

#### AALBORG UNIVERSITET

KØBENHAVN

Aalborg Universitet København Statens Byggeforskningsinstitut A. C. Meyers Vænge 15 2450 København SV Danmark

Studiesekretær: Silpa Stella Rondón Pinto Telefon: 9940 2285 master@sbi.aau.dk

#### Studenterrapport

Uddannelse:

Master i Bygningsfysik

Semester:

4.

Titel på masterprojekt:

Fugtforhold i højisolerede,

ventilerede tage

Projektperiode:

2016

Vejleder:

Eva B. Møller

Studerende:

Preben Bang

Antal normalsider: 56

Vedlagt kvittering fra Digital Eksamen

Afleveringsdato: 28. november 2016

Resume:

De sidste 10-års stramninger i Bygningsreglementet med henblik på at reducere energiforbruget i bygninger, har bl.a. inkluderet krav om begrænsning af varmetabet gennem klimaskærmen. De skærpede krav har således medført, at konstruktionerne skal varmeisoleres mere. Specielt i taget anvendes store isoleringstykkelser, da det i de fleste tilfælde er mest fordelagtigt sammenlignet med isolering af klimaskærmens øvrige bygningsdele. I højisolerede ventilerede tage er varmetabet mindre og tagrum og ventilationsspalte koldere end tidligere, og mængden af fugt, der kan optages af ventilationsluften, er dermed mindre. Dette medfører øget risiko for fugtproblemer i tagkonstruktionen.

Masterprojektets har til formål at undersøge fugtsikkerheden i højisolerede, ventilerede tage med trækonstruktion, der opfylder kravene i Bygningsreglementet og anvisninger i det alment tekniske fælleseje. Det undersøges hvordan fugtproblemer i højisolerede, ventilerede tagkonstruktioner undgås inden for rammerne af gældende regler.

Først sammenfattes gældende danske regler for ventilerede tage indenfor området fugt og fugt-sikkerhed samt udvalgte relaterede studier. Undersøgelsen af fugtforholdene i højisolerede, ventilerede tage er udført som parameterstudie med en reference konstruktion for både et paralleltag og tagrum. Parametervariationerne vedrører forskellige konstruktionsopbygninger og materialer, og andre forhold i konstruktionen, samt randbetingelser ved inde- og udeklima. Beregningerne er udført ved brug af computerprogrammerne WUFI Pro 5.3 og BSim.

Det ikke er muligt at udelukke risikoen for vækst at skimmelsvamp i naturligt ventilerede tage, hvor de ydre dele af tagkonstruktionen udsættes for danske udeklimaforhold. Risikoen for skim-melsvampevækst kan dog begrænses ved korrekt projektering og udførelse af de ventilerede tage, hvor række faktorer har indvirkning på fugtforholdene i tagkonstruktionerne, og derfor skal indgå overvejelserne for at opnå bedre fugtsikkerhed. De væsentligste faktorer er oplistet nedenfor:

• En øget isoleringstykkelse vil øge risikoen for vækst af skimmelsvamp i tagkonstruktionerne, men så længe ikke andre faktorer præger fugtforholdene i tagkonstruktionen negativt, vil den øgede risiko for skimmelsvampevækst være begrænset. Det giver alene på denne baggrund ikke anledning til ændringer af ventilerede tage.

• Luftskiftet i ventilationsspalten skal være tilpas stort til at fjerne den mængde fugt, der uundgåeligt vil blive tilført tagkonstruktionen. Er luftskiftet for lavt vil dette ikke ske, og risikoen for fugtproblemer i tagkonstruktionen bliver stor. Luftskiftet må dog ikke være så højt, at det sænker temperaturen i konstruktionen, da det vil øge den relative fugtighed, og dermed risikoen for skimmelsvampevækst.

• Tagkonstruktioner af træ er følsomme overfor enhver form for lækager, utætheder i undertaget som medfører vandindtængen, utætheder i dampspærren og byggefugt.

Resultaterne er baseret på 75 fugtberegninger i ventilerede paralleltage og tagrum.

Copyright © 2015. This report and/or appended material may not be partly or completely published or copied without prior written approval from the authors. Neither may the contents be used for commercial purposes without this written approval.

## Fugtforhold i højisolerede, ventilerede tage Parameterstudie - fugtberegninger

Preben Bang, studienummer 20142575



Master i Bygningsfysik, Aalborg Universitet København

Titel	Fugtforhold i højisolerede, ventilerede tage
Undertitel	Parameterstudie - fugtberegninger
Uddannelse	Master i Bygningsfysik
Fag	Masterprojekt
Udgivelsesår	2016
Forfatter/e	Preben Bang
Redaktion	C
Sprog	Dansk
Sidetal	92 (56 normalsider)
Litteraturhenvisninger	· · · · · ·
English summary	
Emneord	

ISBN

Pris Layout Tegninger Fotos Omslag Tryk

Udgiver

## Resumé

De sidste 10-års stramninger i Bygningsreglementet med henblik på at reducere energiforbruget i bygninger, har bl.a. inkluderet krav om begrænsning af varmetabet gennem klimaskærmen. De skærpede krav har således medført, at konstruktionerne skal varmeisoleres mere. Specielt i taget anvendes store isoleringstykkelser, da det i de fleste tilfælde er mest fordelagtigt sammenlignet med isolering af klimaskærmens øvrige bygningsdele. I højisolerede ventilerede tage er varmetabet mindre og tagrum og ventilationsspalte koldere end tidligere, og mængden af fugt, der kan optages af ventilationsluften, er dermed mindre. Dette medfører øget risiko for fugtproblemer i tagkonstruktionen.

Masterprojektets har til formål at undersøge fugtsikkerheden i højisolerede, ventilerede tage med trækonstruktion, der opfylder kravene i Bygningsreglementet og anvisninger i det alment tekniske fælleseje. Det undersøges hvordan fugtproblemer i højisolerede, ventilerede tagkonstruktioner undgås inden for rammerne af gældende regler.

Først sammenfattes gældende danske regler for ventilerede tage indenfor området fugt og fugtsikkerhed samt udvalgte relaterede studier. Undersøgelsen af fugtforholdene i højisolerede, ventilerede tage er udført som parameterstudie med en reference konstruktion for både et paralleltag og tagrum. Parametervariationerne vedrører forskellige konstruktionsopbygninger og materialer, og andre forhold i konstruktionen, samt randbetingelser ved inde- og udeklima. Beregningerne er udført ved brug af computerprogrammerne WUFI Pro 5.3 og BSim.

Det ikke er muligt at udelukke risikoen for vækst at skimmelsvamp i naturligt ventilerede tage, hvor de ydre dele af tagkonstruktionen udsættes for danske udeklimaforhold. Risikoen for skimmelsvampevækst kan dog begrænses ved korrekt projektering og udførelse af de ventilerede tage, hvor række faktorer har indvirkning på fugtforholdene i tagkonstruktionerne, og derfor skal indgå overvejelserne for at opnå bedre fugtsikkerhed. De væsentligste faktorer er oplistet nedenfor:

- En øget isoleringstykkelse vil øge risikoen for vækst af skimmelsvamp i tagkonstruktionerne, men så længe ikke andre faktorer præger fugtforholdene i tagkonstruktionen negativt, vil den øgede risiko for skimmelsvampevækst være begrænset. Det giver alene på denne baggrund ikke anledning til ændringer af ventilerede tage.
- Luftskiftet i ventilationsspalten skal være tilpas stort til at fjerne den mængde fugt, der uundgåeligt vil blive tilført tagkonstruktionen. Er luftskiftet for lavt vil dette ikke ske, og risikoen for fugtproblemer i tagkonstruktionen bliver stor. Luftskiftet må dog ikke være så højt, at det sænker temperaturen i konstruktionen, da det vil øge den relative fugtighed, og dermed risikoen for skimmelsvampevækst.
- Tagkonstruktioner af træ er følsomme overfor enhver form for lækager, utætheder i undertaget som medfører vandindtængen, utætheder i dampspærren og byggefugt.

Resultaterne er baseret på 75 fugtberegninger i ventilerede paralleltage og tagrum.

## Abtract

The last ten years of tightening of the Building Code with the purpose of reducing energy consumption in buildings have included requirements for the reduction of heat loss through the thermal envelope. The higher demands have led to increased thermal insulation of buildings. It is most often seen as favorable to apply very thick layers of insulation to roofs as compared to other parts of the building envelope. In highly insulated, ventilated roofs the thermal loss is reduced and attics and ventilated cavities are consequently colder than before. This reduces the amount of humidity the ventilation air can thus absorb, leading to increased risk of moisture build-up in the roof structure.

This master project aims at investigating the moisture safety in highly insulated, ventilated roofs with wooden structure that comply with requirements in the Building Code and technical instructions from generally recognized organizations and institutions.

Current Danish regulations and related studies regarding moisture and moisture safety in ventilated roofs are summed up. The investigation of moisture conditions in highly insulated, ventilated roofs is done as a parameter study with a reference construction for both a cold roof and a cold attic. The parameter variations regard different forms of construction and different materials as well as other aspects of the structure, and also the edge conditions concerning indoor climate and outdoor climate. For the calculations the hygrothermal calculation tools WUFI Pro 5.3 and BSim is used.

There will always be a risk of mould in outdoor-air ventilated roofs subject to Danish climate conditions. However, this risk can be limited through correct project design and execution of a ventilated roof. A range of factors influence the moisture conditions and these must therefore enter into the work on moisture risk. The most important factors are listed below:

- Increased insulation thickness increase the risk of mould in the roof constructions, but so long as no other factors influence the moisture conditions in the roof construction in a negative way the increased risk will be limited. On this background alone this does not lead to alterations of ventilated roofs.
- The air change in the ventilated cavity must be sufficient to eliminate the humidity which will inevitably be fed to the roof construction. An insufficient air change will not do this and the risk of moisture problems will increase. However, the air change must not be so high that it decreases the temperature in the roof construction since this would increase the relative humidity and thus also the risk of mould.
- Wooden roof constructions are sensitive to any type of leakage, leaks in the roof underlay leading to water ingress, leaks in the vapor barrier and humidity in the structure stemming from the building process.

