (blå) grønne tak, som kan utgjøre en stor risiko for aldrende tak, med tanke på den operasjonelle og byggetekniske ytelsen (Andenæs et al., 2018). For eksempel er de fleste artikler om blå grønne tak basert på teori eller laboratoriemålinger på testtak, og nesten ingen på eksisterende aldrende tak. Det er stor enighet om at kjøleeffekten til grønne tak bør forskes nærmere på, spesielt hvordan et nordisk klima vil påvirke den termiske isolasjonsevnen til grønne tak (Thodesen et al., 2018), (Andenæs et al., 2018). Det er også et behov for å forske på hvordan U-verdien påvirkes utover de eksisterende kravene i Norden, samt evne til å holde på regnvannet, effekten av snø, is og fryse-tine syklusen (Thodesen et al., 2018).

Grønne, omvendte takkonstruksjoner byr videre på utfordringer når det kommer til å forstå dens hygrotermiske oppførsel, grunnet faktorer som fuktlagring, fryse-tine syklus, fordampning, redusert strålingsabsorpsjon og skygge fra plantene. Disse faktorene gjør det vanskelig å estimere det langsiktige fuktopptaket i plastisolasjonen, samt bestemmelse av den korrekte U-verdien til taket (Zirkelbach et al., 2013).

### 1.3 Mål og omfang

Masteroppgaven tar utgangspunkt i prosjektoppgaven (Olsen, 2020) for å videre belyse problemstillingen. Formålet med det samlede arbeidet, er å komme med forslag til nye retningslinjer til bygging av omvendte takkonstruksjoner. I et forsøk på å imøtekomme dette formålet, blir problemstillingen oppdelt i følgende forskningsspørsmål:

1. Hvordan påvirkes lekkasjeraten i omvendte tak av isolasjonslagets oppbygging og utførelse?
2. Hvilken betydning har lekkasjeraten for denne kjøleeffekten?
3. Hvordan kan programvaren WUFI benyttes til å simulere regnkjøling av omvendte tak?
4. Hvordan bør omvendte tak bygges for å redusere kjøleeffekten av regn- og smeltevann?

Forskningsspørsmål 1 går ut på å utføre laboratoriemålinger på et oppkonstruert omvendt tak, tilført kontrollert nedbørsmengde. Formålet målingene er å studere hvordan lekkasjeraten ( $f$ ) påvirkes av orientering av isolasjonsplater, bredde på skjøtegapene og ulike nedbørsintensiteter. Isolasjonslaget består av flere isolasjonsplater satt sammen, som fører til at regnvann kan komme forbi isolasjonslaget via platenes skjøtekanter.

Forskningsspørsmål 2 tar for seg hvordan disse lekkasjeratene påvirker  $\Delta U_r$ -korreksjon etter (Standard Norge, 2017)

Hensikten med forskningsspørsmål 3 er å se på hvordan programvaren WUFI kan benyttes til å bestemme den langsiktige fuktoppførselen til omvendte tak, og hvordan fuktopptaket i isolasjonen vil variere med varierende topplag, klima og innetemperaturer. Denne fuktmengden kan videre brukes for å beregne ny varmekonduktivitet som tar hensyn til fuktopptaket.

Forskningsspørsmål 4 tar for seg de anbefalte retningslinjene for utførelse av omvendte tak i henhold til (Byggdetaljer 525.207, 2018). Basert på de andre forskningsspørsmålene blir det drøftet rundt nåværende praksis, samt å komme med forslag til en alternativ oppbygning.

Oppgaven inkluderer ikke måledata for egne feltmålinger, fukt og temperaturmålinger i laboratoriet eller påvirkningen av snø, is og fryse-tine syklusen.

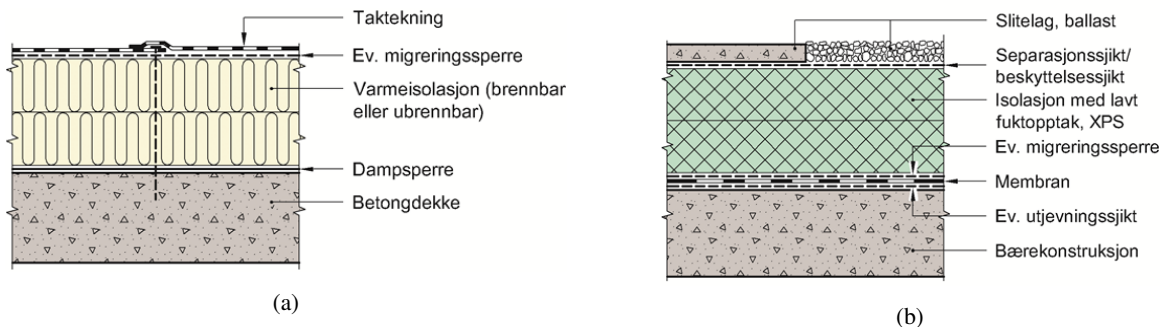


## 2 Teori

### 2.1 Omvendte tak

Kompakte, flate tak deles inn i grupper avhengig hvor takmembranen plasseres. For omvendte tak plasseres membranen under isolasjonen, mens for rettvendte tak plasseres membranen over isolasjonen (se figur 1). Det er vanlig å bygge tak som omvendte tak i forbindelse med takterraser eller grønt arealer mellom bygninger over parkeringskjeller. Dette er fordi taket skal kunne tåle en viss mekanisk påkjenning (Byggdetaljer 525.207, 2018). Fordelene med omvendte tak er at det gir bedre beskyttelse av membranen fra mekaniske belastninger både under byggeperioden og i driftsfase, og fra hyppige temperatursvingninger. Sannsynligheten for skade på membranen reduseres som en konsekvens (Misar and Novotný, 2017). Dessuten kan det gi raskere byggetid, da membranen kan limes direkte på bærekonstruksjonen.

Ulempene er at isolasjonslaget eksponeres for vær og vind, som krever bruk av XPS, siden den tåler høy fuktbelastning. Isolasjonsplatene legges løst over membranen, som medfører at regnvann kan komme forbi isolasjonen via plateskjøtene og danne av en vannfilm oppå membranen (Zirkelbach et al., 2013), (Hens, 1995). Videre holdes isolasjonen på plass av et ballasterende topplag, som tradisjonelt har vært elvegrus, betongheller eller påstøp. Det har derimot blitt mer vanlig å utføre topplaget som et grønt tak.



Figur 1: Eksempel på oppbygning av rettvendt tak (a) og omvendt tak (b) hentet fra (Byggdetaljer 525.207, 2018)

#### 2.1.1 Teoretisk beregning av varmetap til kompakte tak

U-verdien til taket beskriver dens isolasjonsevne, og brukes for å bestemme nødvendig tykkelse på isolasjon, for å imøtekomme krav og retningslinjer til takets isolerende evne. U-verdien er dog mindre nyttig for å evaluere det *faktiske* energitapet. Varmetapet påvirkes av forskjellige faktorer som ikke er medtatt i selve U-verdi beregningene, som blant annet sol, vind, snø og nedbør, hvor spesielt omvendte takkonstruksjoner er utsatt for disse faktorene. Dermed kan tak med samme U-verdi ha store variasjoner i varmetapet (Schaefer et al., 1977). U-verdien er en invers summering av materialenes varmemotstand og betegnes som det teoretiske varmetapet:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{R_{si}} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} + \frac{1}{R_{se}} \quad (\text{W/m}^2\text{K}) \quad (1)$$

hvor

- $R_{si}$  er innvendig varmeovergangsmotstand, i  $\text{m}^2\text{K/W}$
- $R_{se}$  er utvendig varmeovergangsmotstand, i  $\text{m}^2\text{K/W}$
- $d_n$  er tykkelsen til hver bygningskomponent, i m
- $\lambda_n$  er termisk konduktivitet til hver bygningskomponent, i  $\text{W/mK}$

Ligning 1 antar stasjonære forhold og er brukt for å beregne forventet varmetap gjennom taket ( $Q$ ), basert på forskjell i innendørs- og utendørstemperatur ( $\Delta T$ ), multiplisert med dens U-verdi:

$$Q = U \Delta T \quad (\text{W/m}^2) \quad (2)$$

Det teoretiske varmetapet er en konstant verdi, og tar bare hensyn til variasjon i temperaturdifferanser. Det tas ikke hensyn til varierende vindhastighet, solstråling, nedbør og andre faktorer. Måling av faktisk varmetap gjennom takkonstruksjonen kan enten avvike stort eller lite fra det teoretiske varmetapet, og forholdet mellom faktisk og teoretisk kan uttrykkes gjennom takets termiske effektivitet  $\eta$ , angitt i prosent:

$$\eta = \frac{\text{teoretisk varmetap}}{\text{faktisk varmetap}} \quad (3)$$

Ved hjelp av datamaskiner som tar høyde for varierende værforhold, kan faktisk varmetap beregnes. Da kan  $\eta$  enten være mindre, større eller lik 100 %, hvor sistnevnte betyr at faktisk varmetap er lik det teoretiske varmetapet. Er  $\eta$  større enn 100 %, betyr dette at faktisk varmetap er mindre enn det teoretiske, og forekommer på typiske kalde og solfylte dager. Når  $\eta$  er mindre enn 100 % betyr at faktisk varmetap er større enn det teoretiske, og kan oppstå når det regner og vind fører til ytterlig varmetap. Termisk effektivitet er ett nyttig verktøy for å sammenligne forskjellige tak med ulike oppbygning, som har samme U-verdi.

## 2.2 Plastisolasjon

### 2.2.1 XPS og EPS

Plastisolasjon er laget av polystyren fra råolje, og er en type varmeisolasjon, som blir brukt i spesielt fuktutsatte områder, eksempelvis omvendte tak. Isolasjonen leveres som plater med ulike densiteter, enten av ekspandert polystyren (EPS) eller som ekstrudert polystyren (XPS). EPS produseres ved å tilsette et ekspansjonsmiddel (f.eks  $C_5H_{12}$ ) til små kuler av polystyren, som fører til at kulene ekspanderer under oppvarming med vanndamp, og bindes sammen i kontaktflatene. EPS har åpen porestruktur, som gjør den mindre egnet til bruk i omvendte tak, da isolasjonen har et mye større fuktopptak, sammenlignet med XPS (Wayne and Ricard, 1979). XPS derimot har lukket porestruktur og er i tillegg omsluttet av en tynn plasthud på overflaten, som gjør den ekstra tett. Den produseres ved smelting av polystyren som deretter tilsettes en ekspansjons-gass (HFC,  $CO_2$  eller  $C_5H_{12}$ ), for å så ekspandere massen ved å presse den gjennom en dyse (Byggdetaljer 573.344, 2004).

### 2.2.2 Krav og målemetoder for plastisolasjon

I den norske standarden finnes flere prøvemetoder og krav til egenskaper til forskjellige isolasjonsmaterialer. XPS på dokumenteres i henhold til standard (Standard Norge, 2015a) og for EPS er det (Standard Norge, 2015b) som gjelder. Det er fabrikken som produserer isolasjonsmaterialene som utfører en rekke prøvemålinger for å sertifisere at isolasjon er produsert innenfor gitte krav. Deklarert verdi blir sjekket og oppvis vanligvis innenfor både volumprosent fuktinnhold, varmekonduktivitet, maksimum kontinuerlig temperatur og smeltepunkt, brannklasse og trykkfasthet (Stagrum, 2018).

Evnen et materiale har til å holde på fukt avhenger av en rekke faktorer som tid, temperatur og materialeegenskaper. Oppfuktet isolasjon i bygningskroppen vil både føre til fuktskader og forringes dens isolasjonsevne ved at isolasjonens varmekonduktivitet øker for økende fuktinnhold. Dette vil igjen resultere i et økt varmetap som bør tas hensyn til (Lakatos, 2016). Derfor må deklarerert verdi ( $\lambda_D$ ) korrigeres til en dimensjonerende verdi ( $\lambda_d$ ). Dimensjonerende verdi fås ved hjelp av ulike korreksjonsfaktorer, som er avhengig av graden av fuktpåkjenning og bruksområde. Metoden for omregning beskrives i (Standard Norge, 2010)

Det eksisterer mange standardiserte forsøk for bestemmelse av fuktopptakets påvirkning på plastisolasjon, blant annet 1) bestemmelse av vannabsorpsjon ved diffusjon (Standard Norge, 2019a), 2) ved vanndampgjennomgang (Standard Norge, 2013) og 3) ved nedsenkning i vann (Standard Norge, 2019b).

### 2.2.3 Varmekonduktivitet og varmemotstand til plastisolasjon

For å øke varmemotstanden ( $R$ ) i en bygningsdel, brukes isolasjon ved at den reduserer den totale varmeledningsevnen til bygningsdelen (Al-Homoud, 2005). Varmemotstanden avhenger av materialets tykkelse ( $d$ ) og dets varmekonduktivitet ( $\lambda$ ):

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (\text{m}^2\text{K}/\text{W}) \quad (4)$$

og i følge (Stagrum, 2018) påvirkes varmekonduktiviten ( $\lambda$ ) av fire faktorer:

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r + \lambda_c \quad (\text{W}/\text{mK}) \quad (5)$$

hvor

- $(\lambda_s)$  er varmeledning gjennom fast stoff
- $(\lambda_g)$  er varmeledning gjennom gass
- $(\lambda_r)$  er overføring av strålingsenergi
- $(\lambda_c)$  er varmeoverføring ved konveksjon

Varmekonduktiviteten til materialene bestemmes ved måling under gitte betingelser, med den fornkling om at materialene er homogene. Alle de overnevnte formene for varmetransport inkluderes i målingene. Videre beregnes varmegjennomgangen som ren varmeledning. Varmeledningen skyldes en overføring av bevegelsesenergi mellom molekylerne, når det ikke er en konstant temperatur gjennom stoffet (Stagrum, 2018). Bevegelsesenergi er kinetisk energi som overføres fra energirike til energifattige molekyler, via støt, og kan uttrykkes som:

$$q = \frac{\lambda}{d}(T_2 - T_1) \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (6)$$

Her er  $q$  varmestrømmen gjennom materialet,  $d$  er tykkelsen til materialet og  $\lambda$  er varmekonduktiviteten.  $T_1$  er temperatur på varm side og  $T_2$  er temperaturer på kald side. En høyere  $\lambda$ -verdi gir en dårligere varmeisolerings-evne. Ligning 6 gjelder kun for stasjonære forhold og homogene materialer, og avhenger av både av porestørrelse, diameter, gasstrykk og type gass, i tillegg til hvordan partikler og fibre er strukturert i forhold til hverandre.

Av den totale varmekonduktiviteten til XPS og EPS skyldes 60 - 70 % varmeledning gjennom gass. Det skyldes at gassen opptar så mye som 90 - 98 % av volum- % av plastisolasjonen. Varmeledning gjennom fast stoff står følgelig for 10 % av den totale varmekonduktiviteten til isolasjonsmaterialet. Høyere densiteter gir mindre porevolum og luftinnhold og vil resultere i høyere varmeledningsevne. På den andre siden vil isolasjonstyper med lavere densiteter, være mer utsatt for temperaturforandringer, hvor konveksjon og strålingsenergi er spesielt avgjørende. EPS og XPS derimot vil en endring i densiteten gi en liten påvirkning, grunnet at mesteparten av luften er fangen inne i porestrukturen (Stagrum, 2018).

## 2.2.4 Fuktopptak i plastisolasjon

Fuktttransport inn i et materiale kan forekomme på tre ulike måter: 1) som vanndamp i gass-form, 2) som vann i væske-form eller 3) som is i fast-form. Hovedmekanismene bak fuktttransport er enten diffusjon av vanndamp på grunn av forskjell i damptrykk, eller vanntransport i væskeform på grunn av kapillærkrefter. Væsketransport skyldes hovedsakelig trykkgradient, tyngkraft eller kapillærkrefter (Ducoulombier and Lafhaj, 2017). Vanndampdiffusjon inn i isolasjonen skyldes små vannpartikler som diffunderer gjennom porene i materialet, og stopper opp når de absorberes på poreoverflaten (adhesjon). Når fuktopptaket i isolasjonen øker, øker også adhesjonen av vannpartikler på poreoverflaten, grunnet større andel av vannpartikler. Når et i utgangspunktet tynt lag på poreveggen vokser, reduseres samtidig adhesjonskreftene som holder vannpartiklene til overflaten. Tilslutt når porene blir mettet med vannpartikler, er det kun kapillærtransport som er hovedtransport mekanismen i form av væsketransport (Stagrum, 2018).

For XPS og EPS med lukket og delvis lukket porestruktur, vil bevegelse av luft inne i materialet være minimal, og derfor vil kun små mengder vanndamp transporteres via luftbevegelser. Derimot vil forskjell i vanndamptrykk være en større drivkraft til fuktttransport inni isolasjonen (Hedlin, 1977), (Wayne and Ricard, 1979). Forskjellen i damptrykket forårsakes av temperaturgradienten gjennom materialet, som gir ulik RF på varm og kald side. Resultater fra laboratoriemålinger utført av (Wayne and Ricard, 1979), viser at en 2,5 mm tykk isolasjonsplate, tiltrakk seg fukt 100 ganger raskere utsatt for en utsatt for en temperaturgradient på 11 °C, sammenlignet med å nedsenke isolasjonen i vann under konstant temperatur. Temperaturgradienten medførte i en stor vanndampdiffusjon inn i isolasjonen. Den periodevis store temperaturgradienter gjennom flate tak, medfører i et fuktopptaket i isolasjonen som er viktig å ta hensyn til.

## 2.2.5 Varmekonduktivitet ved fuktopptak

Hovedtransportmekanismene bak fuktopptaket i plastisolasjon er hovedsaklig vanndampdiffusjon eller kapillærsug (Byggdetaljer 573.344, 2004). Dette fuktopptaket vil føre til en økt termisk konduktivitet, avhengig av fuktbelastningen og følgelig må isolasjonsmaterialene klassifiseres etter type bruksområde. Den deklarererte varmekonduktiviteten gjelder bare for tørr tilstand, og under prosjektering må den deklarererte verdien korrigeres ut ifra forventet fuktbelastning, som allerede beskrevet i kapittel 2.4.4.

Vann leder varme omtrent 20 ganger mer effektivt enn luft og derfor vil oppfuktet isolasjon få en redusert varmemotstand. XPS som har lukket porestruktur, vil få et fuktopptak som er langt mye mindre EPS, som har åpen porestruktur. Dersom isolasjonen utsettes for temperaturer under null grader, vil vannet fryse til is, som medfører i en 100 ganger større varmeledningsevne i forhold til luft (Szodrai and Lakatos, 2014). Da vil isolasjonen få enda lavere varmemotstand. Det er derimot vanligvis ikke mulig å skille mellom termisk konduktivitet over og under frysepunktet, da det ikke er tilsvarende målte verdier for dette i de fleste bygningsmaterialer (Künzel, 1995).

Isolasjon som eksponeres mot fuktig luft, vil ha et lite bidrag av fuktopptak som vil øke varmekonduktiviteten. Varmeledning skyldes to typer gassooverføringer som strømmer fra varm til kald side: "Passiv" gass (luft) og "aktiv" gass (vanndamp). Drivkraften er forskjell i partialtrykket

over poreveggen som skiller to porer fra hverandre. Her vil poren nærmest varm side ha et høyere partialtrykk, enn poren nærmest kald side. Forskjellen i partialtrykket forårsaker i en diffusjonstransport av gasmolekyler. Diffusjonstransporten resulterer i en fordampning (varme absorberes fra varm porevegg) og kondensering (varme avgis til den kald porevegg), som medfører i en netto varmeavgivelse gjennom porestrukturen.

Har materialet et lavt fuktinnhold, vil det største varmetransportbidraget skyldes varmefluksen i transporten av vanddamp gjennom porene, såkalte latente entalpistrømmer (Künzel, 1995). Disse entalpistrømmene vil være begrenset av hvor stor grad vannet dekker poreoverflatearealet. Hvis lufttrykket er mindre enn vanddampens partialtrykk, vil det oppstå tørking, kalt desorpsjon (Szodrai and Lakatos, 2014).

### 2.2.6 Beregning av varmekonduktivitet til våt plastisolasjon

Fremgangsmåten for å beregne ny varmekonduktivitet for våt isolasjon kan gjøres ved bruk av følgende formler, hvor fuktopptaket er som følge vanddampdiffusjon (Lakatos, 2016). Vanninnholdet ( $w$ ) i prøvene beregnes på følgende måte:

$$\omega = \frac{m_w - m_d}{m_d}, \quad (7)$$

hvor  $m_w$  er massen av våt prøve etter  $n$  døgn, og  $m_d$  er massen av tørr prøve. Varmekonduktiviten av vått prøvestykke kan beregnes som en funksjon av vanninnholdet ( $w$ ), hjelpekonstant  $Z$  ( $= 2$  for plastisolasjon) og deklarerert varmekonduktivitet av tørt materiale ( $\lambda_d$ ). Dermed blir varmekonduktiviet til vått prøvestykke:

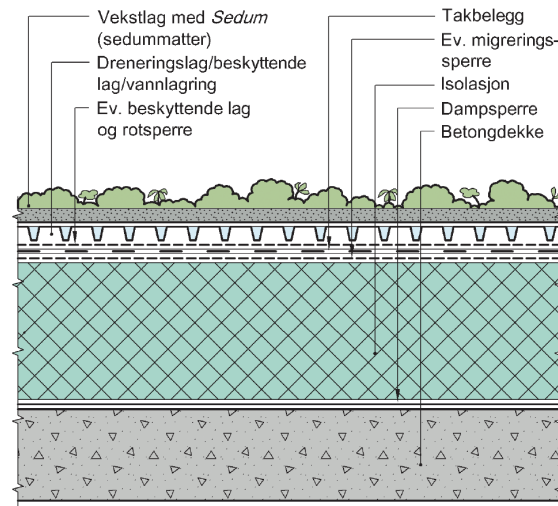
$$\lambda_w = \lambda_d \cdot \left(1 + \frac{\omega \cdot Z}{100}\right) \quad (8)$$

## 2.3 Grønne tak

Det har blitt stadig mer økende interesse for grønne tak, da de bidrar til å bedre byenes mikroklima i tillegg til sin estetiske verdi (se figur 2). I motsetning til konvensjonelle tak, vil grønne tak få en lavere overflatetemperatur, kalt "Urban heat Island effect" (UHI) - også kjent som varmeøy på norsk (Castleton et al., 2010). Effekten skyldes plantenes fordampning og termisk treghet. På sommeren vil fordampning og skygge fra plantene gi en kjølede effekt, som også kan bidra til å redusere varmebehovet om vinteren. På vinteren vil vekstlaget gi økt isoleringsverdi, som bidrar til å redusere varmebehovet om vinteren (Stöckl et al., 2014).

I tillegg får takmembran økt beskyttelse av overliggende vekst og isolasjonslag, som bidrar til å redusere temperaturrelaterte spenninger og økt forventet levetid. Nevnte fordeler veier noe opp for de potensielle fuktproblemene og konstruksjonsskader som kan oppstå for grønne tak. Slike utfordringer har blitt observert for lette, uventilerte grønne tak. Dette skyldes at flate, kompakte tak er dampnett på utvendig side og dermed på feil sted ut ifra et bygningsfysisk ståsted. Tørking er derfor

bare mulig mot innvendig side, og sammenlignet med vanlige flate tak, blir dette tørkepotensialet enda mer redusert, grunnet den kjøligere overflaten om sommeren (Stöckl et al., 2014).



Figur 2: Illustrasjon av oppbygging av grønt tak hentet fra (Byggdetaljer 544.823, 2013)

Grønne tak i Norge er anvendt på flate tak, på bakkenivå som grøntarealer mellom bygninger, som tak av estetiske årsaker. Grøntanlegg på terrasser og gangarealer over bærende betongdekker bygges opp som omvendte tak med all isolasjon over membran, eller som duotak med isolasjon på begge sider av membranen. Dette er for å beskytte membranen i anleggstid og mens bygget er i drift. Rettvendte konstruksjoner benyttes kun etter spesiell vurdering (Byggdetaljer 525.306, 2009).

Grønne tak deles inn i de tre kategoriene ekstensive, semi-intensive og intensive tak, etter hvor tykt det grønne overdekket er (Byggdetaljer 544.823, 2013). Sedum er det vanligste ytre tetningssjiktet for grønne tak, som på norsk er den vannsamlede planten; bergknapp. Fordelen med bergknapp er at den kun åpner spalteåpningen om natten, når fordampningen er minst. Dette fører til at den holder på vannlageret lengre enn andre vekster. Det letteste grønne taket, betegnes ofte som rene sedumtak eller ekstensive tak, og har en lav byggehøyde på 30 - 90 mm. Semiintensive tak er tak med stauder, urter, gress og busker og bygger mer i høyden enn ekstensive tak (ca 120 - 250 mm). Det tyngste grønne taket er kalt intensive tak og har ett typisk vekstlag rundt 150 - 400 mm, og kan bestå av store planter og bukser.

Grønne tak kan også bli brukt i forbindelse med den lokale overvannshåndteringen, ved at grønne tak kan forsinke opptil 50 % av regnvannets transport gjennom taknedløpet og ned til dreneringsnettverket. Videre vil også noe av vannet tas opp av plantene og siden fordampes til uteluften. Når grønne tak blir brukt som en del av den lokale overvannshåndteringen, blir de ofte kalt blå-grønne tak (Thodesen et al., 2018). I følge (Shafique et al., 2016) defineres blå-grønne tak som:

*“Green-blue roof is a green roof with an extra water storage layer, beyond what is required for the plants to survive”.*

## 2.4 Regnkjøling av omvendte tak

Høsten 2019 ble det utført et litteraturstudie av undertegnede (Olsen, 2020), for å fremhente eksisterende litteratur omkring kjøleeffekten av regn- og smeltevann i omvendte takkonstruksjoner. De forskjellige artiklene hadde forskjellige synsvinkler rundt det ekstra varmetapet som oppstår for omvendte takkonstruksjoner. Artiklene kunne deles inn i a) varmetap som følge av at regnvann absorberer varme fra takmembranen b) varmetap som følge av fuktopptak i isolasjonen og c) forslag til utførelse av omvendte tak.

Litteratursøket avdekket at det strides om hva det er som gir størst kjøleeffekt. Samtlige forfattere ser kun på regnvannets kjøleende effekt på membran ( $\Delta U_r$ ) (Künzel and Kieβl, 1996), (Beech and Saunders, 1985) (Pettersson, 1982), (Hens, 1995), (Pel et al., 2016), (Hens, 1996), (Leimer et al., 2005) og (Merkel, n.d.), mens andre ser på fuktopptaket i plastisolasjonen grunnet vandampdiffusjon (Zirkelbach et al., 2013), (Künzel and Kieβel, 1997), (Wayne and Ricard, 1979) (Hedlin, 1977) og (Schaefer, 1976). Vandampdiffusjonen skyldes at det dannes en vannfilm under isolasjonen (Hens, 1995), (Zirkelbach et al., 2013). Det har tidligere vært antatt at vandampdiffusjon inn i XPS isolasjon ikke er mulig grunnet dens tette porestruktur, men forskning har vist at dette er mulig, på grunn av den store temperaturgradienten over taket kombinert med et topplag med høy vannansamling (Zirkelbach et al., 2011), (Wayne and Ricard, 1979). Det er også en forfatter som både uteleder formuler for varmetap grunnet oppvarming av regnvann ved membran, varmetap grunnet vandampdiffusjon inn i isolasjonen og varmetap grunnet kuldebro i isolasjonskjøtene (Hens, 1995). Oppsummert kan varmetapet forbundet med omvendte tak beskrives med følgende bidrag (Hens, 2012):

- $\Delta U_1$ : Varmetap som følge av at regn- og smeltevann som kommer forbi isolasjonen, “på varm side”, og absorberer varme fra takmembranen. Dette varmetapet beregnes med  $\Delta U_r$ -korreksjonen presentert i (Standard Norge, 2017).
- $\Delta U_2$ : Varmetap som følge av fuktopptak i XPS, som forringer dens isolasjonsevne. Dette varmetapet tas hensyn til i (Standard Norge, 2010).
- $\Delta U_3$ : Det forekommer lokale varmetap i kjøtene til isolasjonsplatene (kuldebroer). Dette er større for omvendte tak enn for rettvendte tak da isolasjonen eksponeres for ytre klima. Tatt hensyn til i (Standard Norge, 2017).

Mengden regnvann som kommer forbi isolasjonslaget beskrives at lekkasjeraten ( $f$ ), som er forholdet mellom regnvann som strømmer over og under isolasjonen. Jo større lekkasjeraten er, jo større blir kjøleeffekten (Pel et al., 2016). Det er flere faktorer som påvirker størrelsen på lekkasjeraten: Det ble funnet at langvarige og hyppige nedbørshendelser, snøsmelting og lav nedbørsintensitet, gav økt lekkasjerate (Merkel, n.d.), (Hens, 2012) (Schaefer et al., 1977). Videre vil isolasjonsplatenes orientering i forhold til hverandre også ha en betydning. Forskjøvede isolasjonsplater i to lag, gir enn lavere lekkasjerate, sammenlignet med parallelle skjøter i ett lag. Dessuten vil en økning i gapet mellom platene resultere i en større lekkasjerate (Pettersson, 1982).

Videre er det foreslått mange forskjellige typer oppbygninger av omvendte takkonstruksjoner, deriblant for å ta høyde for den største ulempen til omvendte takkonstruksjoner; nemlig at nedbør kommer forbi isolasjonen via skjøtekantene. Det er derfor stor oppslutning til å innføre et nytt vannavstøtende og dampåpent separasjonssjikt (ett såkalt WSL sjikt) over isolasjonen, for å for-



hindre at regnvann kommer ned på takmembranen (Merkel, n.d.) (Leimer et al., 2005), (Pel et al., 2016), (Vacek and Matějka, 2016a), (Cziesielski and Fechner, 2001), (Misar and Novotný, 2017). Ved innføringen av dette nye sjiktet gir en betraktelig reduksjon i lekkasjeraten, som vider fører til at  $\Delta U_r$ -korreksjonen blir tilnærmet lik null, og det ekstra varmetapet kan ses bort ifra.

