



KLIMA
2050

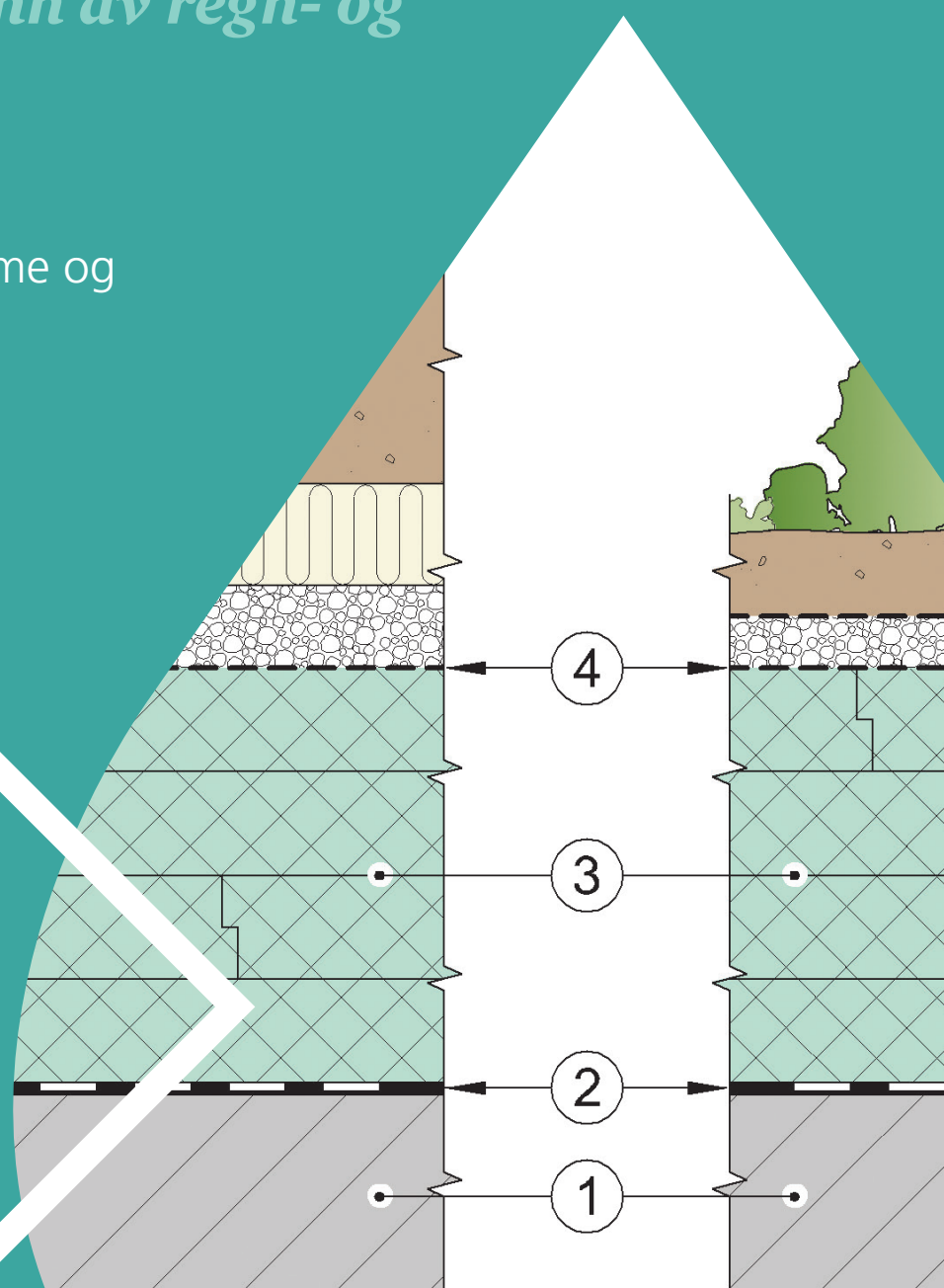
RAPPORT

Nr. 37 – 2022

OMVENDTE KOMPakte TAK

Varmetap på grunn av regn- og smeltevann

Nora Schjøth Bunkholt,
Erlend Andenæs, Berit Time og
Tore Kvande





KLIMA 2050

Klima 2050 Report No 37

Nora Schjøth Bunkholt (SINTEF Community), Erlend Andenæs (NTNU), Berit Time (SINTEF Community) og Tore Kvande (NTNU)

Omvendte kompakte tak

Varmetap på grunn av regn- og smeltevann

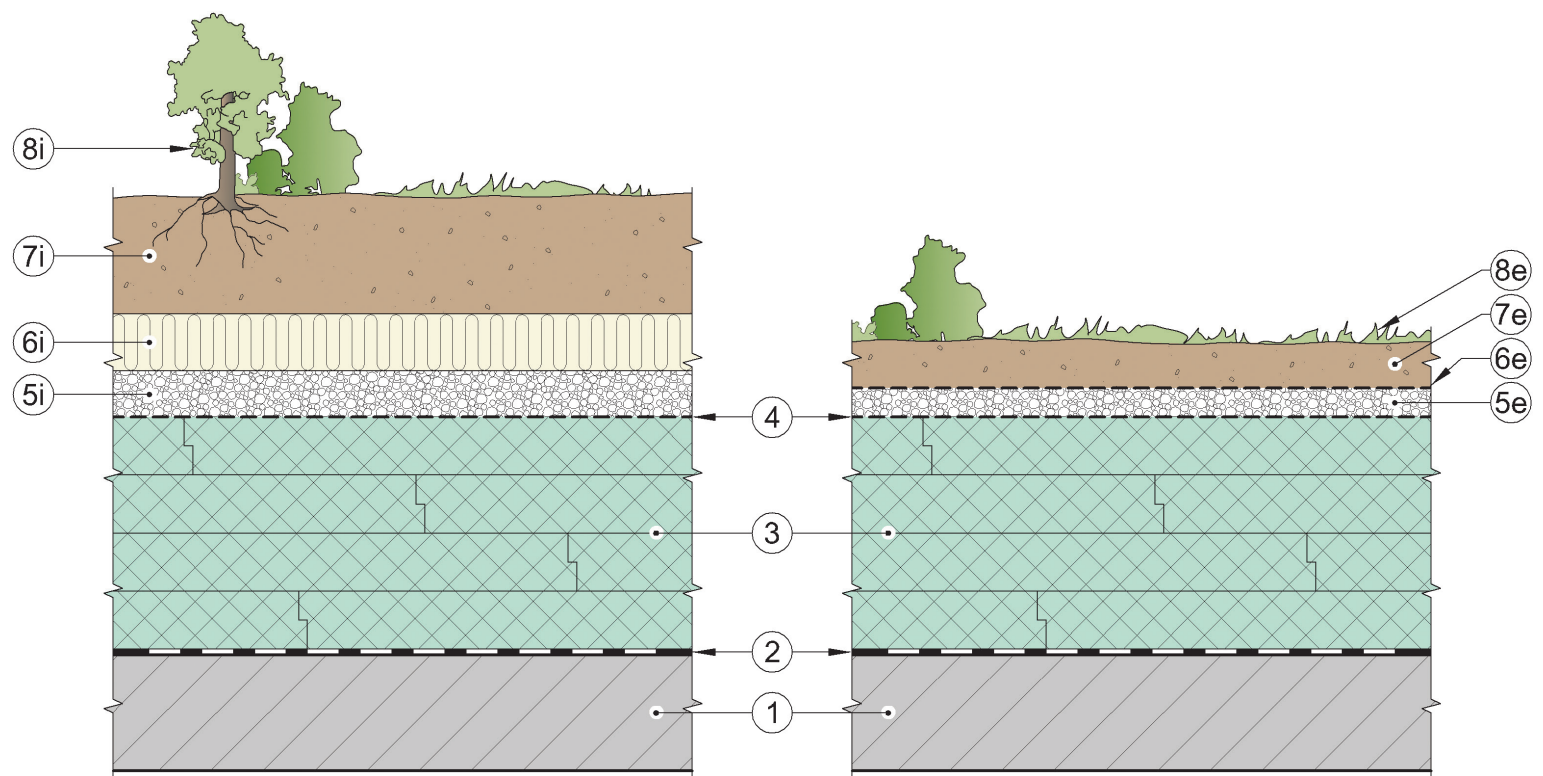
Keywords: Omvendt tak, fukt, klima, U-verdi, varmetap, nedbør, sperresjikt

ISBN: 978-82-536-1768-8 (pdf)

Illustration front cover and page 3: Klima2050

Publisher: SINTEF Community, Høgskoleringen 7 b, PO Box 4760 Sluppen, N-7465 Trondheim

www.klima2050.no



Forord

Denne rapporten omhandler varmetap i omvendte kompakte takkonstruksjoner. Den tar for seg hvilken betydning det har at regnvann føres ned gjennom isolasjonssjiktet, tas opp i isolasjonen og dreneres langs membranen i slike tak. Denne rapporten er skrevet i samarbeid mellom Klima 2050 og innovasjonsprosjektet *Urbane fordrøyende tak – Verktøykasse for prosjektering og utførelse (RoofTools)* hvor Multiblokk AS er prosjektansvarlig. Rapporten er i stor grad basert på en prosjektoppgave [1] og en masteroppgave [2] begge skrevet av Kristina Fjeldstad Olsen ved NTNU i Klima 2050 i perioden 2019–2020. Supplerende laboratorieforsøk er gjennomført vinteren 2021/2022.

Klima 2050 – Reduksjon av samfunnsrisiko knyttet til klimaendringer på det bygde miljø er et senter for forskningsbasert innovasjon (SFI) finansiert av Norges forskningsråd og partnerne i konsortiet. SFI-statusen muliggjør langsiktig forskning i nært samarbeid med privat og offentlig sektor, samt med andre forskningspartnere som har som mål å styrke Norges innovasjons- og konkurranseevne innen klimatilpasning. Sammensetningen av konsortiet er viktig for å kunne redusere samfunnsrisikoen forbundet med klimaendringer.

Senteret vil styrke bedriftenes innovasjonskapasitet gjennom fokus på langsiktig forskning. Det er også et klart mål å legge til rette for tett samarbeid mellom FoU-aktive bedrifter og fremtredende forskningsgrupper. Det blir lagt vekt på utvikling av fuktbestandige bygninger, overvannshåndtering, blågrønne løsninger, tiltak for forebygging av vannutløste skred, sosioøkonomiske insentiver og beslutningsprosesser. Både ekstremvær og gradvise endringer i klimaet blir adressert.

Vertsinstitusjonen for SFI Klima 2050 er SINTEF Community, og senteret ledes i samarbeid med NTNU. De andre forskningspartnerne er Handelshøyskolen BI, Norges Geotekniske Institutt (NGI) og Meteorologisk institutt (MET Norge).

Industripartnerne representerer viktige deler av norsk byggenæring; rådgivere, entreprenører og produsenter av byggevarer og teknologi: Skanska Norge, Multiconsult AS, Mesterhus, Norgeshus AS, Leca Norge AS, Isola AS og Skjæveland Gruppen AS. Senteret inkluderer også viktige offentlige byggherrer og eiendomsutviklere: Statsbygg, Statens vegvesen, Jernbanedirektoratet og Avinor AS. Sentrale aktører er også Trondheim kommune, Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) og Finans Norge.