The results are based on 75 hygrothermal calculations on ventilated cold roofs and cold attics.

# Indhold

R	ESU	IMÉ	3
A	BTR	ACT	4
١N	IDH	OLD	5
1	II	NDLEDNING	6
2	E	BAGGRUND	8
	2.1	PROBLEMFORMULERING OG FORMÅL	
	2.2	AFGRÆNSNING	9
3	Т	'EORI 1	0
	3.1	FUGT I TAGE	10
	3.2	REGLER OG ANVISNINGER FOR TAGE	16
	3.3	KRITISKE FUGTFORHOLD	22
	3.4	BEREGNINGSPROGRAMMER	
4	N	IETODER OG MATERIALER 2	27
	4.1	PARALLELTAG	28
	4.2	TAGRUM	35
5	F	RESULTATER 4	0
	5.1	Paralleltag	40
	5.2	TAG MED VENTILERET TAGRUM	53
6	C	DISKUSSION	64
	6.1	DISKUSSION AF RESULTATER	64
	6.2	HVAD FØRER RESULTATERNE MED SIG	66
	6.3	SAMMENLIGNING BSIM OG WUFI	
7	K	ONKLUSION	<b>'</b> 6
8	L	.ITTERATUR	'8
9	E	81LAG 8	32
	9.1	BILAG A: TAGRUM, MÅNEDSMIDDELVÆRDIER FOR TEMPERATUR OG RF	82
	9.2	BILAG B: PARALLELTAG, PARAMETRE OG VARIATIONER	
	9.3	BILAG C: TAGRUM, PARAMETRE OG VARIATIONER	89

## 1 Indledning

I ventilerede tage er fugtskader, herunder vækst af skimmelsvamp, en kendt problemstilling inden for byggeriet. Erfaringer viser, at årsagerne til skaderne er mangeartede, bl.a. ukorrekt ventileret tagkonstruktion, utætheder i dampspærren, utæt tag, byggefugt og høj fugtbelastning fra rumluften. Alle disse forhold kan reelt undgås, hvis velkendte standarder og anvisninger følges.

Et forhold, der imidlertid ikke er utilsigtet, men som har ændret fugtforholdene i ventilerede tage ift. tidligere, er nutidens høje isoleringsstandard bestemt af kravene til reduktion af bygningers energiforbrug. Dette har gjort tagrum og ventilationsspalte koldere end tidligere, og mængden af fugt, der kan optages og bortventileres, er dermed mindre. Det medfører øget risiko for fugtproblemer i tagkonstruktionen. Måske ændrer det på kravene til ventilerede tage, som vi kender dem i dag.

De forskellige typer ventilerede tage omfatter paralleltage, tage med tagrum og hanebåndstage. Ventilerede tage er typisk trækonstruktioner. Tagformen kan være saddeltag eller pulttag med stor eller lille hældning, også kaldet flade tage. Tage med stor hældning ventileres normalt mellem tagfod og kip, mens tage med lille hældning ventileres fra tagfod til tagfod. Ventilerede tage kan normalt ikke anvendes ved større husdybder eller stor fugtbelastning fra indeklimaet, da det er vanskeligt at sikre tilstrækkelig luftgennemstrømning, samt at ventilationsluften ikke kan forventes at fjerne større fugtmængder. Tagdækningen kan enten være diffusionstæt eller diffusionsåben med undertag. Undertaget kan igen være diffusionstæt eller -åbent.

Historisk set har tagkonstruktioner været udført ventilerede i mange år. Først var ventilation kun beskrevet for tage beklædt med tagpap på bræddeunderlag uden nærmere angivelse i Københavns Byggelov af 1939 (Sivertsen, 1939). I 1950'erne behandler SBi emnet første gang i anvisning 7 Fugt og isolering, hvor det anbefales at alle tagrum ventileres, og angiver for tagrum under tæt tag varierende størrelser på ventilationsåbninger på 1/300-1/600 af det bebyggede areal alt efter tagform, dog med lempeligere krav til fx tegltag uden tæt underlag (Becher & Korsgaard, 1957). SBi-Pjece Fugt og tage fra 1974 (Andersen, Blach, & Christensen, 1974), samt SBi-anvisninger 139 (Andersen, Christensen, & Nielsen, Bygningers fugtisolering (SBi-anvisning 139), 1984) og SBianvisninger 178 (Andersen, Christensen, & Nielsen, 1993) anbefaler alle, at ventilerede tage udføres med et samlet areal af ventilationsåbningerne på mindst 1/500 af det bebyggede areal. Hvordan ventilationen opnås, og hvilke begrænsninger ventilerede tage har, bliver mere detaljeret med tiden. Med SBi-anvisning 224 Fugt i bygninger i 2009 (Brandt E., 2009) ændres anbefalingerne til ventilation, så der stilles krav til størrelsen af de enkelte ventilationsåbninger, dog er 1/500-reglen stadig gældende ved særlige tagformer. Nu er anbefalingerne til ventilerede tage og deres begrænsninger noget mere præcist beskrevet. Anvisningen revideres i 2013 (Brandt E., 2013) og med det ventilationsåbningernes størrelse, og anbefalingerne til ventilerede tage med diffusionstæt tagdækning beskrives detaljeret i TOR-anvisning 30 Fugt og tage (Bunch-Nielsen, 2010). Disse anvisninger er gældende i dag.

I perioden, hvor ventilation af tage har været foreskrevet, er der sket en markant udvikling af tagenes isoleringsevne. Hvor tagkonstruktioner mod opvarmede rum tidligere reelt ikke var isolerede, er isoleringstykkelsen for nybyggeri i dag typisk er 400-500 mm.

Denne rapport omhandler de mest almindeligt forekommende ventilerede tage for nybyggeri under danske forhold. Rapporten undersøger hvor megen ventilation, der er behov for i ventilerede tage, for at sikre at fugtproblemer i højisolerede tagkonstruktioner undgås, samt hvilken indvirkning forskellige andre faktorer har på fugtforholdene i tagkonstruktionen. Undersøgelsen er udført teoretisk som et parameterstudie, hvor der er foretaget beregninger af varme- og fugtforholdene i de forskellige ventilerede tagkonstruktioner ved brug af avancerede fugtberegningsprogrammer. Muligheden for fugtproblemer vurderes i forhold til risiko for vækst af skimmelsvamp.

Rapporten er udarbejdet som masterprojekt for 4. semester på uddannelsen "Master i Bygningsfysik", hvor den stillede opgave er et valgfrit emne inden for det bygningsfysiske område. Rapporten er derfor som udgangspunkt en læringsrapport, der skal demonstrere en detaljeret viden om bygningsfysiske forhold indenfor det aktuelle emne. Derudover kan rapporten anvendes i projekteringsfasen som hjælp til at undgå fugtproblemer i ventilerede tage.

# 2 Baggrund

## 2.1 Problemformulering og formål

De sidste 10-års stramninger i Bygningsreglementet med henblik på at reducere energiforbruget i bygninger, har bl.a. inkluderet krav om begrænsning af varmetabet gennem klimaskærmen. De skærpede krav har således medført, at konstruktionerne skal varmeisoleres mere. Specielt i taget anvendes store isoleringstykkelser, da det i de fleste tilfælde er mest fordelagtigt sammenlignet med isolering af klimaskærmens øvrige bygningsdele. En øget isoleringstykkelse i taget vil under normale omstændigheder kun betyde mindre ændringer i konstruktionsopbygningen, hvorimod en øget isoleringstykkelse i ydevægge samtidig medfører enten en reduktion af bygningens nettoareal eller øget bruttoareal. En øget isoleringstykkelse i terrændæk vil ikke give samme reduktion af varmetabet, da varmetabet mod jord i forvejen er mindre.

Når taget udføres med stor isoleringstykkelse, dvs. højisoleret, ændres betingelserne for fjernelse af fugt sammenlignet med mindre isolerede konstruktioner. I ventilerede tage føres kold udeluft ind i tagkonstruktionen. Pga. varmetab fra huset, opvarmes udeluften og er i stand til at føre fugt, der trænger op i tagkonstruktionen fra rumluften, væk. I højisolerede ventilerede tage er varmetabet mindre og tagrum og ventilationsspalte koldere end tidligere, og mængden af fugt, der kan optages af ventilationsluften, er dermed mindre. Dette medfører øget risiko for fugtproblemer i tagkonstruktionen og muligvis vil det ændre kravene til ventilation af tage. Eventuelt kan der opstå situationer, hvor ventilation vil være skadelig, ligesom andre faktorer med indflydelse på fugtforholdene i tagkonstruktionen måske også skal revurderes.

Masterprojektets formål er at undersøge fugtsikkerheden i højisolerede ventilerede tage med trækonstruktion, der opfylder kravene i Bygningsreglementet, og anvisninger i det alment tekniske fælleseje. Hvordan undgås fugtproblemer i højisolerede tagkonstruktioner, og er det muligt med gældende regler. Hovedvægten er lagt på at undersøge:

• betydningen af ventilationens størrelse

Men også hvilken indvirkning en række andre faktorer har på fugtforholdene i tagkonstruktioner er undersøgt, som vedrører:

- Konstruktionsopbygninger og materialer, som angår taghældning, undertag, tagdækningsmateriale, isoleringstykkelse samt isoleret undertag
- Randbetingelser, i form af orientering, indeklima samt skyggeforhold
- Påvirkninger i konstruktionen fra byggefugt, utæt undertag samt utæt dampspærre

### 2.2 Afgrænsning

Rapporten omhandler ventilerede tagkonstruktioner, der anses for værende typiske for nybyggeri i Danmark, men rapporten kan også være anvendelig ved renovering. Klimaforholdene er danske eller svarende til danske forhold. Undersøgelsen omfatter tage med tagrum og paralleltage, men vil principielt også være gældende for hanebåndstage. Tagene er alle trækonstruktioner med traditionel tæt dampspærre, enten med åben tagdækning og undertag eller tæt tagdækning. Konstruktioner af stål eller beton indgår ikke.