### 2.4.1 U-verdi korreksjoner for omvendte tak (NS ISO 6946:2017)

I følge (Standard Norge, 2017) skal den termiske varmemotstanden (U-verdi) til en bygningskomponent korrigeres for følgende effekter: a) lufthull i isolasjonen b) mekanisk innfestning som penetrerer isolasjonslaget og c) nedbør på omvendte tak. En korrekt U-verdi  $U_c$  er derfor korrigeret med en  $\Delta U$ :

$$U_c = U + \Delta U \quad (9)$$

og  $\Delta U$  er gitt ved:

$$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r \quad (10)$$

hvor

$\Delta U_g$  er korreksjon for lufthull i henhold til vedleg F.2

$\Delta U_f$  er korreksjon for mekanisk innfestning i henhold til F.3

$\Delta U_r$  er korreksjon for omvendte tak i henhold til F.4

Korreksjon for luftehull ( $\Delta U_g$ ) i isolasjonen og skyldes varmetap på grunn av konveksjon eller stråling. Størrelsen er avhengig av størrelse, orientering og posisjonen av lufthullene. Korreksjonen gjelder også for isolasjonsplater med store gap mellom plateskjøtene hvor luft kan trenge gjennom isolasjonslaget. Kun luftehull som er gjennomgående for hele isolasjonslaget fra varm til kald side, vil gi et varmetap bidrag. Ved å plassere isolasjonen i to sjikt, med forskjøvet skjøter, samt fals, vil gi en  $\Delta U_g = 0$ . Derimot vil bare ett lag med isolasjon med butte skjøter, samt et isolasjonsgap på mer enn 5 mm, gi en  $\Delta U_g = 0,01$ .

Level	Description	$\Delta U''$ W/(m <sup>2</sup> ·K)
0	No air voids within the insulation, or where only minor air voids are present that have no significant effect on the thermal transmittance.	0,00
1	Air gaps bridging between the hot and cold side of the insulation, but not causing air circulation between the warm and cold side of the insulation.	0,01
2	Air gaps bridging between the hot and cold side of the insulation, combined with cavities resulting in free air circulation between the warm and cold sides of the insulation.	0,04

Figur 3: Korreksjon for luftehull i isolasjonslaget: Tabell F.1 i (Standard Norge, 2017)

For en detaljert beskrivelse av  $\Delta U_g$  og  $\Delta U_f$  henvises det til (Standard Norge, 2017). Derimot er  $\Delta U_r$  presentert i neste delkapittel, da denne er høyst relevant for oppgaven.

### 2.4.1.1 Korreksjon for regnkjøling av omvendte tak

Det er allerede tatt høyde for kjøleeffekten av regn- og smeltevann som siver gjennom isolasjonssjiktet og ned på membran, der NS standard (Standard Norge, 2017) angir en metode for å korrigere for dette ekstra varmetapet i vedlegg F.4. Korreksjonen gjelder bare for XPS og er uttrykt som:

$$\Delta U_r = p \cdot f \cdot x \cdot \left( \frac{R_1}{R_{\text{tot}}} \right)^2 \quad (11)$$

Hvor

- $p$  Gjennomsnittlig nedbørsmengde gjennom fyringssesongen, basert på data for gitt sted i mm/dag;
- $f$  Lekkasjerate uttrykt som det prosentvise forholdet mellom nedbør som siver gjennom isolasjonssjiktet, og total nedbør  $p$ , som treffer takoverflaten.
- $x$  Faktor for økt varmetap grunnet regnvann som strømmer på membranen, i  $(\text{W} \cdot \text{dag}) / (\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{mm})$ ;
- $R_1$  Den termisk varme motstanden for isolasjonslaget over membranen i  $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ;
- $R_{\text{tot}}$  Det totale varmemotstanden for takkonstruksjonen før den korrigeres, i  $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ .

For et lag med isolasjon med butte skjøter og åpent topplag, eksempelvis ballast, er  $f \cdot x = 0,04$ . Denne oppbygningen gir den høyeste  $\Delta U_r$ -korreksjon. Lavere verdier kan forekomme for omvendte tak med lavere lekkasjerate gjennom isolasjonssjiktet, eksempelvis isolasjonsplater med fals (not og fjær struktur) eller andre typer oppbygninger. Gjennomsnittlig nedbørsrate er forslått til 3 mm/dag i tabell B.7.

### 2.4.2 Bestemmelse av lekkasjerate (f) og varmetapsfaktor (x)

(Standard Norge, 2017) beskriver kun en  $f \cdot x$ -verdi, men en veiledningen for omvendte tak utarbeidet av EOTA (European Organisation for Technical Assessment), forklarer derimot ulike  $f \cdot x$ -verdier (*European Organisation for Technical Assessment*, n.d.). For det mest ugunstige tilfelle setter  $f \cdot x = 0,04$ , hvor  $f$  settes lik 1 (det vil 100 % av vannet kommer forbi isolasjonssjiktet). Videre settes  $x = 0,04 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ , som er basert på termisk varmekapasitet til vann ( $4190 \text{ J}/\text{kgK}$ ), vannets densitet ( $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) og en korreksjonsfaktor på  $0,864 \text{ mm}/\text{dag}$ . Sistnevnte korreksjonsfaktor er relatert hvor lett det er for vann å komme forbi isolasjonssjiktet for et vannmettet takkonstruksjon. Ved å bruke isolasjon i to lag med fals vil dette gi en lavere verdi av  $f \cdot x$ , hvor foreslåtte verdier er presentert i punktlisten nedenfor.

$$x = 4190 \text{ J}/\text{kgK} \cdot 1000 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot \frac{0,864}{1000 \cdot 86400} \text{ m/s} = 0,04 \text{ W}/\text{m}^2\text{K} \quad (12)$$

og

$$f = \frac{\text{Van som kommer forbi isolasjonslaget}}{\text{total mengde vann tilført takoverflaten}} \quad (13)$$

Det stipuleres følgende verdier på  $f \cdot x$  (EOTA, 2010):

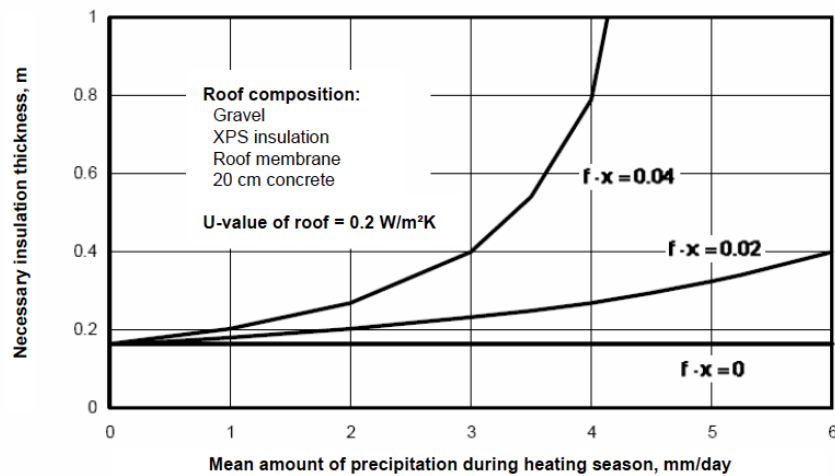
1.  $0,02 \text{ W} \cdot \text{dag}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{mm})$  for grønne tak eller parkeringsdekker med betong påstøp
2.  $0,03 \text{ W} \cdot \text{dag}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{mm})$  for isolasjon med fals og åpent topplag, som i 1)
3.  $0,04 \text{ W} \cdot \text{dag}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{mm})$  for isolasjon med butte skjøter og åpent topplag, som i 1)

I følge (Vacek and Matějka, 2016b) blir  $f \cdot x$  verdiene hentet fra (EOTA, 2010), multiplisert videre med en lekkasjerate. For eksempel blir  $f \cdot x = 0,02$  som gjelder for omvendte grønne tak, multiplisert videre med en lekkasjerate, eksempelvis 0,1 ( $f = 10 \%$ ), som gjelder ved innføring av et WSL sjikt. Dette gir en total faktor på  $0,02 \cdot 0,1$ . For semi-intensive grønne omvendte tak medfører WSL sjiktet at lekkasjeraten kun er 1 %, som gir en total faktor på  $0,02 \cdot 0,01$ . Det blir også foreslått ulike verdier på  $f \cdot x$  av (Leimer et al., 2005) som vist i figur 4, hvor også et vannavstøtende separasjonssjikt er inkludert.

<b>Leak rate <math>L</math></b> [%]	<b>Factor <math>f \cdot x</math></b> [(W day)/(m <sup>2</sup> ·K·mm)]
1 → Water draining separation layer drawn up at the edge construction	0.0005
2 → High rainfall with water draining separation layer	0.0010
5 → Water draining separation layer at flat edge construction	0.0024
8 → Low rainfall with water draining separation layer	0.0038
83 → Butt-jointed insulation slabs with non-woven filter material* *requirement according to EN ISO 6946 Annex D.4	0.0400
100 → Total runoff upon the waterproofing membrane	0.0481

Figur 4: Forslag til ulike  $f \cdot x$  (Leimer et al., 2005)

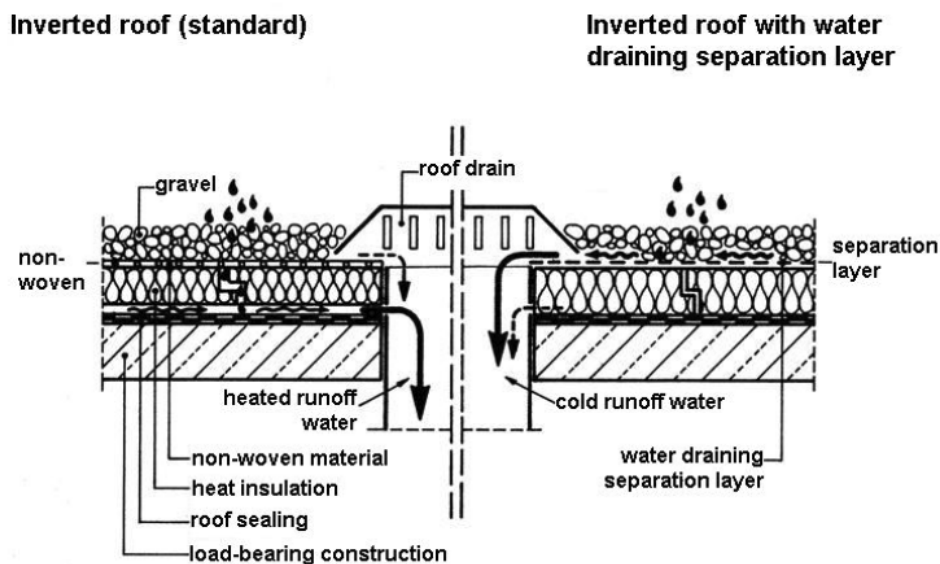
Her blir det derimot stipulert en  $f \cdot x = 0,048$  som verste tilfelle hvor lekkasjeraten  $f = 100 \%$ , og ikke 0,04 som (Standard Norge, 2017) fastslår. En verdi på 0,048 er tilsynelatende uten fiberduk mellom topplag og isolasjon. Figur 5 viser nødvendig tykkelse på isolasjonen for at et tak skal ha en  $U$ -verdi  $= 0,2 \text{ W}/\text{m}^2$  for forskjellige  $f \cdot x$ -verdier.



Figur 5: Nødvendig tykkelse for å kompensere for ulike verdier av  $f \cdot x$  (Leimer et al., 2005)

### 2.4.3 Reduksjon i lekkasjerate med et vannavstøtende separasjonsjikt

Det anbefales av samtlige forfattere (Merkel, n.d.), (Leimer et al., 2005) og (Vacek and Matějka, 2016b) å plassere et kapillærbrytende separasjonsjikt som er dampåpnet, mellom det ballastende topplaget og isolasjonen (se figur 6. Regnvannet forhindres å trenge gjennom isolasjonssjiktet og dermed vil lekkasjeraten kraftig reduseres. Forskning basert på feltmålinger og laboratoriemålinger stipulerer en  $\Delta U$ -korreksjonene lik null ved å innføre et slikt sjikt, basert på en stor reduksjon i lekkasjerate, vist i figur 7 (Leimer et al., 2005), (Merkel, n.d.).



Figur 6: Illustrasjon av omvendt tak med takmembran plassert under isolasjon. Et WSL sjikt plasseres over isolasjonen slik at regnvann ikke strømmer gjennom og gir en kjølede effekt på takkonstruksjonen (Leimer et al., 2005)

I følge (Leimer et al., 2005) vil lekkasjeraten bli svært redusert lekkasjerate ved innføring av et slikt separasjonssjikt, hvor resultatene er vist i 7 .

<b>rain intensity [mm/h]</b>	<b>Leakage rate [%]</b>
ca. 1	5.8 – 8.2
ca. 2	2.4 – 5.6
ca. 4.5 – 5.5	1.8

Figur 7: Redusert lekkasjerate ved å plassere et nytt sjikt mellom topplag og isolasjon (Leimer et al., 2005)

(Merkel, n.d.) henviser til feltmålinger utført av (Cziesielski and Fechner, 2001), som undersøkte vanninnholdet i XPS ved å plassere et WSL sjikt over XPS'en. Resultatene er vist i figur 8.

<b>XPS sample No.</b>	<b>Water content (g)</b>	<b>Water content (Vol-%)</b>
10: under WSL (area 1)	23.2	0.73
11: under polypropylene fleece (area 1)	33.8	0.94
12: under WSL (area 3)	63.9	0.75
13: under Roofmate MK (area 3)	58.9	0.60

(a)

<b>XPS sample No.</b>	<b>Water content (g)</b>	<b>Water content (Vol-%)</b>
1: under WSL (area 1)	4.3	0.15
2: under polypropylene fleece (area 1)	14.3	0.65
3: under WSL (area 2)	96.7	1.25*
4: under WSL (area 3)	31.6	0.53
5: under polypropylene fleece (area 1)	20.5	0.64
6: under polypropylene fleece (area 3)	35.1	0.60

(b)

Figur 8: Vanninnhold i XPS for et omvendt tak iløpet av sommerperioden (a) og fyringssesong (b) ved innføring av et vannavstøtende separasjonssjikt av polypropen (Merkel, n.d.)

Figurene viser det langsiktige fuktopptaket i XPS platene, målt kontinuerlig over en periode på 6 år. XPSen hadde lavt fuktinnhold for begge periodene. Hvis mengden vanninnhold som frigjøres iløpet av sommermånedene analyseres, er det tydelig at diffusjonskapasiteten til et WSL sjikt er bedre enn for polypropen duken (nonwoven polypropylene fleece). En årsak til dette er at mer skitt kan akkumuleres under duken, som er med på å redusere diffusjonskapasiteten (Merkel, n.d.).

## 2.4.4 Korreksjon av fuktopptak i plastisolasjon for omvendte tak (NS-EN ISO 10456)

Forskjellige korreksjonsfaktorer for fuktopptak i XPS ( $F_m$ ) er angitt i (Byggdetaljer 525.207, 2018), som videre henviser til det nasjonale tillegget NA i (Standard Norge, 2010). De forskjellige korreksjonsfaktorene avhenger av hva sjiktet over isolasjonen består av (se figur 9). Korreksjonsfaktorer multipliseres med den deklarererte varmekonduktiviteten  $\lambda_D$ :

$$\lambda_d = F_m \cdot \lambda_D.$$

Ballast og isolering	Uttørkningsgruppe	Fuktinnhold $\Psi$  $m^3/m^3$	Korreksjons- faktor for varme- konduktivet  $F_m$	Dimensjonerende varmekonduktivet $\lambda_d = F_m \cdot \lambda_D$	
				$\lambda_D = 0,034$ W/(mK)	$\lambda_D = 0,038$ W/(mK)
Singel Isolasjon i ett lag, klasse WD(V)3-FT1	I	0,01	1,03	0,035	0,039
Betongheller på klosser Isolasjon i to lag, klasse WD(V)3-FT1	II	0,02	1,05	0,036	0,040
Betongheller på singel Permanent skygge, klasse WD(V)3-FT1	III	0,03	1,08	0,037	0,041
Betong og heller direkte på isolasjon eller i sand, beplantning, klasse WD(V)3-FT1	IV	0,05	1,13	0,038	0,043

Figur 9: Korreksjonsfaktor,  $F_m$ , for å bestemme dimensjonerende varmekonduktivet,  $\lambda_d$ , for ekstrudert polystyren (XPS) i ulike uttørkningsgrupper ( Byggforskserien 525.207).

$$F_m = e^{f_{\Psi}(\Psi_2 - \Psi_1)} \quad (14)$$

$f_{\Psi}$  er bulk fuktighet korreksjonsfaktor (2.5 for XPS)

$\Psi_2$  er fuktinnhold i  $m^3/m^3$  for første sett av beregningskriteriet (23 °C og RF = 50 %)

$\Psi_1$  er fuktinnhold i  $m^3/m^3$  for andre sett av beregningskriteriet (23 °C og RF = 80 %)

Ett lag med isolasjon med et ballasterende topplag av singel gir den laveste uttørkningsgruppen, da denne typen oppbygning tørker raskest ut, grunnet liten tildekking. Et estimert fuktinnhold i XPS lik  $\Psi = 0,01$  ( $m^3/m^3$ ) gir en korreksjonsfaktor,  $F_m = 1,03$ . Denne skal multipliseres med deklarerert varmekonduktivet (0,035 W/mK) og følgelig gi den korrekte dimensjonerende varmekonduktiviteten (0,039 W/mK). Det er forutsatt at det brukes XPS for omvendte tak, og at den har dokumentert vannabsorpsjon ved diffusjon klasse WD(V)3 og fryse-tine-motstand klasse FT1 (Byggdetaljer 525.207, 2018).

## 2.5 Simulering av regnkjøling av omvendte tak med WUFI

### 2.5.1 Simulering basert på feltmålinger fra Holzkirchen

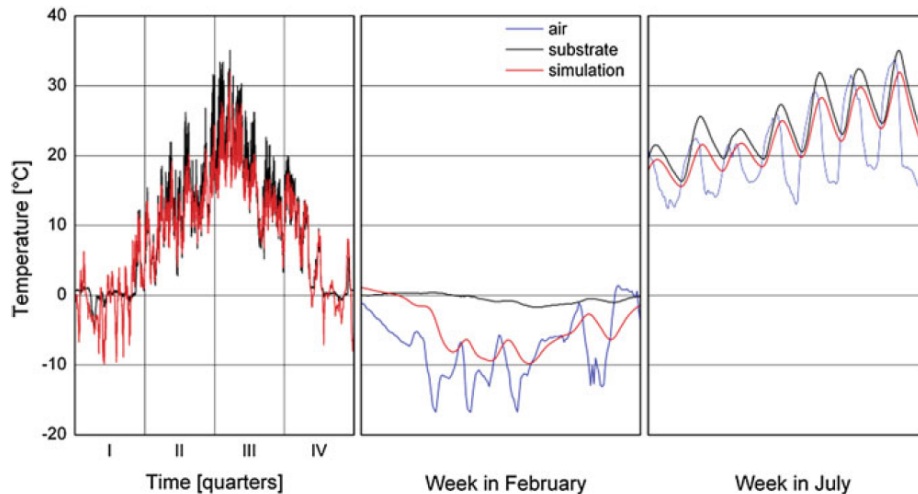
Artikkene (Zirkelbach et al., 1997), (Zirkelbach et al., 2011) og (Zirkelbach et al., 2013) er basert på feltmålinger og simuleringer av omvendte tak med ballast og vegetasjon som øverste lag. Feltemålingene ble utført på taket til internasjonale HAMTIE huset (Heat, Air, and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts) i Holzkirchen, som eies av Fraunhofer IBP. Formålet med studiet var å se på fuktopptaket i XPS for omvendte takkonstruksjoner i felt, i tillegg til å simulere takets fuktoppførsel i WUFI. Modelleringen muliggjør evaluering av mengden regnvann som akkumuleres i XPS og følgelig hvor stor dette øker varmekonduktiviteten over hele takets livsløp. Basert på dette kan det bli foreslått mer korrekte isolasjonsstykkelser, som tar hensyn til fuktopptaket (Zirkelbach et al., 2011).

Feltemålingene besto av å loggføre temperatur og RF under og over isolasjonslaget, i tillegg til veiing av isolasjonsplatene i laboratorium for å undersøke dens faktiske fuktinnhold. Fuktinnholdet i de forskjellige testtakene viser mer eller mindre en kontinuerlig økning over årene (figur 10). Vanninnholdet varierte mellom 4.8 og 8.7 Vol.-% (48–87 kg/m<sup>3</sup>) etter 19 år, avhengig av de ulike topplagene og materialegenskapene til plastisolasjonen. Økningen i vanninnholdet er en funksjon av vandampdiffusjonsmotstanden til isolasjonssjiktet, og RF over og isolasjonslaget. Fuktopptaket øker varme konduktiviteten til isolasjonen med tilnærmet 2.8 % per Vol.-% vanninnhold, som videre tilsvarer en økning mellom 113 og 125 % av tørr tilstand. Dette bør tas hensyn til i designfasen for å gjøre utføre korrekte beregninger av U-verdi, samt en god evaluering av de langsiktige varmetapene gjennom takkonstruksjonen.

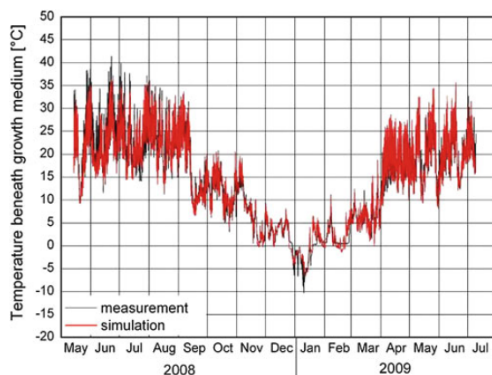
Roof type	1986	1987	1988	1989	1990	1992	1996	2004
Roof 1	0.29	0.59	0.85	1.26	1.83	2.22	–	4.79
Roof 2	–	1.28	1.86	1.74	2.19	2.62	5.18	8.70
Roof 3	0.60	0.84	1.20	1.13	1.68	2.16	–	7.01

Figur 10: Veid fuktopptak i isolasjon

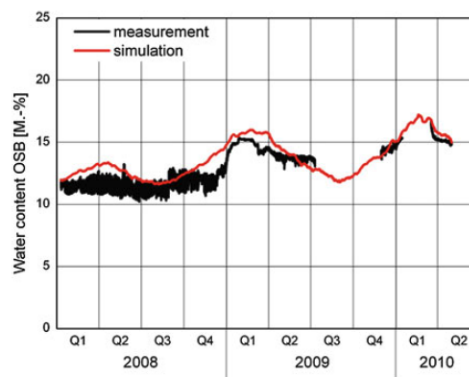
Simuleringen baseres på måledataene fra feltemålingene Holzkirchen, Vienna (Winter et al., 2007) og Leipzig (Teibinger and Nusser, 2010b). Mens tidligere beregninger var basert på konstant fuktpåkjennning (Künzel and Kießl, 1996), er det i denne simuleringen tatt inn variable fuktforhold, som fuktabsorbering, lagring, latent varmefusjon, redusert strålingsabsorpsjon, skyggeeffekt og fordamping. Det blir simulert for både topplag bestående av ballast (singel) og vegetasjon. En 10 mm vannfilm blir lagt til under isolasjonslaget for å ta hensyn til at regnvann kommer forbi isolasjonssjiktet. Resultatene av simuleringene og feltemålingene fra Holzkirchen (figur 11), fra Wien (figur 12) og fra Leipzig (figur 13). Rød graf representerer simulering, og svart graf viser feltemålingene.



Figur 11: Simlert vs. feltmålinger for Holzkirchen (Zirkelbach et al., 2013)



Figur 12: Simulert vs feltmålinger i Vienna (Zirkelbach et al., 2013)



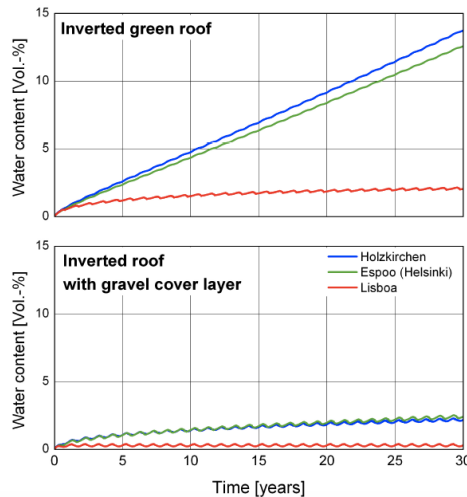
Figur 13: Simulert vs feltmålinger i Leipzig (Zirkelbach et al., 2013)

Simuleringene for de tre ulike stedene for omvendt tak med ballast og grønt tak, er representert i én graf i figur 14. Videre blir det sett på hvordan forskjellige innetemperaturer påvirker fuktakkumuleringen i plastisolasjonen over tid, som vist i figur 15. Øverste grafer er for omvendte, grønne takkonstruksjoner og nederste for omvendte takkonstruksjoner med ballast. Grafene viser at det forekommer størst vannansamling i XPS for grønne tak med et fuktopptak tilsvarende 12 Vol.-%, sammenlignet med ballast som øverste sjikt med 2,5 Vol.-%. Dette er fordi grønt dekke forblir fuktig og har en høyere vanndampmotstand, som gir en redusert uttørkning mot uteluften. Dette er i motsetning til ballast med sin lavere vanndampmotstand, som har bedre uttørkningsmuligheter.

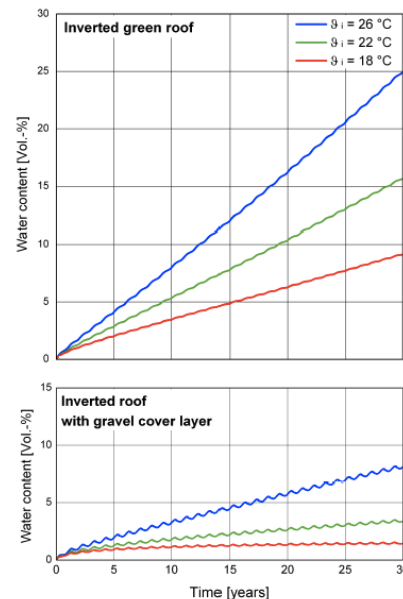
Videre så er det tilnærmet konstant fukt i XPS for testtaket i Lisboa. Dette er fordi det er liten forskjell mellom inne og utetemperatur, som gir en temperaturgradient tilnærmet null, og derfor ingen drivkrefter for vanndampdiffusjonen. I figur 15 viser det at høyere innetemperaturer gir en tilsvarende økning i fuktakkumuleringen for grønne, omvendte tak. Dette skyldes at større temperaturgradienter gir økt vanndampdiffusjon inn i isolasjonen. Derimot er det nesten ingen endring



i fuktopptaket for tak med ballast for innetemperatur på 18 grader over 20 år, mens en høyere innetemperatur gir en liten økning, tilsvarende rundt 7 Vol.-% etter 20 år.



Figur 14: Vanninnhold i isolasjon plottet mot tid for de forskjellige klimaene: Holzkirchen (blå kurve), Helsinki (grønn kurve) og Lisboa (rød kurve)



Figur 15: Vanninnhold i isolasjon plottet mot tid for varierende innetemperaturer: 26 °C (blå kurve), 22 °C (grønn kurve) og 18 °C (rød kurve)

## 2.5.2 Modellering av flate, kompakte tak i WUFI

Basert på feltnmålingene utført i Holzkirchen (Zirkelbach et al., 2013), Wien (Teibinger and Nusser, 2010a) og Kassel (Minke et al., July 2009), er det blitt laget håndbøkene (WUFI, 2017a) og (WUFI, 2017b) for modellere henholdsvis grønne tak og ballasterte tak i WUFI. To takmodeller ble utviklet for det grønne taket: En generisk takmodell og forskjellige produktspesifikke takmodeller med produkter fra Optigreen (*Optigreen international AG, 2020, n.d.*).

For utviklingen av det generiske taket var atmosfærisk motstråling ikke tilgjengelig for testperioden. Derfor ble denne innflytelsen vurdert på en forenklet måte ved hjelp av andre klimadata og overføring av overflatens koeffisienter. Modellen er spesielt egnet for lokasjoner i Sentral-Europa med sammenlignbart klima, og kan brukes hvis ingen målte data for den atmosfæriske motstrålingen eller dersom ingen detaljert informasjon om vekstlaget er tilgjengelig.

På grunnlaget av den generiske takmodellen, ble fem produktspesifikke takmodeller utviklet ved å utføre ytterlige laboratoriemålinger og feltnmålinger i Holzkirchen. I denne takmodellen ble påvirkningen av atmosfærisk motstråling vurdert eksplisitt (se kapittel 2.5.2.2). Disse takmodellene er i prinsippet også velegnet for andre klimaregioner. Validering av disse modellene har siden blitt validert av Holzkirchen og Milano (Fiori and Paolini, n.d.).

I WUFI er det to metoder for å ta hensyn til overkjøling om natten; ved forenklet metode eller ved eksplisitt full strålingsbalanse. Overkjøling om natten som følge av et langbølget strålingstap: Flate tak, som er i strålingsutveksling med atmosfæren, sender ut mer langbølget stråling enn den mottar av himmelen (såkalt atmosfærisk motstråling). Dette fører til at overflate til taket får en lavere temperatur enn utelufta. Årsaken skyldes at bestanddelene i atmosfæren (gasser som  $O_2$ ,  $N_2$  og klimagasser) er dårligere utstrålere enn terrestriske objekter (som taket), da gassene i atmosfæren kun emitterer linjespektra med store mellomrom mellom hver bølgelende. Dette er til forskjell fra faste stoffer og væsker, som emitterer et kontinuerlig strålingspektrum (Planck-spektrum). Innfallende solstråling kompenserer for dette underskuddet på dagtid, og derfor merkes ikke denne overkjølingen om dagen.