Forfatterne ønsker å rette en takk til Ole Mangor-Jensen i Skanska; Kristin Elvebakk, Jan Ove Busklein, Øystein Holmberget og Remy Eik i SINTEF, og Ole Aunrønning ved NTNU.

Trondheim, august 2022

Berit Time
Senterleder
SINTEF Community

Sammendrag

Kompakte tak er tak som består av ett eller flere materiallag som ligger i en tett sandwich-konstruksjon uten luftsjikt. I omvendte kompakte tak er det vanntette sjiktet (takmembranen) plassert under isolasjonssjiktet. Dette fører til et ekstra varmetap i omvendte kompakte tak sammenliknet med rettvendte kompakte tak. Både økt fuktinnhold i isolasjonen, fordamping av vann fra membranen til isolasjonen og regnvann som dreneres mellom membranen og isolasjonssjiktet gir bidrag til det ekstra varmetapet.

Denne rapporten er i stor grad basert på en prosjektoppgave og en masteroppgave skrevet av Kristina Fjeldstad Olsen ved NTNU i Klima 2050 i perioden 2019–2020. Prosjektoppgaven inkluderer en litteraturstudie av kjøleeffekten av regn- og smeltevann i omvendte takkonstruksjoner. Masteroppgaven omfatter laboratorieforsøk og numeriske beregninger gjennomført i simuleringsprogrammet WUFI. Laboratorieforsøkene ser på størrelsen på vannstrømmer gjennom isolasjonslaget i omvendte tak. WUFI-simuleringene undersøker hvordan fuktopptak i XPS varierer for ulike klima, innetemperaturer og for ulike ballasterende topplag. Da Kristinas lab. studier ble noe “amputert” av Covid-19-pandemien, har nye forsøk med samme metode blitt gjennomført vinteren 2021/2022 for å supplere hennes resultater.

Formålet med rapporten er å oppsummere eksisterende kunnskap om varmetap i omvendte kompakte takkonstruksjoner. Spesielt vil vi oppsummere:

- 1) Hvilken betydning det har for varmetap og energibruk i bygningen at regnvann føres ned mellom isolasjonsplatene, tas opp i isolasjonssjiktet og dreneres langs membranen.
- 2) Hvordan standardiserte beregningsmetoder tar hensyn til ekstra varmetap på grunn av fukt.
- 3) Hvilke løsning(er) som kan anbefales for omvendte tak for å redusere fuktpåkjenningen på isolasjonen.

Det er ingen omforent konklusjon i litteraturen på om varmetap som følge av fuktopptak i isolasjonen eller varmetap på grunn av drenering av vann på membranen er størst, men estimerte påslag til U-verdien pga. det ekstra varmetapet i omvendte tak ligger i intervallet 0,03–0,07 W/m²K. Oppsummert gir den studerte litteraturen følgende anbefalinger for å redusere varmetapet knyttet til omvendte tak:

- Plassere et dampåpent vannavstøtende separasjonssjikt mellom topplag og isolasjon.
- Bruke store platedimensjoner (redusere antallet skjøter).
- Bruke isolasjon i to lag med forskjøvnne skjøter eller not og fjær.
- Etablere fall på membran for å sikre drenering av vann mot sluk.
- Vurdere topplaget som benyttes. Ballast gir bedre uttørring enn vegetasjon.

Resultater fra laboratoriemålinger viser at andelen vann som strømmer gjennom isolasjonssjiktet er vesentlig lavere for falsede isolasjonsplater enn rettkantede. Vekten av ballast på platen klemmer de horisontale flatene i falsen sammen og hindrer vanngjennomstrømning på en måte som ikke oppnås for rettkantede plater, som bare har vertikale flater i plateskjøtene. Når isolasjonsplatene ligger i forband er også vanngjennomstrømningen lavere enn når plateskjøtene er parallelle. Den første serien med målinger viser at andelen vann som strømmer gjennom isolasjonslaget er noe høyere ved mindre nedbørsmengder, men de supplerende forsøkene viser en motsatt trend i de fleste målingene. Uten ballast vil også lekkasjeraten øke drastisk, men dette er ikke en realistisk situasjon for en bygget konstruksjon.

Resultatene fra simuleringer i WUFI viste et større fuktopptak i isolasjonen i grønne omvendte tak enn i tak med singel som topplag. Beregningene viste også at fuktopptaket økte ved høyere innetemperatur og i klima med større nedbørmengder og lavere utetemperaturer. Flere referanser i forskningslitteraturen anbefaler å plassere et vannavstøtende og dampåpent separasjonssjikt mellom isolasjon og topplag i omvendte tak for å bidra til at vannstrøm gjennom isolasjonssjiktet reduseres. I samsvar med litteraturen viste WUFI-simuleringer at dette kan bidra til en betydelig reduksjon i fuktopptaket i isolasjonen.

Beregninger av lekkasjenes påvirkning på U-verdier viser at forholdsvis store lekkasjer må oppstå før U-verdien øker i alvorlig stor grad. En lekkasjerate på 12 %, som er det høyeste som ble målt i forsøk med faldede plater og ballast, gir 8 % økning fra en U-verdi på 0,128 W/m²K. En mer typisk lekkasjerate på 5% gir 3% økning i U-verdien, dette er i samme størrelsesorden som korreksjonsfaktorene som oppgis i NS-EN ISO 10456

Basert på erfaringene oppsummert i denne rapporten, foreslås det å revidere anbefalingene i Byggforskserien ved å ta inn et dampåpent, vannavstøtende separasjonssjikt mellom topplaget og isolasjonssjiktet i omvendte kompakte tak. Et slikt separasjonssjikt vil bidra til å redusere varmetapet i slike takkonstruksjoner. Sjiktet må være dampåpent for å tillate uttørring av fukt mot uteluft.

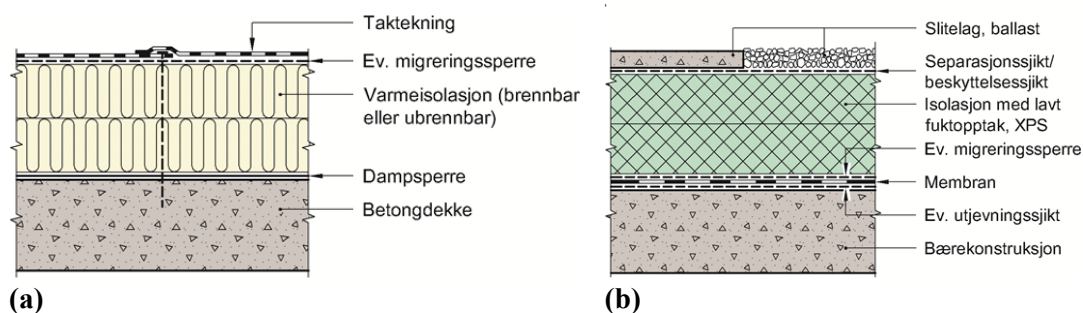
Innhold

FORORD.....	5
SAMMENDRAG.....	6
INNHold.....	8
1 INNLEDNING.....	9
1.1 BAKGRUNN	9
1.2 FORMÅL OG OMFANG	10
2 STANDARDISERTE BEREGNINGSMETODER.....	11
2.1 EKSTRA VARMETAP I OMVENDTE TAK	11
2.2 VARMETAP PGA. FUKTINNHold I ISOLASJONSSJIKTET.....	11
2.3 VARMETAP PGA. DRENERING LANGS MEMBRANEN.....	12
3 ERFARINGER FRA LITTERATUR	13
4 LABORATORIEMÅLINGER	16
4.1 MODELL (TESTOBJEKT)	16
4.2 SIMULERING AV NEDBØR.....	17
4.3 GJENNOMFØRTE TESTER.....	18
4.4 BEREGNING AV ΔU_R -KORREKSJON	19
4.5 RESULTATER	19
5 NUMERISKE BEREGNINGER	23
5.1 TAKMODELLER OG MATERIALVALG	23
5.2 BEREGNINGSTILFELLER OG ANTAKELSER.....	23
5.3 RESULTATER.....	24
6 ANBEFALINGER.....	26
6.1 OPPSUMMERING	26
6.2 FORSLAG TIL REVISJON AV ANBEFALINGENE I BYGGFORSKSERIEN	27
REFERANSER.....	28

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Kompakte tak er tak som består av ett eller flere materiallag som ligger så tett sammen som mulig. I rettvendte kompakte tak plasseres det vanntette sjiktet (taktekningen) over isolasjonssjiktet (figur 1a). Dette hindrer fuktopptak i konstruksjonen, men kan gi risiko for skader fordi tekningen blir utsatt for klimatiske og mekaniske påkjenninger. For å redusere faren for skader kan man velge omvendte kompakte tak. I omvendte tak er det vanntette sjiktet (takmembranen) plassert under isolasjonssjiktet (figur 1b). Dette gir god beskyttelse mot påkjenninger både i byggeperioden og etter at bygningen er tatt i bruk. Omvendte tak bygges ofte med et slitelag/ballast øverst for å holde isolasjonen på plass og er derfor særlig godt egnet for trafikkerte tak, for terrasser med beplantning og som dekke over rom under bakken. Ballasteringen gjør dessuten mekanisk innfesting av tekningen unødvendig. For eksempel anses omvendte tak som mest robust for tak til biltrafikk og parkering, se Byggedetaljer 525.307 [3]. Også for terrasser med beplantning/vegetasjon benyttes ofte omvendte tak, se Byggedetaljer 525.306 [4].



Figur 1. Prinsipiell oppbygning av kompakte tak som vist i Byggedetaljer 525.207 [5].

(a) Rettvendt tak.

(b) Omvendt tak

En ulempe med å velge omvendte tak er at isolasjonssjiktet blir eksponert mot det ytre klima og dermed kan bli utsatt for stor fuktbelastning. I omvendte tak benyttes det derfor alltid isolasjon med lavt fuktopptak, for eksempel ekstrudert polystyren (XPS) eller skumglass, men fukt kan allikevel bli tatt opp i isolasjonssjiktet. Fuktopptaket fører til at konstruksjonens U-verdi øker fordi fuktig/våt isolasjon har redusert isoleringsevne. I tillegg kan regn- og smeltevann renne gjennom skjøter i isolasjonssjiktet og bli liggende eller dreneres mellom isolasjonen og takmembranen (det vil si på "varm" side av isolasjonen). Slik avrenning vil ytterligere øke varmetapet (og U-verdien) i omvendte tak sammenliknet med rettvendte tak. En økning i U-verdi er ugunstig med tanke på krav til fremtidens energieffektive bygninger, og det er derfor ønskelig å begrense varmetapet i omvendte takkonstruksjoner så mye som mulig.

Fuktutfordringen i omvendte tak er spesielt aktuelt for grønne/blågrønne tak. Grønne tak har de siste årene blitt vanligere, blant annet fordi slike tak kan bidra til lokal overvannshåndtering ved å forsinke avrenning av regnvann. Dette er spesielt ønskelig med tanke på å håndtere forventet økt hyppighet av korte, intense regnbyger i Norge [6]. Grønne tak kan bygges både som rettvendte og omvendte kompakte tak, men fordelen med å velge omvendte tak er som nevnt at takmembranen beskyttes. I grønne omvendte tak utsettes imidlertid isolasjonen for et konstant fuktig miljø i tillegg til at slike tak gir dårligere uttørkingmulighet for isolasjonen sammenliknet med omvendte tak med tradisjonell ballast (typisk singel eller betongheller).