Fugtforholdene i tagkonstruktionerne er analyseret på grundlag af fugtberegninger, og er ikke underbygget ved sammenligning med målte resultater. Tagkonstruktionerne er studeret 1dimensionelt dvs. uden at tage hensyn til betydning af spær, lægter og andre kuldebroer, samt samlingsdetaljer ved tilstødende bygningsdele såsom tagfod og kip, samt ovenlys og gennemføring af installationer mv.

Undersøgelsen er udført som et parameterstudie, hvor kun de mest almindelige konstruktionstyper og bygningsmaterialer indgår. Materialeparametre er begrænset af de anvendte beregningsprogrammer. Andre forhold i konstruktionerne og deres omgivelser, som naturligt er varierende eller flerdimensionelle, er givet med forskellige faste værdier; bl.a. ventilation af konstruktion, indeklima, lækage fra inde- og udeklima samt indbygget fugt.

Den definerede grænse for det kritiske fugtindhold i dette studie er anvendt alene for at vise under hvilke forhold vækst af skimmelsvamp på træ og træbaserede materialer er muligt. De nærmere forhold af hvornår skimmelsvampevækst begynder, indgår ikke i den fugttekniske vurdering af konstruktionerne, ligesom de sundhedsmæssige konsekvenser af skimmelsvamp i tagkonstruktionen heller ikke diskuteres.

Resultaterne i denne rapport skal betragtes som retningsgivende, og kan ikke uden videre erstatte en fugtteknisk vurdering af en konkret byggesag. Alle bygninger og deres forudsætninger er forskellige, fx omgivelserne, tagkonstruktionens geometri og materialevalg mv, og påvirkningerne herfra har indvirkning på fugtforholdene i konstruktionen.

### 3 Teori

#### 3.1 Fugt i tage

I tage er de to væsentligste fugttransportformer igennem loft- og tagkonstruktionen diffusion og konvektion, altså fugttransport i dampform. Det er forskelle i potentialetrykket, der fører til fugttransport, fx når vanddamptrykket/vanddampindholdet inde i bygningen er højere end udenfor, vil der ske en fugttransport indefra og ud gennem konstruktionen. Fugttransport kan i de fleste sammenhænge godt betragtes som endimensionel. Fugt kan også transporteres i væskeform ved kapillarsugning i materialer, der dog sjældent har nogen betydning i tage, da fugtindholdet i materialerne skal være tæt på vandmættet før det sker (Brandt E. , 2013).

#### Diffusion

Fugttransport ved diffusion finder sted, når der er forskelle i vanddamptryk/ vanddampindhold mellem tilstødende luftvolumener. Diffusion sker på grund af vandmolekylernes bevægelse fra steder med stor koncentration af vanddamp til steder med lille koncentration, dvs. i retning af aftagende damptryk. Om vinteren er vanddampindholdet i luften højere indendørs end udendørs, og derfor tranporteres fugt ud af bygningen ved diffusion gennem tagkonstruktionen. Diffusion finder sted gennem porøse materialers poresystem men også gennem homogene membraners struktur. Et materiales vanddampdiffusionsmodstand, når der er tale om materialer med fast tykkelse, er således medbestemmende for fugtransportens størrelse. Vanddampdiffusionsmodstanden, også kaldet Z-værdien, anvendes typisk til beregning eller fugtteknisk vurdering. Jo højere Z-værdien er, desto bedre er materiales evne til at modvirke diffusion af vanddamp. Zværdien er defineret som:

Ligning 1: Vanddampdiffusionsmodstanden for materialer med fast tykkelse, Z-værdien.

$$Z = \frac{d}{\delta} \left[ \frac{GPa \ s \ m^2}{kg} \right]$$

hvor

*d* er materialetykkelsen i strømningsretningen [m]

 $\delta$  er vanddamppermeabiliteten [kg/(m s Pa)] (fortæller hvor meget vand, der trænger gennem 1 m<sup>2</sup> af materialet pr. sekund pr. 1 Pa trykforskel)

Fugtstrømninger er i praksis næsten altid ikke-stationære, da omgivelserne tit ændrer sig. Udtørring af byggefugt er ikke-stationær fugttransport, hvor fugt tørres hurtigt ud i starten til begge sider af en konstruktion indtil det meste af fugten er ude af konstruktionen, hvorefter fugttransporten stort set er stationær forudsat uforandrede randvilkår. Fugtforhold ved instationære strømninger bliver normalt kun beregnet ved numeriske metode. Fugttransport ved diffusion gennem et materiale kan tilnærmet beregnes som:

Ligning 2: Fugtstrømning ved diffusion gennem et materiale

$$g = \frac{p_1 - p_2}{Z} \left[ kg/s \ m^2 \right]$$

hvor

 $p_1 og p_2$  er vanddamptrykket på de to sider af konstruktionen [Pa]

Z er vanddampdiffusionsmodstanden [GPa s  $m^2/kg$ )]

#### Fugtkonvektion

Fugttransport ved konvektion sker, når en luftstrøm fører vanddamp med sig. Det kræver en forskel i lufttrykket, som kan skyldes fx vind eller temperatur. Er der forskel i lufttrykket over en konstruktion, i dette tilfælde mellem indeluften og luften i tagkonstruktionen, vil der ved konvektion strømme luft indeholdende vanddamp gennem utætheder i dampspærren. Går transporten af vanddamp fra bygningen og ud i en kold tagkonstruktion, vil den relative fugtighed stige, og det kan føre til kondensation. I den modsatte retning vil den relative fugtighed falde, når den kolde luft varmes op inde i bygningen. I tage er risikoen for opfugtning ved konvektion større pga. at den termiske opdrift (skorstenseffekten) altid vil give et lille konstant overtryk under loftet. Desuden kan vinden medføre over- og undertryk på tage, dog næsten altid undertryk over flade tage. Konvektion sker primært gennem porøse materialer, som mineraluld med lav densitet. Det er derfor væsentligt, at dampspærren i tagkonstruktionen er tæt, så fugttransport ved konvektion ikke bliver for stor. Et eksempel fra SBi-anvisning 224 *Fugt i bygninger* viser, at fugttransport ved konvektion gennem en revne på 1 m x 1 mm i en dampspærre i loftet kan være ca. 100 gange større end ved diffusion gennem den samlede loftflade i et typisk énfamiliehus (Brandt E., 2013).

#### 3.1.1 Belastninger i tage

Tage påvirkes af fugt fra flere forskellige kilder, der både kommer udefra og indefra. Udefra påvirkes tage af nedbør, også i form af slagregn og fygesne, der kan trænge ind i konstruktionen. Desuden af fugtighed i udeluften, der kondenserer i konstruktionens yderste dele pga. udstråling til himmelrummet. Indefra påvirkes tage af fugt fra indeluften, som trænger ud i konstruktionen pga. diffusion gennem materialerne eller konvektion gennem utætheder, eller der kondenserer på indvendig overflade ved kuldebroer. Ydermere af byggefugt, dvs. indbygget fugt i konstruktionen, der stammer fra opførelsen af bygningen. Fugtpåvirkningen af tage kan variere meget alt efter bygningens art, beliggende og funktion (Brandt E. , 2013).

#### Nedbør

Taget er altid udsat for nedbør, som kan være regn, sne eller hagl. I stille vejr uden påvirkning af vinden falder nedbøren lodret og rammer taget uanset taghældningens størrelse. Ved rejste tage, dvs. tage med større taghældning er belastningen ikke så direkte og regnen vil hurtigere løbe af

taget end ved flade tage, hvor taghældningen er lille. Det vil generelt forbedre tagets vandtæthed. Under alle forhold skal nedbøren kunne afledes fra taget på effektiv måde. Når det blæser kan vindtrykket på tagfladen i forbindelse med nedbør føre til, at fugtpåvirkningen på taget bliver betydelig større. Det kommer til udtryk i form af slagregn eller fygesne, der i værste fald kan være opadrettet. I særlige tilfælde kan det betyde, at nedbøren trænger ind i konstruktionen gennem åbne tagdækninger, fx teglsten og ved ventilationsåbninger mv. Hvor udsat taget er for slagregn og fygesne afhænger af beliggenhed, orientering og udformning. I Danmark er den dominerende vindretning fra sydvest, det medfører fx at slagregn forekommer noget oftere ved den jyske vest-kyst end i København (Brandt E. , 2013).

#### Luftfugtighed i udeluften

Den relative luftfugtighed i udeluften varierer hen over året og i det enkelte døgn. Om vinteren er den relative luftfugtighed højst, gennemsnitlig omkring 90 %, og falder sjældent til meget under 80 %. På grund af temperaturen om vinteren er udeluftens vanddampindhold lavt, kun ca.  $5 \text{ g/m}^3$ . Om sommeren ligger den relative luftfugtighed i gennemsnit på ca. 75 %, med variationer mellem ca. 50 % og 100 %. Det varme vejr betyder, at vanddampindholdet er højere om sommeren, typisk omkring 10 g/m<sup>3</sup>. Figur 1 viser det område, som udeklimaet normalt varierer indenfor i løbet af et år. Også de gennemsnitlige variationer inden for et døgn i hver af årets måneder er vist. I ventilerede tage



Figur 1: Udeluftens tilstand varierer gennem året indenfor den kraftigt optrukne kurve. Gennemsnitlige døgnvariationer for temperatur og relativ fugtighed er markeret for hver måned med vandrette streger. Fra SBi-anvisning 224 (Brandt E., 2013).

ligger isoleringen inde i konstruktionen, og tagkonstruktionens ydre dele udsættes dermed for udeklimaet. Ved varmeudstråling fra tagfladen til himmelrummet under skyfrie vinterforhold underafkøles konstruktionens yderste dele, og der opstår risiko for kondens på de kolde flader. Hvis der efterfølgende sker en omfordeling af fugt i tagkonstruktionen ved solvirkning, kan nordvendte tagflader tilføres yderligere fugt. Dette er mest udtalt i ventilerede tage med tætte tagdækninger som fx tagpap og mindre ved tegltage, da tagsten har større varmekapacitet og undertaget ved udstråling ikke bliver lige så koldt (Brandt E. , 2013) (Byg-Erfa, 2011).