Graden av overkjøling påvirkes videre av skydekke, temperatur, fuktighet og helning på bygningskomponenten. Skyer på himmelen består av vanndråper som emitterer et fullstendig Planck-spektrum, og kan derfor kompensere helt eller delvis for denne overkjølingen. I tillegg vil overkjølingen avhenge av overfaltens helning. Et flat kompakt tak står i full strålingsutveksling med himmelen og vil derfor gjennomgå en sterke overkjøling enn en vertikal vegg, som bare har deler av himmelen i sitt "synsfelt"

### **2.5.2.1 Overkjøling om natten - Forenklet metode**

I forenklet beregningsmodus tas det hensyn til langbølget strålingsutveksling ved bruk av et varmeovergangstall som inneholder et visst bidrag av langbølget stråling. Varmeutveksling med omkringliggende luft består derfor av konvektiv varmestrøm og langbølget strålingsutveksling. Den kortbølgede (sol-) stråling blir derimot sett på som en varmekilde i bygningsdelens overflate. Dens kildstyrke er gitt som den innfallende solstrålingen mot overflaten multipliseres med kortbølget absorpsjonstall for utvendig overflate. (Thue and Oustad, n.d.).

### **2.5.2.2 Overkjøling om natten - eksplisitt strålingsbalanse**

Videre kan overkjøling om natten tas hensyn til ved eksplisitt (full) strålingsbalanse. Dette gir mulighet for en kvantitativ beregning av overkjøling om natten, ved å huke av på dialogboksen "eksplisitt strålingsbalanse". Da vil de langbølgete strålingskomponentene bli bestemt eksplisitt, både om dagen og om natten. Langbølget og kortbølget stråling summeres opp til en felles varmekilde i overflaten, som er positiv eller negativ avhengig av den totale strålingsbalansen. Netto strålingsbalanse  $I$  ( $w/m^2$ ) er positiv for oppvarming av overflaten, mens en negativ  $I$  gir avkjøling. For en videre detaljer i forbindelse med full strålingsbalanse, henvises det til (Thue and Oustad, n.d.).

### 2.5.3 WUFI

WUFI (Wärme und Feuchte Instationär) er en brukervennlig programvare, utviklet av Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) i Tyskland (*Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP*, n.d.). Programmet tillater beregning av hygrotermiske forhold i bygningskomponenter ved gitte, varierende og reelle klimabetingelser, over en viss tidsperiode (Thue and Oustad, n.d.). I tabell 1 presenteres de forskjellige transportmekanismerne som inkluderes i WUFI (Schmidt, 2006):

Tabell 1: Oversikt over hvilke transportmekanismer som er inkludert i WUFI Pro

	Inkludert	Ikke inkludert
Varmetransport	Varmedledning Entalpistrømning gjennom fuktstømmers faseforandring Kort- og langbølget solstråling Langbølget atmosfærisk og terrestrisk motstråling Varmekilde inni en komponent (valgfritt)	Varmetransport ved konveksjon grunnet luft i bevegelse
Vanndamptransport	Vanndampdiffusjon og effusjon Løsningdiffusjon Kapillærledning	Vanndampkonveksjon
Væsketransport	Overflatediffusjon/ overflatakrypning -	Dreneringsstrømning Hydraulisk strømning Elektrokinetikk og osmoseeffekter

Som kan ses i tabell 1 inkluderes hverken konveksjon ved varmetransport eller ved vanndamptransport. Dette skyldes at luft i bevegelse er vanskelig å kvantifisere og er sjeldent bare 1-dimensjonal. Fukktransport i væskeform er det flere transportmekanismer som ikke er inkludert, blant annet dreneringsstrømning og hydraulisk strømning. Dreneringsstrømning er vannstrømning i grove porer med tyngdekraften som drivkraft. Eksempelvis kondensvann i mineralull som strømmer nedover. Hydraulisk strømning skyldes transport av vann grunnet overtrykk. Dette kan foreksempel være aktuelt for flate tak som har et stående vanntrykk. Elektrokinetiske og osmoseeffekter er heller ikke inkludert.

#### Materialdata

I WUFI sin materialdatabase kan hvert sjikt i konstruksjonen tilegnes et spesifikt materiale med tilhørende materialeegenskaper. Materialeegenskapene er inndelt i basisparametre og i fuktavhengige parametre, hvor førstnevnte er egenskaper i tørr tilstand og består av:

- Spesifikk varmekapasitet, tørr [J/kgK]
- Termisk konduktivitet, tørr tilstand (10 °C) [W/mK]
- Densitet [kg/m<sup>3</sup>]
- Porøsitet [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]
- Vanndampsmotstandsfaktor [ $\mu$ ]

De fuktavhengige parametrene er materialeegenskaper som endres for varierende grensebetingelser, som eksempelvis vanninnhold, temperatur og relativ fuktighet (RF). Disse er:

- Termisk konduktivitet som en funksjon av fuktinnhold [W/mK]
- Termisk konduktivitet som en funksjon av temperatur [W/mK]
- Entalpi som er funksjon av temperatur [J/kg]
- Vanndampdiffusjonsmotstandsfaktor som en funksjon av RF [ $\mu$ ]
- Væsketransportkoeffisienten, desorpsjon  
Vanntansportkoeffisienten for desorpsjon som en funksjon av vanninnhold [ $m^2/s$ ]
- Væsketransportkoeffisienten, absorpsjon  
Vanntansportkoeffisienten for absorpsjon som en funksjon av vanninnhold [ $m^2/s$ ]
- Fuktlagringsfunksjonen  
vanninnhold som funksjon av RF [ $kg/m^3$ ]

### Fukt- og varmetransportligning

Varme- og fuktstrømmene gjennom overflatene bestemmes av gitte materialegenskaper, og av omgivende forhold, randvilkår, i form av klimadataene (temperatur, RF, slagregn, solstråling, atmosfærisk motstråling osv). For hvert tidssteg i beregningen blir to ligninger løst numerisk for den angitte tidsperioden ved definerte startbetingelser. Ligning for varmetransport uttrykkes som:

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (15)$$

og ligning for fukttransport uttrykkes som

$$\rho_w \frac{\partial u}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho_w D_w \frac{\partial u}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (16)$$

hvor

$D_w$	er væsketransportkoeffisienten ( $m^2/s$ )
$H$	er entalpien for et oppfuktet bygningsmateriale ( $J/m^3$ )
$h_v$	er fordampningsentalpien til vann ( $J/kg$ )
$p$	er partiell vanndamptrykk (Pa)
$u$	er vanninnhold ( $m^3/m^3$ )
$\delta$	er vanndampdiffusjonskoeffisient i luft ( $kg/msPa$ )
$\vartheta$	er temperatur ( $^{\circ}C$ )
$\lambda$	er varmekonduktivitet til oppfuktet materiale (W/mK)
$\mu$	er vanndampmotstanden for et tørt materiale (-)
$\rho_w$	er tettheten til vann ( $kg/m^3$ )
$\phi$	er relativ fuktighet (-)

Venstresidene av begge ligningene består av lagringsbetingelsene. Varmelagringen omfatter både varmekapasiteten til det tørre materialet og varmekapasiteten til et oppfuktet materiale. På høyre side av ligningene finner vi transportbetingelsene. Varmetransport er summen av den fuktavhengige varmeledningsevnen og vanddampentalpi-strømningen. Varmetransporten grunnet vanddampentalpi-strømning skyldes at vann fordampes et sted og derved absorberer latent varme fra dette stedet, som deretter diffunderer til et annet sted, kondenserer der og frigjør latent varme. Denne typen varmetransport kalles ofte latente varmeeffekter. Væsketransport gjennom overflate-diffusjon og kapillærledning skyldes begge på grunn av en forskjell i damptrykk, og er i relativ liten grad temperaturavhengighet. Dampdiffusjon påvirkes derimot sterkt av temperaturforskjeller, da metningsdamptrykket øker eksponentielt med temperaturen.

### **Numerisk kalkulerer av transportligningene**

For en numeriske behandling av transportligningene, må differensialligningene diskretiseres. Dette betyr at de kontinuerlige fukt- og varmefeltene evalueres ved et gitt antall separate punkt, som bestemmes av fin til grov oppdeling av rutenettet. Jo lengre disse punktene er ifra hverandre, jo mindre fullstendig blir beskrivelsen av feltene, og jo mindre presis blir beskrivelsen i neste tids-trinn. WUFI bruker metoden "finite volumes", som først balanserer differensialligningene og deretter formuleres disse i algebraiske uttrykk, i slik måte at fukt og varmebalansen er ivaretatt for hvert element i det numeriske rutenettet. I og med at balansen er ivaretatt i hvert punkt, er også balansen for hele systemet ivaretatt (Schmidt, 2006).

Etter en simulering kan resultatene kontrolleres for å vurdere påliteligheten i beregningsmodellen. Deriblant vil konvergensfeil oppstå når WUFI bruker for lang tid for å løse differensialligningene. Dette skjer når den oppnår et maksimum av antall tillatte iterasjoner uten å oppnå en midlertidig løsning, som møter det endelige kriteriet. WUFI stopper dermed iterasjonen, og kommer med en mindre riktig løsning, og hvis den er god nok, fortsetter WUFI kalkulasjonen. Antall konvergensfeil øker med én. Oppstår det derimot mer enn 50 konvergensfeil i løpet av ett år, bør endringer i selve modellen gjøres. Det er derimot ikke alltid at konvergeringsfeil betyr at det er store avvik i beregningen, da én konvergeringsfeil både kan bety store eller små avvik. Videre så er det også viktig å sjekke vannbalansene, balanse 1 og 2: Balanse 1 er endringen i total vanninnhold i løpet av kalkuleringen, mens balanse 2 er summen av overflatestrømmene ( $kl + dl - kr - dr$ ), hvor:

kl : kapillærtransport ved venstre overflate,  
dl : Vanddamptransport ved venstre overflate,  
kr : Kapillærtransport ved høyre overflate,  
dr : Vanddamptransport ved høyre overflate (\*).

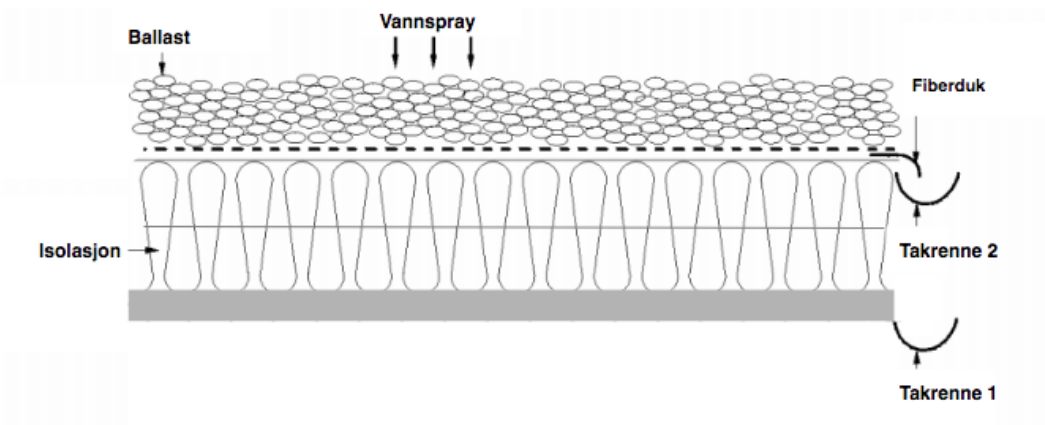
Ideelt skal balanse 1 og balanse 2 være like, siden en endring i totalt vanninnhold er et resultat av at fukt transporteres gjennom overflatene. Avrundingsfeil eller konvergeringsproblemer kan føre til avvik mellom disse to tallene (Schmidt, 2006).

## 3 Metode

### 3.1 Laborieforsøk

#### 3.1.1 Oppbygning av testtak

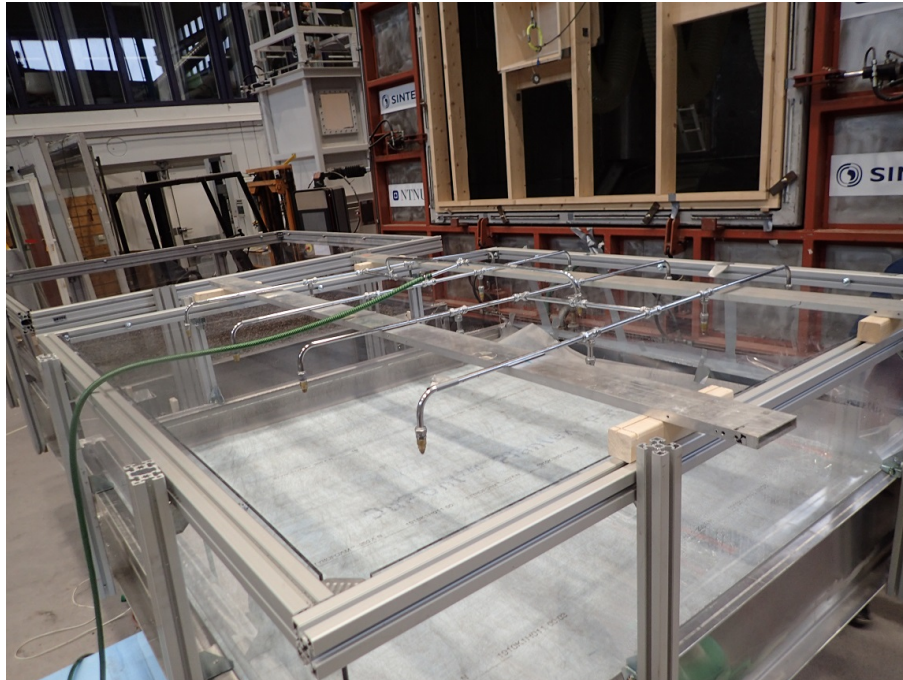
Testtaket som ble brukt for å bestemme lekkasjeraten gjennom isolasjonslaget målte 2 x 2 m og bestod av en sammensveiset stålramme og stålplate. Testtaket var festet til fire stålben som kunne justeres til en takhelningen på 1:40, for å imøtekomme kravet til helning på flate tak ifølge (Byggdetaljer 525.207, 2018). XPS'en ble lagt i to lag direkte ned på stålplaten, med både forskjøvet isolasjonsplater og parallelle skjøtekanter. Det ble tapet med tape langs periferien, dvs det mellomrommet som oppstår mellom isolasjonen og stålrammen. Dette ble gjort for å etterligne samme skjøteforhold som det ville vært i virkeligheten. Fiberduken ble plassert over isolasjonen, etterfulgt av et 50 mm lag med singel. I den ene enden av testtaket var det montert en takrenne av stål langs hele siden, som skulle samle opp regnvann som kom forbi isolasjonsslaget (figur 55, samt en ekstra takrenne laget av dampsperr materiale, som skal fange opp det vannet som dreneres over isolasjonen (se figur 56). Takrennene leder vannet til hver sin tønne med tilhørende trykksensor i bunnen av tønne.



Figur 16: Illustrasjon av testtaket tegnet i (Diagrams.net, n.d.) basert på eksisterende bilde fra (EOTA, 2010)

Gjennomsiktige plater av plast ble montert rundt taket, som vannspray-riggen ble lagt oppå. Se figur 17. For flere bilder av testtaket henvises det til vedlegg C. Material og utstyr som ble brukt i laboriemålingene er som følgende:

- XPS Styrofoam 250 SL-A-N 50MM DOW
- Fiberduk Plantex Patio 2,1x25meter
- Singel 10-30 mm
- Gaffatape
- Dampsperrprodukt brukt for å lage en takrenne
- Trykksensor av type Vegabar 14 (type bar 14. x1sa1gv1).

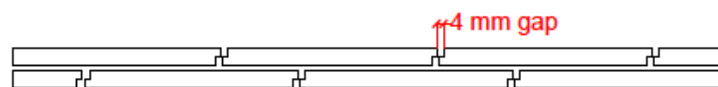


Figur 17: Foto av ferdig takrigg med vannspray-rigg liggende over

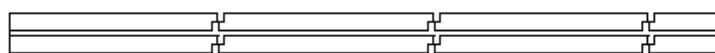
### 3.1.2 Planlagt og utført laboratoriearbeid

#### Planlagt laboratoriearbeid

I tabell 2 vises de planlagte testscenarioene som skulle vært gjennomført i laboratoriet. Formålet med testene var å studere hvordan lekkasjeraten endrer seg for forskjellige måter å legge isolasjonsplatene på. Det skulle vært testet for både isolasjonsplater med fals (50 mm XPS) og uten fals (100 mm XPS), og med isolasjonsplater parallell og vinkelrett med fallretning. På grunn av COVID 19 kunne ikke undertegnede selv utføre laboratorieforsøkene. Som en konsekvens ble kun tekst i svart gjennomført av Jan Ove Busklein som er ansatt på SINTEF laboratoriet, som vist i tabell 2. Se figur 18 og 19 som illustrerer isolasjonsplatenes plassering i forhold til hverandre, henholdvis forskjøvet og parallele skjøter.



Figur 18: Tversnitt som viser 50 mm isolasjonsplater i to lag med forskjøvet kant; overlapp 20 cm



Figur 19: Tversnitt som viser 50 mm isolasjonsplater i to lag med parallele skjøter

Tabell 2: Forskjellige testscenarier. Tekst markert i grått viser tester som ikke ble gjennomført på laboratoriet

Oppbygning	Nedbørsrate	Isolasjonens plassering	Isolasjonens orientering	Skjøteavstand mellom platene
m/u småsingel under isolasjon				
1. XPS m/fals (50 mm i to lag)	6,7 mm	Forskjøvet skjøter	Parallell	0 mm
	11,7 mm	parallele skjøter	vinkelrett	4 mm
3. XPS u/fals (100 mm i ett lag)	6,7 mm	Forskjøvet skjøter	Parallell	2 mm
	11,7 mm	Parallele skjøter	vinkelrett	4 mm
Med ballast over isolasjon				
1. XPS m/fals (50 mm i to lag)	6,7 mm	Forskjøvet skjøter	Parallell	4 mm
	11,7 mm	Parallele skjøter	vinkelrett	
2. XPS u/fals (100 mm i ett lag)	6,7 mm	-	Parallell	4 mm
	11,7 mm		vinkelrett	

### Utført laboratoriearbeid

I tabell 3 vises de forskjellige testscenariene som faktisk ble gjennomført med tilhørende nummerering. Det mest ideelle testscenarioet med tilnærmet 0 mm gap mellom plateskjøtene og med forskjøvet isolasjonsplater i to lag (test 1 og 2) ble utført først. Deretter ble det laget et 4 mm gap mellom isolasjonsplatene for å etterligne noe som kan forekomme i virkeligheten (test 3 og 4) ifølge (Petersson, 1982). Videre ble samme oppbygning brukt men med tre singelsteiner plassert under isolasjonslaget (test 5 og 6). Singelsteiner under isolasjonen vil skape et mer ujevnt underlag, som også kan oppstå i virkeligheten, og gi et enda mer ugunstig gapforhold. Resterende tester ble utført med parallelle skjøtekanter (figur 19), med de samme steinene under isolasjonen (test 7 og 8). Helt tilslutt ble det lagt et ballasterende topplag over isolasjonen, i form av 50 mm tykt lag med singel med steinstørrelse 10 - 30 mm. Hensikten var å se hvordan topplaget sammen med det mest ugunstige scenarioet, ville påvirke lekkasjeraten gjennom isolasjonsjiktet.



Tabell 3: Beskrivelse av de forskjellige testscenarioene

Testscenarioer	Bredde gap	Isolasjonsplatenes orientering	Nedbørsintensitet	Singel
Test 1	0 mm	Forskjøvet kant	6,7 mm	-
Test 2	0 mm	Forskjøvet kant	11,7 mm	-
Test 3	4 mm	Forskjøvet kant	6,7 mm	-
Test 4	4 mm	Forskjøvet kant	11,7 mm	-
Test 5	4 mm	Forskjøvet kant	6,7 mm	singel bunn
Test 6	4 mm	Forskjøvet kant	11,7 mm	singel bunn
Test 7	4 mm	Parallell kant	6,7 mm	singel bunn
Test 8	4 mm	Parallell kant	11,7 mm	singel bunn
Test 9	4 mm	Parallell kant	6,7 mm	singel bunn singel topp
Test 10	4 mm	Parallell kant	11,7 mm	singel bunn singel topp

### 3.1.3 Nedbørsimulering etter tysk metode

Laboratorieforsøkene ble utført etter den tyske metoden (FLL, 2008) for bestemmelse av lekkasjeraten (runoff coefficient). I henhold til (FLL, 2008) ble testtaket påført vann tilsvarende nedbørsmengde på 6,7 mm og 11,7 mm i løpet av 20 min. Dette gir videre en nedbørsintensitet på 20,1 mm/time og 35,1 mm/time. For at takriggeren skal være ved feltkapasitet før start, ble taket derfor gjennomvannet før tre etterfølgende tester ble kjørt, som tilslutt ble midlet til én verdi. Gjennomvanningen ble først avsluttet når en konstant avrenning oppsto for begge sjiktene. Dette tok 1 - 1,5 timer.

For bestemmelse av hvilken nedbørsintensitet som skulle tilføres testtaket, ble det brukt IFV-kurven for Voll målestasjon i Trondheim hentet fra (*Norsk Klimaservicesenter*, n.d.). En IFV-kurve viser gjennomsnittlige nedbørsmengder med forskjellige varigheter for ulike gjentak-intervaller. Det ble valgt å ta utgangspunkt i et gjentakintervall på 50 år, med en varighet på nedbør lik 20 min. Dette gav en nedbørsmenge på 12,1 mm. Kalibrerte nedbørsmengder ble derfor valgt til å være verdier rundt denne, som tilslutt ble 6,7 mm og 11,7 mm i løpet av 20 min.

- 6,7 mm: På 2 sek, Av 18 sek, 60 sykler (20 min)
- 11,7 mm: På 2 sek, Av 8 sek, 120 sykler (20 min)

### 3.1.4 Beregning av lekkasjerate

Beregningen av lekkasjeraten er beregnet på samme måte som (Pel et al., 2016) og (EOTA, 2010):

$$f = \frac{\text{Andel nedbør som dreneres gjennom isolasjonssjiktet}}{\text{Total nedbør som tilføres takrigger}} \cdot 100\% \quad (17)$$

### 3.1.5 Korreksjon for regnkjøling på omvendte tak

Det blir ikke forslått forskjellige verdier på  $f \cdot x$  for beregning av  $\Delta U_r$ -korreksjonen (11) i henhold til (Standard Norge, 2017). Kun én verdi på  $f \cdot x = 0,04$  nevnes, som gjelder for et lag med XPS med butte skjøter som gir en lekkasjerate,  $f = 100 \%$ . På den andre siden blir det i artiklene (Leimer et al., 2005) og (EOTA, 2010) foreslått flere verdier av  $f \cdot x$ . Derimot gir det mest ugunstige tilfelle en  $f \cdot x = 0,048$  i følge (Leimer et al., 2005) (isolasjon i ett lag med butte skjøtkanter).

Det ble valgt å gå for sistnevnte, da (Leimer et al., 2005) foreslår flest verdier på  $f \cdot x$  (se figur 4). Dette gjør det enklere å sammenligne egne verdier med de foreslåtte verdiene, for å sjekke at egne beregningene blir riktig. Dessuten er  $f \cdot x = 0,048$  mer konservativ enn  $0,04$  som er den verdien (EOTA, 2010) og (Standard Norge, 2017) foreslår.

I standarden (Standard Norge, 2017) anbefales det en gjennomsnittlig nedbør på 3 mm/dag. I følge klimadata hentet fra (Byggdetaljer 451.031, 2013) for Trondheim (Voll målestasjon) er gjennomsnittlig årsnedbør lik 850 mm/år. Denne ble dividert på 356 dager som gir en gjennomsnittlig nedbør på 2,3 mm/dag som ble brukt for beregning av varmetapet.

Videre ble beregningen av  $\Delta U_r$  basert på varmemotstand og U-verdi til det omvendte taket med ballast, hentet fra WUFI modellen:

- Takets totale U-verdi lik  $0,128 \text{ W/m}^2$  som gir  $R_{tot} = 7,81$
- Varmekonduktivitet for XPS i tørr tilstand:  $\lambda_d = 0,03 \text{ W/mK}$
- $R_1 = 0,2 \text{ m} / 0,03 \text{ W/mK} = 6,67 \text{ m}^2\text{K/W}$

Det ble i tillegg beregnet  $\Delta U_r$ -korreksjoner med forskjellige  $f \cdot x$  verdiene foreslått av (Leimer et al., 2005). Dette er gjort for å vise hvordan de ulike oppbygningene påvirker størrelsen på tilhørende  $\Delta U_r$ -korreksjon, samt deres betydning på et tak sin totale U-verdi.

## 3.2 WUFI simuleringer

### 3.2.1 Test scenarier

Hensikten med WUFI simuleringene er å studere det langsiktige fuktopptaket i XPS for omvendte takkonstruksjoner i Norge. Med utgangspunkt i takmodellene presentert i WUFI sine håndbøker (WUFI, 2017a) og (WUFI, 2017b), ønskes det å studere hvordan et nordisk klima vil påvirke fuktopptaket. Også her vil forskjellige innetemperaturer og klima studeres, i tillegg til å se på virkningen av ulike lekkasjerater (f) gjennom isolasjonslaget.

To omvendte tak er blitt simulert i WUFI, hvor det er bare de øverste lagene som skiller de to fra hverandre: et ballasterende topplag av singel, og et grønt, omvendt tak. Dette gjør det mulig å kunne sammenligne topplagenes ulike påvirkning på fuktopptaket i XPS. Lekkasjeratene er tatt fra resultatet fra laboratoriemålingene. I tabell 4 er de forskjellige simuleringversjonene presentert.

Tabell 4: Oversikt over de forskjellige testene som er simulert i WUFI

Type oppbygning	Klima	Innetemperatur	Lekkasjerate
1. Omvendt tak med ballast	-Trondheim	18 °C	40 %
	-Oslo	22 °C	81,7 %
	-Bergen	26 °C	68,7 %
			7,8 %
2. Grønt omvendt tak	-Trondheim	18 °C	40 %
	-Oslo	22 °C	50 %
	-Bergen	26 °C	60 %
			70 %

Det er viktig å understreke at formålet med de ulike testscenarioene, er å gi et bilde på endring i trendene, og ikke nødvendigvis eksakte tall på faktisk fuktopptak. Simuleringer over en lengre tidsperiode er et langsiktig estimat og bør tilpasses måledata fra feltmålinger. På grunn av feltmålinger i Norge ikke var mulig å utføre, er det tatt utgangspunkt i modeller tilpasset et tysk klima, som i utgangspunktet skal kunne gjelde for andre klima også. Dette må tas i betraktning når resultatene studeres. Det er likevel interessant å se hvordan ulike nordiske klima med varierende mengder nedbør og solstråling, vil kunne ha å si for fuktopptaket. Det ble også sjekket for ulike i prosentandel av nedbør tilført topplaget og vannfilm under isolasjonen. I Tyskland var prosentandel i ballast satt til 40 % av nedbøren, mens i vannfilmen var denne satt til 1,0 %. Til slutt ble det simulert med et vannavstøtende og dampåpent separasjonssjikt, plassert mellom isolasjon og topplag,

### 3.2.2 Generelt om simuleringene

For modellering av det grønne, omvendte taket ble i utgangspunktet gått for en produktspesifikk takmodell, versjon: "Optigreen-system Nature Roof Solution 1". Dette ble valgt på basis av at disse modellene kan brukes for alle typer klima og tar også hensyn til overkjøling om natten. Den produktspesifikke takmodellen gav derimot store forskjeller i vannbalansen (balanse 1  $\neq$  balanse 2), og etter en del simuleringstester, viste det seg at at det var de øverste materiallagene fra Optigreen (vekstlag og beplantning) som gav denne feilen.

Det ble derfor foretatt en sammenligning mellom det produktspesifikke taket med et generisk tak, i henhold til (WUFI, 2017a). De to øverste produktspesifikke lagene ble byttet ut med "Generic substrate" uten beplantning over som gav en ubetydelig forskjell i fuktbalansen. Førstnevnte tar hensyn til overkjøling ved aktivering av eksplisitt strålingsbalanse, mens sistnevnte tar hensyn til denne effekten på en forenklet måte, da eksplisitt strålingsbalanse ikke er aktivert. Dette medfører at sammenligningsgrunnlaget for taket med ballast og det generiske grønne taket blir noe dårligere. På grunn av at det ikke ble funnet noen løsning på hvorfor fuktbalansene ikke var bedre for det produktspesifikke taket, ble det derfor valgt å gå for det generiske taket. Dette valget er også basert på at de to takmodellene gav tilnærmet likt fuktopptak i plastisolasjon, som vist i figur 26 i resultatkapitlet.

For omvendte tak hvor deler av regnvannet kommer forbi isolasjonssjiktet, vil ca 10 mm vannfilm dannes under isolasjonssjiktet. Det vil dermed være 100 % RF under isolasjonen, som vil forårsaker en vandampdiffusjon i XPS'en. Dettetas hensyn til i simuleringen ved å tilføre en 1 mm tykk fiberduk tilført en fuktkilde tilsvarende 1 % av nedbøren (Zirkelbach et al., 2011). Fuktkilden fordeles over hele lagets tykkelse, med unntak av de ytterste elementene, da dette kan skape numeriske problemer og føre til forskjell i fuktbalansen (Schmidt, 2006).