1.2 Formål og omfang

Formålet med denne rapporten er å oppsummere eksisterende kunnskap om varmetap i omvendte kompakte takkonstruksjoner. Spesielt vil vi oppsummere:

- 1) Hvilken betydning det har for varmetap og energibruk i bygningen at regnvann føres ned mellom isolasjonsplatene, tas opp i isolasjonssjiktet og dreneres langs membranen.
- 2) Hvordan standardiserte beregningsmetoder tar hensyn til ekstra varmetap på grunn av fukt.
- 3) Hvilke løsning(er) som kan anbefales for omvendte tak for å redusere fuktpåkjenningen på isolasjonen.

Rapporten er i stor grad basert på en prosjektoppgave [1] og en masteroppgave [2] skrevet av Kristina Fjeldstad Olsen ved NTNU i Klima 2050 i perioden 2019–2020. Prosjektoppgaven inkluderer en litteraturstudie som omhandler kjøleeffekten av regn- og smeltevann i omvendte takkonstruksjoner. Masteroppgaven omfatter laboratorieforsøk og numeriske beregninger gjennomført i simuleringssystemet WUFI. Laboratorieforsøkene ser på størrelsen på vannstrømmer gjennom isolasjonslaget i omvendte tak. WUFI-simuleringene undersøker hvordan fuktopptak i XPS varierer for ulike klima, innnetemperaturer og for ulike ballasterende topplag. Hovedfunn fra masteroppgaven er også beskrevet i Byggeindustrien nr. 10 2020 [7].

Rapporten er finansiert gjennom BIA-prosjektet *Urbane fordrøyende tak – Verktøykasse for prosjektering og utførelse (RoofTools)* hvor Multiblokk AS er prosjektansvarlig, og SFI Klima 2050.

2 Standardiserte beregningsmetoder

2.1 Ekstra varmetap i omvendte tak

Fordi isolasjonssjiktet i omvendte tak utsettes for spesielt stor fuktbelastning, må det benyttes ulike korreksjoner ved varmetekniske beregninger for denne typen takkonstruksjoner (for eksempel ved U-verdi-beregninger). Dette skyldes både at fuktig/våt isolasjon får redusert isoleringsevne og at vann som dreneres på varm side av isolasjonssjiktet, det vil si mellom isolasjonen og takmembranen, vil føre til et økt varmetap. Det ekstra varmetapet i omvendte kompakte tak sammenliknet med rettvendte kompakte tak kan i hovedsak deles i følgende bidrag:

- varmetap på grunn av økt fuktinnhold i isolasjonen
- varmetap på grunn av drenering av vann mellom takmembranen og isolasjonen
- varmetap på grunn av fordamping av vann inn i isolasjonen
- varmetap på grunn av kuldebroer i plateskjøtene

Standardiserte beregningsmetoder for å ta hensyn til det ekstra varmetapet i omvendte tak er beskrevet i NS-EN ISO 10456:2007 *Byggematerialer og -produkter - Hygrotermiske egenskaper - Tabulerte dimensjonerende verdier og prosedyrer for bestemmelse av deklarete og praktiske termiske verdier* [8] og NS-EN ISO 6946:2017 *Bygningskomponenter og -elementer - Varmemotstand og varmegjennomgangskoeffisient – Beregningsmetoder* [9]. Varmetap på grunn av fuktinnhold i isolasjonen tas hensyn til når dimensjonerende varmekonduktivitet for isolasjonssjiktet beregnes iht. NS-EN ISO 10456, se avsnitt 2.2. Varmetap på grunn av drenering av vann mellom membranen og isolasjonssjiktet tas hensyn til ved beregning av en korreksjon til U-verdien beskrevet i NS-EN ISO 6946, se avsnitt 2.3. Det er uklart hvorvidt tap på grunn av fordamping av vann inn i isolasjonssjiktet inngår i disse to korreksjonene, men det er ikke beskrevet at fordampingsvarmetapet er tatt hensyn til. Kuldebroer i plateskjøtene er ikke tatt hensyn til.

2.2 Varmetap pga. fuktinnhold i isolasjonssjiktet

Varmekonduktiviteten¹ til materialer er avhengig av materialets fuktinnhold. I bruksområder med høy fuktbelastning vil fuktinnholdet øke og redusere materialets varmeisolerende evne. Ved varmetekniske beregninger, for eksempel beregning av U-verdi, må den deklarete varmekonduktiviteten til materialene korrigeres basert på forventet fuktbelastning. NS-EN ISO 10456 gir beregningsmetoder for å bestemme varmekonduktiviteten til materialer i ulike bruksområder, det vil si dimensjonerende varmekonduktivitet, λ_d . Den dimensjonerende varmekonduktiviteten bestemmes ved å multiplisere deklart varmekonduktivitet, λ_D , med en korreksjonsfaktor for fukt, F_m ($\lambda_d = F_m \times \lambda_D$). Se også Byggdetaljer 471.010 [10] og Byggdetaljer 525.207 [5].

Omvendte tak deles inn i uttøringsgrupper avhengig av hva sjiktet over isolasjonen (topplaget) består av. Topplag som i liten grad dekker til isolasjonen og gir rask uttørring har lavest fuktopptak. Tabell 1 viser korreksjonsfaktoren, F_m , for å bestemme dimensjonerende varmekonduktivitet til XPS. Fuktinnhold og korreksjonsfaktorer for fukt er hentet fra det nasjonale tillegget til NS-EN ISO 10456 [8], men det er for oss uklart hva som er kildene til disse faktorene

¹ Varmekonduktiviteten angir hvor mye varme per tidsenhet, målt i watt (W) som strømmer gjennom et areal på 1 m² av et materialsjikt ved en konstant temperaturgradient gjennom materialet på 1 K per meter tykkelse. Varmekonduktiviteten er slik et mål på hvilken evne et materiale har til å lede varme.

Tabell 1. Korreksjonsfaktor for fukt for beregning av dimensjonerende varmekonduktivitet for XPS i henhold til NS-EN ISO 10456 [8] og eksempel på beregnet dimensjonerende varmekonduktivitet.

Topplag og isolasjon	Fuktinnhold Ψ [m ³ /m ³]	Korreksjonsfaktor for fukt F_m [-]	Eksempel på varmekonduktivitet [W/mK]	
			Deklarert λ_D	Dimensjonerende λ_d
Singel Isolasjon i ett lag, klasse WD(V)3-FT1	0,01	1,03	0,034	0,035
Betongheller på klosser Isolasjon i to lag, klasse WD(V)3-FT1	0,02	1,05	0,034	0,036
Betongheller på singel Høyst 10 mm puss på isolasjon. Permanent skygge, klasse WD(V)3-FT1	0,03	1,08	0,034	0,037
Betong og heller direkte på isolasjon eller i sand, beplantning, klasse WD(V)-FT1	0,05	1,13	0,034	0,038

2.3 Varmetap pga. drenering langs membranen

NS-EN ISO 6946 beskriver en korreksjonsmetode for å ta hensyn til varmetap på grunn av regnvann/smeltevann som strømmer gjennom skjøter i isolasjonslaget og dreneres mellom membranen og isolasjonen i omvendte tak. Metoden gjelder *kun* for oppvarmede bygninger og takkonstruksjoner med XPS som isolasjonsmateriale. Følgende formel benyttes [9]:

$$\Delta U_r = p \cdot f \cdot x \cdot \left(\frac{R_1}{R_{tot}} \right)^2 \quad (1)$$

der

- ΔU_r er korreksjonen til U-verdien på grunn av vann som strømmer mellom isolasjonen og membranen
- p er gjennomsnittlig nedbørsrate i fyringssesongen [mm/dag] (basert på data som er relevante for stedet, for eksempel fra en målestasjon, eller gitt av nasjonale, regionale eller lokale bestemmelser)
- f er lekkasjerate/dreneringsfaktor [-]. Gir andel av p som renner ned til den vanntette membranen (*størrelse på denne faktoren er ikke gitt i standarden*)
- x er faktor for økt varmetap på grunn av regnvann som strømmer på membranen [W · dag/m² · K · mm] (*størrelse på denne faktoren er ikke gitt i standarden*)
- R_1 er varmemotstanden til isolasjonslaget over membranen [m²K/W]
- R_{tot} er total varmemotstand for takkonstruksjonen før bruk av korreksjonen

Gitt et omvendt tak med isolasjonssjikt i ett lag med rette (butte) skjøter og åpent topplag, for eksempel singel, kan man ifølge NS-EN ISO 6946 sette $f \cdot x = 0,04$ (dette er oppbygningen av isolasjonssjiktet som er antatt å gi den høyeste ΔU_r)² [9]. Lavere verdier av $f \cdot x$ kan brukes for konstruksjoner med mindre drenering gjennom isolasjonssjiktet. Dette kan for eksempel gjelde i tilfeller der det benyttes andre skjøtemetoder i isolasjonssjiktet, som forskjøvne skjøter eller not og fjær. I beregningene i denne rapporten er verdien av $f \cdot x$ satt til 0,0481 [2].

² NS-EN ISO 6946 oppgir ikke verdier for f og x , og kun ett eksempel på en verdi for $f \cdot x$.

3 Erfaringer fra litteratur

Dette kapittelet oppsummerer litteraturstudien gjennomført i en prosjektoppgave ved NTNU [1]. Tabell 2 gir en oppsummering av tema, resultater og anbefalinger som diskuteres i litteraturen [11-32] som ble gjennomgått i studien. Tabell 3, 4 og 5 utdyper noe av informasjonen i tabell 2. Målet med litteraturstudien var å samle eksisterende forskning om kjøleeffekten av regn- og smeltevann i omvendte takkonstruksjoner og få en bedre forståelse av ΔU_r -korreksjonen (korreksjonen som tar høyde for kjøleeffekten av nedbør som dreneres på varm side av isolasjonslaget).

Tabell 2. Oppsummering av litteraturen som ble avdekket i litteraturstudien [1].