#### Luftfugtighed i indeluften

Fugtbelastningen inde i bygningen har betydning for hvor stor en fugtmængde, der tilføres tagkonstruktionen, enten ved diffusion eller konvektion - eller dampspærrens indvendige overflade. Indeluftens fugtindhold bestemmes af udeluftens fugtindhold, fugtproduktionen i bygningen, ventilationens størrelse og bygningens volumen. Om vinteren opvarmes udeluften, når den kommer ind i bygningen. Ved opvarmning falder den relative fugtighed, da mætningsdamptrykket bliver højere. I bygninger foregår der som regel aktiviteter, som tilfører vanddamp til indeluften. Fugtproduktionen skyldes fordampning fra personer, dyr og planter, samt aktiviteter som fx madlavning, badning, tøjvask og -tørring mv. I en bolig med to voksne og to børn kan der regnes med en fugtproduktion på ca. 10 kg/døgn. Der kan dog være en væsentlig variation i fugtproduktion de enkelte boliger imellem. I kontorer og lign. er fugttilførslen normalt mindre end i boliger, hvorimod den er højere i fx svømmehaller. Fugttilførslen vil føre til at indeluften indeholder mere vanddamp end udeluften, og udluftning vil derfor som hovedregel betyde at vanddamp fjernes. Ventilation/udluftning af en bygning er nødvendig for at holde den relative fugtighed nede på et acceptabelt niveau. I boliger er det som regel nok at luften udskiftes på to timer, dvs. at luftskiftet er 0,5 gange i timen [h<sup>-1</sup>]. Er luftskiftet stort og fugtproduktionen ringe vil den relative fugtighed blive lav, og omvendt vil et ringe luftskifte og stor fugttilførsel føre til en høj relativ fugtighed (Brandt E. , 2013). Et eksempel på dette ses nedenfor under forudsætning af en konstant fugtproduktion.

I en bolig med rumfang på 200 m<sup>3</sup>, der har en fugttilførsel fra personer og aktiviteter på 10 kg/døgn, dvs. ca. 400 g/h, og et luftskifte på 0,5 h<sup>-1</sup>, vil der ske en forøgelse af vanddampindholdet i indeluften med 4 g/m<sup>3</sup> - [400 g/h]:  $(0,5 h^{-1} x 200 m^{3})$ ]. Om vinteren hvor udeluften har et vanddampindhold på ca. 5 g/m<sup>3</sup> betyder det at vanddampindholdet i indeluften er ca. 9 g/m<sup>3</sup>, som svarer til en relativ fugtighed på ca. 50 %, se Figur 2 (gul pil). Hvis luftskiftet i samme bolig kun er 0,25 h<sup>-1</sup> vil fugttilskuddet blive 8 g/m<sup>3</sup>, og dermed give et vanddampindhold på 13 g/m<sup>3</sup> i rumluften, som svare til en relativ fugtighed på ca. 75



Figur 2: Indeluftens fugtindhold bestemmes af udeluftens fugtindhold, der opvarmes og tilføres fugt, hbv. 2 g/m<sup>3</sup> (grøn pil), 4 g/m<sup>3</sup> (gul pil) og 8 g/m<sup>3</sup> (rød pil).

%, Figur 2 (rød pil). Igen samme bolig men nu er fugtproduktionen kun 200 g/h med et luftskifte på 0,5 h<sup>-1</sup>. Fugttilskuddet bliver så 2 g/m<sup>3</sup>, og vanddampindholdet i rumluften 7 g/m<sup>3</sup>, som svarer til en relativ fugtighed på ca. 40 %, Figur 2 (grøn pil).

Til vurdering af en tagkonstruktions fugttekniske forhold kan fugtbelastningsklasser anvendes til at beregne fugtbelastningen fra indeluften. Fugtbelastningsklasserne er en forsimplet måde at beskrive vanddampkoncentrationen i indeluften i løbet af et år som følge af fugtproduktion og luftskifte. Der findes fugtbelastningsklasser for de almindeligste bygningsanvendelser. De er opdelt i 5 kategorier og benævnt fugtbelastningsklasse 1-5. Fugtbelastningsklasse 1 indeholder fx tørre lagerhaller, mens kontorer og boliger med normal beboelsestæthed regnes til fugtbelastningsklasse 2. Boliger med høj beboelsestæthed er indplaceret i fugtbelastningsklasse 3 og fugtbelastningsklasse 4 vedrører fx storkøkkener. Fugtbelastningsklasse 5 er specielle bygninger fx svømmerhaller. I Figur 3 er angivet for hver af de fem fugtbelastningsklasser et fugttilskud til indeluften, der afhænger af udeluftens månedsmiddeltemperatur. Der er væsentlig forskel på det forventede fugttilskud i de kolde perioder af året, mens der ikke forudses noget betydende fugttilskud i de varmeste perioder for nogen af klasserne. Fugttilskuddet falder pga. en øget udluftning, når udetemperaturen stiger (Dansk Standard, 2013) (Brandt E., 2013).



Figur 3: Fugtbelastningsklasserne 1-5 og deres forventede fugttilskud til indeluften, som afhænger af udeluftens middeltemperatur. Fra SBi-anvisning 224 (Brandt E., 2013).

#### Byggefugt

Under byggeprocessen kan der være indbygget større mængder fugt i tagkonstruktionen. Det kan skyldes, at fugtige materialer er indbygget i tagkonstruktionen som følge af opfugtning i perioden fra fabrik til indbygningen, eller fugt er overført til fugtfølsomme materialer, fx træ, fra uorganiske materialer, der ikke har været tilstrækkelig udtørret. Endvidere er indtrængen af nedbør, hvor taget ikke har været forsvarligt afdækket, en mulig årsag (Brandt E. , 2013).

#### 3.1.2 Paralleltag

Paralleltage kan være saddeltag eller pulttag opbygget med bjælkespær, hvor loftfladen er parallel med tagdækningen. Paralleltage udføres både som rejste og flade. Figur 1 viser princippet på et ventileret paralleltag med diffusionsåben tagdækning og ventileret undertag og tæt dampspærre. Det ventilerede paralleltag fungerer fugtteknisk således at den fugtmængde, der uundgåeligt trænger ud i tagkonstruktionen fra indeluften enten ved diffusion igennem dampspærren eller ved konvektion gennem utætheder i dampspærren skal fjernes med ventilation på den kolde side af isoleringen. Ventilationen sikres med ventilationsspalte mellem isolering og undertag og åbninger i tagfod og kip. Det er forskelle i vindtryk og temperatur, der få luften til at strømme gennem ventilationsspalten og dermed ventilere fugten væk. Hulrummet mellem tagdækningen og undertag skal ligeledes ventilereret (Brandt E. , 2013).



Figur 4: Transportmekanismer (kun illustreret på en tagflade) i ventileret paralleltag med diffusionsåben tagdækning, ventileret undertag og dampspærre

#### 3.1.3 Tag med ventileret tagrum

Tage med ventileret tagrum kan være saddeltag eller pulttag typisk opbygget med gitterspær, hvor isoleringen er placeret i loftkonstruktionen. Tage med ventileret tagrum udføres som rejste med større eller mindre taghældning. Figur 1 viser princippet på et ventileret tagrum med diffusionsåben tagdækning og tæt dampspærre. Tag med ventilerede tagrum fungerer fugtteknisk således at den fugtmængde, der uundgåeligt trænger op i tagkonstruktionen fra indeluften enten ved diffusion igennem dampspærren eller ved konvektion gennem utætheder i dampspærren skal fjernes med ventilation på den kolde side af isoleringen. Ventilationen sikres bedst med ventilationsåbninger i tagfod og kip (samme dimension som paralleltaget). Det er forskelle i vindtryk og temperatur, der få luften til at strømme gennem tagrummet og dermed ventilere fugten væk. Hulrummet mellem tagdækningen og undertag skal ligeledes ventilereret (Brandt E. , 2013).



Figur 5: Transportmekanismer (kun illustreret på en tagflade) i tag med ventileret tagrum, diffusionsåben tagdækning og dampspærre

### 3.2 Regler og anvisninger for tage

Et litteraturstudie er udført for at sammenfatte gældende danske regler for udførelse af ventilerede tage med konstruktion af træ og træbaserede materialer indenfor området fugt og fugtsikkerhed. I forlængelse af dette træffes valg af konstruktionsopbygning og materialer, der skal indgå i masterprojektets undersøgelse. Endvidere er udført en mere specifik undersøgelse af viden og erfaringer omkring ventilation i tagkonstruktioner og fugtforhold i højisolerede konstruktioner, primært fra andre nordiske lande. Derudover en undersøgelse af håndtering af de anvendte beregningsprogrammer og de faktorer, der skal inkluderes for at forudsige trækonstruktioners modstandsdygtighed set i forhold til kritiske fugtforhold. Det er udvalgte kilder, der præsenteres i dette afsnit set i forhold til projektets samlede antal kildeangivelser.

#### 3.2.1 Gældende regler og anbefalinger

Bygningsreglementet (Trafik- og Byggestyrelsen, 2016) foreskriver, at bygninger, og dermed også tage, skal udføres så vand og fugt ikke medfører skader på bygning eller gener for brugerne. Der skal sikres mod skadelig akkumulering af kondensfugt som følge af fugttransport fra indeluften. Tage skal udføres, så der opnås tæthed mod indtrængen af regn og smeltevand fra sne, og sikre at nedbøren kan løbe af på en forsvarlig måde. Ved indflytning må bygningskonstruktioner og bygningsmaterialer ikke have et fugtindhold, der medfører risiko for vækst af skimmelsvamp. Bestemmelser i Bygningsreglementet er uddybet i *Anvisning om Bygningsreglement 2015* (de Place Hansen, J. E. (red.), 2016), med henvisning til flere af nedenstående anvisninger.