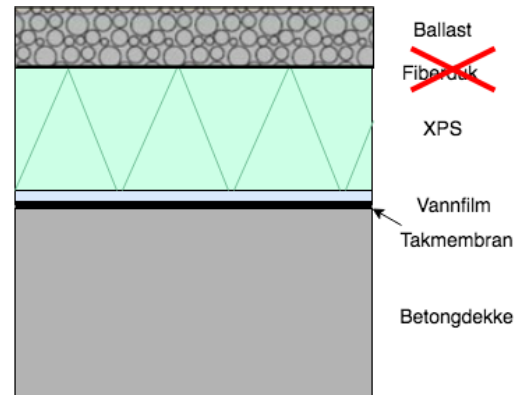
En fuktkilde tilført topplaget er satt til 40 % da dette stemmer best overens med feltmålinger utført i Holzkirchen. Eksakt mengde tilført er mindre viktig, da hensikten til fuktkilden er å tilføre 100 % RF i topplaget etter en nedbørshendelse. Denne begrenses til fri vannmetning til materialet. Det er likvel blitt tilført forskjellige prosentandel av nedbør i topplag og vannfilmen under isolasjonslaget, for å se hvordan dette vil påvirke fuktopptaket.

Det ble også testet hvordan et vannavstøtende og dampåpent separasjonsjikt (WSL: Water repellent Separation Layer) mellom topplaget og isolasjonen, ville påvirke fuktopptaket. Valgte materiale i WUFI var vindsperran "\*weather resistive barrier", hvor dens sd-verdi ble endret fra 0,1 til 0,02. I takmodellene ble dermed vannfilmen under XPS'en tatt bort, basert på antagelsen at sjiktet forhindrer vannet å strømme forbi isolasjonslaget.

### 3.2.3 Materialvalg og oppbygning av omvendt tak med ballast

De hygrotermiske materialeegenskapene til et ballast lag bestående av singel eller elvestein, har blitt tilpasset ved å sammenligne feltmålinger utført på ballasterte tak i Holzkirchen med simuleringresultatene. Dette er allerede blitt nevnt i kapittel 2.4, hvor det siden har er publisert håndboken (WUFI, 2017b) på WUFI sine egne nettsider. I håndboken blir det beskrevet hvilke material

og input data som skal velges for å simulere denne typen tak i WUFI. Denne håndboken er blitt brukt som en retningslinje for å se på fuktakkumulasjonen i XPS for nordiske klima. Figur 20 viser oppbygningen av takmodellen i WUFI. Fiberduk mellom ballast og XPS ble valgt å ta bort grunnet at slike tynne sjikt kan skape problem, og har dessuten liten påvirkning på det endelige resultatet (Thue and Oustad, n.d.).



Figur 20: Illustrasjon av oppbygning av omvendt tak med ballast i WUFI. Tegnet på i programmet diagrams.net (Diagrams.net, n.d.)

Tabell 5 viser en mer detaljert beskrivelse av valgte materialer.

Tabell 5: Liste over brukte materialer for simulering av omvendt tak med ballast i WUFI

Materiale	Produkt- navn	Masse- tetthet [kg/m <sup>3</sup> ]	Spesifikk varmekapasitet [J/kgK]	Varme- konduktivitet [W/mK]	Vanndampdiffusjons- motstand [-]
Ballast	“Generic gravel.xml”	1400	1000	0,7	1
Isolasjon	XPS-ytterhud (0,01 m)	40	1500	0,03	450
	XPS kjerne (0,2 m)	40	1500	0,03	100
	XPS-ytterhud (0,01 m)	40	1500	0,03	450
Vannfilm	“Optigreen Nature Roof 1 (filtermat) 3-5.xml” 0,1 cm	83	840	0,035	1
Takmembran	“Takmembran V13”	2400	1000	0,5	100000
Betongdekke	Betong B45 0,25 m	2220	850	1,6	248

## Fuktkilder

I tillegg til fuktkilden tilført under isolasjonslaget, er det også tilført en fuktkilde i ballastlaget. På grunn av av det regnvannet som treffer takoverflaten i tilfelle for intense regnbyger, ikke vil tas opp raskt nok, vil deler av regnvannet dreneres på modellens overflate; det vil si at det antas at regnvann dreneres bort ved takets overflate, på samme måte som regnvann dreneres bort på en eksponert vertikal vegg. Derimot er takmodellen opprinnelig designet for å simulere absorbering av regnvann og derfor må det tilføres en fuktkilde i topplaget for å unngå denne effekten - som knapt forekommer i praksis (regnvannet vil normalt renne gjennom vekstlaget og ikke over det). (Zirkelbach et al., 2011) anbefaler at fuktkilden avsetter 40 % av nedbøren i de nederste 20 cm for vekstlaget, begrenset til fri vannmetning, mens for ballast fordeles fuktkilden over hele lagets tykkelse. Følgende fuktkilder ble lagt inn for det omvendte taket med ballast:

- 5 cm tykk generic gravel med en fuktkilde som har en startdybde 0,0005 m og sluttdybde lik 0,05. Kildestyrken til fuktkilden tilsvarer en fuktbelastning lik 40 % av stedets totale andel innfallende slagregn, samt at fuktkilden begrenses til fri vannmetting.
- 0,1 cm fiberduk med en fuktkilde som har en startdybde 0,025 cm og sluttdybde lik 0,075 cm, med en kildestyrke tilsvarende 1 % av stedets totale andel innfallende slagregn, og begrenset til fri vannmetting.

## Overflateparametre

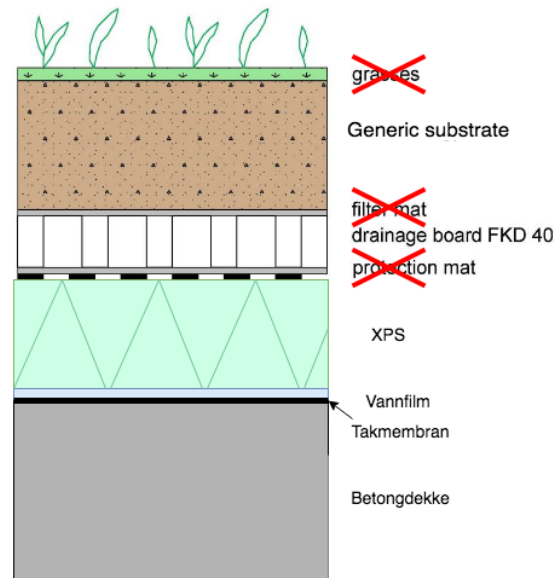
Etter anbefalinger fra håndboken (WUFI, 2017b) ble følgende overflateparametre brukt: Varmemotstand lik 0,0526 m<sup>2</sup>K/W, inkludert langbølget strålingsbidrag lik 6.5 W/m<sup>2</sup>. Kortbølget strålingsabsorpsjonstall: a = 0,5 for medium grå ballast og langbølget strålingsemisivitet, ε = 0.93. Eksplisitt strålingsbalanse: på. Se figur 21

Ytre overflate (venstre side)	
Varmemotstand [(m <sup>2</sup> K)/W]	0.0526 Tak
inkluderer langbølgete strålingsbidrag [W/(m <sup>2</sup> K)]	6.5
Vindavhengig	<input type="checkbox"/>
Sd-verdi [m]	-----
	Ingen overflatebehandling
	Forklaring: Denne innstillingen har ingen innvirkning på
Kortbølget strålingsabsorpsjonstall [-]	0.5 Singeltak, generisk modell
Langbølget strålingsemisivitet [-]	0.93
Reduksjonsfaktorer på grunn av skygge:	
for absorpsjonstall [-]	1.0 Ingen skygge
for emisivitet [-]	1.0
Eksplisitt strålingsbalanse	<input checked="" type="checkbox"/> Merknad: Med dette valget tas det hensyn til avkjølingseffekten pga langbølget utstråling. Ved fysiske tilfeller kan det være nødvendig at klimafilen har tilstrekkelig nøyaktige data om motstråling.
Terreng, kortbølget refleksjonsgrad [-]	0.2 Standardverdi
Regnvannabsorpsjonstall [-]	1.0 Avhengig av komponenthelning

Figur 21: Innstillinger i WUFI for ballast taket

### 3.2.4 Materialvalg og oppbygning av omvendt, grønt tak

I figur 22 viser en illustrasjon av valgte oppbygning av det grønne, omvendte taket i WUFI. De røde kryssene viser hvilke sjikt som ikke ble lagt inn i modellen, da flere tynne sjikt kan medføre konvergeringsfeil, og har dessuten lite å si for fukt- og varmetransporten i selve simuleringen. Disse sjiktene er dog viktig å ta med når slike grønne tak faktisk skal bygges.



Figur 22: Illustrasjon av oppbygning av omvendt grønt tak i WUFI. Øverste lag fra og med protection mat, er en illustrasjon hentet fra (WUFI, 2017a) og nederste lag er tegnet på i programmet diagrams.net (Diagrams.net, n.d.)

Tabell 6: Liste over brukte materialer i WUFI for simulering av grønt omvendt tak

Materiale	Produkt-navn	Masse-tetthet [kg/m <sup>3</sup> ]	Spesifikk varmekapasitet [J/kgK]	Varme-konduktivitet [W/mK]	Vanndampdiffusjons-motstand [-]
Vekstlag	“Generic substrate” 10 cm	912	1000	0,4	5
Drenslag	“Optigreen Nature Roof 1 (drainage boards) 4-5.xml” 4 cm	60	850	0,3	1,3
Isolasjon	XPS-ytterhud (0,01 m)	40	1500	0,03	450
	XPS kjerne (0,2 m)	40	1500	0,03	100
Vannfilm	“Optigreen Nature Roof 1 (filtermat) 3-5.xml” 0,1 cm	83	840	0,035	1
Takmembran	“Takmembran V13”	2400	1000	0,5	100000
Betongdekke	Betong B45 0,25 m	2220	850	1,6	248

## Fuktkilder

- vekstlag 40 cm, og i de 20 nederste cm legges en fuktkilde med en startdybde 0,08 og sluttdybde 0,1 m. Kildestyrken til fuktkilden tilsvarer en fuktbelastning lik 40 % av stedets totale andel innfallende slagregn, samt begrenset til fri vannmetting.
- Fuktkilde i dreneringsplater gjeldende for hele materialaget. Kildestyrken til fuktkilden tilsvarer en fuktbelastning lik 40 % av stedets totale andel innfallende slagregn, samt at fuktkilden begrenses til maksimum volum til platene ( $((8,7 \text{ kg/m}^2)/(0,04 \text{ m}) = 217,5 \text{ kg/m}^3)$ )
- 0,1 cm fiberduk med en fuktkilde som har en startdybde 0,025 cm og sluttdybde lik 0,075 cm, med en kildestyrke tilsvarende 1 % av stedets totale andel innfallende slagregn, samt begrenset til fri vannmetting.

## Overflateparametre

Varmemotstand lik  $0,0526 \text{ m}^2\text{K/W}$ , hvor det inkludert langbølget strålingsbidrag lik  $6.5 \text{ W/m}^2$ . Kortbølget strålingsabsorpsjonstall:  $a = 0,3$ . 'Grønt tak, generisk modell'. Eksplisitt strålingsbalanse: av. Se figur 23.

Ytre overflate (venstre side)		
Varmemotstand [(m <sup>2</sup> K)/W]	0.0526	Tak
inkluderer langbølgete strålingsbidrag [W/(m <sup>2</sup> K)]	6.5	
Vindavhengig	<input type="checkbox"/>	
Sd-verdi [m]	----	Ingen overflatebehandling
		Forklaring: Denne innstillingen har ingen innvirkning på
Kortbølget strålingsabsorpsjonstall [-]	0.3	Grønt tak, generisk modell
Langbølget strålingsemissivitet [-]	----	
Reduksjonsfaktorer på grunn av skygge:		
for absorpsjonstall [-]	----	Ingen skygge
for emissivitet [-]	----	
Eksplisitt strålingsbalanse	<input type="checkbox"/>	Merknad: Med dette valget tas det hensyn til avkjølingseffekten pga langbølget utstråling. Ved falsomme tilfeller kan det være nødvendig at klimafilen har tilstrekkelig nøyaktige data om motstråling.
Terreng, kortbølget refleksjonsgrad [-]	0.2	Standardverdi
Regnvannabsorpsjonstall [-]	1.0	Avhengig av komponenthelning

Figur 23: Innstillinger i WUFI for det grønne taket

### 3.2.5 Initialbetingelser

Valgt startfuktighet ble valgt til å være et gjennomsnitt over hele konstruksjonen. Det ble valgt å gå for et typisk byggfukt for hvert material. Starttemperaturen for materialegene ble satt til  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ , men denne vil raskt utjevnes i forhold til ute og inneluften, og vil derfor ha relativ liten betydning for de videre kalkulasjoner.



### 3.2.6 Beregningsperiode

De forskjellige variantene ble simulert for en tidsperiode på 19 år, som startet 01.10.2000 og avsluttet 01.10.2019. Tidstrinnet ble satt til en time. Ved å simulere for en lang tidsperiode, vil det kunne ses når konstruksjonen oppnår fuktlikevekt, eller om det vil forekomme en konstant fuktakkumulering over tid, som en bør være klar over.

### 3.2.7 Inne- og uteklima

Inneklima er definert som en funksjon av innvendig fukttilskudd og temperatur, etter NS-EN 13788. Innetemperaturen er konstant, hvor fukttilskuddet i inneluften settes lik uteluftens fuktinnhold, med et ekstra tillegg av innvendig fukttilskudd i  $[g/m^3]$ . Det ekstra fukttilskuddet er avhenging av utelufttemperaturen. Fuktbelastning 2 tilsvarer et innvendig fukttilskudd lik  $4 g/m^3$ . Innetemperaturen ble satt til  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$  og  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

De forskjellige utvendig klimadataene for Trondheim, Oslo og Bergen, er hentet fra WUFI sin egen kartfunksjon (map/file) som tar utgangspunkt i det såkalte referanseåret ("Moisture Design Reference Year" - MDRY). Disse klimadataene er basert på faktiske målinger, som består av tre målinger i løpet av et døgn og videre omregnet til timesverdier ved hjelp av lineær interpolasjon. I tillegg er klimadata fra Holzkirchen presentert for sammenligning av resultater med resultatene fra artikkelen (Zirkelbach et al., 2013). Orienteringen for takene for de forskjellige klimaene ble valgt etter hvilken orientering som gav størst slagregn. Det var dessverre ikke mulig å velge den eksakte orientering for størst slagregnpåkjenning, da det bare var mulig å velge mellom 8 orienteringer. Derfor ble den orienteringen som gav størst slagregnpåkjenning valgt. For Trondheim ble taket orientert mot sør-vest, og for Bergen og Oslo var dette sør. Se tabell 7 for en mer detaljert beskrivelse.

Tabell 7: Oversikt over klimadata for Oslo, Bergen, Trondheim og Holzkirchen

Klima	Midlere temp.	maks temp	min temp.	Midlere skyindeks [-]	Normalregn summert [mm/a]	Slagregn [mm/a]
<b>Oslo</b>	6,8	29,3	-14,8	0,67	604,7	S: 203
<b>Bergen</b>	8,1	28	-9,7	0,71	2421	S: ca 1588
<b>Trondheim</b>	5,4	24,2	-13,8	0,74	1233,6	SV: ca 720
<b>Holzkirchen</b>	6,6	32,1	-20,1	-	1184,6	V: 600

### 3.2.8 Kalkulasjon av ny varmekonduktivitet

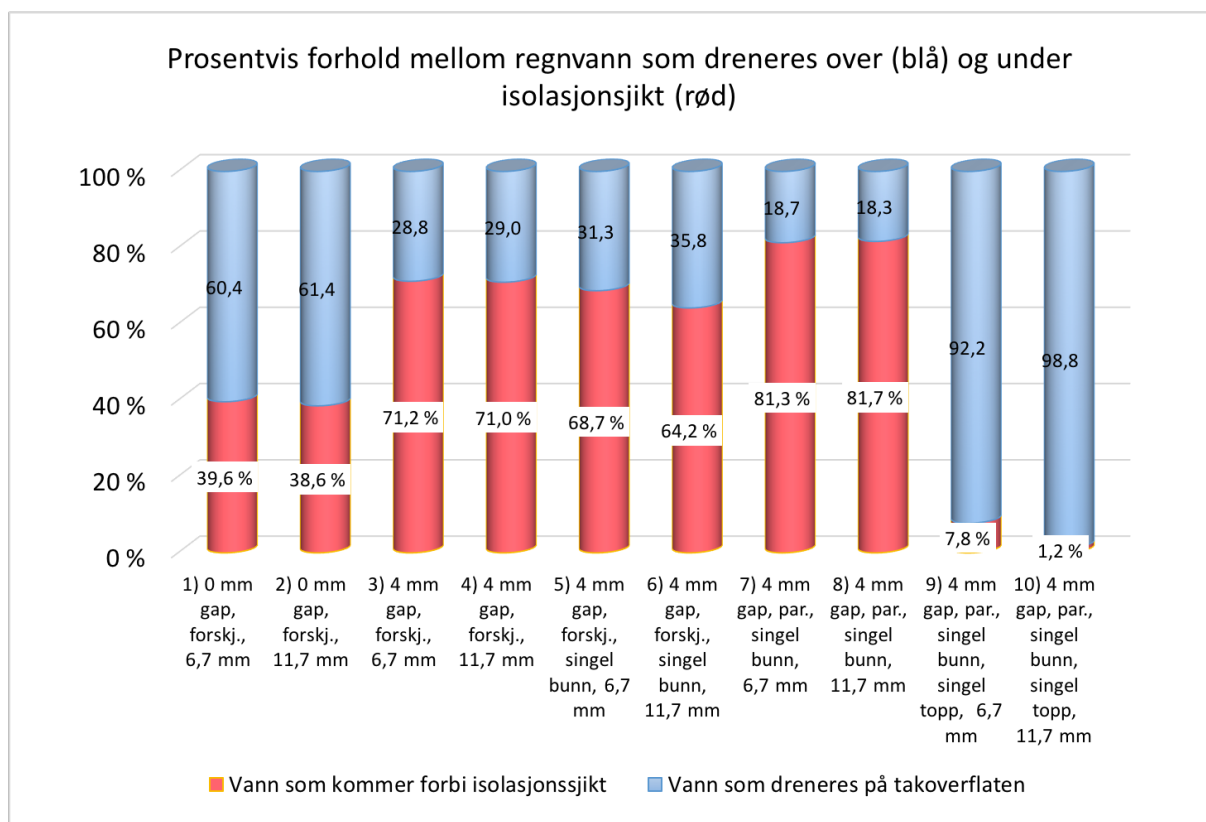
Simulert fuktinnhold i XPS i  $kg/m^3$  ble brukt for å beregne ny varmekonduktivitet etter formel 7 og 8. For beregning av  $\omega$  ble det brukt romdensiteter i  $kg/m^3$  istedenfor massene i kg.

# 4 Resultater

## 4.1 Laboratoriemålinger

### 4.1.1 Bestemmelse av lekkasjerate (f)

Resultatet fra laboratoriemålingene er presentert i figur 24, som viser forholdet mellom regnvann som dreneres over og under isolasjonslaget. Lekkasjeraten er definert som det regnvannet som kommer forbi isolasjonen i henhold til ligning 17. Lekkasjeraten er tallene i de hvite boksene, det vil si rød del av hver stolpe. For en detaljert beskrivelse av de ulike testene, se tabell 3.



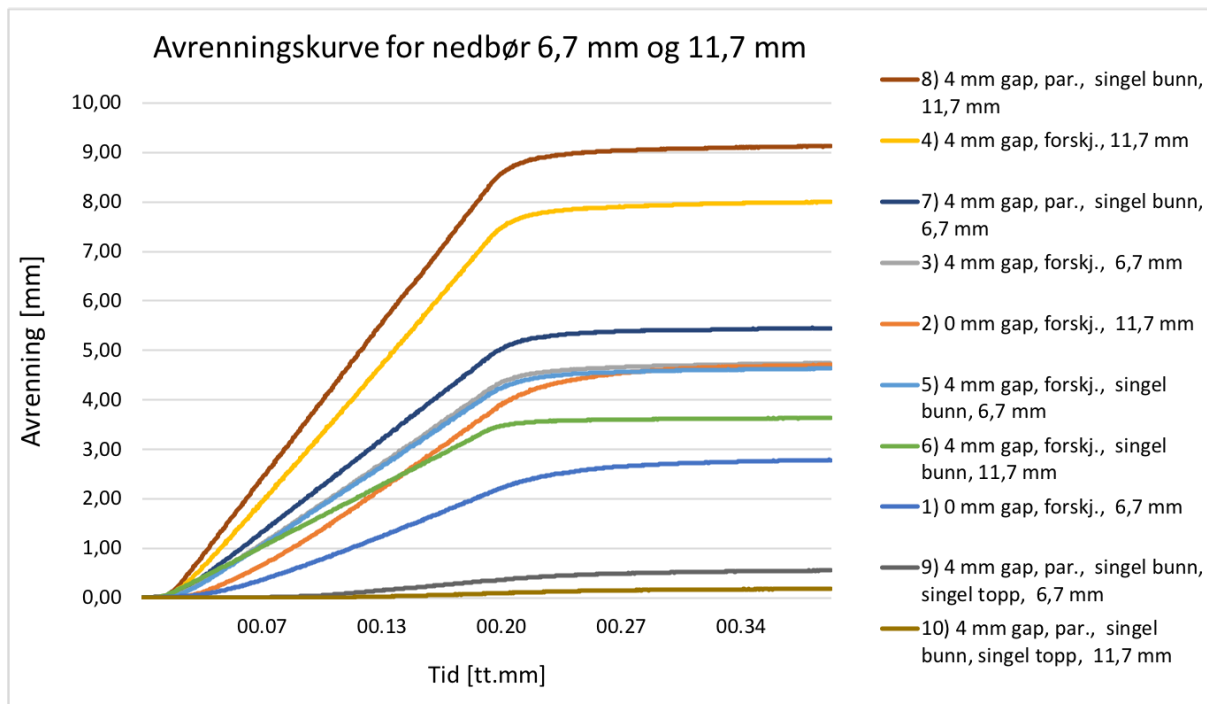
Figur 24: Lekkasjeraten (f) for de ulike testtakene. “Forsk.” står for forskjøvet plateskjøter og forkortelsen “par.” står for parallelle plateskjøter

De to første testene er det mest gunstige scenarioet, hvor det er tilnærmet 0 mm gap mellom plateskjøtene. For en nedbør på 6,7 mm og 11,7 mm gav dette en lekkasjerate på henholdsvis 39,6% og 38,6 %. Resterende tester ble utført med et gap på 4 mm mellom plateskjøtene. Testene viser store variasjoner i lekkasjeratene fra den laveste måle på 1,2 % til den høyeste på 81,7 %. Hovedfunnene fra testene er at lekkasjeraten er lavest for høyest nedbørsintensitet, og øker for økt gapvidde mellom plateskjøtene. Dessuten øker lekkasjeraten for parallelle plateskjøter sammenlignet med forskjøvet. Test 7 og 8 skiller seg derimot ut i forhold til de andre testene, hvor det er

høyst lekkasjerate for den høyeste nedbørsintensiteten. Videre blir lekkasjeraten kraftig redusert ved å introdusere et 50 mm singellag over isolasjonen.

#### 4.1.2 Avrenningskurver

I figur 25 vises avrenningskurve for nedbør på 6,7 mm og 11,7 mm tilsvarende en nedbørsintensitet på 0,3 mm/min og 0,6 mm/min. Det er bare mengden vann som kommer forbi isolasjonsjiktet som er plottet i grafene, da det er denne størrelsen som er av betydning for kjøleeffekten. Test 7 og 8 har størst prosentvis mengde regnvann som dreneres på overflaten, tett fulgt opp av test 3 og 4. Test 7 og 8 har parallelle plateskjøter og har en større lekkasjerate enn test 3 og 4 som har forskjøvet plateskjøter. Felles for test 6, 7, 8, 9 og 10 er at noen få singelsteiner under XPS'en. Dette medførte at det ble større gap noen steder, da underlaget ble mer ujevnt og mer vann trengte gjennom isolasjonslaget. Det oppstår en markant reduksjon i avrenningen for test 9 og 10. Dette skyldes et 50 mm tykt singellag som ble lagt over isolasjonen, og som for de andre testene er det størst reduksjon i lekkasjeraten for den høyeste nedbørsintensiteten.



Figur 25: Avrenningsskurve for de forskjellige testtakene

Størst lekkasjerate oppsto når isolasjonsplatene var parallelle, som kan ses ved å sammenligne test 5 (forskjøvet isolasjonsplater) og test 7 (parallelle isolasjonsplater) for en nedbør på 6,7 mm. Dette gav en differanse på 0,81 mm. Denne forskjellen er enda større for en høyere nedbørsintensitet (nedbør lik 11,7 mm): Ved å sammenligne test 6 og test 8 med henholdsvis 3,63 og 9,13 mm, gir dette en differanse på 5,5 mm.

### 4.1.3 Varmetapskorreksjon for lekkasjerate

De forskjellige lekkasjeratene målt i laboratoriet vil gi hvert sitt kjølebidrag på takkonstruksjonen. I tabell 8 blir de forskjellige  $\Delta U_r$ -korreksjonene beregnet for de ulike lekkasjeratene:

Tabell 8:  $\Delta U$ -Korreksjon for nedbør som kommer forbi isolasjonssjktet etter (Standard Norge, 2017), for lekkasjerater fra laboratoriemålingene

Test	Nedbørsintensitet [mm/dag]	Lekkasjerate [%]	f·x [W·dag/m <sup>2</sup> K·mm]	$\Delta U$ -verdi [W/m <sup>2</sup> K]	Økning i total U-verdi [%]
1	2,3	39,6	0,0190	0,032	25
2	2,3	38,6	0,0186	0,0331	24
3	2,3	71,2	0,0342	0,057	45
4	2,3	71,0	0,0342	0,057	45
5	2,3	68,7	0,0330	0,055	43
6	2,3	64,2	0,0309	0,052	40
7	2,3	81,3	0,0391	0,065	51
8	2,3	81,7	0,0393	0,066	51
9	2,3	7,8	0,0038	0,005	5
10	2,3	1,2	0,0006	0,001	1

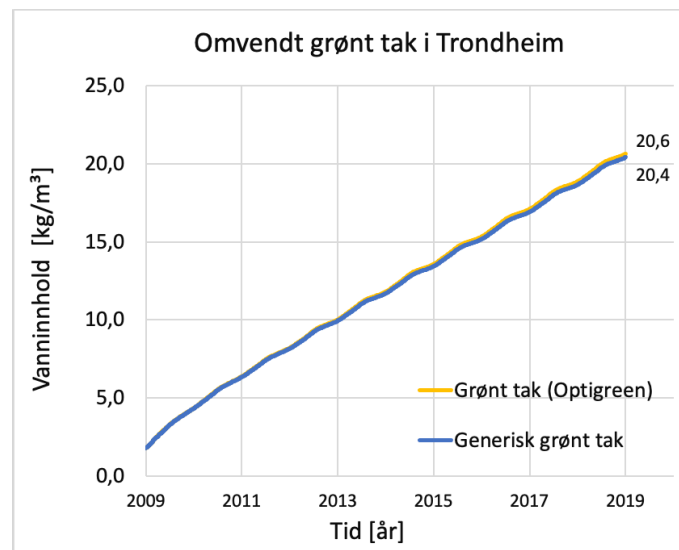
Det er også beregnet  $\Delta U_r$ -korreksjoner for samme taket, men med de foreslåtte f·x-verdiene fra (Leimer et al., 2005) presentert i tabell 9. Verdiene på f·x er avhengig av type oppbygning som kan studeres figur 4.

Tabell 9:  $\Delta U$ -Korreksjon for nedbør som kommer forbi isolasjonssjktet beregnet etter formel presentert i (Standard Norge, 2017), hvor f·x verdier er hentet fra (Leimer et al., 2005), figur 4

Lekkasjerate [%]	f·x [W·dag/m <sup>2</sup> K·mm]	Nedbørsintensitet [mm/dag]	$\Delta U$ -verdi [W/m <sup>2</sup> K]	Økning i total U-verdi [%]
100	0,0481	2,3	0,081	63
83	0,04	2,3	0,067	52
8	0,0038	2,3	0,006	5
5	0,0024	2,3	0,004	3
2	0,001	2,3	0,002	1,3
1	0,0005	2,3	0,008	0,7

## 4.2 WUFI simuleringer

Simulering av det produktspesifikke taket fra Optigreen og det generiske grønne taket er presentert i figur 26 over en tidsperiode på 10 år. Resultatet viser at disse to takmodellene har tilnærmet samme fuktopptak i isolasjonen, hvor det produktspesifikke har et vanninnhold i XPS på 20,6 kg/m<sup>3</sup> og det generiske grønne taket har et vanninnhold på 20,4 kg/m<sup>3</sup>. Videre i dette kapitlet er resultatene av grønne tak bygget opp som generiske grønne tak.