Årstall	1976 – 2017		
Land (antall studier i parentes)	Tyskland (8) USA (6) Belgia (3)	Tsjekkia (2) Canada (2) Storbritannia (1)	Sverige (1) Danmark (1)
Type studier	Teoretiske beregninger, feltforsøk, laboratorieforsøk, simuleringer		
Overordnet	Det forekommer et ekstra varmetap i omvendte kompakte tak sammenliknet med rettvendte tak. Både økt fuktinnhold i isolasjonen, fordamping av vann fra membran til isolasjon og regnvann som dreneres mellom membranen og isolasjonssjiktet gir bidrag til dette varmetapet.		
Faktorer som påvirker varmetapet	Nedbør (hyppighet og intensitet), vind, temperaturer (ute og inne), snødekke, lekkasjerate ¹), fuktopptak i isolasjonen, type topplag, isolasjonssjikt (utforming, tykkelse, type skjøter), drenerings-/separasjonssjikt mellom isolasjon og topplag, takfall		
Varmetap pga. diffusjon av vann inn i isolasjonssjiktet (se også tabell 3)	Varmetapet kommer både av at isolasjonen får høyere varmekonduktivitet med økende fuktinnhold, og av prosessen der vann diffunderer inn i isolasjonssjiktet. Diffusjon blir mulig ved at det dannes en vannfilm mellom membranen og isolasjonen. Dannelsen av en slik vannfilm kan reduseres ved etablering av fall mot sluk. Noen studier mener at varmetapet pga. diffusjon av vann inn i isolasjonen er større enn varmetapet pga. vann som dreneres mellom membranen og isolasjonssjiktet. Forfatterne som ser på fuktopptak pga. diffusjon, beskriver ikke varmeenergien som kreves for at regnvann skal fordampe. Det er usikkert hvor stort varmetapet knyttet til vanddamptransport inn i isolasjonssjiktet er.		
Varmetap pga. vann som dreneres mellom membran og isolasjonssjikt (se også tabell 4)	Drenering av vann mellom membran og isolasjonssjikt gir et varmetap pga. avkjøling av membranen og oppvarming av vannet. Tapet øker med økende dreneringsfaktor, økte nedbørmengder og økt snøsmelting. En forfatter konkluderer med at dette varmetapet kan være større for lette takkonstruksjoner enn for tunge takkonstruksjoner.		
Nedbør	Langvarige og hyppige nedbørshendelser påvirker temperaturprofilene gjennom taket. Økte nedbørmengder gir lavere membrantemperatur og større varmetap.		
Dreneringsrate¹⁾	Avhenger av nedbørintensiteten. Økt nedbørintensitet gir lavere dreneringsrate fordi større andel av vannet dreneres bort på takoverflaten. Lavere nedbørintensiteter og lengre varighet gir økt dreneringsrate. Dreneringsraten avhenger også av hvor tett topplaget er, om det er et eventuelt dreneringssjikt over isolasjonen og hvordan isolasjonsplatene er montert (not/fjær eller rette skjøter). Dreneringsraten påvirker i størst grad varmetapet pga. drenering av vann mellom membran og isolasjonssjikt.		
Topplagets betydning	Topplaget til takkonstruksjonen påvirker konstruksjonens uttørkingsevne. Grønne tak gir lavere uttørking enn tak med topplag av for eksempel ballast.		
Skjøter i isolasjonssjiktet	Det forekommer lokale varmetap i skjøtene i isolasjonssjiktet (kuldebroer). Dette tapet er større for omvendte tak enn for rettvendte tak pga. vannet som strømmer gjennom skjøtene i omvendte tak. Større platedimensjoner eller separasjonssjikt mellom topplag og isolasjon kan begrense kuldebroene fordi mindre regnvann vil trenge ned i skjøtene. Så smale skjøter som mulig anbefales.		
Bruk av separasjonssjikt	Varmetapet reduseres ved bruk av et dampåpent vannavstøtende separasjonssjikt mellom topplag og isolasjon fordi et slikt sjikt sørger for at mesteparten av vannmassene dreneres ned i sluk på oversiden av isolasjonslaget istedenfor mellom membran og isolasjonssjikt.		

ΔU-korreksjon²⁾ (se også tabell 5)	Variierende informasjon om hvor stor korreksjonen av U-verdien bør være og hvilke forhold man bør ta hensyn til. Lite litteratur har satt en gitt størrelse på det ekstra varmetapet i omvendte takkonstruksjoner.
Anbefalinger for å redusere varmetapet i omvendte tak	<ul style="list-style-type: none"> – Plassere et dampåpent vannavstøtende separasjonssjikt mellom topplag og isolasjon. – Bruke store platedimensjoner (reduere antall skjøter). – Bruke isolasjon i to lag med forskjøvne skjøter eller not og fjær. – Etablere fall på membran for å sikre drenering mot sluk. – Vurdere topplaget som benyttes. Ballast gir større uttørring enn vegetasjon.

¹⁾ Lekkasjeraten er forholdet mellom mengde nedbør som treffer taket og mengde vann som dreneres mellom membran og isolasjon.

²⁾ ΔU -korreksjonen beskriver korreksjonen/tillegget til U-verdien til omvendte tak på grunn av ekstra varmetap pga. fukt

Tabell 3. Litteratur som diskuterer varmetap knyttet til fuktopptak på grunn av vanddampdiffusjon i isolasjonslaget.

Referanse	Informasjon
[26]	Fant at et fuktopptak i XPS på 1,5 vol-% kan forventes i felt. Fant størst fuktopptak i isolasjonsplatene nærmest innvendig sluk (omtrent det dobbelte sammenliknet med andre områder lengre fra sluk). For isolasjonssjikt i to lag var fuktinnholdet størst øverst i hvert av lagene. For isolasjonssjikt i ett lag minket fuktinnholdet fra toppen til bunnen av isolasjonssjiktet.
[27]	Diffusjon av vann inn i isolasjonssjiktet øker varmetapet. Fordamping av vann gir større kjøleeffekt enn oppvarming av vann på membranen.
[13]	Fuktopptaket i XPS øker med økende vanddampgradient. Fuktopptaket var tilnærmet lineært når fuktinnholdet i isolasjonen var lavt, og sank ettersom fuktinnholdet økte. Større fuktopptak når isolasjonen utsettes for stor damptrykkgradient enn ved å legge isolasjonen direkte i vann under isoterme betingelser. Fant høyere fuktopptak for XPS der ytterhuden var fjernet.
[29]	Fordi det ofte er betydelige temperaturgradienter gjennom isolasjonen i takkonstruksjoner er fuktopptak pga. dampdiffusjon viktig å bestemme. Isolasjonsplater har større fuktopptak når de utsettes for en stor damptrykkgradient enn ved å legge platene direkte under vann i isoterme betingelser. Konkluderte med at fuktopptaket er relativt lavt. Det er først når duggpunkttemperaturen oppstår i isolasjonssjiktet at fuktopptaket øker, pga. kondensering av vann.
[25]	Varmetap i forbindelse med fordamping inn i isolasjonen er vanskelig å bestemme og kan neglisjeres for XPS pga. stor dampmotstand. Fuktopptak i XPS målt 4 år etter installasjon viste at det tilsvarte 0,5-1 % av totalt volum. Omtrent samme fuktnivå ble registrert i rettventd tak som i omvendte tak. Konkluderte med at det ekstra varmetapet assosiert med omvendte tak i liten grad ble påvirket av fuktopptak i isolasjonen.
[16]	Inspeksjon av flere eksisterende tak i perioden 1980 – 1994 viste dannelse av vannfilm under isolasjonen som kan forårsake vanddampdiffusjon inn i isolasjonslaget. Konkluderer med at det største varmetapet i forbindelse med regn- og smeltevann er dannelsen av vannfilm oppå membranen, der varmetapet er et resultat av fordamping av vannet på membranen.
[31]	Fuktopptaket i isolasjonen (XPS) varierte mellom 4,8 til 8,7 vol-% etter 19 år eksponering. Fant at fuktinnholdet økte for hvert år pga. vanddampdiffusjon inn i isolasjonssjiktet. Dette skyldtes at det ble dannet en 10 mm vannfilm under isolasjonen. Økning i varmekonduktivitet pga. vannopptak i isolasjon over tid bør tas hensyn til for å få en korrekt U-verdi-korreksjon.
[17]	Deler av regnvannet danner en vannfilm oppå membranen og trenger inn i isolasjonen ved diffusjon pga. latent varme fra innvendig side. Vannfilmen gir 100 % RF under isolasjonssjiktet. Man bør ta hensyn til dette tapet selv om man kan argumentere med at en vannfilm kan unngås ved at det etableres fall mot sluk under isolasjonen.

Tabell 4. Litteratur som studerer varmetapet på grunn av vann som dreneres mellom membranen og isolasjonssjiktet.

Referanse	Informasjon
[27]	Brukte membrantemperaturen til å evaluere ytelsen til omvendte tak og om de blir påvirket av vann som dreneres mellom membranen og isolasjonen. Fant at temperaturen på membranen sank etter nedbørshendelser og snøsmelting. Konkluderte med at økt nedbør og snøsmelting ga økt varmetap.
[11]	Lette takkonstruksjoner kan få større varmetap pga. drenering av regnvann på membranen pga. lav termisk masse. Lette takkonstruksjoner der derfor mer sårbare for store nedbørshendelser, rask snøsmelting og lave utetemperaturer. Ved normale nedbørshendelser vil lette og tunge omvendte tak ha omtrent samme ytelse.
[17]	Varmetap pga. drenering av vann mellom membran og isolasjonssjikt øker bla. med høyere gjennomsnittlig nedbørintensitet og hyppigere nedbørhendelser i fyringssesongen. Redusert lekkasjerate gir redusert varmetap som følge av drenering av vann på membranen.
[24]	Jo mer regnvann som er i kontakt med membranen, jo større er varmetapet gjennom konstruksjonen. Fant at innendørstemperaturer ble redusert, mens temperaturen på nedløpsvann økte.

Tabell 5. Litteratur som beskriver ΔU -korreksjonen.

Referanse	ΔU	Kommentar
[25]	Innenlandsklima: 0,04–0,05 W/m ² K Kystklima (sterkere vind, mer regn): 0,06–0,07 W/m ² K	Studerer varmetap pga. drenering av vann mellom membran og isolasjon. Basert på sammenlikning av varmegjennomgang for omvendte tak med et rettventd tak.
[15]	0,03–0,04 W/m ² K brukes i nordiske land, avhengig av topplaget.	
[18]	$\Delta U = 0,03 \times m_p$ der m_p er gjennomsnittlig nedbørmengde gjennom fyringssesongen (mm/dag)	Basert på sammenlikning av varmegjennomgang for omvendte tak med et rettventd tak.
[12]	Tyske retningslinjer gir at man skal legge til en korreksjon på opp til 0,05 W/m ² K for å ta hensyn til varmetap på grunn av vann som dreneres mellom membran og isolasjon.	Tyske retningslinjer er gitt i DIN 4108-2
[20]	Bruker formel for ΔU fra NS-EN ISO 6946 og oppgir ulike verdier for faktoren f_x avh. av p . Se likning (1).	Studerer varmetapet pga. drenering av vann mellom membran og isolasjonssjikt. Kommenterer at valg av fyringssesong er viktig.
[17]	Oppgir at ΔU består av tre bidrag: $\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3$ $\Delta U_1 =$ tap pga. drenering av vann langs membran $\Delta U_2 =$ tap pga. fordamping inn i isolasjonen $\Delta U_3 =$ tap pga. kuldebroer i skjøter i isolasjonssjiktet.	Oppgir formler for beregning av de tre bidragene til ΔU .
[9]	Likning (1) brukes for beregning av varmetap pga. drenering av vann mellom membran og isolasjonssjikt.	Gjelder kun for XPS i tak over oppvarmede bygninger.

4 Laboratoriemålinger

4.1 Modell (testobjekt)

En modell av et omvendt tak (2×2 m) ble bygget av en sammensveiset stålramme og stålplate med takhelning 1:40. 50 mm XPS-plater med fals ble lagt i to lag direkte på stålplaten, med enten forskjøvne skjøter eller parallelle skjøter. Det ble ikke benyttet takmembran under isolasjonen i forsøkene utført i masteroppgaven [2]. En fiberduk (planteduk/geotekstil) ble plassert over isolasjonen og noen av forsøkene ble gjennomført med 50 mm singel (steinstørrelse 10–30 mm) som topplag. Takrenner samlet opp vann som 1) rant forbi isolasjonssjiktet og ned på stålplaten eller 2) ble drenert på undersiden av isolasjonen. Vannet ble samlet opp i to beholdere med en trykksensor i bunnen av hver beholder, som vist i figur 2. En rigg for vannpåføring ble montert over testtaket.



Figur 2. Renner og trykksylindere brukt til å måle avrenning. Avrenning over isolasjonssjiktet rant i en renne av plast over i sylindringen til høyre. Avrenning gjennom isolasjonssjiktet havnet i stålrenna (delvis synlig gjennom plasten) og sylindringen til venstre.