En række anvisninger beskriver konkret, hvordan ventilerede tage opbygges og udføres i overensstemmelse med god praksis. Anvisningerne er baseret på forskning og byggetekniske erfaringer og skal derfor være med til at sikre en god teknisk kvalitet af tagene.

Nedenstående uddrag fra anvisningerne er målrettet masterprojektets valgte tagtyper og teoretiske karakter. En egentlig beskrivelse af udførelsestekniker, der teoretisk set ikke har indflydelse på tagkonstruktioners generelle opbygning og materialevalg, samt af samlingsdetaljer, som ikke kan håndteres i anvendte fugtberegningsprogrammer, er ikke indeholdt. Som eksempler herpå kan nævnes anvisning til hvordan tagdækning, undertag og ventilation udføres ved tagfod og kip, og anvisning for udførelse af samlinger i dampspærren.

#### Tagdækning

Tagdækninger findes i mange typer med forskellig grad af tæthed; fx tagsten af tegl, beton, skifer, banevarer af tagpap og tagfolie, samt tagplader af fibercement og metal. Til dette projekt er valgt at fokusere på tagdækninger af tegltagsten og tagpap. Om disse tagdækninger skriver SBianvisning 224, *Fugt i bygninger* (Brandt E. , 2013), at tagdækning med tagsten af tegl er normalt ikke helt tæt, og anvendes derfor som regel altid sammen med undertag. Tegltage skal have en taghældning på mindst 25° for at sikre vandtæthed og frostsikkerhed. Tidligere anvendte metode med understrygning af tagsten uden undertag vurderes ikke længere at sikre tiltrækkelig vandtæthed på sigt, og bør derfor ikke anvendes på tage uden tilgængelighed indefra. Med tagdækning af tagpap opnås en fuldstændig tæthed. Tage med tagpap kan udføres med lille taghældning ned til 1:40, dog lidt mindre i skotrender. Tegl 36 *Oplægning af tegltage* (Murerfagets Oplysningsråd, 2005) fastslår ligeledes, at taghældning for tegltage med undertag skal være mindst 25°. Mindste taghældning for tage med tagpap er i overensstemmelse med TOR-anvisning 30 *Fugt og tage* (Bunch-Nielsen, 2010).

#### Undertag

Ved åbne tagdækninger som tegltagsten anvendes undertage til at opfange og aflede den lille mængde nedbør, der måtte trænge igennem tagdækningen. Derudover skal undertaget tillade, at indefra kommende fugt kan slippe ud, så risiko for skadelig fugtophobning, undgås. Fugtteknisk skelnes der mellem ventilerede og uventilerede undertage. Ventilerede undertage, traditionel løsning, er diffusionstætte, hvor fugten, der kommer indefra, fjernes ved ventilation under undertaget. Uventilerede undertage er diffusionsåbne og her fjernes indefra kommende fugt ved diffusion gennem undertaget, som så bortventileres under tagdækningen. Ventilerede og uventilerede undertage fungerer kun korrekt, hvis fugtig rumluft effektivt hindres i at trænge op i tagkonstruktionen. Ventilerede undertage anbefales, hvis det er usikkert om dampspærren kan udføres tæt. Undertage kan udføres enten som fast undertag af brædder, krydsfiner eller OSB-plader beklædt med fx tagpap eller frithængende banevarer eller træfiberplader. Uventilerede undertage udføres af materialer, der både er vandtætte og diffusionsåbne med en dampdiffusionsmodstand (Zværdi) på mindst 3 GPa s m²/kg (Brandt E. , 2013). Jf. TRÆ67 *Undertage* bør undertaget vælges efter de aktuelle belastninger, og bør desuden have mindst samme levetid som tagdækningen (Træinformationen, 2013).

#### Ventilation

Ventilationen i ventilerede tage skal fjerne den fugtige rumluft, der uundgåeligt trænger op i tagkonstruktionen. Ventilationsluften kommer ind og ud gennem ventilationsåbninger ved tagfod, kip og evt. gavl, og strømmer i tagkonstruktionen gennem luftspalter og tagrum. Det er forskelle i vindtryk og temperatur ("skorstenseffekt"), der får luften til at strømme gennem konstruktionen og ventilere fugt bort. I tage med lille hældning er det kun vinden, der driver ventilation - altid undertryk over taget. Ventilationen skal fordeles jævnt, så alle områder i tagkonstruktionen ventileres. I rejste tage ventileres normalt mellem tagfod og kip. I flade tage med taghældning under 10° må ventilation kun ske fra tagfod til tagfod. Ventilation kan fungere i tage med husdybde op til 16 m (ved større husdybde skal foretages en fugtteknisk vurdering). Nødvendig størrelse af ventilationsåbninger er 15 mm ved hver tagfod og samlet åbning i kip 10 mm spalte og studse på 50-100 cm<sup>2</sup> alt efter tagtype. Krav til ventilationsåbninger i tage med diffusionstæt tagdækning beskrives mere detaljeret i TOR-anvisning 30 Fugt og tage (Bunch-Nielsen, 2010). For paralleltage med diffusionsåben tagdækning og undertag skal ventilationen omfatte hulrum mellem tagdækning og undertag uanset om undertaget er diffusionsåbent eller diffusionstæt, og endvidere spalten under diffusionstæt undertag, som for fast undertag skal være mindst 45 mm, og mindst 70 mm for frithængende. Ved paralleltage med diffusionstæt tagdækning skal spalten mellem tagdækningen og isoleringen ventileres, hvor højden af spalten skal være mindst 45 mm. For tage med ventilerede tagrum er det uudnyttede tagrum, samt hulrum mellem tagdækning og undertag, der skal ventileres. Alle ventilerede tage kan anvendes i fugtbelastningsklasse 1-3. (Brandt E., 2013).

#### Konstruktion

I vinterhalvåret udsættes ventilerede tagkonstruktioners yderste dele af den bærende konstruktion for høj relativ fugtighed typisk 80-90 % i udeluften. Træ og træbaserede materialers kritiske fugt-

niveau kan normalt antages at være 75 % RF på materialets overflade, hvis vækst af skimmelvækst skal undgås (Brandt E. , 2013), som Bygningsreglementet foreskriver. Endvidere forskriver *Anvisning om Bygningsreglement 2015*, at hvis det kritiske fugtindhold med hensyn til skimmelvækst for et materiale ikke er kendt og dokumenteret, kan et fugtindhold i materialet, der er i ligevægt med en relativ luftfugtighed (RF) på 75 % på materialets overflade, normalt anvendes som kritisk fugtindhold (de Place Hansen, J. E. (red.), 2016). Da temperaturen er lav om vinteren vil det under normale forhold ikke medføre vækst af skimmelvækst. (Brandt E. , 2013). Se yderligere under afsnit 3.3.

#### Isolering

Overholdelse af energirammen i Bygningsreglementet vil normalt kræve mindst 300 mm isolering i loft-/tagkonstruktionen (Munch-Andersen, 2008).

#### Dampspærre

I ventilerede tage skal dampspærren udføres af diffusionstæt materiale med en dampdiffusionsmodstand (Z-værdi) på mindst 50 GPa s m<sup>2</sup>/kg. Dette hindrer, at vanddamp fra indeluften trænger ud i tagkonstruktionen og gør skade, samtidig med at det sikrer konstruktionens lufttæthed, og dermed hindrer opfugtning som følge af konvektion. Selv kraftig ventilation kan ikke forventes at fjerne den mængde fugt, der trænger op i tagkonstruktionen som følge af utæt dampspærre. Dampspærren i ventilerede tage er typisk en plastfolie. Her er det vigtigt, at den udføres i et robust materiale, fx 0,2 mm PE-folie. Dampspærren anbringes på den varme side af isoleringen. For at sikre dampspærrens tæthed bedst muligt bør el-installationer trækkes på indvendige side. Dette kan opnås ved at placere dampspærren 45-50 mm inde i isoleringslaget, hvor den generelt også er bedre beskyttet (Brandt E. , 2013).

#### 3.2.2 Udvalgte relaterede studier

#### Sverige

Lund Universitet LTH har gennem flere studier undersøgt hvad et passende luftskifte er for hulrummet bag facadebeklædningen, når der skal udføres detaljerede fugtberegninger med simuleringsværktøjer som WUFI. Dette er gjort ved, at sammenligne 'blindt' beregnede værdier med feltmålinger, dvs. at beregningerne er udført inden målte værdier er kendt. Baggrunden for dette er, at et større antal fugtberegninger viste, at størrelsen af ventilationen i hulrummet bag facadebeklædningen har stor betydning for fugtforholdene i træskeletkonstruktioner. Et studie (Hägerstedt & Harderup, 2010) udførte beregninger af temperatur og relativ fugtighed i en træskeletvæg med seks forskellige faste luftskifter fra 0-50 h<sup>-1</sup> i hulrummet bag facadebeklædningen. En sammenligning mellem to af de beregnede luftskifter og målingerne viste en klart bedre overensstemmelse af relativ fugtighed yderst i isoleringen med et luftskifte på 20 h<sup>-1</sup> end med et luftskifte på 1 h<sup>-1</sup>. Et andet studie (Hägerstedt & Harderup, Comparison of mesured and calculated temperature and relative humidity with varied and constant air flow in the facade air gap, 2011), der ligeledes vedrører træskelvægge, har på grundlag af (Hägerstedt & Harderup, 2010) valgt et fast luftskifte på 30 h<sup>-1</sup>, og endvidere et vindafhængigt luftskifte på enten 10 h<sup>-1</sup> eller 100 h<sup>-1</sup> alt efter vindhastighed og vindretning. Beregningerne af fugtforholdene i konstruktionen er i god overensstemmelse med de tilsvarende målte værdier for temperatur og relativ fugtighed på nær om vinteren, hvor beregningerne viser lavere temperatur og som følge heraf en højere relativ fugtighed. Det vindafhængige luftskifte giver ikke nødvendigvis bedre overensstemmelse når beregninger og målinger sammenlignes.