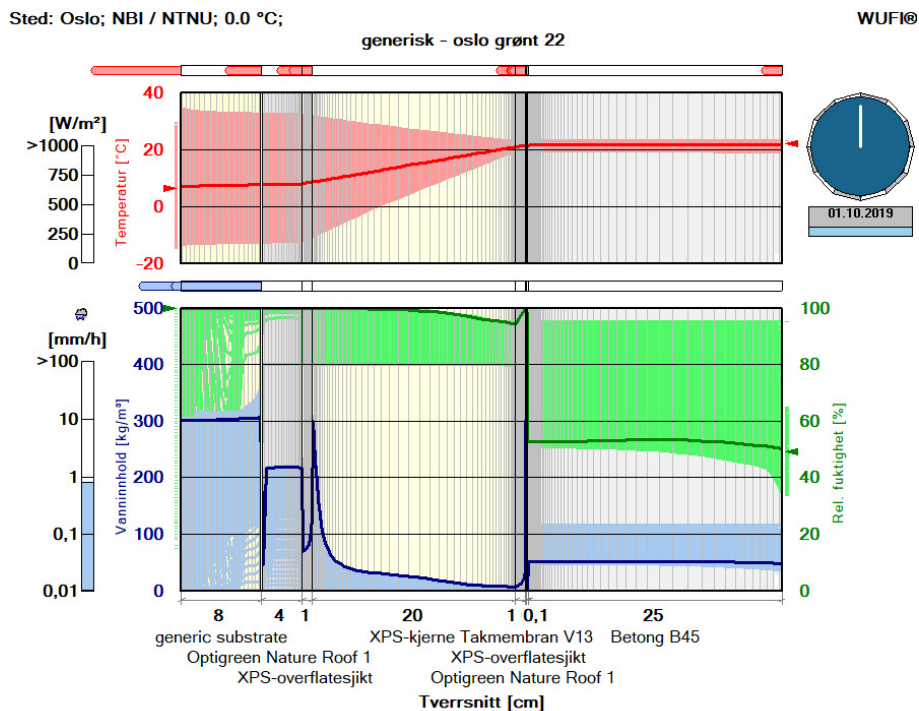
Figur 26: Fuktopptak i XPS for grønt omvendt tak for et produktspesifikk tak med aktivert eksplisitt strålingsbalanse og for et generisk hvor eksplisitt strålingsbalanse er deaktivert

### 4.2.1 Fukt- og temperatur distribusjoner gjennom omvendt tak

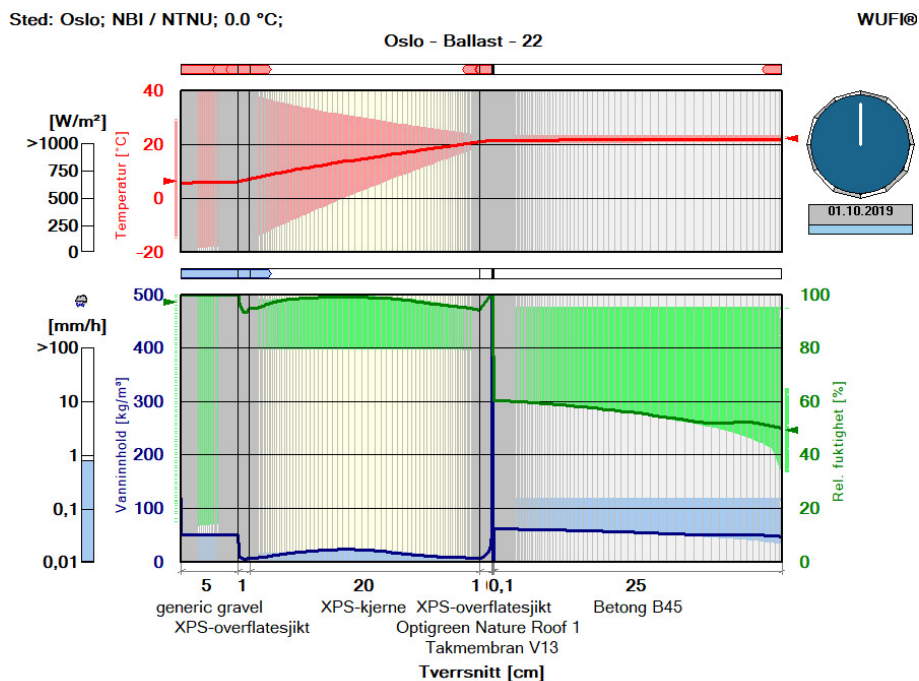
En videosimulering av et omvendt grønt tak (figur 27) og et omvendt tak med ballast (figur 28), viser sluttresultatet for en simuleringsperiode på 19 år i Oslo. Innetemperatur er satt til 22 °C. De to øverste grafene i hver figur, viser temperaturforløpet (rød) for gitt mengde solstråling i W/m<sup>2</sup>. De nederste grafene viser vanninnhold (blå) i kg/m<sup>3</sup> og nedbørsmengde (mm/h) i venstre vertikalakse, mot relativ fuktighet (grønn) i høyre vertikalakse. Horisontalaksen viser tverrsnitt av taket med de forskjellige materialtykkelsene. Mørke-blå, mørke-rød og mørke-grønn viser gjennomsnittet av henholdsvis vanninnhold, temperatur og RF. De lysere fargene viser hvor mye disse har variert gjennom den simulerte tidsperioden.

For det grønne taket forekommer det større dempninger i temperaturgradienten for vekstlaget, sammenlignet med den brattere temperaturgradienten i ballastlaget. I sommermånedene oppstår det høyere temperaturer takets overflate for ballast taket, enn temperaturen på varm side av isolasjonen: Det er en økende temperaturgradient mot uteluft. Dette oppstår også for det grønne taket, men forskjellen her er ikke like stor.

Ved å kjøre simuleringsfilmen viser det stor variasjon i RF i ballastlaget, mens for vekstlaget er variasjonen kun i det ytterste sjiktet. Ellers er det en tilnærmet konstant RF på 100 % for resten



Figur 27: Simuleringsvideo for tverrsnittet for grønt, omvendt tak i Oslo, for innetemperatur lik 22 °C



Figur 28: Simuleringsvideo for tverrsnittet for omvendt tak med ballast i Oslo, for innetemperatur lik 22 °C

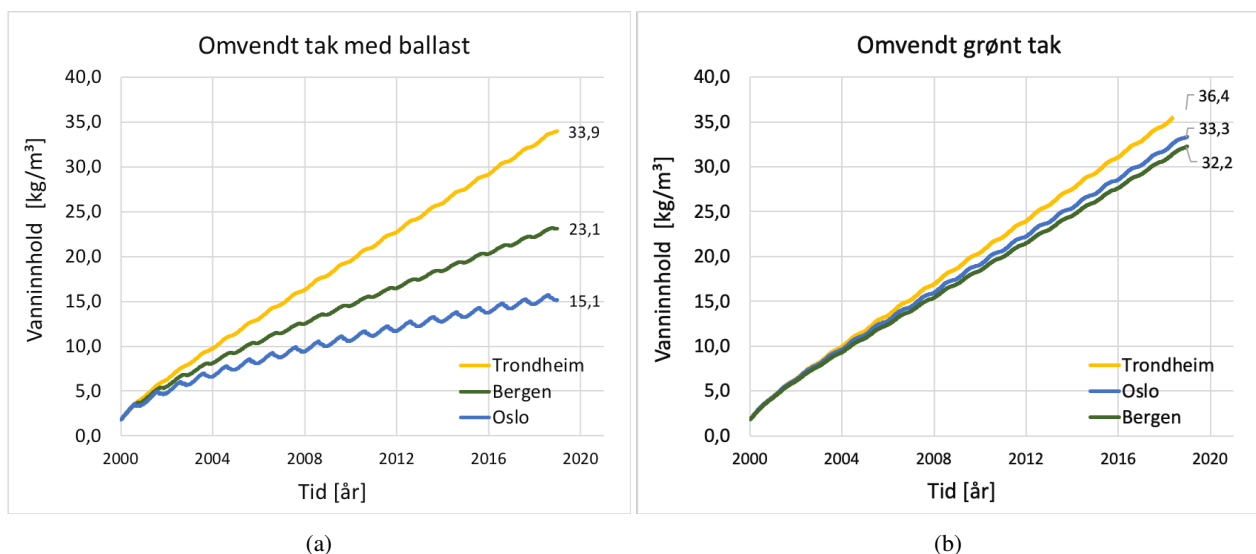
av laget. En annen viktig forskjell er det større vanninnholdet i XPS, for det grønne taket enn for ballast taket. Toppunktet i vanninnholdet heller sterkt mot kald side av isolasjonen for det grønne taket, mens for ballast taket er toppunktet i vanninnholdet tilnærmet i midten av isolasjonen.

RF i betongdekket varier mer for ballast taket, enn for det grønne taket. RF er høyere på høyere side av takmembranen for ballasttaket (ca 60 % RF) hvor det forekommer en jevn nedgang. For det grønne taket ligger derimot RF under 60 % i overgang takmembran - betongdekke, hvor den gjennomsnittlige RF er tilnærmet konstant over tverrsnittet.

Kurven for totalt vanninnhold viser at de grønne takene, samt ballast taket i Trondheim, vil ha en svært begrenset evne til selvuttørkning (se figur 54, 51 53), mens det omvendte taket med ballast i Oslo tilsynelatende har den beste uttørkningsevnen (figur 52 i vedlegg B)

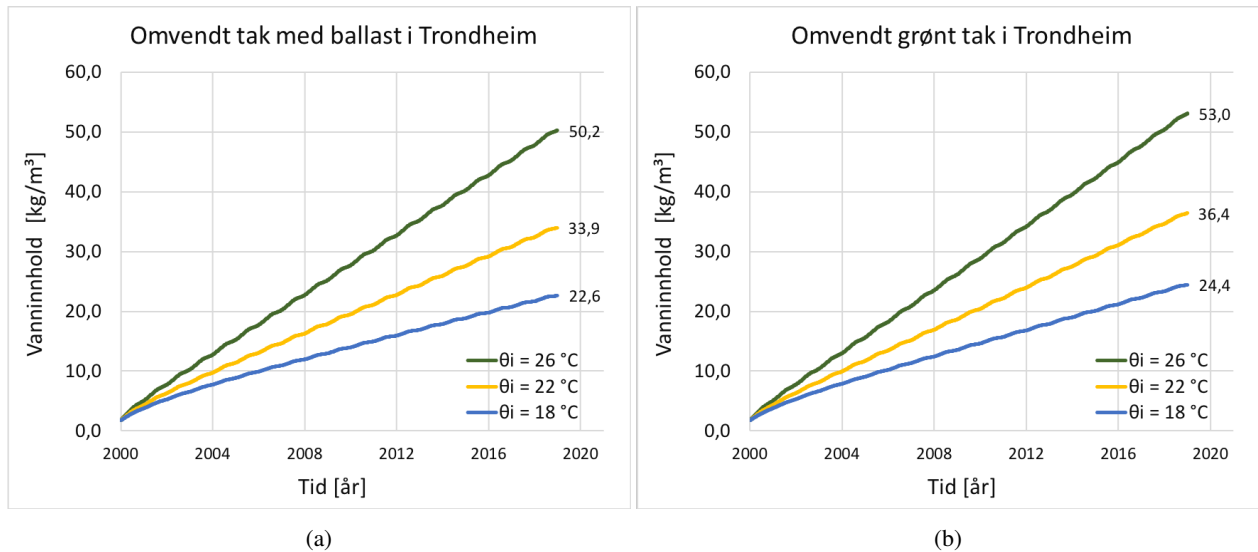
#### 4.2.2 Langsiktig simulering av vanninnhold i XPS

Simulert vanninnhold i XPS vises i figur 29a for det omvendte taket med ballast, og figur 29b for det grønne omvendte taket. Det er simulert for klimaene Oslo, Trondheim og Bergen, hvor vanninnholdet i XPS-kjernen (vertikal akse) er plottet mot en tidsperiode på 19 år (horisontal akse). For ballast taket, er det størst fuktopptak for Trondheim med  $33,9 \text{ kg/m}^3$  (3,4 Vol.-%), etterfulgt av Bergen med  $23,1 \text{ kg/m}^3$  (2,3 Vol.-%) og Oslo med  $15,1 \text{ kg/m}^3$  (1,5 Vol.-%). For det grønne omvendte taket i figur 29b er det derimot tilnærmet samme vanninnhold i isolasjonen for de forskjellige lokasjonene. Likevel er det en liten forskjell, hvor størst fuktopptak er i Trondheim med  $36,4 \text{ kg/m}^3$  (3,6 Vol.-%), etterfulgt av Oslo med  $33,3 \text{ kg/m}^3$  (3,3 Vol.-%) og til sist Bergen med  $32,2 \text{ kg/m}^3$  (3,2 Vol.-%). Det er større forskjeller i vanninnhold for ballast taket sammenlignet med det grønne taket.



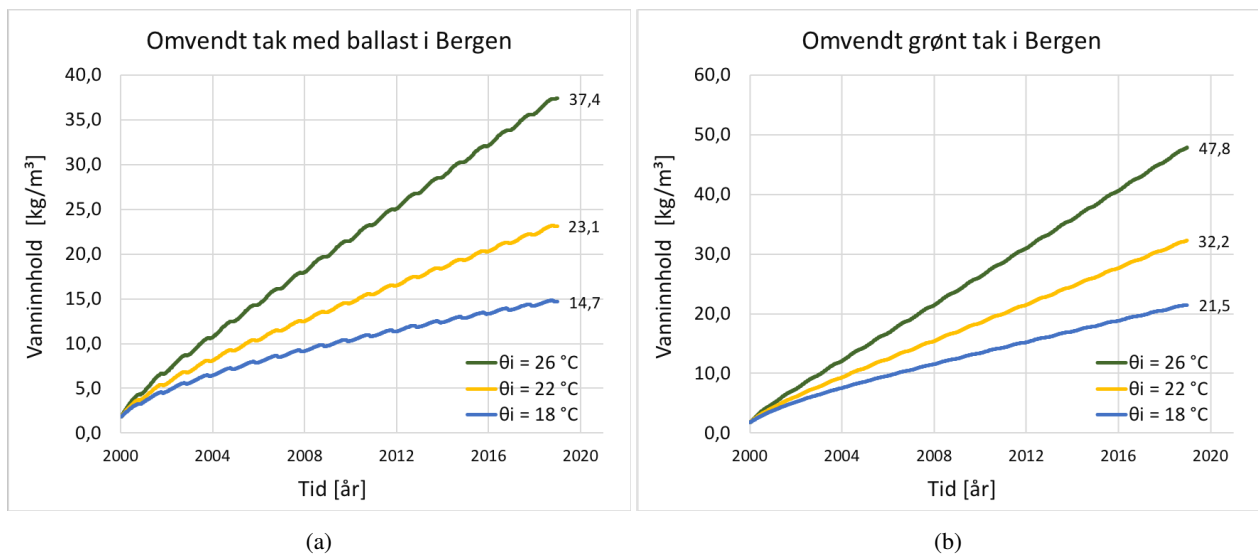
Figur 29: Simulert vanninnhold i XPS for omvendt tak med topplag av ballast (a) og som grønt tak (b), for klimaene Oslo, Trondheim og Bergen i løpet av 19 år.

Figur 30a viser for ballast taket og figur 30b for det grønne taket for Trondheim. I figurene vises vanninnholdet i XPS for forskjellige konstante innetemperaturer på 18, 22 og 26 °C. Som en kan se i figurene øker fuktopptaket for økende innetemperatur. Igjen kan en se at fuktopptaket i Trondheim for de ulike temperaturene er nesten tilnærmet lik for ballast taket og det grønne taket.



Figur 30: Simulert vanninnhold i XPS for omvendt tak med topplag av ballast (a) og som grønt tak (b), for klimaene Oslo, Trondheim og Bergen i løpet av 19 år.

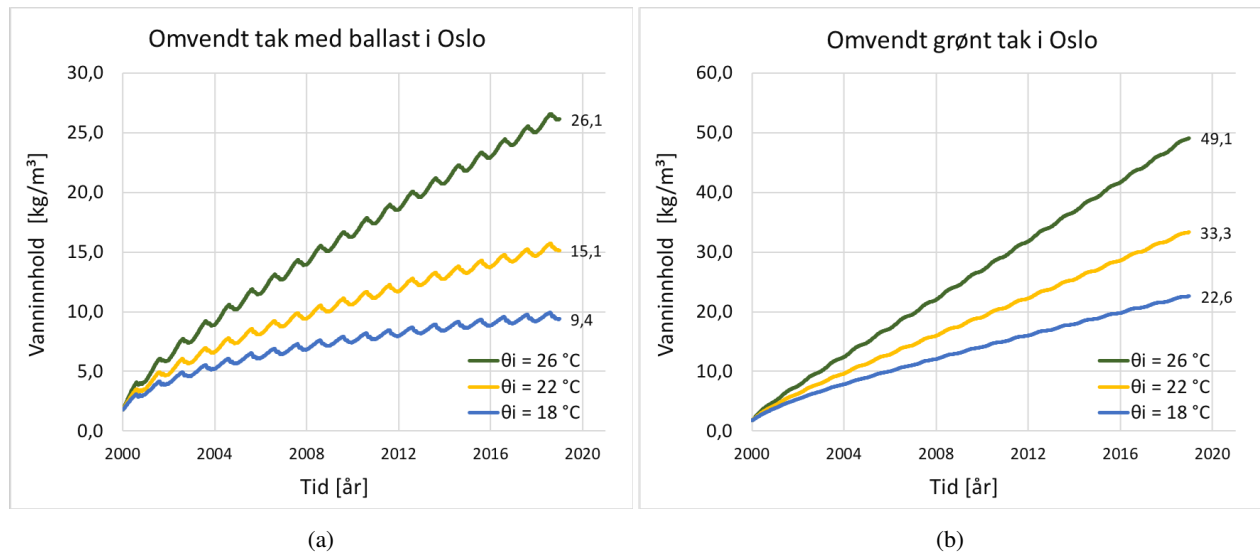
For Bergen varierer vanninnholdet i større grad mellom ballast taket i figur 31a og det grønne taket i figur 31b. Forskjellen er tilnærmet 1,0 Vol.-% for 26 og 22 °C. Forskjellen i vanninnhold for 18 °C er på 0,7 Vol.-%. En annen viktig observasjon verdt å nevne, er at det forekommer større svingninger i vanninnholdet for ballast taket, sammenlignet med det grønne taket. Denne svingningen i vanninnholdet er tydeligere for ballast taket i Bergen sammenlignet med ballast taket i Trondheim.



Figur 31: Simulert vanninnhold i XPS for omvendt tak med topplag av ballast (a) og som grønt tak (b), for klimaene Oslo, Trondheim og Bergen i løpet av 19 år.

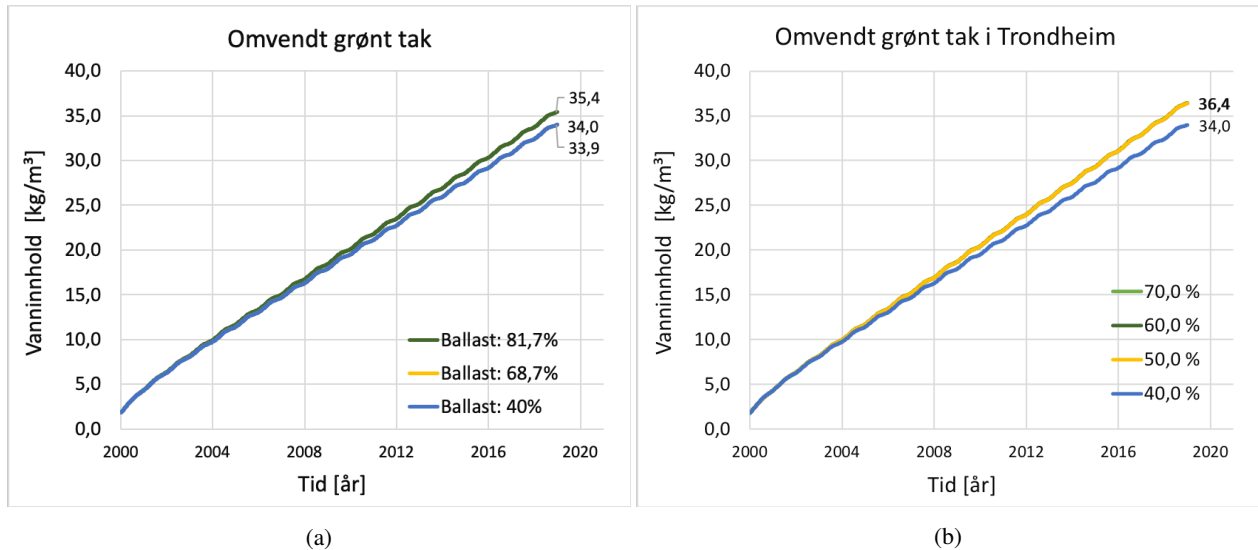


Størst variasjoner i vanninnhold forekommer for Oslo klimaet for ballast taket i figur 32a og det grønne taket i figur 32b. For en innetemperatur på 22 °C er har ballast taket i Oslo et vanninnhold på 1,5 Vol.-% og hele 3,3 Vol.-% for det grønne taket. En tilnærmet doubling i vanninnhold. Høyere innetemperaturer gir større forskjell i vanninnhold: Denne forskjellen er på 2,3 Vol.-% for en innetemperatur på 26 °C, mens for 18 °C er forskjellen på 1,4 Vol.-%. Videre kan en se at fuktopptaket svinger mer for ballast taket enn for det grønne taket. Denne svingningen er også størst for Oslo sammenlignet med Trondheim og Bergen. Innetemperaturen på 26 °C for ballasttaket gir dessuten en brattere og lengre stigning for hver syklus, sammenlignet med innetemperaturen på 18 °C.



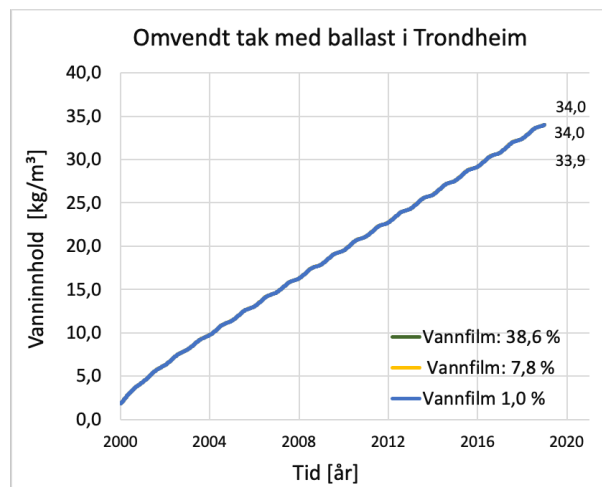
Figur 32: Simulert vanninnhold i XPS for omvendt tak med topplag av ballast (a) og som grønt tak (b), for klimaene Oslo, Trondheim og Bergen i løpet av 19 år.

I figur 33 vises vanninnhold i XPS for Trondheim med en innetemperatur på 22 °C for varierende prosentandel av nedbør lagt inn i topplaget. Ballast taket er vist i figur 33a, og det grønne taket er vist i figur 33b. Det grønne taket ble prosentandelene 50, 60 og 70 % tilført vekstlaget, og resultatet viser at disse gir nesten helt likt vanninnhold i XPS. Forskjellen er 0,01 %. 50 og 60 % ligger gjemt bak 70 %, og kan derfor ikke ses i grafen. For ballast taket i figur 33a er det noe større variasjon i fuktopptaket, hvor 81,7 % gir størst fuktopptak. Det er dog nesten helt likt fuktopptak for prosentandelene 40 % og 68,7 %.



Figur 33: Simulert vanninnhold i XPS for omvendt tak i Trondheim med en innetemperatur lik 22 °C. Figur (a) varieres prosentandel av nedbør i ballastlaget og for figur (b) varieres prosentandelen i vekstlaget til det grønne taket.

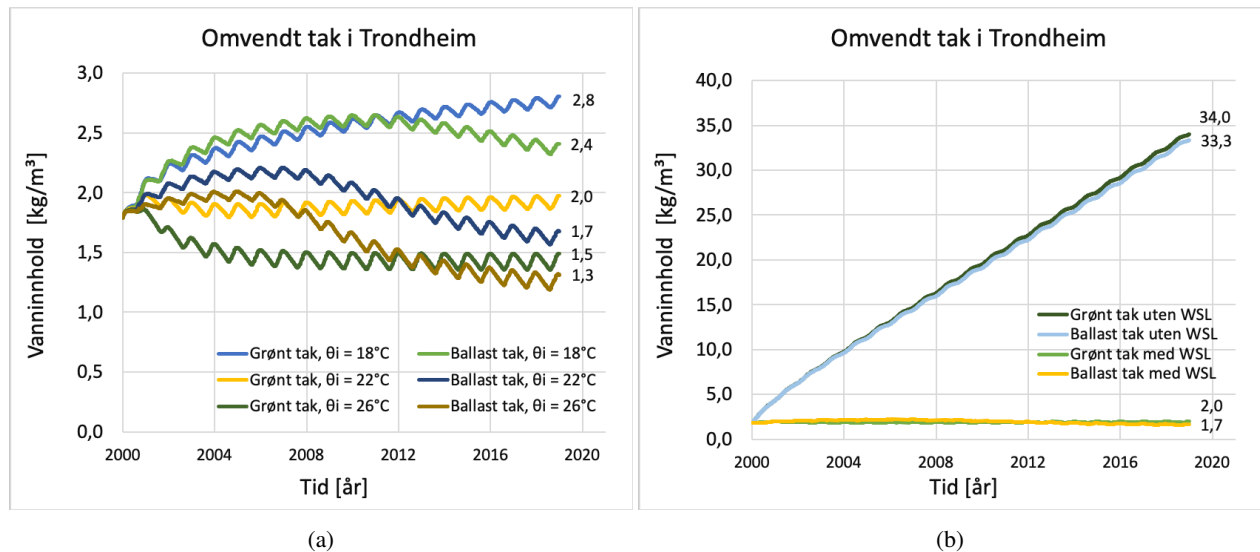
I figur 34 vises et omvendt tak med ballast i Trondheim med en innetemperatur på 22 °C. Her er forskjellige prosentandelene av nedbør lagt til i vannfilm under isolasjonen. Resultatet viser at en økning fra 1,0 % til 7,8 % og 38,6 %, ikke påvirker fuktopptaket i isolasjonen.



Figur 34: Simulert vanninnhold i XPS for omvendt tak med topplag av ballast for Trondheim med en innetemperatur lik 22 °C. Figur (a) variere prosentandel av nedbør i vannfilm

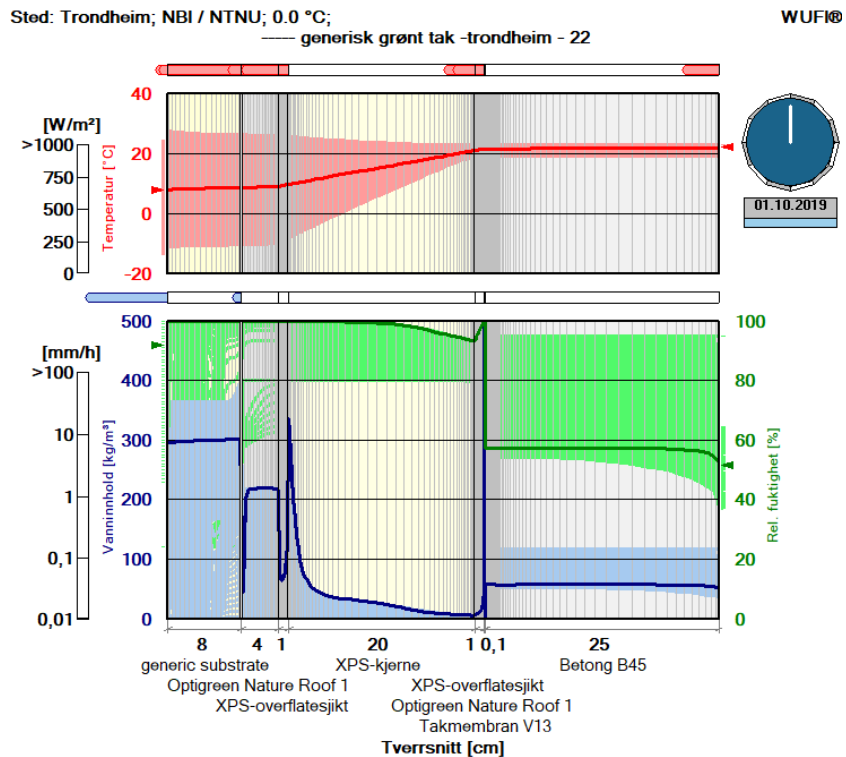
Figur 35a viser hvordan vanninnholdet i XPS påvirkes av å plassere et vannavstøtende separasjons-sjikt mellom topplaget og isolasjonen. Ved avlesning i figur 35a er det størst vanninnhold for 18 °C, hvor det grønne taket gir størst fuktopptak på 2,8 kg/m<sup>3</sup> (0,28 Vol.-%). Lavest vanninnhold forekommer for 26 °C, hvor ballast taket gir det laveste vanninnholdet på 1,31 kg/m<sup>3</sup> (0,13 Vol.-%). Oppsummert kan det påpekes at den laveste temperaturen gir en stigende trend i vanninnhold, mens den høyeste innetemperaturen gir en synkende trend. Derimot er det for en innetemperatur på 22 °C et tilnærmet konstant vanninnhold i løpet av simuleringsperioden, mens for ballastlaget er det igjen en stigende trend i vanninnholdet.

For figur 35b kan en se forskjellen med og uten WSL for de to takene, med en inntemperatur på 22 °C. For det grønne taket med WSL gir dette et vanninnhold i XPS lik 2,0 kg/m<sup>3</sup>, og uten WSL hele 34,0 kg/m<sup>3</sup> i XPS'en - en forskjell på hele 32,0 kg/m<sup>3</sup>, tilsvarende 3,2 Vol.-%.