De supplerende forsøkene utført vinteren 2021/2022 ble utført på en tilnærmet identisk måte, se figur 3, men med en takteking (Isola Mestermembran) lagt i bunnen av riggen mot stålplaten. Taktekingen ble montert for å gi isolasjonsplatene et realistisk underlag. Samtlige forsøk (unntatt et kontrollforsøk) ble utført med ballast i form av elvegrus. For å lette ombyggingen av riggen mellom forsøkene ble mesteparten av grusen plassert i kasser som kunne løftes inn og ut med kran, se figur 4. Plastkassene, av en type som ofte blir brukt til å transportere frukt og grønnsaker, ble vurdert å ikke ha noen innvirkning på ballastens hydrologiske egenskaper eller på vektfordelingen.

Et eksempel på en vannavstøtende, dampåpen duk (rullprodukt) ble også skaffet og vurdert benyttet i de supplerende forsøkene. Kontroll av vanntetthetsegenskapene til duken (300 mm stående vanntrykk over lang tid) viste at materialet var for vanntett til å kunne gi noe annet enn 100% avrenning over isolasjonen. Duken ble derfor ikke benyttet. Derfor ble alle forsøk i runde to gjennomført kun med Plantex fiberduk som underlag for ballasten.



Figur 3. Testriggen for andre runde med forsøk, vinteren 2021/2022. På bildet er membran, isolasjon og geotekstil montert, men ikke ballasten.



Figur 4. Ballast plassert i permeable plastkasser for enklere ombygging.

4.2 Simulering av nedbør

Forsøkene ble utført etter en tysk metode for bestemmelse av lekkasjerate [33]. Testtaket ble påført vann i sykler tilsvarende en nedbørsmengde på 6,7 mm og 11,7 mm i løpet av 20 minutter. Dette tilsvarer en nedbørintensitet på henholdsvis 20,1 mm/time og 35,1 mm/time. Testtaket ble gjennomvannet før prøving startet. Valgt nedbørintensitet ble bestemt basert på IVF-kurven for Voll målestasjon i Trondheim, og gjennomsnittlig nedbør for et gjentakintervall på 50 år og en varighet på nedbør lik 20 minutter. På grunn av begrensninger med utstyret ble en intensitet på 6,3 mm og 10,4 mm brukt i forsøkene vinteren 2021/2022. Nedbøren ble påført i pulser, der dysene sto på i noen sekunder av gangen med noen sekunders mellomrom over en halv time, for å gi en tilsvarende gjennomsnittlig timesnedbør som under forrige forsøk. En dyse er vist i figur 5.



Figur 5. Dyser som påfører vann på testtriggen.

4.3 Gjennomførte tester

Laboratorieforsøkene ble gjennomført med 0 eller 4 mm brede skjøter mellom isolasjonsplatene og med forskjøvne eller parallelle plateskjøter. Det ble gjennomført prøving med og uten småsingel lagt under isolasjonslaget for å simulere et ujevnt underlag, og med og uten singel som topplag (ballast). Oversikt over gjennomførte tester er vist i tabell 6 og tabell 7.

Tabell 6. Gjennomførte tester våren 2020 [2].

Test	Bredde skjøt	Plateskjøter	Nedbørmengde	Singel under isolasjon	Topplag
1	0 mm	Forskjøvet kant	6,7 mm ¹⁾	-	-
2			11,7 mm ²⁾		
3	4 mm	Forskjøvet kant	6,7 mm	-	-
4			11,7 mm		
5	4 mm	Forskjøvet kant	6,7 mm	Småstein	-
6			11,7 mm		
7	4 mm	Parallelle kant	6,7 mm	Småstein	-
8			11,7 mm		
9	4 mm	Parallelle kant	6,7 mm	Småstein	50 mm singel
10	4 mm	Parallelle kant	11,7 mm		50 mm singel

¹⁾Tilsvarende en nedbørintensitet på 20,1 mm/time

²⁾Tilsvarende en nedbørintensitet på 35,1 mm/time

Tabell 7. Supplerende forsøk gjennomført vinteren 2021/2022.

Test	Bredde skjøt	Plateskjøter	Nedbørmengde	Platekanter	Ballast
A	4 mm	Forband	6,3 mm	Falset	0
			10,4 mm		
B	4 mm	Forband	6,3 mm	Falset	50 kg/m ²
			10,4 mm		
C	0 mm	Forband	6,3 mm	Rettkantet	100 kg/m ²
			10,4 mm		
D	4 mm	Forband	6,3 mm	Rettkantet	100 kg/m ²
			10,4 mm		
E	4 mm	Forband	6,3 mm	Falset	100 kg/m ²
			10,4 mm		
F	4 mm	Forband	6,3 mm	Falset	100 kg/m ² Knotteplast i bunn
			10,4 mm		
G	4 mm	Parallele skjøter	6,3 mm	Falset	100 kg/m ²
			10,4 mm		

4.4 Beregning av ΔU_r -korleksjon

Korreksjonen i U-verdi på grunn av drenering av vann under isolasjonslaget i omvendte tak, ΔU_r , ble i masteroppgaven beregnet etter likning 1 vist i avsnitt 2.3. Det ble benyttet en $f \cdot x$ -verdi på 0,048 gitt i [20], som er en noe mer konservativ verdi enn $f \cdot x = 0,04$ som foreslås i NS-EN ISO 6946 [9]. For gjennomsnittlig nedbør, p , ble en verdi på 2,3 mm/dag brukt basert på at gjennomsnittlig årsnedbør for Trondheim (Voll målestasjon) er 850 mm/år ifølge Byggdetaljer 451.031 [34]. U-verdi for et omvendt tak med ballast ble satt til 0,128 W/m²K (i henhold til minimumskravet $U=0,13$ i TEK 17 §14-2), som gir $R_{\text{tot}} = 7,81$ m²K/W. Det ble benyttet en varmemotstand for isolasjonslaget på $R_1=6,67$ m²K/W.

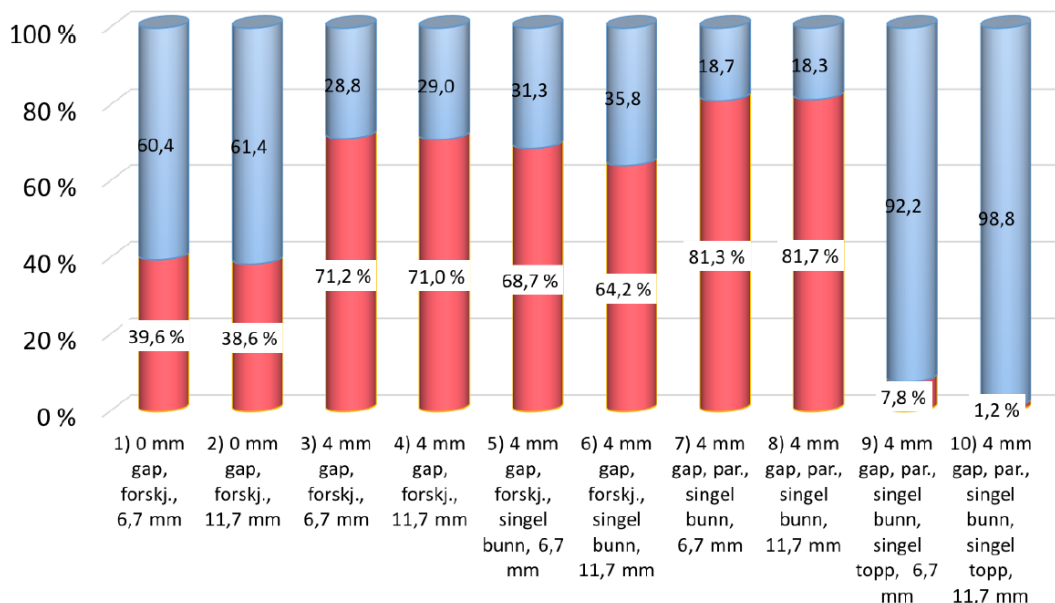
4.5 Resultater

Utvalgte resultater fra laboratoriemålingene er gitt i figur 6, figur 7 og figur 8 [2]. Figur 6 og figur 8 viser forholdet mellom regnvann som dreneres på oversiden og undersiden av isolasjonslaget. Lekkasjeraten er definert som andelen av tilført nedbørsvann som renner forbi isolasjonslaget og ned på takmembranen (se likning 1 i avsnitt 2.3). Figur 7 viser avrenningskurve for nedbør på 6,7 mm og 11,7 mm, som tilsvarer en nedbørintensitet på 0,3 mm/min og 0,6 mm/min. Kun mengden vann som renner forbi isolasjonssjiktet er vist fordi det er denne størrelsen som er av betydning for nedbørens kjøleeffekt. Tabell 7 viser beregnet ΔU_r -korleksjon og økning i U-verdi basert på lekkasjeratene som ble målt i laboratorium og antakelser gitt i avsnitt 4.4.

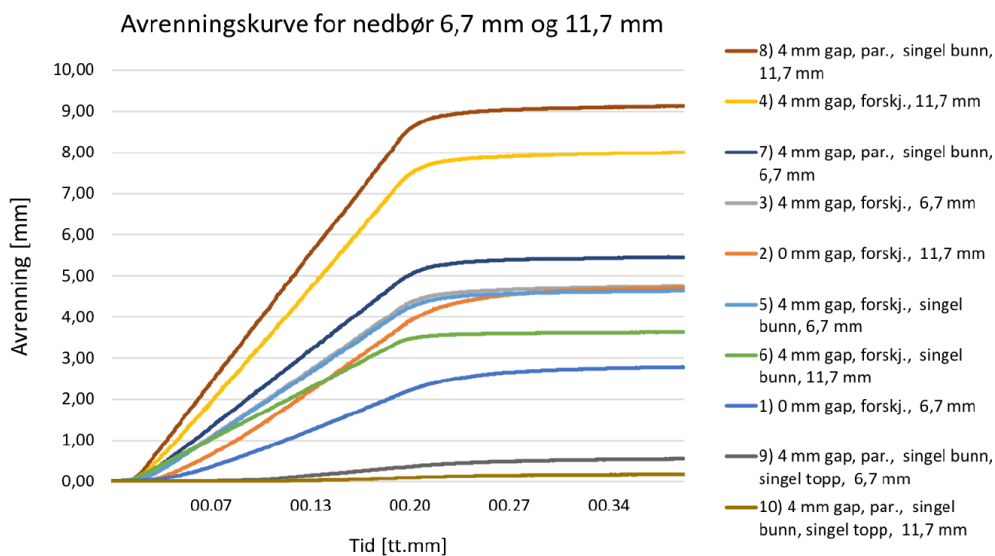
Generelt viser resultatene at lekkasjeraten er lavere for isolasjonsplater lagt i forband enn plater lagt med parallelle skjøter. Falsede plater har lavere lekkasjerater enn rettkantede, fordi vekten av ballast klemmer de horisontale flatene i falsen sammen og lager en mye tettere skjøt enn de utelukkende vertikale skjøtene mellom rettkantede plater. Den første serien med målinger viser en noe høyere lekkasjerate ved høyere nedbørintensitet, men det er motsatt i den andre serien. Lekkasjeraten er drastisk høyere i alle målinger uten ballast. Å redusere ballasten til halvparten av anbefalt verdi ser ikke ut til å påvirke lekkasjeraten nevneverdig. De fleste forsøkene har lagt platene med 4 mm mellomrom for å simulere unøyaktig legging på byggeplass. Å redusere mellomrommet til 0 mm gir noe mindre lekkasje, men eliminerer det ikke. Ved bruk av et lag knotteplast mellom isolasjon og takteking ble lekkasjeraten redusert til nesten null i alle forsøk.