Et tilsvarende men mere omfangsrigt forskningsprojekt ligeledes udført af LTH med i alt 148 målepunkter, hvoraf de 63 var placeret i ventilerede tage, skulle afgøre om et 1D fugtberegningsprogram (WUFI) kan forudsige fugtforholdene i ventilerede tage. Målingerne blev udført i fem forskellige huse lokaliseret i fire forskellige byer i Sverige over en periode på ca. 3 år fra 2009-2011 (Mundt-Petersen, 2013a-e). For beregningerne af temperatur og relativ fugtighed i projektets paralleltage blev anvendt et luftskifte på 30 h<sup>-1</sup> i ventilationsspalten baseret på (Hägerstedt & Harderup, 2010). For tagene med ventileret tagrum blev valgt et luftskifte på 3 h<sup>-1</sup> baseret på (Walker & Forest, 1995). Det 'reelle' luftskifte på 3 h<sup>-1</sup> blev herefter omregnet til et modelluftskifte i et tilnærmet tagrum i beregningsgrammet på baggrund af tagrummenes volumen. Generelt var der god overensstemmelse mellem målte og blindt beregnede værdier i de fleste undersøgte positioner i de ventilerede tage. Beregningsprogrammet blev derfor anset som et pålideligt værktøj, der kan forudsige evt. fugtproblemer i konstruktioner (Mundt-Petersen & Harderup, 2015).

Et studie af LTH har undersøgt ventilationen i luftspalter i ydervægge (Falk, 2014). Studiet viser, at ventilationsraten i luftspalten afhænger af spaltens geometriske udformning, den termiske opdrift og vindhastighed. I dagtimerne er temperaturforskelle den dominerende kraft for luftstrømningen i spalten, mens det om natten er vinden. Solpåvirkning på facaden giver øget strømning, der også betyder at en mørk facade øger ventilationen set i forhold til en lys. Der kan derfor generelt regnes med lavere strømning på en nordvendt facade end en sydvendt. En udformning af luftspalten med kun vertikale lægter giver et gennemsnitlig luftskifte på 230-310 h<sup>-1</sup> viser målinger for en sydfacade i vinterhalvåret, mens spalte med perforede horisontale rigler blev målt til et luftskifte, der var 60-70 % lavere.

I Sverige har LTH og Sveriges tekniske forskningsinstitut SP inden for forskningsprojektet WoodBuild udgivet en vejledning til projektering og risikovurdering, som skal sikre en fugtsikker udformning af klimaskærme med fugtfølsomme materialer (Thelandersson, Isaksson, & Niklewski, 2014). Vejledningen beskriver en konkret metode til at vurdere konstruktioners udformning og påvirkninger fra omgivelserne. Metoden er beskrevet som anvendelig ved sammenligning af fugtsikkerhed i alternative konstruktioner. En række eksempler er angivet for at illustrere metoden. Vejledningen skal sammen med en anden vejledning i samme regi (er endnu ikke udgivet, kun præsentationsmateriale) (Wallentén, 2013) give brugere af moderne hygrotermiske simuleringsværktøjer hjælp til at udføre beregningerne og analysere resultaterne, så de kan anvendes i praksis.

Et laboratoriestudie udført af SP skulle undersøge, hvilken betydning forskellige vindspærrer har på fugtforholdene i træskeletvægge ved yderside af stolperne - for vurdering af risiko for vækst af skimmelsvamp. En forsøgsvæg med 290 mm isolering opdelt i 5 forskellige konstruktioner blev over en 4 måneders periode udsat for et simuleret udeklima svarende til efterår og indeklima på 20 °C med naturligt varierende % RF. Målingerne fra vægstykket med mineraluld og traditionel diffusionsåben vindspærre (Z-værdi ca. 1,5) viste en middeltemperatur på 9,9 °C og højst 85 % RF i isolering lige bag vindspærren. Midt på ydersiden af en massiv træstolpe lige bag vindspærren måltes en middeltemperatur på 10,8 °C og højst 79-82 % RF. Tilsvarende måling på en letstolpe viste en middeltemperatur på 10,4 °C og højst 81-83 % RF. Målinger viser altså lidt lavere % RF yderst på den massive stolpe end let-stolpen, samt lavere % RF ved stolper end i isoleringen. I studiet er resultatet af målingerne forklaret med, at jo mere varmeledende materiale der er i konstruktionen desto højere temperatur og lavere % RF yderst i konstruktionen (Olsson, 2011).

#### Norge

Det Norske byggeforskningsinstitut SINTEF Byggforsk har undersøgt, om risikoen for fugtskader i bl.a. ventilerede tage øges med øget isoleringstykkelse, primært ved beregninger, hvor klimaforholdene er norske. I tag med ventileret tagrum er fugtforholdene ved underside af undertag undersøgt med hhv. 100 mm, 250 mm, 500 mm og 750 mm isolering i loftkonstruktionen. Vurderingen af ventilerede paralleltage er baseret på beregninger fra lette ydervægge med hhv. 150 mm, 250 og 400 mm isolering. Det vurderes, at der generelt ikke er behov for specifikke tiltag for at modvirke den negative effekt af en øget isoleringstykkelse, så længe gældende standarder og anvisninger følges, fx krav til ventilation af tagkonstruktionen, tæt dampspærre og lav fugtbelastning fra indeluften (Geving & Holme, 2010).

Det Norske byggeforskningsinstitut SINTEF Byggforsk har udført en række feltmålinger og undersøgelser i tage med diffusionsåbent undertag i en boligbebyggelse udenfor Oslo, pga. problemer med rim- og isdannelser på undersiden af diffusionsåbne undertage observeret i den første tid efter udførelsen. Undersøgelsen indikerer, at undertagsmaterialer af banevarer med lav diffusionsmodstand og kartonplade med større absorptionsevne mindsker risikoen for kondens i forhold til hårde træfiberplader. Ydermere viser simuleringer af temperatur- og fugtforhold i tagkonstruktion med opbygning svarende til den undersøgte bebyggelse også, at lav diffusionsmodstand og høj absorptionsevne er faktorer, der reducerer risikoen for kondens de første år. Bedst er tykke porøse træfiberplader. På den baggrund anbefales undertagsmateriale med lav diffusionsmodstand på mindre end S<sub>d</sub>=0,1 m, som svarer til en Z-værdi på 0,5 GPa s m<sup>2</sup>/kg, og/eller at materialet har høj absorptionsevne som fx en porøs træfiberplade (Blom & Bøhlerengen, 2012).

#### Øvrige udland

I Canada (Edmonton, Alberta) blev der udført feltmålinger af luftskiftet i tag med ventileret tagrum over en toårig periode i 1990-92. Bebyggelsen, der består af en række tætliggende huse i en etage, ligger delvist i læ af træer og nærliggende bygninger. På baggrund af målingerne fastsættes luftskiftet i ventilerede tagrum for ubeskyttede vindretninger til ca. 2 h<sup>-1</sup> og stigende til 10 h<sup>-1</sup>, hvor ventilationsåbningerne udgør mindst 1/300 af tagrummets areal. Målingerne viser endvidere at tagrummets luftskifte bestemmes af vindhastigheden, vindretningen og forskelle i temperatur mellem tagrum og udeluften. Vindhastigheden er den dominerende drivkraft for ventilation, dog er vindretningen vigtig, især når taget ligger i læ af bygninger og lign.

#### 3.3 Kritiske fugtforhold

I dette studie er vurdering af kritiske fugtforhold i tagkonstruktionerne set i forhold til risikoen for skimmelsvampevækst. En grænse, der typisk bruges for trækonstruktioner, og som ligeledes er iht. Bygningsreglementet BR15 (Trafik- og Byggestyrelsen, 2016), se afsnit 3.2.1 *Gældende regler*. Der ses ikke på risikoen for angreb af råd og svamp, da det kritiske fugtindhold for træ normalt skal være noget højere ved nyangreb, ca. 87 % RF (Brandt E. , 2013).

Skimmelsvampevækst afhænger af flere faktorer, og det er derfor svært at forudsige præcist, hvornår væksten sker. Skimmelsvampevækst forudsætter en tilstrækkelig mængde næringsstoffer og fugt samt en passende temperatur, der skal være til stede over en vis tid /have en vis varighed. Vækstbetingelserne er kun til stede ved høj relativ fugtighed, der regnes normalt med kritisk fugtniveau på 75 % RF på overfladen af et materiale, hvor betingelserne bliver bedre med stigende relativ fugtighed, men aftager igen nær 100 % RF. Hvad angår næring er der kun behov for ganske små mængder fra materialet selv eller fra snavs på dem. Betingelserne for vækst er bedst ved temperaturer omkring 20-30 °C, men der kan forekomme vækst ved temperaturer mellem ca. 0-50 °C, dog i mindre grad jo lavere eller højere temperaturen er. Tiden afhænger af vækstbetingelserne, altså graden af relativ fugtighed, nærring og temperatur, og kan være fra få dage til måneder. Skimmelsvampevækst sker normalt i korte perioder med høj relativ fugtighed, og derefter perioder hvor vækstbetingelserne ikke er opfyldt. Hvilken betydning periodernes længde har på skimmelsvampevæksten vides ikke præcist, da der ikke er fundet nogen verificeret forsøgsmetode (Brandt E. , 2013).