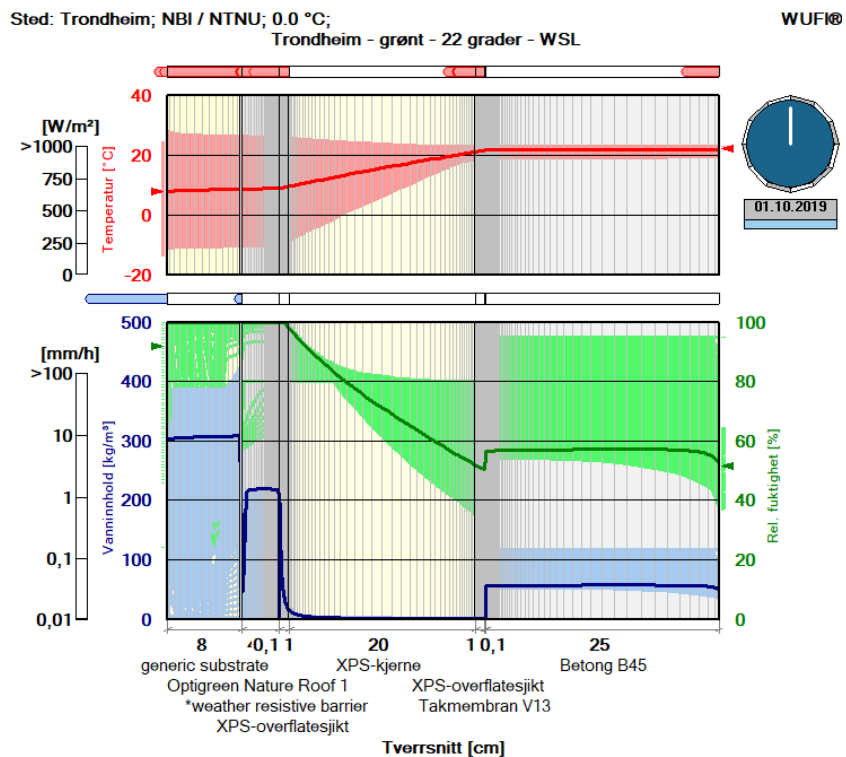


Figur 35: (a) Simulert vanninnhold i XPS for omvendt tak i Trondheim, med WSL mellom isolasjon og topplag for ulike innetemperaturer og topplag og (b) simulert vanninnhold i XPS for omvendte tak i Trondheim, med og uten WSL for innetemperatur lik 22 °C for grønt og ballast tak

Figur 36 på neste side, viser slutten av en videosimulering med WSL sjikt og figur 37 viser videosimulering uten WSL. Begge simuleringene er for et grønt tak i Trondheim, hvor innetemperatur er satt til å være 22 °C. WSL-sjiktet som er brukt i figur 37 er et vindsperre produkt ved navn “\*weather resistive barrier”, og er plassert mellom isolasjonslaget og vekstlag. Den største forskjellen mellom disse takene er RF i XPS'en: Taket med WSL-sjikt har en en synkende RF mot varm side, mens taket uten WSL har en tilnærmet 100 % RF. Dette fører til at RF under isolasjonen synker fra 100 % RF til en verdi rett under 60 %. Videre vises det at RF og vanninnhold i betongdekket er den samme for takene.



Figur 36: Simuleringsfilm for grønt, omvendt tak i Trondheim, uten WSL for innetemperatur lik 22 °C



Figur 37: Simuleringsfilm for grønt, omvendt tak i Trondheim, med WSL for innetemperatur lik 22 °C

### 4.2.3 Korreksjon av varmekonduktivitet grunnet fuktopptak i XPS

Korreksjon av fuktopptaket beregnes etter ligning 7 og ligning 8 som er å finne i teori kapittelet 2.2.6. Romdensiteten til XPS er  $40 \text{ kg/m}^3$  i tørr tilstand og etter simuleringene fikk XPS et vanninnhold i intervallet  $9,4 \text{ kg/m}^3 - 50,2 \text{ kg/m}^3$ . Det er derfor mulig å beregne en ny varmekonduktivitet basert på resultatene fra WUFI. Det er dog brukt densitet  $\text{kg/m}^3$  og ikke masse i  $\text{kg}$  for beregning av  $\omega$ , basert på at  $\omega$ -verdien kun er et forholdstall. Et eksempel på beregning av  $\omega$  for et fuktopptak på  $9,4 \text{ kg/m}^3$  er som følger:

$$\omega = \frac{m_w - m_d}{m_d} = \frac{(40 + 9,4) - 40}{40} = \frac{9,4}{40} = 0,23 \quad (18)$$

Ulike verdier av  $\omega$  kan ses i tabell 10 og 11 med tilhørende korreksjoner av varmekonduktivitet. Største endringen for varmekonduktiviteten er for det største fuktopptaket på  $53 \text{ kg/m}^3$  for omvendt grønt tak i Trondheim for innetemperatur på  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ , som gir en  $2,7 \%$  økning i konduktiviteten. Minste fuktopptaket er på  $9,4 \text{ kg/m}^3$  for omvendt tak med ballast i Oslo med en innetemperatur på  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ : en økning på  $0,5 \%$  i konduktiviteten. Dette gir en tilsvarende økning i U-verdien til taket, henholdsvis  $2,5 \%$  og  $0,3 \%$  for henholdsvis største og minste fuktopptaket. Ved innføring av et vannavstøtende separasjonssjikt medførte dette til et svært lavt vanninnhold i XPS'en som ikke vil påvirke varmekonduktiviteten.

Tabell 10: Korreksjon av varmekonduktivitet for simulert vanninnhold for omvendt tak med ballast

Simulering	Innetemperatur [ $^\circ\text{C}$ ]	Fuktopptak [ $\text{kg/m}^3$ ]	Vanninnhold ( $\omega$ )	Deklarert varmekonduktivitet [ $\text{W/mK}$ ]	Varmekonduktivitet av vått materiale [ $\text{W/mK}$ ]	$\lambda_w/\lambda_d$
Ballast tak Trondheim	18	22,6	0,57	0,03	0,0303	1,011
	22	33,9	0,84	0,03	0,0305	1,017
	26	50,2	1,26	0,03	0,0308	1,025
Ballast tak Bergen	18	14,7	0,37	0,03	0,0302	1,007
	22	23,1	0,58	0,03	0,0303	1,012
	26	37,4	0,93	0,03	0,0306	1,019
Ballast tak Oslo	18	9,4	0,23	0,03	0,0301	1,005
	22	15,1	0,38	0,03	0,0302	1,008
	26	26,1	0,65	0,03	0,0304	1,013

Tabell 11: Korreksjon av varmekonduktivitet for simulert vanninnhold i XPS for omvendt, grønt tak

Simulering	Inne- temperatur [°C]	Fuktopptak [kg/m <sup>3</sup> ]	Vanninnhold ( $\omega$ )	Deklarert varmekonduktivitet [W/mK]	Varmekonduktivitet av vått materiale [W/mK]	$\lambda_w/\lambda_d$
Grønt tak Trondheim	18	24,4	0,61	0,03	0,0304	1,012
	22	36,4	0,91	0,03	0,0305	1,018
	26	53,0	1,33	0,03	0,0308	1,027
Grønt tak Bergen	18	21,5	0,54	0,03	0,0303	1,011
	22	32,2	0,80	0,03	0,0305	1,016
	26	47,8	1,19	0,03	0,0307	1,024
Grønt tak Oslo	18	22,6	0,56	0,03	0,0303	1,011
	22	33,3	0,83	0,03	0,0305	1,017
	26	49,1	1,23	0,03	0,0307	1,025

## 5 Diskusjon

Hensikten med denne oppgaven er å se på kjøleeffekten av regn- og smeltevann i omvendte takkonstruksjoner, hvor følgende forsknings spørsmål ble definert:

1. Hvordan påvirkes lekkasjeraten i omvendte tak av isolasjonslagets oppbygging og utførelse?
2. Hvilken betydning har lekkasjeraten for denne kjøleeffekten?
3. Hvordan kan programvaren WUFI benyttes til å simulere regnkjøling av omvendte tak?
4. Hvordan bør omvendte tak bygges for å redusere kjøleeffekten av regn- og smeltevann?

Følgende underkapittel har som hensikt å drøfte hver av disse forsknings spørsmålene i samme rekkefølge

### 5.1 Lekkasjerate i omvendte tak

Resultatene fra laboratoriemålingene, presentert i kapittel 4.1 viser en stor variasjon av målte lekkasjerater. Som forventet gav det mest ideelle tilfelle av testene, hvor det var tilnærmet 0 mm gap mellom platene, en mye lavere lekkasjerate sammenlignet med 4 mm gap. For 0 mm gap mellom platene, gav en lekkasjerate på 39,6 % (test 1). Ved et 4 mm gapet mellom platene, gav dette en lekkasjerate på 71,2 % (test 3) - tilsvarende en økning på hele 32 %. Dette viser at en skjodesløs legging av isolasjonsplatene har en stor betydning for lekkasjeraten, som vil igjen påvirke kjøleeffekten.

Videre kan en observere at en økt nedbørsintensitet på 11,7 mm gir lavere lekkasjerate, i forhold til den lavere på 6,7 mm. Dette skyldes at en høyere nedbørsintensitet gir en økt hastighet på vannet som treffer overflaten, noe som frakter den hurtigere mot takrennen, og dermed blir det mindre tid på å finne "åpningene" i isolasjonskjøtene. Dette samsvarer også med resultatene i forskningslitteraturen presentert i 2.4 Det er likevel et avvik for test 7 og 8, hvor lekkasjeraten på 81,7 % for nedbørsintensitet lik 11,7 mm er høyere enn for 6,7 mm med lekkasjeraten 81,3 %. Hva dette skyldes er usikkert.

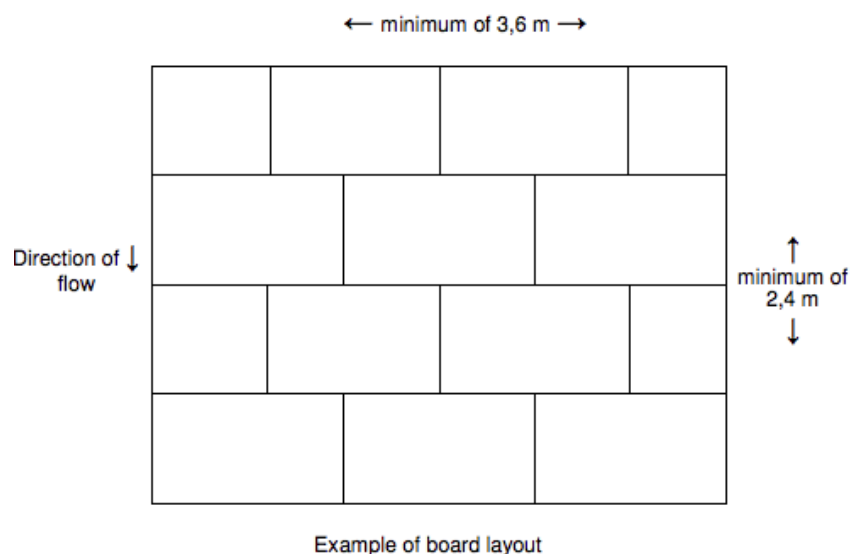
Videre ble det sammenlignet lekkasjerater for isolasjonsplater som er forskjøvet med ikke forskjøvet. For disse testene var det også plassert noen få singelsteiner under isolasjonen, for å simulere noe som kunne forekommet i praksis. Singelsteinene tilførte ujevnheter i isolasjonens underlag, som resulterte i enda større gap mellom isolasjonsplatene (se figur 68). Resultatet viser at lekkasjeraten øker betraktelig ved å legge isolasjonsplatene med parallelle skjøtekanter. Videre er betydningen av å ha forskjøvet plateskjøter påvirket av nedbørsintensitet: Ved å sammenligne test 6 (forskjøvet) og test 8 (parallell) for nedbørsintensitet på 11,7 mm, gir dette en differanse på hele 5,5 mm. Til sammenligning gir den lavere nedbørsintensiteten på 6,7 mm for test 5 (forskjøvet) og test 7 (parallell) en forskjell på 0,82 mm.

Når et 50 mm lag med singel legges over isolasjonen, forekommer det en reduksjon på 80,5 % i lekkasjeraten for nedbørsintensitet 11,7 mm (test 8 og 10). Denne markante reduksjonen i lek-

kasjeraten er grunnet av vekten singellaget, som førte til at isolasjonsplatene ble presset ned på stålplaten. Dette medførte at det ikke var mulig for regnvannet å strømme under isolasjonen og vannet som kom i isolasjonsskjøtende, ble derfor liggende helt i ro.

En slik stor reduksjon i lekkasjeraten var ikke et forventet resultat, da man ville trodd det motsatte; at mer av regnvannet ville ble "absorbert" av singelen og deretter ført ned gjennom isolasjonslaget. Årsaken til den store reduksjonen i lekkasjeraten, skyldes trolig det altfor plane underlaget. Det ble antatt at en takmembran ikke ville påvirke lekkasjeraten, og derfor ble det ikke lagt en takmembran under isolasjonslaget. Effekten av singellaget ville kanskje blitt mindre om underlaget ikke var like plant. Skulle forsøket blitt gjort på nytt, ville nok en takmembran med sammensveiste skjøtekanter bidratt til å lage et litt mer ujevnt underlag. En ville kanskje da observert at det ikke oppstår like stor reduksjon i lekkasjeraten, som resultatet viser. Derfor burde en takmembran vært installert under isolasjonslaget i laboratoriemålingene.

Videre burde laboratorieforsøket vært utført i henhold til veiledning (EOTA, 2010) vedlegg C, som gir en detaljert beskrivelse for hvordan måle lekkasjeraten forbundet med omvendte tak i laboratorium. Denne veiledningen var undertegnede ikke klar over eksisterte, når laboratoriemålingene ble planlagt i starten av semesteret. I følge veiledningen skal minste dimensjon på testaket være 3,6 m x 2,4 m som passer med standard størrelse på isolasjonsplater på 1200 x 600 mm. Videre skal isolasjonsplatene legges med en forskyvning, ikke bare vertikalt med også horisontalt, som vist i figur 38. En horisontal forskyvning i tillegg, vil nok bidra til en enda større reduksjon i lekkasjeraten. For en videre beskrivelse av laboratoriemålingene, se (EOTA, 2010).



Figur 38: Horisontal orientering av isolasjonsplater, sett ovenifra (EOTA, 2010)



## 5.2 Lekkasjeratens betydning for kjøleeffekten

Laboratorieresultatene viser at lekkasjeratene er svært avhengig av hvordan isolasjonssjiktet er bygget opp, som igjen vil påvirke størrelsen på  $\Delta U_r$ -korleksjon. Tabell 8 viser at den største lekkasjeraten på 81,7 % gir en  $\Delta U_r$ -korleksjon på 0,066 W/m<sup>2</sup>K som tilsvarer en økning takets U-verdi på hele 51 % - altså en dobling i U-verdi. Dette ekstra varmetapet er det derfor viktig å ta hensyn til i prosjekteringen. Til sammenligning gir det mest ugunstige tilfelle med en lekkasjerate på 100 %, en økning i takets U-verdi på 63 % (tabell 9), i henhold til (Leimer et al., 2005). Ved å plassere et WSL sjikt gir dette en lekkasjeraten helt ned til 1 - 8 %. Dette gir kun en økning i U-verdi fra 0,7 - 5 %.

Det må påpekes at  $f \cdot x = 0,04$  eller  $0,048$  gjelder for ett lag med XPS med butte skjøter. I laboratoriemålingene ble det brukt to lag med 50 mm XPS med fals, med forskjøvede kanter. Dette skulle tilsi en langt lavere lekkasjerater enn hva som ble målt. Det målt en lekkasjerate helt opp til 81,7 %. Grunnen til dette skyldes trolig at de fleste testene ble målt uten singellag over isolasjonen. Denne effekten kombinert med at det ikke var en takmembran under isolasjonen, bidro begge til et mindre riktig bilde av virkeligheten.

Helt til slutt må det påpekes at beregning av  $\Delta U_r$ -korleksjon ved bruk av ligning 11 hentet fra (Standard Norge, 2017) kan fravike fra virkeligheten, både i gjennomsnittsverdi, men også at en U-verdi gjennom taket aldri er stasjonær, men vil variere i takt med utebetingelsene, som nevnt i kapittel 2.1.1. Videre er  $f \cdot x$ -verdiene hentet fra (Leimer et al., 2005) og det kan også tenkes at disse verdiene vil variere etter hvem som utfører laboratorieforsøket og hvordan taket er bygget opp. Det er derfor mange faktorer som spiller inn i bestemmelsen av dette ekstra varmetapet, som en bør være klar over.

## 5.3 WUFI simuleringer

WUFI kan være et nyttig verktøy for å studere hvordan omvendte tak påvirkes av regnkjølingen. For å simulere et omvendt tak kan man tilføre en vannfilm under isolasjonsjiktet, som tar hensyn til lekkasjeraten gjennom isolasjonslaget. Videre bør WUFI modellen ideelt sett, baseres på feltmålinger fra samme klima som ønskes studeres. Dette er fordi faktorer som solstråling, nedbørsmengde og utetemperaturer vil variere for forskjellige klima, som igjen vil påvirke den hygrotermiske oppførselen i omvendte tak. Ved å utføre feltmålinger for en gitt måleperiode, kan en WUFI modell tilpasse for samme periode. Når feltmålinger og WUFI modell samsvarer, vil en utvidet simuleringsperiode, utover måleperioden, mest sannsynlig også stemme overens med virkeligheten. På denne måten er det mulig å gjøre en langsiktig estimat av fuktopptaket i XPS, som igjen vil bidra til å utføre riktig korreksjoner for økt varmekonduktivitet.

En sammenligning av det generiske grønne taket og det produktspesifikke taket med produkter fra Optigreen, viser ubetydelige forskjeller i fuktopptaket (figur 26). Det grønne taket med produkter fra Optigreen tar hensyn til overkjøling om natten ved at eksplisitt strålingsbalanse er aktivert (se kapittel 2.5.2.2). For det generiske er denne deaktivert, og overkjølingen tas hensyn til ved en forenklet metode (se kapittel 2.5.2.1). Analysing av resultatene fra det produktspesifikke taket fra Optigreen, viser et avvik i fuktbalansene i en størrelsesorden på ca 10. Dette kan være årsaken til at disse to er nokså like. En annen mulig forklaring er at det ikke er betydelige forskjeller mellom å ta hensyn til overkjøling ved eksplisitt strålingsbalanse, sammenlignet med den forenklete metoden.

### 5.3.1 WUFI film av omvendte tak

Videosimuleringene for det omvendte taket med ballast og det grønne taket viser at det er tydelige forskjeller i temperatur- og fuktforholdene. Det forekommer blant annet en større demping av temperaturen i vekstlaget for det grønne taket i figur 27. Temperaturen varierer innenfor et smalere intervall sammenlignet med ballast i figur 28. Dempningen i temperaturgradienten for vekstlaget skyldes vekstlagets høyere isoleringsevne, som gjør at den blir mindre påvirket av uteluftens temperatursvingninger. Ballastlaget derimot har en lavere isoleringsevne og følger i større grad utetemperaturens svingninger. Vekstlagets isolerende egenskaper vil føre til at temperaturen på overflaten til XPS'en på kald sideer høyere enn for ballasttaket. Dette gir en lavere temperaturgradient gjennom det grønne taket. På grunn av at den største drivkraften bak fukttransport i XPS skyldes vanndampdiffusjon, som styres av forskjell i vanndamptrykk, vil drivkraften bak fukttransport inn i XPS være større for ballasttaket, i forhold til det grønne taket. Dette kan være en av grunnene til at det er mer fukt i XPS for singel taket enn for det grønne taket.

Videre er det forskjeller i vanninnhold i XPS for de forskjellige takene. Et lavere fuktinnhold i XPS for ballasttaket skyldes at ballastlaget har en lavere vannansamlingskapasitet kombinert med en lavere vanndampmotstand, som medfører til en hurtigere uttørkning av mindre mengder vann, i perioder med høye utetemperaturer og økt solstråling. Vekstlaget kan derimot større vannansamlingskapasitet, i tillegg til en høyere vanndampmotstand, som gir dårligere uttørkningsmuligheter. Dette fører til at vekstlaget forblir fuktig året rundt med tilnærmet 100 % RF. Unntaket er det yt-

terste sjiktet av vekstlaget, hvor RF vil varierer i større grad. Når XPS utsettes for et konstant fuktig miljø, både over og under isolasjonen, vil dette gi økt fuktopptak i XPS.

Kurvene for totalt fuktinnhold viser bekrefter overnevnte årsaker: De grønne takene har en svært begrenset evne til selvuttørkning i forhold til tak med ballast (se figur 51 og 52 i vedlegg B). I midlertid viser grafen for total fuktinnhold for omvendt tak med ballast, en del lavere uttørkning for Trondheim, sammenlignet med Oslo (se figur 53). Årsaken til dette skyldes at det er mindre regn og mer sol i Oslo enn i Trondheim.

Vinterstid vil den store temperaturgradienten mellom inne- og uteluft øke den oppadrettede fukttransporten i taket. Spesielt mye fukt vil diffundere inn i XPS'en, ettersom det alltid er en vannfilmen under isolasjonslaget. I sommerhalvåret går derimot deler av fuktmengden gå tilbake til nedre del av XPS'en - en nedadrettet fukttransport. Årsaken til dette er høye temperaturer på takoverflaten, som øker damptrykkforskjeller mellom øvre og nedre del av isolasjonslaget, som fører til at fuktinnholdet fordeles mer mot midten og nedre delen av XPS'en. Denne effekten er størst for ballasttaket, hvor figur 28 viser en brattere temperaturgradient over ballastlaget.

### 5.3.2 Fuktopptak i XPS

Som allerede observert i simulerings-videoene, er fuktopptaket i XPS størst for det grønne taket. Det samme viser resultatgrafene for vanninnhold i XPS over tid for de to tak typene. For det grønne taket i figur 29b, er det størst vanninnhold for Trondheim (3,6 Vol.-%) etterfulgt av Oslo (3,3 Vol.-%) og tilslutt Bergen (3,2 Vol.-%). Årsaken bak et høyere vanninnhold for Oslo enn for Bergen, kan skyldes en høyere temperaturgradient for taket i Oslo. Temperaturgradienten blir større når det er større temperaturforskjell mellom inne og ute, og medfører en tilsvarende økning i damptrykkgradienten, som fører videre til økt oppadrettet vandampdiffusjon fra vannfilmen. I Trondheim forekommer det størst vanninnhold i XPS, grunnet den uheldige kombinasjonen av lave utetemperaturer og mye regn (se klimadata i tabell 7).

For kystklimaene Trondheim og Bergen, med mildere vintre sammenlignet med Oslo, vil gi en reduksjon i temperaturgradient over taket i vinterhalvåret. Dette taler for en lavere vandampdiffusjon inn i XPS'en fra vannfilmen, siden det er mindre temperaturforskjeller mellom inne og ute. På den andre siden vil fukttilførselen ovenifra være større for kystklima (større nedbørsmengder), som vil bidra til å kompensere for denne lavere vandampdiffusjonen underfra.

Det forekommer en større variasjon i vanninnhold i XPS for ballast taket for de ulike klimaene, enn for det grønne taket. Som forventet forekommer det størst fuktopptak for Trondheim (3,3 Vol.-%). Årsaken til at det er større vanninnhold for Bergen (2,3 Vol.-%) enn for Oslo (1,5 Vol.-%), skyldes større nedbørsmengder i Bergen, som reduserer perioder med uttørkningsmulighet. Dette er også i tråd med at det forekommer større svingningene i vanninnholdet for Oslo kurven (figur 29a, som tilsier at det er perioder hvor uttørkning mot uteluft er stor, da det regner mindre i Oslo. Videre gjelder denne begrunnelsen også for at det er størst forskjell i fuktopptak for Oslo og minst i Trondheim for de to takene. Videre viser grafene at fuktopptaket øker for økende innetemperatur, hvor innetemperatur lik 26 grader gir høyest fuktopptak. Dette stemmer godt overens med simuleringene utført av (Zirkelbach et al., 2013). Videre kan det påpekes at det er minst svingninger

i fuktopptaket for den laveste innnetemperaturen, på grunn av reduksjonen i temperaturgradienten som gir en tilsvarende reduksjon i damptrykkgradienten.

I utgangspunktet var det tenkt at forskjellige lekkasjerater ville påvirke fuktopptaket i XPS'en, hvor de ulike lekkasjeratene fra laboratorie skulle bli brukt. Derimot når det kom til stykke, ble det mindre logisk å tilføre lekkasjeratene fra laboratorie som fuktilder i takkonstruksjon i WU-FI. Dette er fordi 40 % i topplaget og 1 % av nedbøren i vannfilm under isolasjonen ikke har en sammenheng med hverandre, hvor  $40\% + 1\% \neq 100\%$ . Derfor er det ikke en sammenheng mellom prosentandelen tilført topplaget og vannfilmen, men lekkasjeratene fra laboratoriemålingene, ble likevel brukt for å se hvordan dette ville påvirke fuktopptaket. Tilføring av en større prosentandel av nedbør i topplaget for det grønne omvendte taket og ballast taket, gav ikke store endringer i fuktopptaket. Årsaken til dette skyldes at materialenes kapasitet til å ta opp vann begrenses til fri vannmetning (vannet fyller opp hele porevolumet i materialet, og kun det), og ved å tilføre mer mengde regnvann vil ikke føre til en økt vannansamling for topplagene. Dessuten bidro heller ikke en økt prosentandel av nedbør i vannfilm, til noe videre økning i fuktopptak i XPS'en. Dette skyldes trolig at . . . Likevel så vil nok et større vannvolum som kommer forbi isolasjonen, ha en betydning for

Ved å plassere et WSL sjikt mellom topplag og isolasjon, vil dette føre til at mesteparten av vannet dreneres på oversiden av sjiktet mot taksluk, slik at vannet ikke kommer forbi isolasjonslaget. I denne forbindelse ble derfor vannfilmen fjernet, som i utgangspunktet tilførte et fuktig miljø på 100 % RF. Fjerning av vannfilmen førte til en betraktelig reduksjon i RF for dette området, som igjen gav en reduksjon i vanndampdiffusjon inn i XPS'en, og videre i et lavere vanninnhold i XPS, som konsekvens.

Med et WSL sjikt forekommer det største fuktopptaket i XPS for det grønne taket med den laveste innnetemperaturen (18 °C). Videre forekommer det laveste fuktopptaket for ballast taket, med en innnetemperatur på 26 grader °C. En forklaring på dette kan skyldes at lav innnetemperatur fører til at luften under isolasjonen holder dårligere på fuktigheten, som resulterer i en økt RF, som videre gir et større bidrag av vanndampdiffusjon inn i XPS. En høyere innnetemperatur gir en lavere RF under isolasjonen, som gir en lavere oppadrettet vanndampdiffusjon. En annen forklaring kan være at temperaturgradienten gjennom taket er høyest for 26 °C, som gir størst oppadrettet vanndampdiffusjon og uttørkning mot uteluft, mens lavest innnetemperatur ikke gir stor nok uttørkning mot uteluft. En innnetemperatur på 22 °C, gir derimot et tilnærmet konstant vanninnhold i XPS for det grønne taket, mens for ballast taket forekommer det en reduksjon i vanninnhold over tid. Basert på forklaring nr 2. skyldes dette ballastlaget sin lavere dampmotstand som gir høyere uttørkningsevne mot uteluft. Dette resulterer i at XPS'en tørker mer ut mot uteluft, mens for vekstlaget med dens høyere vanndampmotstand, gir enda dårligere uttørkningsevne.

Oppsummert var det høyeste fuktopptaket i XPS for det omvendte taket med ballast på 5,0 Vol.-%, lokalisert i Trondheim. Til sammenligning ble dette simulert til å være på rundt 2 Vol.-% (figur 14) i Holzkirchen (Zirkelbach et al., 2013), ved avlesning av graf for samme simuleringsperiode. Egne resultater gir altså et høyere fuktopptak for det omvendte taket med ballast for klimaet i Trondheim. Videre var det høyeste fuktopptaket for det grønne omvendte taket i Trondheim på 5,3 Vol.-%, som til sammenligning på ca 8 Vol.-% for Holzkirchen (figur 14). Altså er det et høyere fuktopptak i det grønne taket i Holzkirchen. Ved å studere tabell 7 viser at det er tilnærmet samme nedbørsmengder

for Trondheim og Holzkirchen, mens utetemperaturene varierer i et større intervall for Holzkirchen, som bidrar til en periodevis høyere temperaturgradient gjennom taket. Dette kan være grunnen til at det er høyere simulert fuktopptak for Holzkirchen.

Videre så er det større forskjeller i fuktopptaket mellom ballast taket og det grønne taket i Holzkirchen (forskjell på ca 6 Vol.-%), enn egne simuleringer for Trondheim (forskjell på 0,3 Vol.-% for Trondheim og 1,8 Vol.-% for Oslo). Grunnen til dette er uvisst, men kan skyldes enten feil sammenligningsgrunnlag mellom ballast taket og det grønne taket: Førstnevnte tar hensyn til overkjøling ved eksplisitt strålingsbalanse, mens det grønne tar hensyn til overkjølingen på en forenklet metode. Hadde det vært mer tid til å fikse vannbalansen for det produktspesifikke taket, kunne denne takmodellen vært brukt istedenfor. Da kunne kanskje forskjellen i fuktopptaket vært større, og mer i tråd med simuleringresultatene fra Holzkirchen.

### 5.3.3 Forenkling og usikkerhet i forbindelse med WUFI modellen

De utførte beregningene i WUFI har i større eller mindre grad flere usikkerhetsfaktor tilknyttet seg. De forskjellige faktorene er:

- Begrensning i beregningsmodellen
- Unøyaktig eller utilstrekkelig inngangsdata
- Forenklinger i modellen

En beskrivelse av beregningsmodellen er allerede blitt presentert i kapittel 2.5.3, hvor det eksisterer begrensninger tilknyttet forenkling i den matematiske modellen. Dette kan gi utslag i resultatene ved at modellen vil avvike i forhold til reell situasjon. Videre vil for mange konvergensfeil tyde på at det eksisterer uheldig oppdeling av rutenettet som gjør at løsningene på ligningene ikke konvergerer, og videre gi en uheldig vannbalanse. Dette var årsaken til at det produktspesifikke taket fra Optigreen ikke ble valgt. Det generiske grønne taket hadde derimot 0 konvergeringsfeil og en god vannbalanse (balanse 1 = balanse 2).