Resultatene for lekkasjerate gir en økning i beregnet U-verdi for et omvendt tak på 1 – 25%, som vist i tabell 7. Forsøkene indikerer at for testet nedbørintensitet vil et drenerende topplag i stor grad redusere lekkasjeraten og dermed varmetap og økning i U-verdi i omvendte tak.

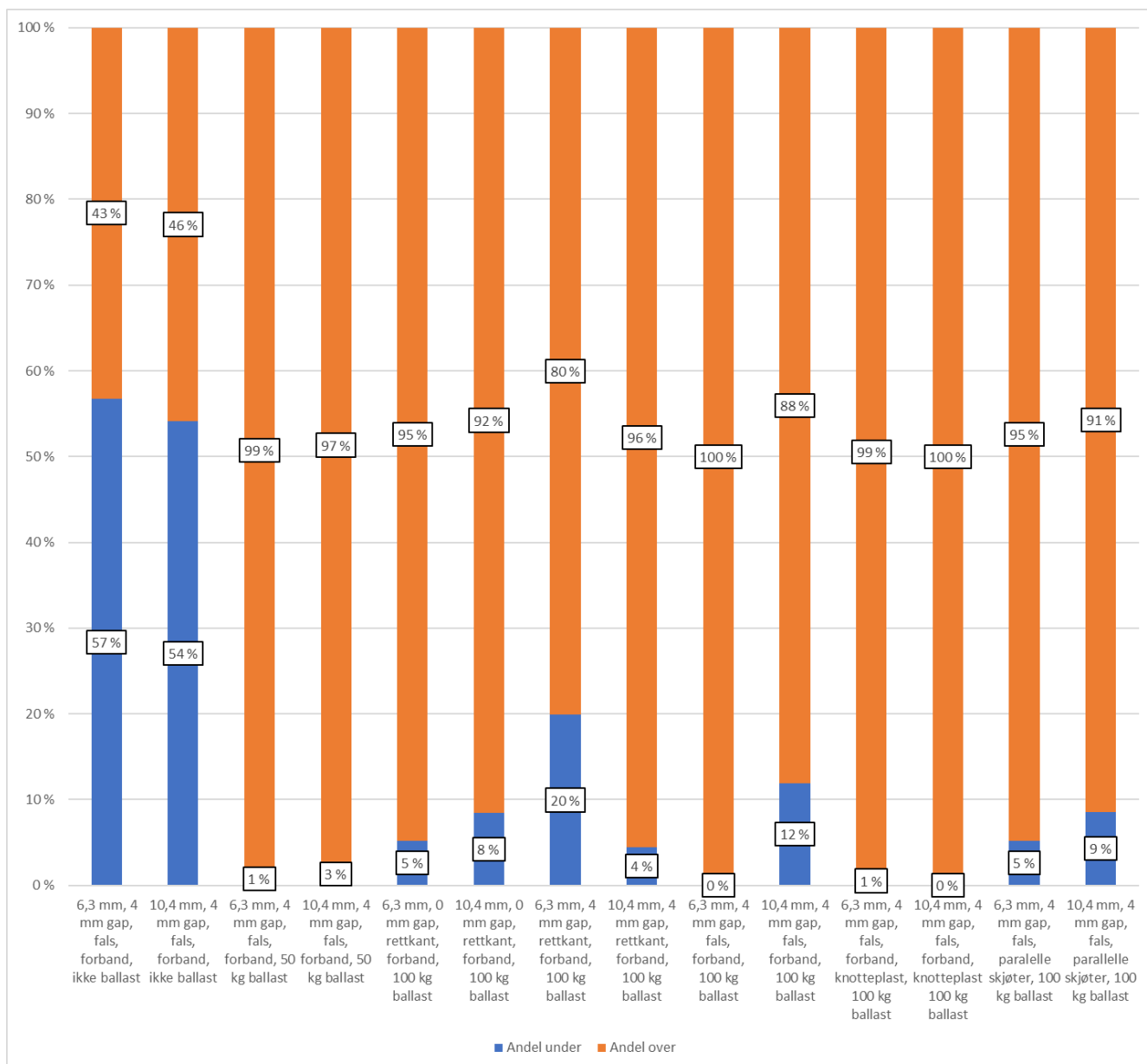
Prosentvis forhold mellom regnvann som dreneres over (blå) og under isolasjonsjikt (rød)



Figur 6. Resultater fra de første laboratoriemålingene våren 2020 [2]. Gap = bredde på plateskjøter. Forsk. = forskjøvne plateskjøter. Par = parallelle plateskjøter. Singel bunn = småstein ligger på undersiden av isolasjonslaget (for å simulere et ujevnt underlag). Singel topp = konstruksjonen har ballast av singel.



Figur 7. Avrenningskurve for de første forsøkene [2]. Se forklaring av forkortelser i figurteksten til figur 6.



Figur 8. Resultater fra de supplerende avrenningsforsøkene vinteren 2021/2022. Prosentvis fordeling mellom regnvann som dreneres over (rød) og under isolasjonssjiktet (blå).

Tabell 8. Beregnet ΔU -korreksjon og økning i U-verdi på grunn av nedbør som dreneres på undersiden av isolasjonssjiktet i omvendte tak presentert av [2]. U-verdi for et omvendt tak med ballast ble satt til 0,128 W/m²K.

Test	Nedbørintensitet	Lekkasjerate	f·x	ΔU	Økning i U-verdi
	[mm/dag]	[%]	[W·dag/m ² K·mm]	[W/m ² K]	[%]
1	2,3	40	0,0192	0,032	25
2		39	0,0188	0,031	25
3		71	0,0342	0,057	45
4		71	0,0342	0,057	45
5		69	0,0332	0,056	43
6		64	0,0308	0,052	40
7		81	0,0390	0,065	51
8		82	0,0394	0,066	52
9		8	0,0038	0,006	5
10		1	0,0005	0,001	1
A1	2,3	57	0,0274	0,046	36
A2		54	0,0260	0,044	34
B1		1	0,0005	0,001	1
B2		3	0,0014	0,002	2
C1		5	0,0024	0,004	3
C2		8	0,0038	0,006	5
D1		20	0,0096	0,016	13
D2		4	0,0019	0,003	3
E1		0	0,0000	0,000	0
E2		12	0,0058	0,010	8
F1		1	0,0005	0,001	1
F2		0	0,0000	0,000	0
G1		5	0,0024	0,004	3
G2		9	0,0043	0,007	6

5 Numeriske beregninger

Dette kapittelet oppsummerer numeriske beregninger gjennomført i WUFI³ i en masteroppgave ved NTNU [2]. Alle metoder og resultater som beskrives, er hentet fra masteroppgaven. Formålet med beregningene var å undersøke langsiktig fuktopptak i isolasjonen i omvendte tak og hvordan fuktopptaket i isolasjonen vil variere med ulike topplag, klima, innetemperaturer og lekkasjerater. Beregnet fuktopptak ble brukt til å beregne varmeledningsevne for isolasjonen korrigert for fuktinnhold, istedenfor å benytte standardiserte verdier.

5.1 Takmodeller og materialvalg

Simuleringer ble gjennomført for to ulike takmodeller fra WUFI, der bare de øverste lagene skiller de to takene fra hverandre:

- 1) Omvendt tak med ballasterende topplag av singel
- 2) Grønt omvendt tak

Simulering med to ulike topplag gjorde det mulig å sammenlikne topplagenes påvirkning på fuktopptaket i isolasjonssjiktet. Tabell 9 og tabell 10 viser oppbygning og materialvalg for de to takkonstruksjonene. For andre valg og antakelser for oppbygning av takene, se [2].

Tabell 9. Oppbygning og materialer for ballastert omvendt tak simulert i WUFI [2].

Oppbygning utenfra	Material	Tykkelse
Ballast	Singel	50 mm
Isolasjon	XPS	200 mm
Vannfilm	Fiberduk med fuktkilde	1 mm
Takmembran	Asfalt takbelegg	-
Betongdekke	Betong	250 mm

Tabell 10. Oppbygning og materialer for grønt omvendt tak simulert i WUFI [2].

Oppbygning utenfra	Material	Tykkelse
Vekstlag	Vekstmedium	400 mm
Drenslag	Drensplate	40 mm
Isolasjon	XPS	200 mm
Vannfilm	Fiberduk med fuktkilde	1 mm
Takmembran	Asfalt takbelegg	-
Betongdekke	Betong	250 mm

5.2 Beregningstilfeller og antakelser

Tabell 12 viser en oversikt over noen av de ulike beregningstilfellene som ble gjennomført. Fuktopptaket i topplaget for det ballasterte taket er basert på resultater fra laboratoriemålingene, se avsnitt 4.5. For å simulere at regnvann renner forbi isolasjonssjiktet og ned på takmembranen ble det lagt inn en vannfilm (simulert som en 1 mm fiberduk tilført vann) mellom takmembran og isolasjon. Det ble i de fleste simuleringene antatt at fukttilførselen i dette sjiktet er 1% av innfallende nedbør for å simulere 100% RF under isolasjonslaget som vil føre til vanndampdiffusjon inn i isolasjonen. I tillegg ble det i de fleste simuleringene

³ WUFI er et program er et simuleringsprogram for vurdering av fuktforhold i bygningskomponenter. WUFI beregner varme- og fukttransport i en- eller todimensjonale tverrsnitt av bygningskomponenter, og tar hensyn til (hvis det er hensiktsmessig) byggfukt, slagregn, solstråling, langbølget stråling, kapillær fukttransport og sommerkondensering, ved gitte varierende klimabetingelser over en gitt tidsperiode.

antatt at topplaget i taket tilføres 40% av innfallende nedbør for å simulere 100% RF i topplaget etter en nedbørshendelse. For ytterligere antakelser og beskrivelse av simuleringene, se [2].

I tillegg til parameterne vist i tabell 12, ble det gjennomført simuleringer for å undersøke hvordan et vannavstøtende og dampåpent separasjonssjikt, WSL (water repellent separation layer), mellom topplaget og isolasjonen påvirker fuktopptaket i isolasjonen. Separasjonssjiktet ble simulert som en vindspærre med s_d -verdi lik 0,02 m. Simuleringene med separasjonssjikt ble gjennomført uten vannfilmen under isolasjonslaget, basert på antakelsen om at separasjonssjiktet forhindrer vann i å strømme gjennom isolasjonslaget.

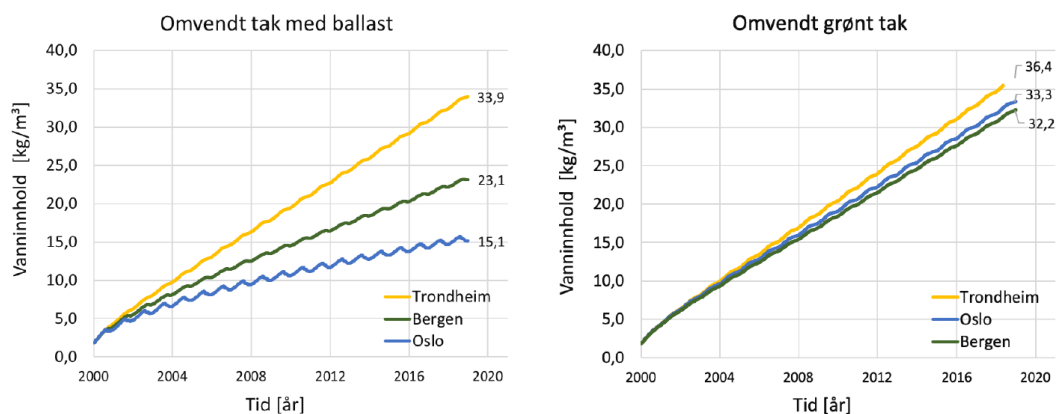
Tabell 11. Oversikt over parametere brukt i beregningene i WUFI [2].