Skimmelsvampe vokser primært på materialernes overflade (dog uden at nedbryde dem). Vækstbetingelserne er bedst på organiske materialer, såsom træ og træbaserede materialer, hvor den kritiske relative fugtighed er 75-80 %, og mindre på uorganiske materialer fx beton, hvor kritisk RF skal være 90-95 %. Dog er den kritiske relative fugtighed på forurenede materialer fx fra jord eller støv ca. 75 %. Skimmelsvampe består af flere arter, der har forskellige krav til fugtniveau og nærringstoffer (Brandt E. , 2013).

Der findes en række anerkendte skimmelsvampemodeller til vurdering af muligheden for vækst af skimmelsvamp i bygningskonstruktioner / på bygningsmaterialer. Nogle af dem ses i Figur 6. Modellerne svarer i mange henseender overens, når det



Figur 6: Forskellige skimmelmodeller viser samme adfærd med hensyn til temperatur og relativ fugtighed. Fra (Mundt-Petersen, Wallentén, Toratti, & Heikkinen, 2012)

gælder de ovenfor omtalte faktorer, som er betingelserne for at skimmelsvampevækst kan ske, fx at det kritiske fugtniveau er temperatur-afhængigt og ophører ved lave temperaturer omkring 0 °C. Hvorimod forskellen mellem modellerne primært går på hvordan indflydelse af varigheden behandles. Det gælder både når vækstbetingelserne er til stede med værdier over det kritiske fugtniveau, men også hvis den relative fugtighed evt. falder under det kritiske fugtniveau, hvor vækstbetingelserne ikke længere er til stede (Mundt-Petersen, Wallentén, Toratti, & Heikkinen, 2012).

Til dette studie gøres brug af den tyske skimmelmodel LIM I (Sedlbauer, 2001), se Figur 6, da modellen er anvendelig ved vurdering af trækonstruktioner samt er i god overensstemmelse med *Anvisning om Bygningsreglement 2015*, om kritisk relativ luftfugtighed på 75 % på materialets overflade (de Place Hansen, J. E. (red.), 2016). Skimmelmodellen knytter sig ligeledes til fugtberegningsprogrammet WUFI (WUFI, 2013), se afsnit 3.4.1. Faktorerne, der bestemmer væksten, er som beskrevet ovenfor. Modellen beskriver vækstbetingelser for skimmelsvampe ved brug af såkaldte Isopleth systemer, baseret på målte data, hvor den laveste grænse for skimmelaktivitet, kaldet LIM (Lowest Isopleth for Mould), er bestemt på baggrund af konstant temperatur og relativ fugtighed. Jo større overskridelsen af denne grænse er, jo større er risikoen for vækst af skimmelsvamp. Til dette studie er anvendt  $\text{LIM}_{mat}$ I, en kategori for biologisk nedbrydelige byggematerialer, såsom træ og træbaserede materialer. Det beskrives, at  $\text{LIM}_{mat}$ I kurven - herefter benævnt RF <sub>kritisk</sub> - skal gå igennem punkterne 12 °C / 79 % RF, 25 °C / 75 % RF og 30 °C / 76 % RF.

Figur 7 viser et eksempel på Isopleth modellen baseret på (Sedlbauer, 2001) som beskrevet ovenfor, hvor kurvens forløb er faslagt tilnærmelsesvis ved opmåling. Det ses, hvordan den kritiske relative fugtighed for vækst af skimmelsvamp RF\_kritisk (rød linje) varierer anhængig af temperatur (x-akse) og relativ fugtighed (y-akse), endvidere om der er risiko for skimmelvækst, dog uden betydning af varighed/tid. Hvert enkelt punkt (blå) i diagrammet er lig med forholdet mellem temperatur og relativ fugtighed for en specifik time i en valgt position i konstruktionen. Punkter over RF\_kritisk medfører risiko for skimmelvækst, mens punkter under anses for at være uden risiko. Uden varighed/tid er det ikke muligt at registrere længden af perioder, hvor RF\_kritisk overskrides.

Figur 8, baseret på Folos 2D visual mould chart (Mundt-Petersen, Wallentén, Toratti, & Heikkinen, 2012), er en videreudviklet visualisering til anerkendte skimmelsvampe modeller, såsom Isopleth modellen i Figur 7. Diagrammet gør det muligt at sammenligne fugtforholdene over tid i forskellige positioner i samme konstruktion samt forskellige konstruktioner med forskellig opbygning, og endvidere forskelle mellem beregnede og målte temperaturer og RF i en faktisk konstruktion. Eksemplet i diagrammet skal forstås således, at kritiske fugtforhold, hvor vækst af skimmelsvamp er mulig, forekommer, når den relative fugtighed RF (sort linje) er over den kritiske relative fugtighed RF<sub>\_kritisk</sub> (rød linje). Varigheden af RF over RF<sub>\_kritisk</sub> kan ligeledes aflæses, og endvidere hvor stor overskridelsen er. Jo større og jo længere overskridelsen af RF over RF<sub>\_kritisk</sub> er, jo større er risikoen for vækst af skimmelsvamp. Temperaturen (gul) kan ligeledes aflæses i diagrammet. Input består således af timeværdier for temperatur, relativ fugtighed og definitionen på kurven RF<sub>\_kritisk</sub> fra Isopleth modellen, som hver især skaber en linje i diagrammet.



Figur 7: Eksempel på forholdet mellem temperatur [T] og relativ fugtighed /RF? sammenholdt med kritisk relativ fugtighed [RF\_kritisk] (Sedlbauer, 2001). Hvert punkt er en timeværdi for T og RF i en given position.

Figur 8: Eksempel på forholdet mellem relativ fugtighed [RF] og kritisk relativ fugthed [RF kritisk] over tid med angivelse af en 1-årig periode. RF kritisk er afhængig af temperaturen |T|.

70

ົວ

**Femperatur** 

Analyseværktøjerne i Figur 7 og Figur 8 kan således anvendes med fokus på, hvordan temperatur og relativ fugtighed påvirker vækst af skimmelsvamp i konstruktionen.

#### 3.4 Beregningsprogrammer

#### 3.4.1 WUFI

WUFI (Wärme- Und Feuchtetransport Instationär) er et computerprogram, som er udviklet af Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP) i Tyskland til at beregne koblet varme- og fugttransport for en flerlags bygningskonstruktion. Programmet findes både i en 1- og 2-dimensionel version. Det er den 1-dimensionelle version WUFI Pro 5.3 (WUFI, 2013), der er valgt til dette studie, da 1D vurderes at være acceptabel til opgavens karakter. WUFI udfører instationære beregninger i bygningsdele og konstruktioner med varierende materialeparametre og randbetingelser.

WUFI er baseret på fugttransport ved dampdiffusion og væsketransport (kapillarsugning) i bygningsmaterialer. Beregningsmetoden er numerisk (differentialligninger for varme- og fugttransport) udført som finite elementer (inddeling i net); over tid med angivelse tidsskridt. Drivkraften for fugttransport er temperatur og relativ fugtighed. Programmet er blevet valideret gennem sammenligninger med feltmålinger i hele verden, herunder svenske klimaforhold; WUFI (MundtPetersen, 2013a-e) (Mundt-Petersen & Harderup, 2015), og giver realistiske simuleringer af hygrotermiske forhold i bygningsdele under faktiske forhold.

WUFI er velegnet til vurdering af udtørringstider for byggefugt, analyse af fugtforholdene i klimaskærmen herunder skimmel- og kondensrisiko i bygningskonstruktioner, samt hjælp til design af konstruktioner med relation til den samlede hygrotermiske ydeevne - både ved nybyggeri og renovering. Programmet kan håndtere forhold som påvirkning af slagregn, solstråling, langbølget stråling, latent varmetransport, ventilerede luftspalter, lækager, kapillarsugning og sommerkondens.

Programmet håndterer kun 1-dimensionelle processer, og kan dermed ikke regne på geometriske kuldebroer som fx spær, og det er derfor ikke muligt at inkludere betydningen af forskelligt fugtindhold i disse dele fra byggefasen, ligesom luft- og varmestrømme gennem samlinger og andre utætheder skal betragtes ved brug af særskilte modeller. Beregningsmodellen tager desuden ikke hensyn til varme- og fugttransport, der afhænger af konvektion gennem bygningsmaterialer samt luftstrømme forårsaget af gravitation og vind, ligesom hysterese ikke overvejes i materialernes sorptionskurve.

### 3.4.2 BSim

BSim (Building Simulation) er et edb-program, der er udviklet af Statens Byggeforskningsinstitut, SBi, til beregning og analyse af indeklimaforhold, effektbehov samt energiforbrug i bygninger (Wittchen, Johnsen, Grau, & Rose, 2013). Forskellige beregningsmodeller i programmet gør det muligt at udføre sammensatte analyser af en bygning. Kernen i systemet er en fælles bygningsdatamodel, der deles af alle beregningsmodellerne og en fælles database med termiske og fugttekniske data for typiske bygningsmaterialer og konstruktioner.

En fugtmodel til dynamisk beregning af fugtforhold i indeklimaet og bygningsdele er efterfølgende integreret i programmets termiske bygningssimuleringsmodel, som giver muligheder for både at analysere fugtholdene i fx tagrum og for at vurdere fugttilstanden i fx loft- og tagkonstruktion. Programmet er valideret gennem sammenligninger med feltmålinger (Rode, Grau, & Mitamura, 2001).

I BSim består en bygning af et antal zoner, der adskilles fra hinanden og fra udeklimaet ved bygningens konstruktioner. I hver zone angives et fugtniveau ved tilføjelse af forskellige fugtkilder. Indeklimaet kan også fastsættes ved etablering af en fiktiv zone, således kan fugtbelastningen i bygningen svare til fugtbelastningsklasserne i DS/EN ISO 13788 (Dansk Standard, 2013). Fugtigheden udveksles dynamisk ved ventilation og luftskifte med udeklimaet og med tilstødende zoner samt mellem luften i en zone og dennes overflader. Udeklimaet fastsættes ved en klimadatafil, hvor det er muligt at vælge klimadata fra hele verden.