Beregningsmodellen tar utgangspunkt i en rekke materialdata for å beregne fukt og temperaturforholdene i bygningskomponentene. Utilstrekkelig kunnskap om materialdata kan ha en stor påvirkning på resultatene. I denne beregningene eksisterer det stor usikkerhet i resultatene, da valgte materialdata er tilpasset resultater fra feltmålinger utført i Holzkirchen. Ideelt skulle WUFI simuleringene presentert i denne oppgaven, vært basert på materialdata hentet fra egne feltmålinger i Norge, med samme fremgangsmåte som i (Zirkelbach et al., 2013): Simulering av temperatur og fuktoppførsel i topplag og under isolasjonen for en periode, bør tilpasses måledata fra feltmålinger (temperatur og RF) for samme måleperiode. Når disse to samsvarer (som det for eksempel gjør i figur 11), kan en simulering av et mer langsiktig fuktopptak, bestemmes med større sikkerhet. Da dette ikke var mulig i denne oppgaven, blir hensikten med resultatene mer for å illustrere trendene og forskjell i trendene i fuktopptaket.

Det må også nevnes forenklingen i form av å ta hensyn til at det dannes en vannfilm under isolasjonssjiktet, samt forenklingen ved at denne tas bort når et WSL sjikt innføres. Ved å ta bort vannfilmen helt, gir en mindre god beskrivelse av virkeligheten. Det har blitt utført både feltmålinger

og laboratorie målinger, som viser at en prosent mellom 1 % - 10 %, likevel vil kunne komme forbi dette nye sjiktet. Dette skyldes materialet legges løst over isolasjon med overlappende skjøter og dermed vil det kunne komme vann mellom skjøtene (Leimer et al., 2005), (Vacek and Matějka, 2016b) og (Merkel, n.d.). Det er likevel interessant å se forskjellen med og uten WSL for de forskjellige takene, selv om det ikke vil stemme helt korrekt med virkeligheten. Ved å ha et WSL sjikt og dermed ta bort vannfilmen, vil representere det mest gunstige tilfelle, mens uten WSL og med vannfilmen, vil representere det mest ugunstige tilfelle. Disse to tilfellene vil være med å illustrere forskjellen i trendene, og bidra til økt forståelse rundt hvorfor et WSL sjikt kan være positivt for å redusere kjøleeffekten.

### 5.3.4 Korreksjon for fuktopptak i XPS

Tabell 10 og 11 viser at det forekommer en minimal endring i varmekonduktiviteten etter formel 7 og 8. Det største vanninnholdet på 53,0 kg/m<sup>3</sup> gav bare en 2,3 % økning i takets U-verdi. Til sammenligning gir WUFI sin fuktavhengig varmekonduktivitet (se tabell 12) en økning på takets U-verdi på 11,2 %. Dette er dog basert på et vanninnhold på 50 kg/m<sup>3</sup> med en  $\lambda_w = 0,034$  W/mK (tørr XPS har en varmekonduktivitet på 0,03 W/mK). For at formel 7 og 8 skal gi samme verdier som WUFI sine, må  $Z = 2$  settes til ca  $Z = 10,6$ .

Tabell 12: Den fuktavhengige varmekonduktivitet for XPS hentet fra WUFI

Vanninnhold [kg/m <sup>3</sup> ]	Varmekonduktivitet [W/mK]
0	0,03
10	0,031
20	0,032
50	0,034

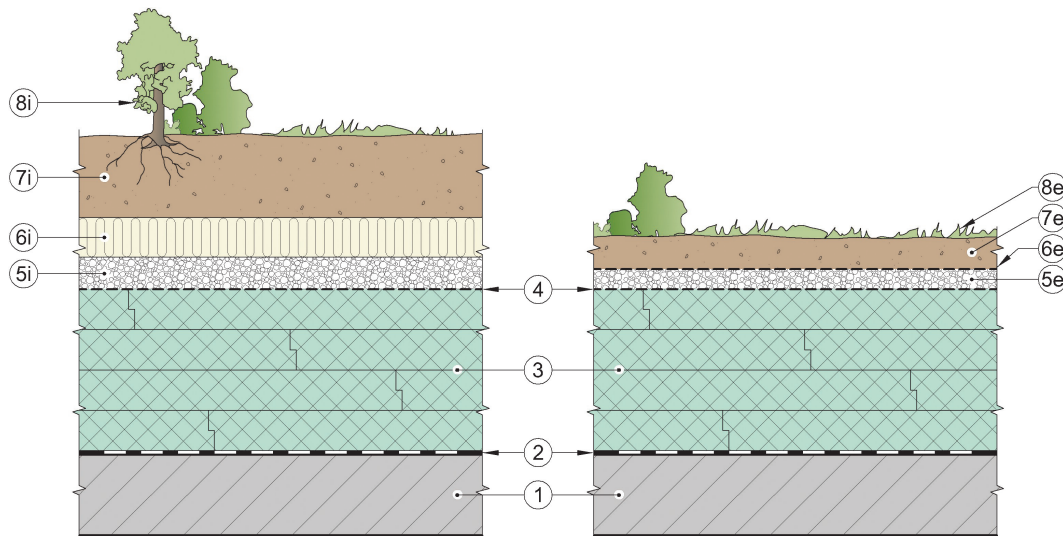
(Standard Norge, 2010) tar høyde for et fuktopptak på 0,01 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, tilsvarende 1 Vol.-%, for ett lag med XPS med et ballasterende topplag av singel (se figur 9). Dette korrigeres for ved at deklareret verdi på 0,035 W/mK multipliseres med en korreksjonsfaktor som gir dimensjonerende varmekonduktiviteten lik 0,039 W/mK - tilsvarende en økning på 0,004 W/mK. Dette er den samme økningen som den fuktavhengige varmekonduktiviteten i WUFI korrigeres for ved et vanninnhold på 50 kg/m<sup>3</sup>: 0,03 + 0,004 = 0,034 W/mK. Forskjellen er at (Standard Norge, 2010) korrigerer for 1 Vol.-% vanninnhold, mens WUFI korrigerer for et vanninnhold tilsvarende 50 kg/m<sup>3</sup>, tilsvarende 5 Vol.-%. I henhold til (Standard Norge, 2010) gir en økningen på 0,004 W/mK i varmekonduktivitet, en økning i takets U-verdi på 11,2 %. For beplantning over XPS, økes varmekonduktiviteten med 0,005 W/mK (fuktopptak lik 5 Vol.-%), tilsvarende en økning på 13,9 %.

I følge egne simuleringer, hvor høyeste simulerte fuktopptaket i XPS for ballast tak var ca 50,0 kg/m<sup>3</sup>, resultere dette i følge WUFI sin fuktavhengig varmekonduktivitet, i en økning på 0,004 W/mK. Dette er det samme som (Standard Norge, 2010) dimensjonerer XPS for bruk i omvendte tak med ballast - hvor også varmekonduktiviteten økes med 0,004 W/mK. For vegetasjon over isolasjon, estimerer (Standard Norge, 2010) et vanninnhold på 5 Vol.-%. Feltnmålinger utført i Holzkirchen på omvendte, grønne tak, målte derimot et vanninnhold i XPS (i løpet av 19 år) til å være mellom 4,8 Vol.% og 8,7 Vol.% (Zirkelbach et al., 1997). Altså kan det være høyere enn 5 Vol.%,

som standarden stipulerer. En slik økning i vanninnholdet tilsvarte en økning i konduktiviteten tilsvarende 13 - 25 % av tørr tilstand. Derfor kan det settes spørsmål til om standarden er konservativ nok.

## 5.4 Forslag til revisjon av anbefalingene i Byggforskserien

Dagens anbefalinger for oppbygning av omvendte kompakte tak (Byggdetaljer 525.207, 2018), beskriver kun et separasjonssjikt mellom topplag og isolasjon, først og fremst for å skille to materialsjikt, men også for å forhindre at partikler skal komme ned i isolasjonen. Basert på forskningslitteraturen foreslås det å plassere et vanntett separasjonssjikt over isolasjonen, som vist i figur 39. Hensikten med det nye sjiktet er å redusere vannmengden som kommer forbi isolasjonslaget, og følgelig bidra til å redusere f·x-verdiene og varmetapet. Dette sjiktet må i tillegg være dampåpent for å tillate uttørking av fukt mot uteluft, i tillegg til å være motstandsdyktig for både råteskader og samtidig fungere som rotsperre.



Figur 39: Oppbygning av omvendte grønne takkonstruksjoner med semiintensivt tak til venstre og ekstensivt tak til høyre: (1) bærekonstruksjon, (2) membran, (3) XPS, (4) vannavstøtende separasjonssjikt og rotsperre, (5i) dreneringslag, (6i) mineralullplate, (7i) vekstlag 100 – 200 mm, (8i) beplantning, (5e) dreneringslag, (6e) rotsperre, (7e) vekstlag 30 – 100 mm, (8e) beplantning. Illustrasjon: Klima 2050 og SINTEF Community

Etter anbefalinger fra (Merkel, n.d.) og (Leimer et al., 2005) er det følgende praktiske anbefalinger til et WSL sjikt::

- 150 mm overlappende skjøter langs takhelning
- Ved oppstikkende penetreringer i taket, skal WSL føres opp til toppen av topplaget.
- Ved takparapet skal WSL legges opp mellom isolasjon og takmembran, på minst 15 cm.
- Ved installering må WSL beskyttes for vindkast, ved å delvis legge et ballasterende lag over, inntil hele laget er lagt oppå.
- WSL kan også brukes i grønne tak under dreneringslaget eller i takdekker over parkering-skjeller, mellom XPS og påstøp.

I tillegg har EOTA (*European Organisation for Technical Assessment*, n.d.) utarbeidet en ytelsesbasert veiledning for omvendte takkonstruksjoner kalt “Inverted Roof Insulation Kits - Part 1: General” (EOTA, 2010), som bør leses (også nevnt i kapittel 2.4.2). EOTA er en organisasjon basert i Belgia, som teknisk bedømmer produkter og deres brukbarhet i bygningskonstruksjoner. I veiledningen blir det presentert ulike verifiseringmetoder for å imøtekomme de tekniske kravene til de ulike materialene, brukt i omvendte takkonstruksjoner. I følge veiledningen er hensikten med innføring av et vannavstøtende sjikt (i veiledningen kalt: water-flow reducing layer) mellom topplag og isolasjon, å redusere f-x-verdiene. I tillegg vil den fungerer som et separasjonssjikt som forhindrer partikler fra topplaget å komme ned i isolasjonslaget. I veiledningen setter det flere tekniske krav til et vannavstøtende separasjonssjikt (WSL):

- Brannmotstand
- Dimensjon
- Massetetthet
- Vanndampmotstand
- Vannpenetrering - før og etter aldring
- Hydrostatisk hode
- Strekkspenning- før og etter aldring
- Statisk last
- Kjemisk motstand

Veiledningen setter blant annet krav til maksimum sd-verdi lik 0,1 og et hydrostatisk hode på maksimum 1000 mm. Videre anbefales det å legge sjiktet med overlappende skjøter på minimum 150 mm. For videre detaljer til krav henvises det til (EOTA, 2010). Derimot er anbefales det i følge (Merkel, n.d.) en sd-verdi = 0,02. Dette er basert på laboratorietester, hvor denne verdien gav lavest vanninnhold i XPS - noe som også sier seg selv. Utfordringen blir å finne et materiale som har like lav sd-verdi, samtidig som den tilfredsstiller overnevnte tekniske krav.



## 6 Konklusjon

Det finnes flere fordeler med å bygge kompakte flate tak som omvendte tak. Fordeler som redusert byggetid og økt beskyttelse av takets vanntette sjikt (takmembran) veier noe opp for det ekstra kjølebidraget som følge av at isolasjonen plasseres oppå og ikke under takmembranen. Denne plasseringen eksponerer isolasjonen for ytre klima, som krever et isolasjonsmateriale med lavt fuktopptak (eksempelvis XPS). Ved en uheldig oppbygning av XPS-platene kan det likevel skje at store mengder regnvann kommer forbi isolasjonen, og ned på varm side av konstruksjonen. Da kan det dannes en vannfilm oppå membranen, som både fører til en aktiv nedkjøling av taket, samt en oppadrettet vandampdiffusjon inn i XPS-en. Et økt fuktopptak i XPS-en forringer dens isolasjonsevne og øker varmetapet gjennom taket. Økt fuktopptak kan kompenseres for ved å øke isolasjonstykkelsen. Et nytt vannavstøtende og dampåpent sjikt kan derimot forhindre nedbør fra å komme forbi isolasjonen, og vil gi en betydelig reduksjon i lekkasjeraten og den totale kjøleeffekten. Da er det ikke nødvendig å øke isolasjonstykkelsen og fuktopptak-korreksjonen og  $\Delta U_r$ -korreksjonen kan ses bort i fra. Dette vil tale enda mer for å velge en omvendt takløsning, spesielt med tanke på fremtidens strenge krav til energieffektivitet og lave U-verdier.

Uten et vannavstøtende separasjonssjikt skyldes det største kjølebidraget en oppvarming av nedbør på takmembranen, som medfører en økning på hele 62,9 % av takets totale U-verdi (ved å bruke  $f \cdot x = 0,048$ ). Til sammenligning utgjør det største simulerte fuktopptaket i XPS (grønt omvendt tak i Trondheim) en økning på 11,2 %, ifølge (Standard Norge, 2010) og (Standard Norge, 2017).

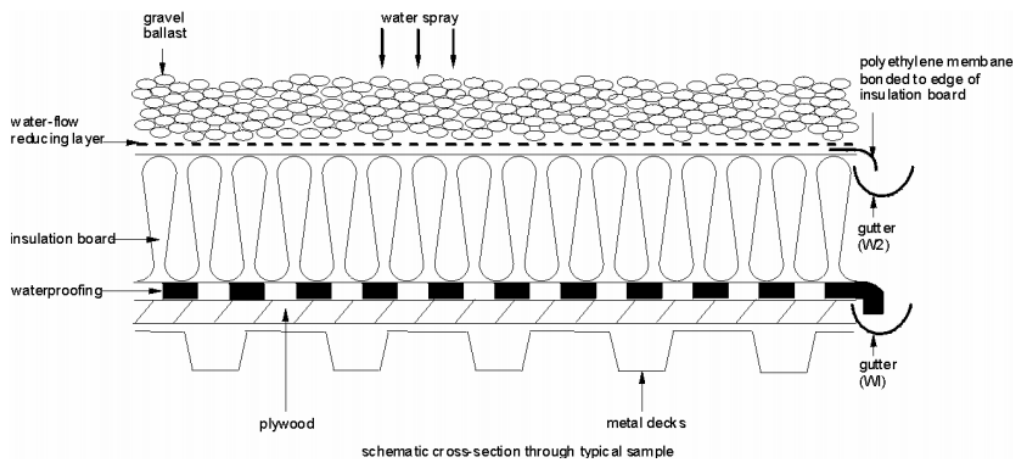
Laboratorietestene viser at en uheldig oppbygning av isolasjonsplatene kan bidra til å øke lekkasjeraten betraktelig. Lekkasjeraten økte ved større gap mellom isolasjonsplatene, lave nedbørsintensiteter, for parallelle skjøtekanter, samt ujevnheter i underlaget. Videre ble lekkasjeraten betraktelig redusert ved å plassere et 50 mm lag med singel over isolasjonen. Dette skyldes trolig takets plane underlag, som medførte at vekten av singelen presset isolasjonsplatene ned mot stål bunnen. Derfor kunne ikke vannet renne like lett under platene. Det ble ikke lagt en membran under isolasjonsplatene, ut fra antagelsen at den ikke ville påvirke lekkasjeraten. Basert på at ujevnheter i underlaget økte lekkasjeraten, vil trolig også en takmembran økt lekkasjeraten.

Simulering av omvendte tak i WUFI kan gjøres basert på å tilpasse WUFI modellen med feltmålinger, eller ved å ta utgangspunkt i eksisterende feltmålinger utført i blant annet Holzkirchen. Fremgangsmåten er presentert i WUFI sine egne håndbøker. Størst troverdighet ovenfor resultatene oppnås ved å utføre egne feltmålinger for valgte klima i WUFI. Det er en rekke faktorer som vil påvirke fuktopptaket, deriblant har topplaget over XPS stor betydning: Grønne omvendte tak gir høyere fuktopptak i XPS, grunnet sin lavere uttørkningsevne sammenlignet med et ballastlag. Derimot er det nesten tilnærmet likt vanninnhold i XPS for de to takene, simulert for Trondheim, noe som tilsier at ballastlag i Trondheim har lavere uttørkningsevne enn vekstlaget i det grønne taket. Størst uttørkningsevne forekommer for det omvendte taket med ballast i Oslo. Videre vil et kaldere og våtere klima, kombinert med høye innnetemperaturer, øke fuktopptaket. Ved å plassere et vannavstøtende separasjonssjikt (WSL) ble fuktopptaket betydelig redusert.

# 7 Fremtidig arbeid

## 7.1 Supplerende forsøk

Ved en gjentakelse av laboratoriemålingene bør fremst og fremst en takmembran plasseres under isolasjonen, slik at de målte lekkasjeratene blir mer troverdig. Dessuten hadde det vært interessant å fullført planlagte laboratorietester, som blant annet inkluderer 100 mm XPS med butte skjøtekanter. Hadde for eksempel en oppbygning på ett lag med XPS med butte skjøter, gitt en lekkasjerate på  $f = 100\%$ ? Videre er det interessant å foreta nye målinger av lekkasjerate ved å plassere et WSL sjikt over isolasjonen, som vist i figur 40 hentet fra (EOTA, 2010). I veiledningen blir det presentert en detaljert beskrivelse av hvordan utføre laboratoriemålinger for bestemmelse av lekkasjeraten.



Figur 40: Illustrasjon hentet fra (EOTA, 2010)

Dessuten ville det vært interessant å påføre en temperaturgradient over testtaket i laboratoriet. Det vil si å bygge en “hotbox”, hvor topplokket til boksen utføres som et omvendt tak og resten isoleres slik at tilført varme inni boksen, ikke slipper raskt ut igjen. Inne i boksen kan det plasseres et varmeelement for å simulere en innetemperatur på  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Videre bør hotbox'en plasseres et kjølig sted, for å få en så stor temperaturgradient som mulig. Eventuelt kan den plasseres utendørs, enten med kontrollert tilførsel av vann, eller ved at det tilføres naturlig nedbør fra himmelen. For å måle fuktopptaket må topplaget og WSL fjernes for å ta inn XPS inn til laboratorie for veiing. Temperatur- og fuktmålere kan også plasseres under og over isolasjonen for en loggføring av hvordan dette vil variere med tilført vann på taket. Dette kan bidra til å gi en økt forståelse for den eventuelle kjøleeffekten som medføres med og uten et WSL sjikt.

En enda større utvidelse er å faktisk plassere et WSL sjikt på eksisterende tak, eller deler av et tak, og foreta veiing av XPS. Da slipper man å bygge en hotbox og bruke elektrisk energi for å tilføre hotbox'en varme. Da kan en se på hvordan et WSL sjikt kan redusere lekkasjeraten, samt om fuktopptaket i isolasjonen reduseres. Det kan også testes forskjellige WSL sjikt og se hvordan denne oppfører seg på varme sommerdager med tanke på innoverrettet vandampdiffusjon, grun-

net oppvarming av WSL-sjiktet. Eventuelt så har dette ikke har noe effekt, grunnet overliggende lag. Ved å plassere temperatur og fuktmåler under og over isolasjonslaget i eksisterende tak, kan måledataene brukes til å tilpasse norske produkters materialdata, slik at en WUFI modell er bedre tilpasset et norsk klima. Da vil et estimert fuktopptak i XPS for en simuleringsperiode på 20-30 år, også bli mer korrekt.

## 7.2 Varmetapsvurderinger

Dessuten hadde det vært interessant å se på hvordan WSL påvirker varmetapet i et energiberegnetde simuleringsprogram, eksempelvis IDA ICE eller SIMIEN. Programmet kan fastslå en eventuell endring i innendørs temperatur ved innføring av et WSL-sjikt, hva konsekvens dette har for oppvarmingsbehovet. Det kan også testes for to ulike takmodeller; en lett takkonstruksjon (korrugerte stålplater) og en tung takkonstruksjon (betondekke). I følge forskningslitteratur (Beech and Saunders, 1985) påpekes det at lette takkonstruksjoner er mer utsatt for temperaturendringer i himling, enn tunge grunnet den tyngre konstruksjonens høyere termisk treghet. Videre kan det foretas en vurdering med tanke på kostnad versus nytte, for å se om kostnaden for et WSL - sjikt veier opp for de kostnadsbesparelsene en gjør ved å slippe å øke innetemperaturen eller øke isolasjonstykkelsen. Ved innføring av WSL kan også den mindre dyrere EPS isolasjonen benyttes, selv om den har et høyere fuktopptak.

# Referanser

- Al-Homoud, D. M. S. (2005), 'Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials', *Building and Environment* **40**(3), 353–366.
- Andenæs, E., Kvande, T., Muthanna, T. M. and Lohne, J. (2018), 'Performance of Blue-Green Roofs in Cold Climates: A Scoping Review', *Buildings* **8**(4), 55.
- Beech, J. and Saunders, G. (1985), 'The performance of lightweight reverted flat roof'.
- Byggedetaljer 421.132 (2018), *Fukt i Bygninger - Teorigrunnlag*, Byggeforskserien, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo.
- Byggedetaljer 451.031 (2013), *Klimadata for dimensjonering mot regnpåkjønning*, Byggeforskserien, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo.
- Byggedetaljer 471.008 (2018), *Beregning av U-Verdier etter NS-EN ISO 6946*, Byggeforskserien, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo.
- Byggedetaljer 471.010 (2018), *Varmekonduktivitet Og Varmemotstand for Bygningsmaterialer*, Byggeforskserien, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo.
- Byggedetaljer 525.207 (2018), *Kompakte Tak*, Byggeforskserien, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo.
- Byggedetaljer 525.306 (2009), *Terrasser med beplantning på bærende betongdekker*, Byggeforskserien, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo.
- Byggedetaljer 544.823 (2013), *Sedumtak*, Byggeforskserien, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo.
- Byggedetaljer 573.344 (2004), *Varmeisolasjonsmaterialer - Typer Og Egenskaper*, Byggeforskserien, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo.
- Byggedetaljer 573.430 (2003), *Materialdata for vanddamprtransport*, Byggeforskserien, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo.
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M. and Davison, J. B. (2010), 'Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit', *Energy and Buildings* **42**(10), 1582–1591.
- Cziesielski, E. and Fechner, O. (2001), 'Experimentelle Untersuchung zum delta-U-Wert bekiester Umkehrdächer mit wasserableitender Trennlage', *Bauphysik* **23**(5), 288–297.
- Diagrams.net* (n.d.), <https://www.diagrams.net/index.html>. Accessed: 2020-05-16.
- Ducoulombier, L. and Lafhaj, Z. (2017), 'Comparative study of hygrothermal properties of five thermal insulation materials', *Case Studies in Thermal Engineering* **10**, 628–640.
- EOTA (2010), 'ETAG 031- GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL of Inverted Roof Insulation Kits Part 1: General ()'.
- European Commission (2020), 'Energy performance of buildings directive', [https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en).
- European Organisation for Technical Assessment* (n.d.), <https://www.eota.eu/en-GB/content/who-we-are/33/>. Accessed: 2020-6-20.
- Fiori, M. and Paolini, R. (n.d.), 'Politecnico di milano, dipartimento di architettura, ingegneria delle costruzioni e ambiente costruito. the green roof monitoring is funded by the italian ministry of research, project prin sense „smart building envelope for sustainable urban environment“'.

- FLL (2008), 'Guidelines for the planning, construction and maintenance of green roofing - green roofing guideline'.
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP (n.d.), <https://www.ibp.fraunhofer.de/>. Accessed: 2020-02-28.
- Hanssen-Bauer, I., Førland, E., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., Nilsen, J., Sandven, S., Sandø, A., Sorteberg, A. and Ådlandsvik, B. (2017), 'Climate in Norway 2100', *empty* p. 48.
- Hedlin, C. (1977), 'Moisture Gains by Foam Plastic Roof Insulations Under Controlled Temperature Gradients', *Journal of Cellular Plastics* **13**(5), 313–319.
- Hens, H. (1995), 'Thermal Performance of Protected Membrane Roof Systems, Part 1: A Simplified Heat and Moisture Analysis', *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes* **18**(4), 377–389.
- Hens, H. (1996), 'Hygrothermal Performance of Protected Membrane Roof Systems: Part 2: Experimental Verification', *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes* **19**(4), 314–335.
- Hens, H. (2012), *Performance based Building Design 2. From Timber-framed Construction to Partition Walls.*, Wilhelm Ernst & Sohn, Rotherstr. 21, 10245 Berlin, Germany.
- Künzel, H. M. (1995), *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and Two-Dimensional Calculation Using Simple Parameters*, IRB Verlag, Stuttgart.
- Künzel, H. M. and Kießel, K. (1997), 'Moisture Behaviour of Protected Membrane Roofs with Greenery', *empty* p. 7.
- Künzel, H. M. and Kießel, K. (1996), 'Assessing precipitation heat losses of protected membrane', *empty* p. 6.
- Lakatos, Á. (2016), 'Moisture induced changes in the building physics parameters of insulation materials', *Science and Technology for the Built Environment* **22**(3), 252–260.
- Leimer, H.-P., Rode, C., Künzel, H. and Bednar, T. (2005), 'Requirements of inverted roofs with a drainage layer', *In Proceedings of the 7th Nordic Symposium on Building Physics*.
- Merkel, H. (n.d.), 'Inverted Roofs with Reduced Heat Losses Due to a Water-Repellent Separating Layer', p. 12.
- Minke, G., Otto, F. and Gross, R. (July 2009), 'Ermittlung des wärmedämmverhaltens von gründächern'.
- Misar, I. and Novotný, M. (2017), 'Defects and behaviour of inverted flat roof from the point of building physics', *MATEC Web Conf.* **93**, 02002.
- Norsk Klimaservicesenter (n.d.), <https://klimaservicesenter.no/faces/desktop/idf.xhtml>. Accessed: 2020-6-20.
- Olsen, K. F. (2020), 'Kjøleffekten av regn- og smeltevann i omvendte takkonstruksjoner'. *Optigreen international AG, 2020* (n.d.), <https://www.optigreen.com/>. Accessed: 2020-02-22.
- Pel, M., Tech, B., Budde, D. and Eit, B. A. (2016), 'Drainage Capabilities and Heat Loss of Different Inverted Roof Assemblies', *empty* p. 19.
- Petersson, B.-Å. (1982), 'The Upside-Down Roof. Field and Laboratory Studies of Thermal Insulation. Moisture Conditions and Performance', *Journal of Thermal Insulation* **5**(3), 140–152.
- Schaefer, D. (1976), Water Absorption of Insulation in Protected Membrane Roofing Systems, Technical Report CRREL-76-38, COLD REGIONS RESEARCH AND ENGINEERING LAB HANOVER N H.

- Schaefer, D., Larsen, E. T. and Aamot, H. W. C. (1977), Observation and Analysis of Protected Membrane Roofing Systems, Technical Report CRREL-77-11, COLD REGIONS RESEARCH AND ENGINEERING LAB HANOVER N H.
- Schmidt, T. (2006), 'On-line help for wufi-pro 4.01 (e)'.
- Shafique, M., Kim, R. and Lee, D. (2016), 'The potential of green-blue roof to manage storm water in urban areas'.
- Stagrum, A. E. (2018), 'Fuktopptak i plastisolasjon', *SINTEF Klima 2050*.
- Standard Norge (2010), *Byggematerialer og -produkter - Hygrotermiske egenskaper - Tabulerte dimensjonerende verdier og prosedyrer for bestemmelse av deklarererte og praktiske termiske verdier*, NS-EN ISO10456:2007+NA:2010.
- Standard Norge (2013), *Varmeisoleringsprodukter til bruk i bygninger - Bestemmelse av egenskaper med hensyn til vanddampgjennomgang*, NS-EN 12086:2013.
- Standard Norge (2015a), *Varmeisolasjonsprodukter for bygninger - Fabrikframstilte produkter av ekstrudert polystyrenskum (XPS) - Krav*, NS-EN 13164:2012+A1:2015.
- Standard Norge (2015b), *Varmeisolasjonsprodukter for utstyr i bygninger og tekniske installasjoner - Fabrikframstilte produkter av ekspandert polystyren (EPS)*, NS-EN 14309:2015.
- Standard Norge (2017), *Bygningskomponenter og -elementer - Varmemotstand og varmegjennomgangskoeffisient - Beregningsmetoder*, NS-EN ISO 6946:2017.
- Standard Norge (2019a), *Varmeisoleringsprodukter til bruk i bygninger - Bestemmelse av langtids vannabsorpsjon ved diffusjon*, NS-EN ISO 16536:2019.
- Standard Norge (2019b), *Varmeisoleringsprodukter til bruk i bygninger - Bestemmelse av langtids vannabsorpsjon ved nedsenking*, S-EN ISO 16535:2019.
- Stöckl, B., Zirkelbach, D. and Künzel, H. M. (2014), 'Hygrothermal simulation of green roofs – new models and practical application', *empty* p. 8.
- Szodrai, F. and Lakatos, A. (2014), 'MEASUREMENTS OF THE THERMAL CONDUCTIVITIES OF SOME COMMONLY USED INSULATING MATERIALS AFTER WETTING', *Environ. Eng. Manag. J.* **13**(11), 2881–2886.
- Teibinger, M. and Nusser, B. (2010a), 'Ergebnisse experimenteller untersuchungen an flachgeneigten hölzernen dachkonstruktionen. herausgegeben von holzforschung austria, wien'.
- Teibinger, M. and Nusser, B. (2010b), 'Ergebnisse experimeteller Untersuchungen and flashgeneigten hölzernen Dachkonstruktionen. herausgegeben von Holzforschung Austria. Wien (Forschungsbericht HFA-Nr: P412 '.
- Thodesen, B., Kvande, T., Tajet, H. T. T., Time, B. and Lohne, J. (2018), 'Adapting Green-Blue Roofs to Nordic Climate', *Adapting Green-Blue Roofs to Nordic Climate*.
- Thue, J. V. and Oustad, M. (n.d.), 'WUFI 1d pro 4.1 brukermanual', p. 35.
- Vacek, P. and Matějka, L. (2016a), 'Decreasing Negative Influence of Under-Flow Rainwater Inverted Green Roofs on Passive Houses, Using Accumulating Hydrophilic Mineral Wool Panels', *Applied Mechanics and Materials; Zurich* **824**, 786–794.
- Vacek, P. and Matějka, L. (2016b), 'Decreasing Negative Influence of Under-Flow Rainwater Inverted Green Roofs on Passive Houses, Using Accumulating Hydrophilic Mineral Wool Panels', <https://www.scientific.net/AMM.824.786>.