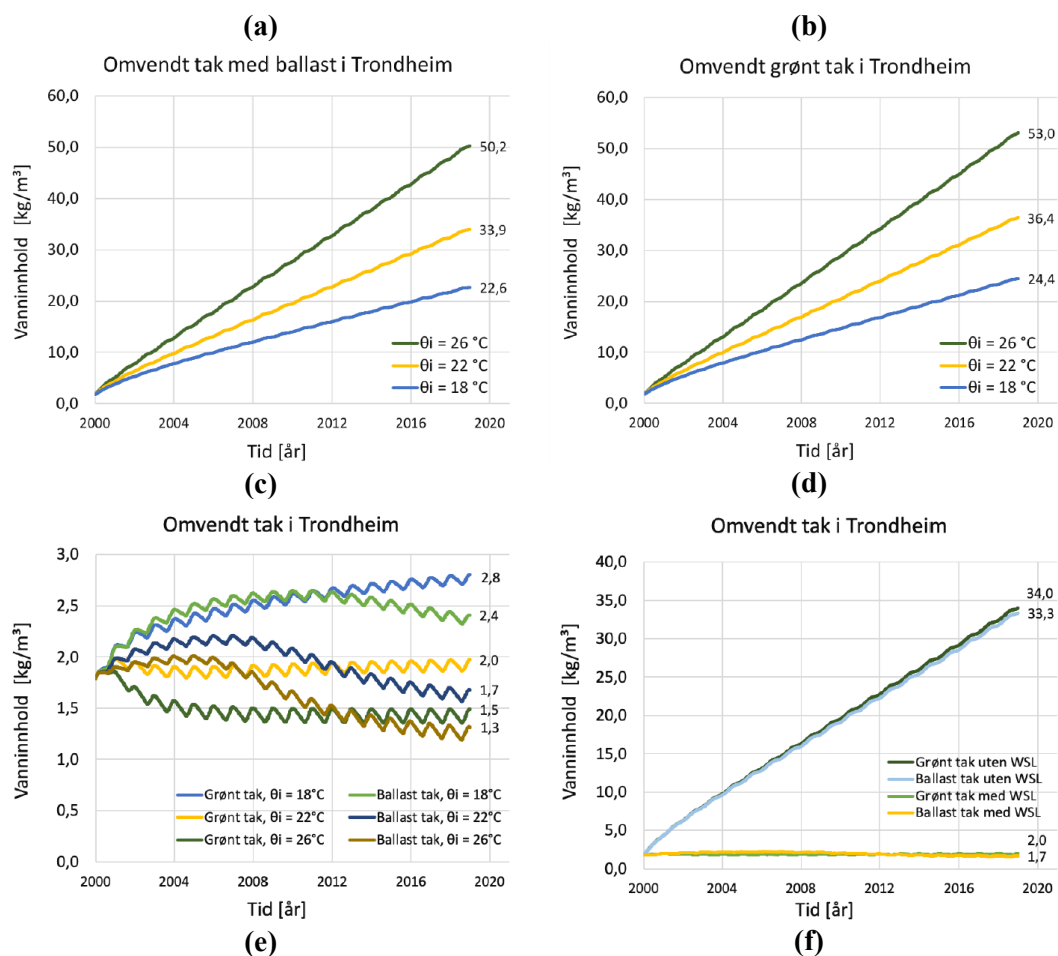
Type oppbygning	Uteklima	Innetemperatur	Fuktopptak i topplag (% av nedbør)
Omvendt tak med ballast	Trondheim	18	40%
	Oslo	22	81,7%
	Bergen	26	68,7%
Grønt omvendt tak	Trondheim	18	7,8%
	Oslo	22	40%
	Bergen	26	50%
			60%
			70%

5.3 Resultater

Utvalgte resultater fra simuleringene [2] er vist i figur 9. Diagrammene viser utvikling i fuktinnhold (kg/m^3) i isolasjonssjiktet over en periode på 19 år for de to ulike takoppbyggingene. Resultater for ulike uteklima er vist i figur 9a og figur 9b, mens resultater for ulike innetemperaturer er vist i figur 9c og figur 9d. Figur 9e og figur 9f sammenlikner simuleringer med og uten et vannavstøtende og dampåpent separasjonssjikt (WSL) plassert på oversiden av isolasjonssjiktet.

Resultatene viser at fuktopptaket i isolasjonen i det ballasterte taket er mer avhengig av uteklima enn fuktopptaket i isolasjonen i det grønne taket, se figur 9a og b. For Trondheim er fuktopptaket omtrent likt for ballastert tak og grønt tak, mens fuktopptaket er høyere i det grønne taket enn i det ballasterte taket i Oslo og Bergen. I Oslo er fuktopptaket i det grønne taket omtrent dobbelt så stort som i det ballasterte taket. Fuktopptaket i det ballasterte taket svinger mer enn fuktopptaket i det grønne taket. Denne effekten er mest tydelig for simuleringer med Oslo-klima. Figur 9c og d viser at fuktopptaket øker for økende innetemperatur. Forskjellen i fuktopptak mellom ballastert og grønt tak øker også for økende innetemperatur. For tak med separasjonssjikt viser resultatene en kraftig reduksjon i fuktopptak i isolasjonen, se figur 9f.





Figur 9. Simulert vanninnhold [kg/m³] i isolasjonssjiktet for omvendte tak.

- (a) Ballastert tak, ulike uteklima (steder), innetemperatur 22°C
- (b) Grønt omvendt tak, ulike uteklima (steder), innetemperatur 22°C
- (c) Ballastert tak, Trondheim, ulike innetemperaturer
- (d) Grønt tak, Trondheim, ulike innetemperaturer
- (e) Ballastert og grønt omvendt tak med separasjonssjikt (WSL), Trondheim, ulike innetemperaturer
- (f) Ballastert og grønt tak med eller uten separasjonssjikt (WSL), Trondheim, innetemperatur 22°C

6 Anbefalinger

6.1 Oppsummering

Det forekommer et ekstra varmetap i omvendte kompakte tak sammenliknet med rettvendte kompakte tak. Både økt fuktinnhold i isolasjonen, fordamping av vann fra membranen til isolasjonen og regnvann som dreneres mellom membranen og isolasjonssjiktet gir bidrag til dette varmetapet. Standardiserte beregningsmetoder i NS-EN ISO 10456 og NS-EN ISO 6946 beskriver hvordan man kan ta hensyn til varmetap pga. henholdsvis fuktinnhold i isolasjonssjiktet og drenering av vann mellom membranen og isolasjonssjiktet i omvendte kompakte tak.

Litteraturen som ble behandlet i litteraturstudien [1], beskriver varierende fuktopptak i XPS over tid, og det er usikkert hvor konservativ beregningsmetoden i NS-EN ISO 10456 er. Varmetap pga. vann som dreneres mellom membran og isolasjon behandles i flere studier, men få tallfester størrelsen på dette varmetapet. Det er ingen omforent konklusjon på om varmetap som følge av fuktopptak i isolasjonen eller varmetap på grunn av drenering av vann på membranen er størst. Basert på informasjonen som er avdekket i litteraturen virker påslaget på U-verdien pga. det ekstra varmetapet i omvendte tak å ligge i intervallet 0,03–0,07 W/m²K. Oppsummert gir den studerte litteraturen følgende anbefalinger for å redusere varmetapet knyttet til omvendte tak:

- Plassere et dampåpent vannavstøtende separasjonssjikt mellom topplag og isolasjon
- Bruke store platedimensjoner (redusere antallet skjøter)
- Bruke isolasjon i to lag med forskjøvne skjøter eller not og fjær
- Etablere fall på membran for å sikre drenering av vann mot sluk
- Vurdere topplaget som benyttes. Ballast gir bedre uttørring enn vegetasjon.

Samlet viser resultatene fra masteroppgaven utført ved NTNU i samarbeid med Klima 2050 [2] at det største varmetapet kan kyttes til nedbør som absorberer varme fra takmembranen. Resultatene fra laboratoriemålingene viste at lekkasjeraten er sterkt avhengig av ballastering. Ballast klemmer platene mot hverandre og mot underlaget, og hindrer dermed vannstrømning gjennom horisontale sprekker. Forsøkene utført uten ballastering viser at lekkasjeraten øker ved lavere nedbørintensiteter, økt spaltebredde mellom isolasjonsplatene, ved parallelle skjøter og ved ujevnt underlag under isolasjonen. Laboratoriemålingene viste betydningen av tette skjøter og jevnt underlag for isolasjonssjiktet og indikerte at utførelsen av isolasjonslaget kan være av betydning.

Beregninger av lekkasjenes påvirkning på U-verdier viser at forholdsvis store lekkasjer må oppstå før U-verdien øker i alvorlig stor grad. En lekkasjerate på 12 %, som er det høyeste som ble målt i forsøk med falsede plater og ballast, gir 8 % økning fra en U-verdi på 0,128 W/m²K. En mer typisk lekkasjerate på 5% gir 3% økning i U-verdien, dette er i samme størrelsesorden som korreksjonsfaktorene som oppgis i NS-EN ISO 10456, oppsummert i Tabell 1.

Resultatene fra simuleringer i WUFI viste et større fuktopptak i isolasjonen i grønne omvendte tak enn i tak med singel som topplag. Beregningene viste også at fuktopptaket økte ved høyere innetemperatur og i klima med større nedbørmengder og lavere utetemperaturer.