- Wayne, T. and Ricard, J. (1979), 'moisture gain and its thermal consequence for common roof insulation'.
- Winter, S., Fülle, C. and Werther, N. (2007), 'Forschungsprojekt MFPA Leipzig und TU München Flachdächer in Holzbauweise'.
- WUFI (2017a), 'Guideline for the calculation of extensive green roofs'.
- WUFI (2017b), 'Guideline for the calculation of gravel roofs'.
- Zirkelbach, D., Schafaczek, B. and Künzle, H. (1997), 'Long-Term Hygrothermal Performance of Green Roofs', *empty* p. 7.
- Zirkelbach, D., Schafaczek, B. and Künzle, H. (2011), 'Thermal Performance Degradation of Foam Insulation in Inverted Roofs Due to Moisture Accumulation', *empty* p. 8.
- Zirkelbach, D., Schafaczek, B. and Künzle, H. (2013), Hygrothermal Performance and Damage Risk of Green Roofs, *in* V. P. de Freitas and J. Delgado, eds, 'Hygrothermal Behavior, Building Pathology and Durability', Building Pathology and Rehabilitation, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 141–163.

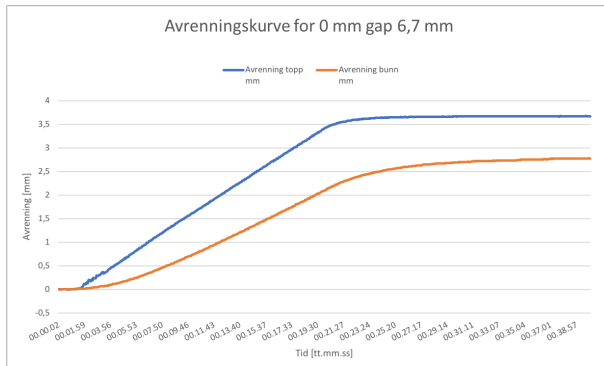
# Appendices

<b>A</b>	<b>Laboratorie resultater</b>	<b>III</b>
<b>B</b>	<b>WUFI resultater</b>	<b>IV</b>
<b>C</b>	<b>Bilder fra laboratorieforskene</b>	<b>VII</b>
<b>D</b>	<b>Artikkel publisert i Byggeindustrien</b>	<b>XI</b>

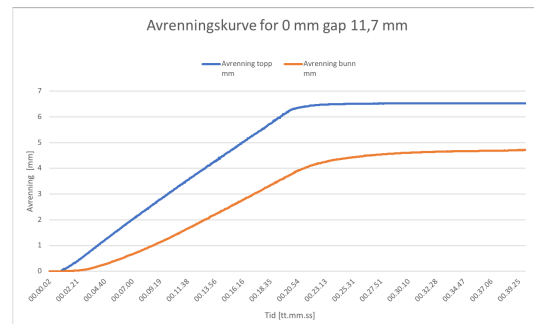


[Blank side]

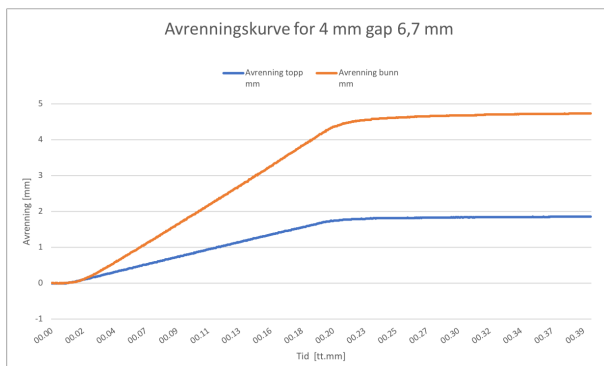
# A Laboratorie resultater



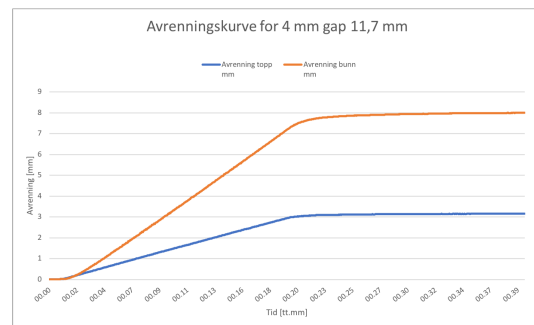
Figur 41



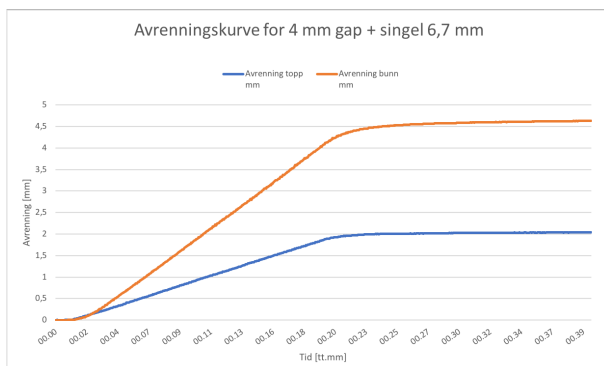
Figur 42



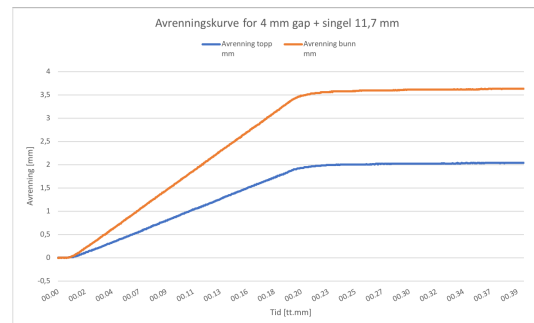
Figur 43



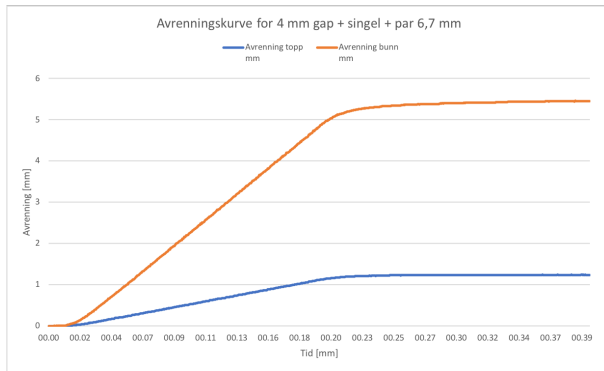
Figur 44



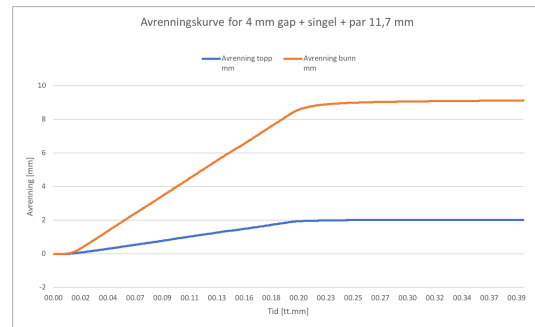
Figur 45



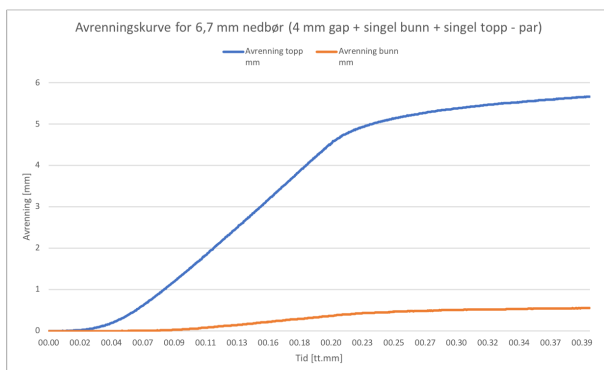
Figur 46



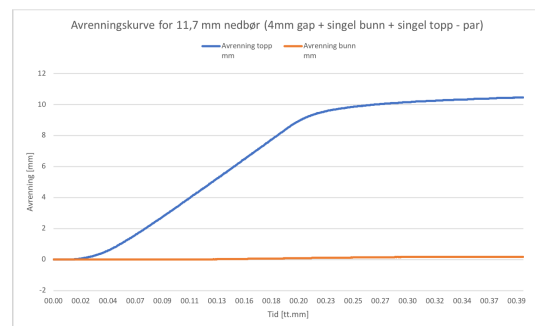
Figur 47



Figur 48

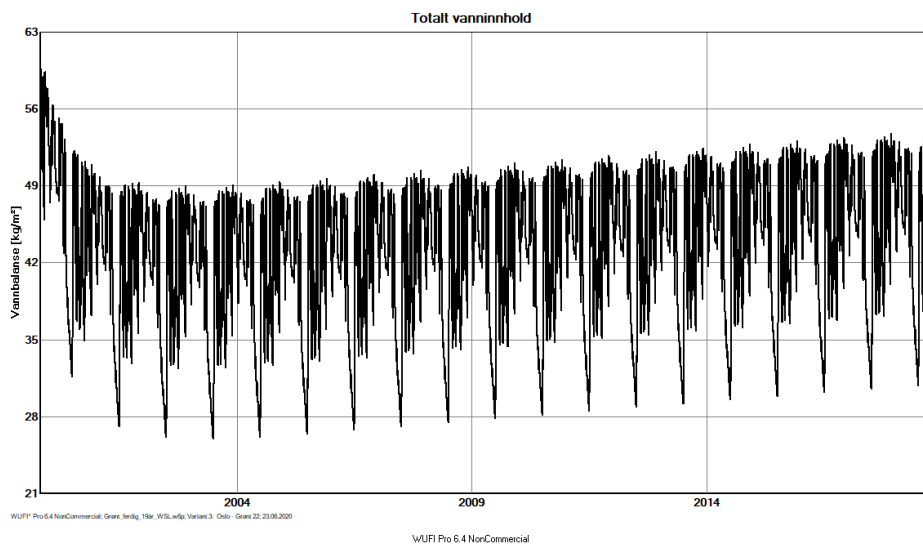


Figur 49

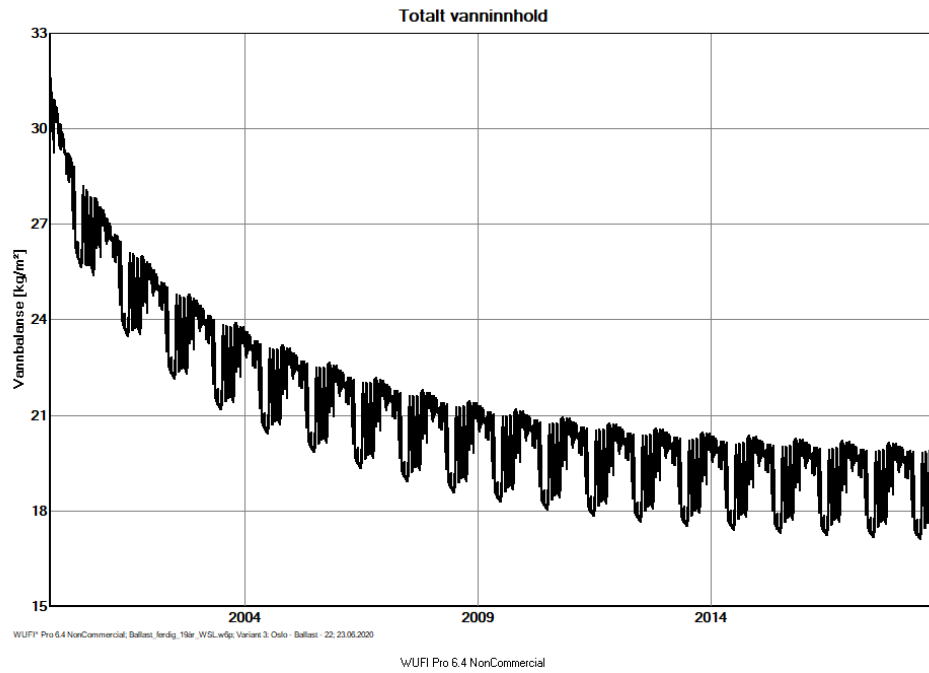


Figur 50

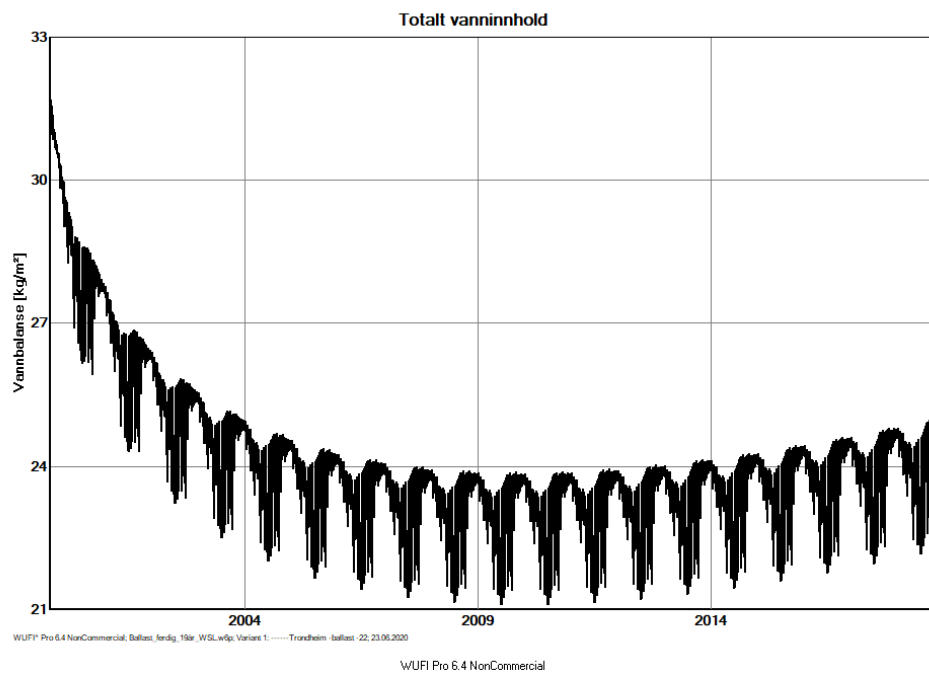
## B WUFI resultater



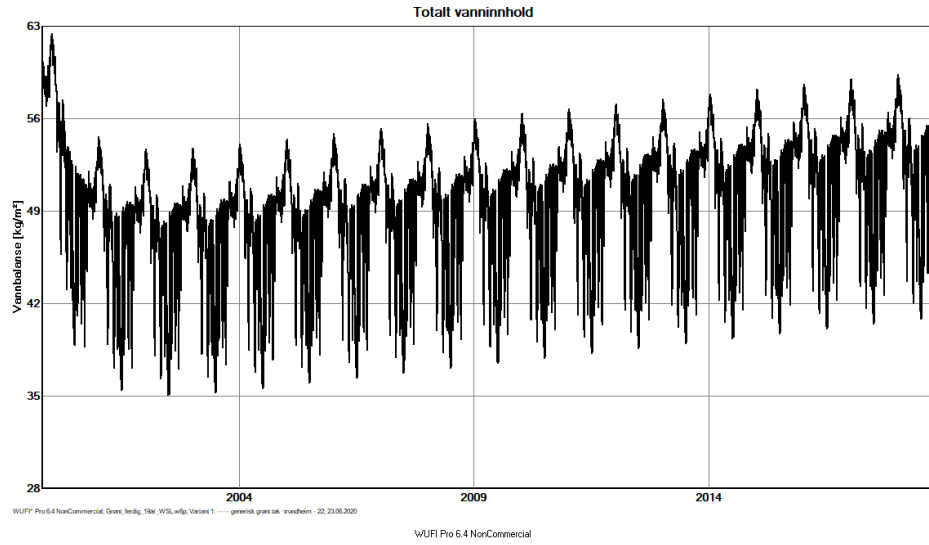
Figur 51: Totalt vanninnhold i omvendt, grønt tak i Oslo med en innetemperatur på 22 °C



Figur 52: Totalt vanninnhold i omvendt tak med ballast i Oslo med en innetemperatur på 22 °C



Figur 53: Totalt vanninnhold i omvendt tak med ballast i Trondheim med en innetemperatur på 22 °C

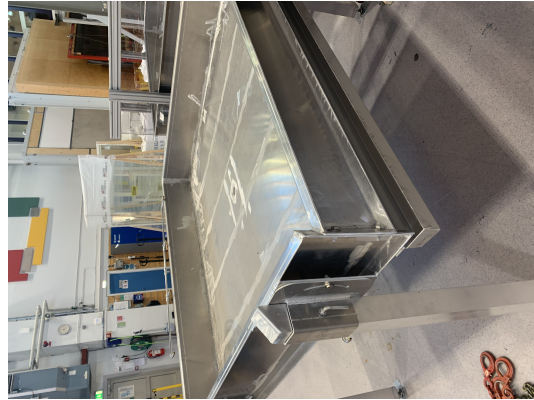


Figur 54: Totalt vanninnhold i omvendt, grønt tak i Trondheim med en innnetemperatur på 22 °C

## C Bilder fra laboratorietforsøkene



Figur 55: Tønne som fanger opp vann som dreneres under isolasjonen



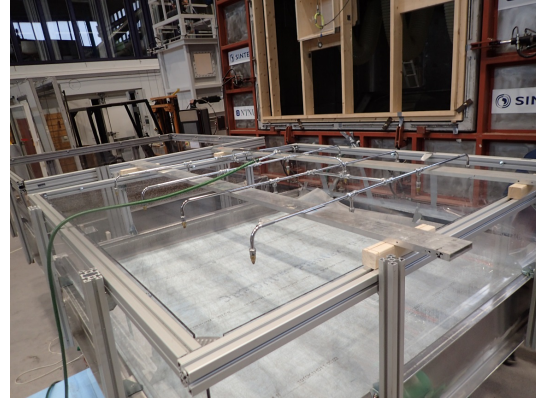
Figur 56: Bar takrigg



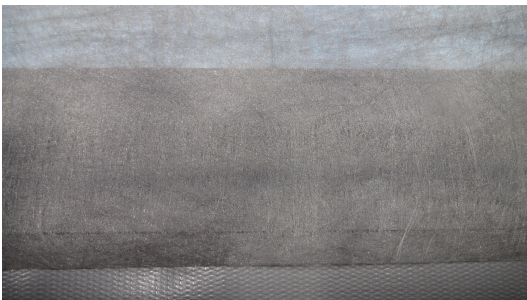
Figur 57: Ferdig takrigg for tester uten singel over isolasjon



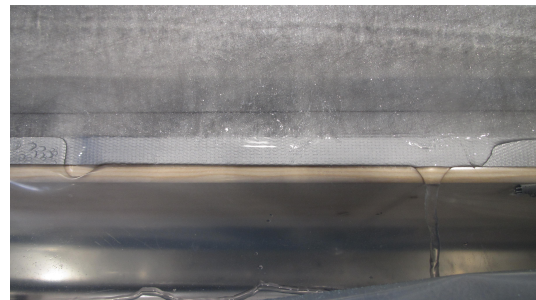
Figur 58: Oversikt over lagd takrenne av damp-sperre som skal fange opp vannet som dreneres på takoverflaten



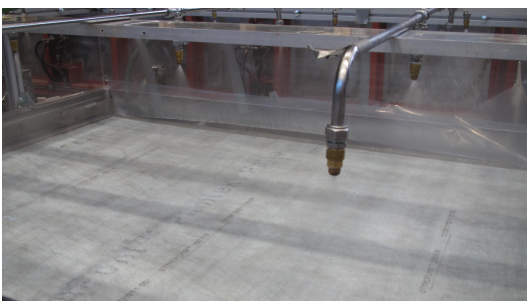
Figur 59: Oversikt over hele takriggen med dyse-matrisen



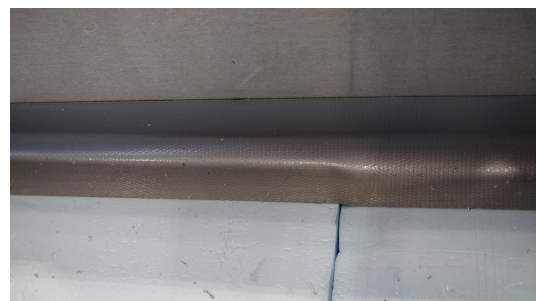
Figur 60: Fiberduk over membran



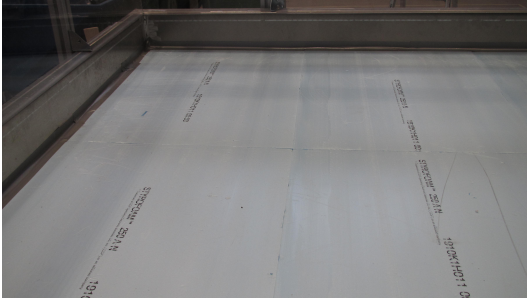
Figur 61: Avrenning fra topplag



Figur 62: Regndyse slått på



Figur 63: Taping langs periferien



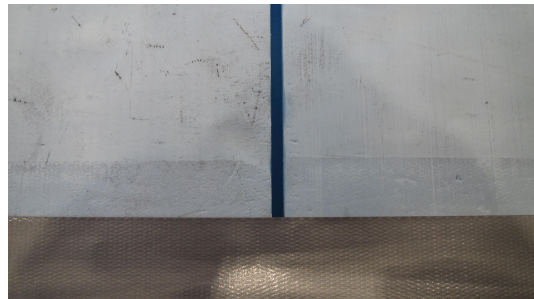
Figur 64: 0 mm gap



Figur 65: 0 mm gap, nærbilde



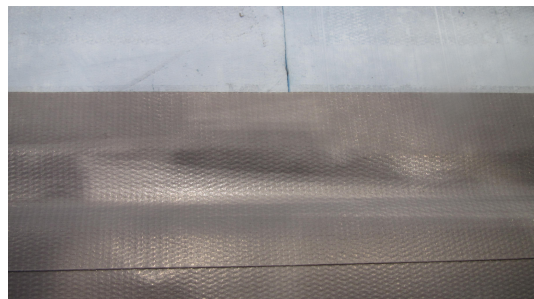
Figur 66: 4 mm gap med fiberduk over



Figur 67: 4 mm gap, nærbilde



Figur 68: Bildet viser at ujevnheter grunnet småsingel under isolasjonssjiktet, gir større gap noen steder



Figur 69: tape på overkant av isolasjon





Figur 70: Bildet viser et 50 mm lag med singel over fiberduk

# D Artikkel publisert i Byggeindustrien

FRA EKSPERTENE: NTNU

## Regnkjøling av omvendte tak

Omvendte tak er spesielt godt egnet for trafikkerte tak, som terrasser og som dekke over rom under bakken. I motsetning til rettvendte tak har et omvendt tak sitt vanntette sjikt (takmembran) under varmeisolasjonen. Dette gir ekstra god beskyttelse av membranen, men uønsket kjøling når regn- og smeltevann trenger gjennom isolasjonsskjøtene og ned på membranen. For å minimere kjøleeffekten anbefaler vi derfor et vannavstøtende og dampåpent separasjonssjikt over isolasjonen.

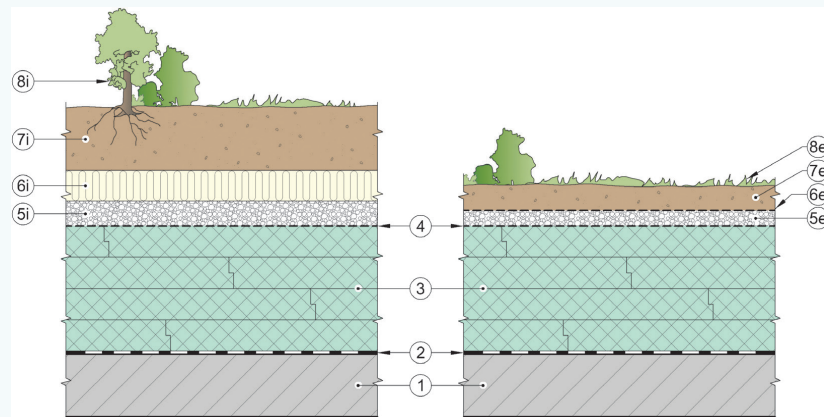
**Kristina Fjeldstad Olsen  
og Erlend Andenæs**  
Institutt for bygg- og miljøteknikk

### Fordelene og ulempene med omvendte tak

Omvendte tak gir bedre beskyttelse av membranen fra hyppige temperatursvingninger og mekaniske belastninger sammenlignet med rettvendte tak. Byggetiden kan også reduseres, da membranen kan limes direkte på bærekonstruksjonen. Ulempene er at isolasjonssjiktet eksponeres for det ytre klima, noe som krever bruk av isolasjon som tåler høy fuktbelastning, typisk XPS. Isolasjonen holdes på plass av et ballasterende topplag. Tradisjonelt har det blitt brukt elvegrus eller betongheller, men det har i senere tid blitt mer vanlig å utføre topplaget som et grønt tak. En ulempe med grønne omvendte tak er at isolasjonen utsettes for et konstant fuktig miljø, noe som vil øke fuktopptaket og forringe isolasjonsevnen. Grønne tak gir også dårligere uttørkningsmulighet for isolasjonen sammenlignet med tradisjonell ballast.

### Omvendte, grønne tak som klimatiltak

Grønne tak blir stadig mer populære både på grunn av estetikk og miljø. De kan også bidra til overvannshåndteringen ved å forsinke avrenning av regnvann, noe som er spesielt ønskelig med tanke på forventet økt hyppighet av korte, intense regnbyger. Grønne tak som bygges for dette formålet, blir kalt blågrønne tak. Blir blågrønne tak også bygget som omvendte tak, utsettes isolasjonen for ekstra stor fuktbelastning, som kan medføre at taket får en høyere U-verdi enn det som ble prosjektert. Det er derfor viktig å få en bedre forståelse av de hydrotermiske egenska-



Oppbygging av omvendte grønne takkonstruksjoner med semiintensivt tak til venstre og ekstensivt tak til høyre: (1) bærekonstruksjon, (2) membran, (3) XPS, (4) vannavstøtende separasjonssjikt og rotsperre, (5i) dreaslagn, (6i) mineralullplate, (7i) vekstlag 100 – 200 mm, (8i) beplantning, (5e) dreaslagn, (6e) rotsperre, (7e) vekstlag 30 – 100 mm, (8e) beplantning. Illustrasjon: SFI Klima 2050/SINTEF Community

pene til blågrønne tak for å kunne bestemme faktisk isolasjonsevne.

### Kjøleeffekt av regn- og smeltevann

Kjøleeffekten fra regn- og smeltevann som trenger gjennom isolasjonslaget i omvendte tak, er tema for masteroppgaven til Kristina Fjeldstad Olsen. Studien inngår i Klima 2050 og omfatter laboratorieforskning for å avdekke størrelsen på vannstrømmene gjennom isolasjonslaget i tillegg til numeriske beregninger av kjøleeffekten dette representer.

Standarder som brukes til beregning av varmetap, tar i dag kun hensyn til deler av kjøleeffekten som oppstår i omvendte tak. Kjøleeffekten beskrives med følgende varmetap:

(a) Varmetap som følge av at membranen kjøles av regn- og smeltevann som kommer forbi isolasjonen. Dette varmetapet berregnes med -U-korreksjonen presentert i [1].

(b) Varmetap som følge av tapt isolasjonsevne grunnet fuktopptak i isolasjon. Dette varmetapet er tatt hensyn til i [2].

(c) Varmetap grunnet fordampning og kondensering av vann inn i isolasjonen. Det er uvisst om dette er blitt tatt hensyn til i de andre korreksjonene, men det kommer ikke klart frem i standardene.

(d) Kuldebroer som oppstår i plateskjøtene. Dette er ikke blitt tatt hensyn til i standardene.

### Forslag til praktisk forbedring av omvendte tak

For å redusere alle de overnevnte varmetapene, foreslår vi å plassere et vanntett separasjonssjikt over isolasjonen slik vist i figuren over, se lag (4). Dette sjiktet må være dampåpent for å tillate uttørring av fukt mot uteluft, og motstandsdyktig mot både råteskader og planterøtter. Et sjikt som dette er i dag ikke omtalt i Byggeforskerien.

Laboratorieforskningene viser i tillegg

legge betydningen av tette skjører i varmeisolasjonslaget. Bruk av isolasjon i to lag med not og fjær lagt tett gjorde at kun 40 % av regnvannet trakk ned gjennom isolasjonslaget. Monteringsfeil med glipper eller gruspartikler mellom isolasjonsplatene økte andelen regnvann gjennom isolasjonslaget til over 80%. I tillegg til økt kjøleeffekt viser dette betydningen av å ha fall på membran for å sikre drenering av vann mot sluk.

[1] NS-EN ISO 6946:2017 Bygningskomponenter og -elementer - Varmemotstand og varmegjennomgangskoeffisient – Beregningsmetoder

[2] NS-EN ISO 10456:2007+NA:2010 Byggematerialer og -produkter - Hydrotermiske egenskaper - Tabulerte dimensjonerende verdier og prosedyrer for bestemmelse av deklarererte og praktiske termiske verdier