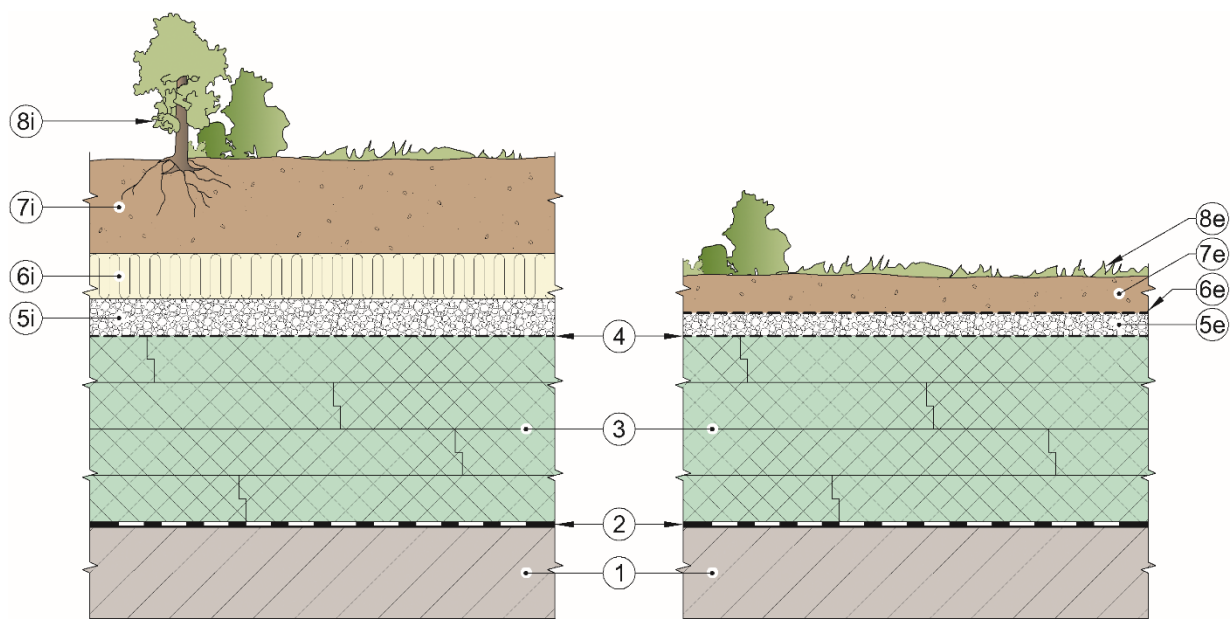
Flere referanser i forskningslitteraturen [11-32] anbefaler å plassere et vannavstøtende og dampåpent separasjonssjikt (WSL) mellom isolasjon og topplag i omvendte tak for å bidra til at vannstrøm gjennom isolasjonssjiktet reduseres, se kapittel 3. Et slikt sjikt ble også

inkludert i WUFI-simuleringene [2], som i samsvar med litteraturen viste at sjiktet kunne bidra til en betydelig reduksjon i fuktopptaket i isolasjonen.

6.2 Forslag til revisjon av anbefalingene i Byggforskserien

I dagens anbefalinger for oppbygning av omvendte kompakte tak i Byggforskserien beskrives det at omvendte tak kan ha behov for et beskyttelses-/separasjonssjikt mellom topplaget og isolasjonen, se figur 1b. Den eneste begrunnelsen som gis for å benytte et slikt sjikt er for å hindre partikler i å komme ned til membranen eller skille to materiallag. Basert på erfaring oppsummert i denne rapporten foreslås det å revidere anbefalingene i Byggforskserien ved å ta inn et dampåpent, vannavstøtende separasjonssjikt mellom topplaget og isolasjonssjiktet. Et slikt sjikt vil bidra til å redusere varmetapet forbundet med omvendte kompakte tak. Sjiktet må være dampåpent for å tillate uttørring av fukt mot uteluft.

For grønne omvendte tak er det viktig at tilstrekkelig ballast blir brukt, for å oppnå den nødvendige klemmingen av horisontale sprekker. Sedum eller tynne jordlag i seg selv er ikke tunge nok til å sikre dette. Derimot behøves det som regel et dre slag under jordlaget i grønne tak, hvor et lag med grus kan tjene både som drenering og ballast. Et forslag til hvordan grønne omvendte tak kan utføres er vist i figur 10.

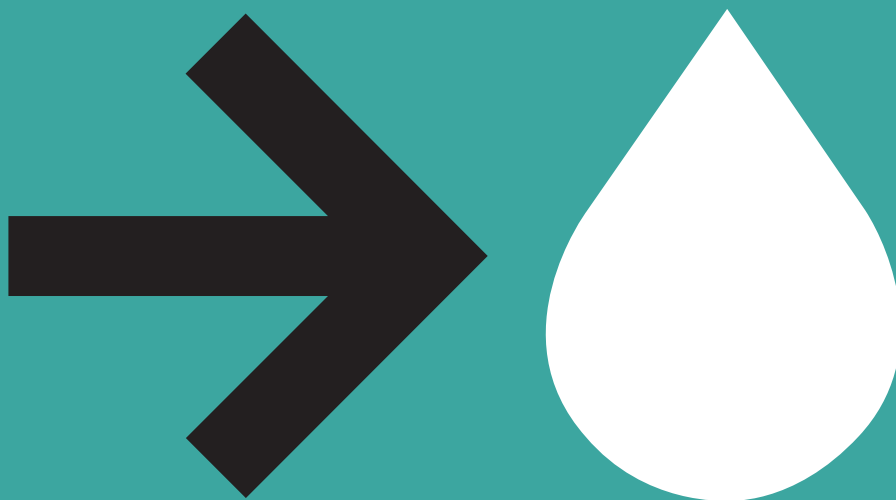


Figur 10. Oppbygning av omvendte grønne takkonstruksjoner med semiintensivt tak til venstre og ekstensivt tak til høyre: (1) bærekonstruksjon, (2) membran, (3) XPS, (4) vannavstøtende separasjonssjikt og rotsperre, (5i) dre slag, (6i) mineralullplate, (7i) vekstlag 100 – 200 mm, (8i) beplantning, (5e) dre slag, (6e) rotsperre, (7e) vekstlag 30 – 100 mm, (8e) beplantning.

Referanser

- [1] K. F. Olsen, "Kjøleeffekt av regn- og smeltevann i omvendte takkonstruksjoner" - Klima 2050 Note 91, 2020.
- [2] K. F. Olsen, "Kjøleeffekten av regn- og smeltevann i omvendte takkonstruksjoner," Masteroppgave, NTNU, Trondheim, Norge, 2020.
- [3] Byggforskserien 525.307 - "Tak for biltrafikk og parkering", SINTEF Community, Oslo, Norge, 2019.
- [4] Byggforskserien 525.306 - "Terrasser med beplantning på bærende betongdekker", SINTEF Community, Oslo, Norge, 2009.
- [5] Byggforskserien 525.207 - "Kompakte tak", SINTEF Community, Oslo, Norge, 2018.
- [6] I. Hanssen-Bauer et al., *Klima i Norge 2100 : kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning oppdatert 2015*, Oslo: Norsk klimaservicesenter, 2015.
- [7] K. F. Olsen og E. Andenæs, "Regnkjøling av omvendte tak," *Byggeindustrien*, Nr. 10, 2020.
- [8] *NS-EN ISO 10456:2007+NA:2010 Byggematerialer og -produkter - Hygrotermiske egenskaper - Tabulerte dimensjonerende verdier og prosedyrer for bestemmelse av deklarererte og praktiske termiske verdier*, Standard Norge, 2007.
- [9] *NS EN ISO 6946:2017. Bygningskomponenter og -elementer - Varmemotstand og varmegjennomgangskoeffisient - Beregningsmetoder*, Standard Norge, 2017.
- [10] Byggforskserien 471.010 - "Varmekonduktivitet og varmemotstand for bygningsmaterialer", SINTEF Community, Oslo, Norge, 2020.
- [11] J. Beech og G. Saunders, "The performance of lightweight reverted flat roof." (1985)
- [12] E. Cziesielski og O. Fechner, "Experimentelle Untersuchung zum delta-U-Wert bekiester Umkehrdächer mit wasserableitender Trennlage," *Bauphysik*, vol. 23, no. 5, pp. 288-297, 2001.
- [13] C. P. Hedlin, "Moisture gains by foam plastic roof insulations under controlled temperature gradients," *Journal of Cellular Plastics*, vol. 13, no. 5, pp. 313-319, 1977.
- [14] C. P. Hedlin, "Effect of moisture on thermal resistance of some insulations in a flat roof under field-type conditions," i *Thermal Insulation, Materials, and Systems for Energy Conservation in the '80s*: ASTM International, 1983.
- [15] H. Hens, "Thermal Performance of Protected Membrane Roof Systems, Part 1: A Simplified Heat and Moisture Analysis," *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*, vol. 18, no. 4, pp. 377-389, 1995.
- [16] H. Hens, "Thermal performance of protected membrane roof systems, Part 2: Experimental verification," *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, vol. 19, no. 4, pp. 314-335, 1996.
- [17] H. Hens, *Performance Based Building Design 2*. Weinheim, Tyskland: Wiley-VCH Verlag GmbH & KGaA, 2012.
- [18] H. Künzel og K. Kiessl, "Assessing precipitation heat losses of protected membrane roofs," *Proceedings IEA-Annex*, vol. 24, pp. 43-49, 1996.
- [19] H. Künzel og K. Kießl, "Moisture behaviour of protected membrane roofs with greenery," *CIB W40 Proceedings*, 1997.
- [20] H.-P. Leimer, C. Rode, H. Künzel, og T. Bednar, "Requirements of inverted roofs with a drainage layer," i *7th Nordic Symposium on Building Physics*, 2005, pp. 570-577.
- [21] W. A. Lyte, "Dual Barrier Protected Membrane Roof Assemblies," *Journal of ASTM International*, vol. 8, no. 10, pp. 1-16, 2011.
- [22] H. Merkel, "Inverted roofs with reduced heat losses due to a water-repellent separating layer," *Proc. of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VIII*, 2001.

- [23] I. Misar og M. Novotný, "Defects and behaviour of inverted flat roof from the point of building physics," i *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 93: EDP Sciences, p. 02002.
- [24] M. Pel og D. Budde, "Drainage capabilities and heat loss of different inverted roof assemblies," i *BEST 5 Conference*, 2018.
- [25] B.-Å. Petersson, "The Upside-Down Roof. Field and Laboratory Studies of Thermal Insulation. Moisture Conditions and Performance," *Journal of Thermal Insulation*, vol. 5, no. 3, pp. 140-152, 1982.
- [26] D. Schaefer, "Water Absorption of Insulation in Protected Membrane Roofing Systems (No. CRREL-76-38)," Cold regions research and engineering lab, Hanover, 1976.
- [27] D. Schaefer, E. T. Larsen, og H. W. Aamot, "Observation and analysis of protected membrane roofing systems (No. CRREL-77-11)," Cold regions research and engineering lab, Hanover, 1977.
- [28] B. Stöckl, D. Zirkelbach, og H. Künel, "Hygrothermal simulation of green roofs—new models and practical application," i *Nordic Symposium of Building Physics*, Lund, Sverige, 2014, pp. 15-19.
- [29] W. Tobiasson og J. Ricard, *Moisture gain and its thermal consequence for common roof insulations*. US Army Corps of Engineers Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1979.
- [30] D. Zirkelbach, B. Schafaczek, og H. Künel, "Long-term hygrothermal performance of green roofs," *Proc. Buildings XI, ASHRAE, Atlanta*, 2010.
- [31] D. Zirkelbach, B. Schafaczek, og H. Künel, "Thermal performance degradation of foam insulation in inverted roofs due to moisture accumulation," i *Proceedings of the 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components—XII DBMC, Porto, Portugal*, 2011, vol. 1, pp. 529-36.
- [32] D. Zirkelbach, B. Schafaczek, og H. Künel, "Hygrothermal performance and damage risk of green roofs," i *Hygrothermal Behavior, Building Pathology and Durability*: Springer, 2013, pp. 141-163.
- [33] FLL, "Green Roof Guidelines - Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs," 2008.
- [34] Byggforskserien 451.031 - "Klimadata for dimensjonering mot regnpåkjenning", SINTEF Community, Oslo, Norge, 2013.



CONSORTIUM

Private sector

SKANSKA

MESTERHUS

Multiconsult

Finans Norge

SKJÆVELAND
GRUPPEN

NORGESHUS

Leca

isola

Public sector



Statens vegvesen



Noregs
vassdrags- og
energidirektorat

AVINOR



Jernbane-
direktoratet



STATSBYGG



TRONDHEIM KOMMUNE

Research & education

SINTEF

BI

NTNU

Meteorologisk
institutt

NGI