BSim udfører instationære beregninger af fugtforholdene i konstruktioner, hvor de dynamiske randbetingelser er bestemt af det tilstødende inde- og udeklima. Fugttransport i konstruktioner ses alene som diffusion, hvor materialernes fugtbuffervirkning beregnes ud fra deres sorptionskurver med inklusion af hysterese (kurver afviger fra hinanden ved opfugtning og udtørring). Desuden kan beregningsmodellen tage hensyn til latent varmetransport.

Konstruktioner i BSim kan ikke opbygges med inhomogene materialelag, og kan dermed heller ikke tage højde for samlingsdetaljer, dvs. kun 1-dimensionel fugtberegning. Programmet kan ikke beregne fugttransport i konstruktioner ved konvektion og kapillarsugning, ej heller simulere med slagregn. Ligesom langbølget strålingsudveksling med himlen ikke medtager strålingsudveksling med omkringliggende bygninger eller fremspring på bygningen selv.

### 4 Metoder og materialer

Undersøgelsen af fugtforholdene i højisolerede, ventilerede tage er udført som parameterstudie gennem beregninger af forskellige konstruktionsopbygninger med varierende forhold, som fremgår af afsnit 4.1.3 og 4.2.3, ved brug af computerprogrammerne WUFI Pro (WUFI, 2013) og BSim (Wittchen, Johnsen, Grau, & Rose, 2013), der begge udfører 1-dimensionel fugtberegning. Programmerne er omtalt i afsnit 3.4.1 og 3.4.2. WUFI er anvendt til beregning af forholdene i paralleltag, samt i begrænset omfang til tag med ventileret tagrum. BSim er anvendt til tag med ventileret tagrum. For at sikre at konstruktionerne er i fugtligevægt med omgivelserne, er det resultaterne fra det tredje år af de 3-årige beregningsperioder, som er præsenteret. Dette er indledningsvis verificeret ved 5-årig beregningsperiode. Ved analysen af byggefugt, er det dog startåret.

En reference konstruktion for både paralleltag og tag med ventileret tagrum er valgt ud fra dansk tradition/byggestik med opbygning efter gældende regler og anvisninger for nybyggeri, se afsnit 3.2.1. Først er udført en analyse af de mest fugtkritiske positioner i hver af reference tagkonstruktionerne, og dernæst er foretaget ændring af forskelige parametre vurderet op mod reference konstruktionen i den mest fugtkritiske position. Parametervariationerne vedrører forskellige konstruktionsopbygninger og materialer, og andre forhold i konstruktionen, samt randbetingelser ved inde- og udeklima, og er baseret på litteraturstudiet, se afsnit 3.2.2. Opbygning af tagkonstruktioner og valg af parametre er bestemt ud fra programmernes muligheder, bl.a. er der kun anvendt materialer fra deres materialedatabase. Alt er nærmere beskrevet i efterfølgende afsnit 4.1 *Paralleltag* og 4.2 *Tagrum*.

Resultatet af beregningerne for de forskellige studerede tagkonstruktioner er vurderet i forhold til det kritiske fugtindhold, hvorved der er risiko for vækst af skimmelsvamp på træ og træbaserede materialer. Til dette formål er anvendt den tyske skimmelmodel LIM I (Sedlbauer, 2001), hvor den nedre grænse for hvornår skimmelsvampevækst opstår i dette studie er benævnt RF<sub>\_kritisk</sub>, der er detaljeret omtalt i afsnit 3.3. De nærmere forhold, af hvornår skimmelsvampevækst begynder, indgår ikke i vurderingen af konstruktionerne, da hensigten med undersøgelsen primært er, at vise hvilke, og i hvilken udstrækning, specifikke faktorer påvirker og ændrer vilkårene for skimmelsvampevækst. Resultaterne er præsenteret i to forskellige typer diagrammer; et såkaldt Isopleth diagram, se Figur 7, som er anvendt til forholdsmæssig sammenligning af konstruktionerne ved at sammenholde temperatur og relativ fugtighed med RF<sub>\_kritisk</sub>, samt et såkaldt Folos 2D visual mould diagrammet er ikke brugt til analyse af BSim beregningerne for tagrum, da data for timeværdierne har så store udsving over døgnet, at det ikke er muligt at aflæse resultatet i diagrammet.

Da dataoverførsel fra BSim i form af timeværdier for et helt år til analyse og sammenligning af resultater i ovenfor nævnte diagrammer er tidskrævende, har det været nødvendigt at begrænse tidsperioden til enkelte måneder. Udvælgelsen af de pågældende måneder er sket på grundlag af de mest fugtkritiske perioder på året baseret på beregnede ugemiddelværdier for temperatur og relativ fugtighed i referencekonstruktionen for tagrum ved den mest fugtkritiske position, samt

resultaterne af fugtforholdene i paralleltaget beregnet i WUFI for at inkludere betydningsfulde forskelle fra parametervariationerne.

### 4.1 Paralleltag

#### 4.1.1 Referencekonstruktion og beregningsmodel

Paralleltagets reference konstruktion, hvor tværsnit ses i Figur 9, er opbygget som et traditionelt koldt tag med tæt dampspærre og ventileret undertag efter anvisninger, som er detaljeret beskrevet i afsnit 3.2.1. Taget har 500 mm isolering, hvor dampspærren ligger 50 mm tilbagetrukket, og indvendig beklædning er 2 lag gipsplader. Tagdækningen er (røde) teglsten og der er fast undertag af krydsfiner med tagpap. Ventilationsspalten mellem isoleringen og undertaget er 50 mm.



Figur 9: Paralleltag - reference (P.Ref.), tværsnit i traditionel ventileret tagkonstruktion. 1-dimensionel beregningsmodel fra programmet WUFI, og med tilhørende materialelag.

I Figur 9 ses yderligere hvordan tagkonstruktionen er opbygget i WUFI Pro (WUFI, 2013) som en 1-dimensionel beregningsmodel. Spær og lægter i isoleringslag er dermed udeladt, ligesom spær, afstandslister og lægter ikke indgår i luftlag. Et materialelag med egenskaber helt som en tegl tagsten findes ikke i WUFI materialedatabasen, og derfor er de yderste 5 mm af materialelaget gjort tættere med en vandafvisende behandling, som beskrevet i *Handling of typical constructions in WUFI* (Fraunhofer Institute for Building Physics, 2014). Til sammenligning er udført tre simuleringer af tagkonstruktionen, hvor hhv. tegltaget er uden den vandafvisende behandling, en tæt membran er tilføjet uden på tegltaget, og påvirkningen fra regn er reduceret til 0,1. Der var ikke nogen nævneværdig forskel på resultatet af de beregnede værdier for relativ fugtighed i positionerne A og B.

Luftspalten mellem isoleringen og undertaget er sammensat af 3 lag, baseret på WUFI materialedatabase (WUFI, 2013), (for at mindske risikoen for fejl i beregningen). Yderst og inderst er placeret et 2 mm luftlag med ekstra fugtkapacitet, og i midten et 46 mm luftlag uden ekstra fugtkapacitet, hvor luftskiftet er tilføjet (Mundt-Petersen, 2012) (Thelandersson, Isaksson, & Niklewski, 2014). Luftskiftet i ventilationsspalten er fast og sat til 30 h<sup>-1</sup>, baseret på svenske erfaringer (Hägerstedt & Harderup, Comparison of mesured and calculated temperature and relative humidity with varied and constant air flow in the facade air gap, 2011) og (Mundt-Petersen & Harderup, 2015). I ventilationsspalten under tagdækningen er luftskiftet sat til 200 h<sup>-1</sup>, en antagelse baseret på (Falk, 2014).

Isoleringslaget på udvendig side af dampspærren er opdelt i 5 lag af 90 mm, da store isoleringstykkelser over 100 mm i et lag bør undgås igen for at mindske risikoen for fejl i beregningen (Mundt-Petersen, 2012). Alle anvendte materialelag med deres basisegenskaber er oplistet i Tabel 1. Materialernes fugtafhængige egenskaber er ikke vist i tabellen, men kan findes i programmets materialedatabase.

Materiale	WUFI materiale	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Porøsitet [%]	Varme- kapacitet [J/kg K]	Varme- ledningsevne [W/m K]	Vanddamp- diffusions- modstand [-]
Tagsten	Solid Brick, hand-formed	1725	0,38	850	0,6	17
Luftspalte	Air layer 70 mm	1,3	0,999	1000	0,4	0,23
Tagpap undertag	Roof Membran V13	2400	0,001	1000	0,50	100000
Krydsfiner fast undertag	Plywood desity 600	600	0,5	1600	0,13	210
Luftspalte	2 mm Air layer 50 mm	1,3	0,999	1000	0,28	0,32
Luftspalte	46 mm Air layer 50 mm; without additional moisture capacity	1,3	0,999	1000	0,28	0,32
Isolering	Mineral Wool (heat con: 0,04 W/m²)	28 (Rockwool, 2016)	0,95	850	0,04	1,3
Dampspærre	PE-Membran 0,2 mm (s <sub>d</sub> =87)	130	0,001	2200	1,65	87000
Gipsplade	Gypsymboard, interior	625	0,73	850	0,2	8,33

Tabel 1: Anvendte materialeparametre for paralleltag og deres egenskaber for beregningsmodel i WUFI.

Tagfladen er orienteret mod nord og har en hældning på 45°. En nordvendt tagflade er valgt, da det normalt anses for at være på den sikre side ved fugtteknisk vurdering af konstruktioner pga. at solopvarmningen på den udvendig flade er mindst ved denne orientering (Brandt E. , 2013).

Det er antaget at konstruktionen er helt tæt, dvs. ingen nedbør trænger igennem undertaget og fugttransport gennem dampspærren sker kun ved diffusion.

I WUFI er det ikke muligt at vælge dansk udeklima, derfor er anvendt udeklima fra Lund i Sverige, som er vurderet værende sammenligning med det danske klima. Klimadata for perioden 1995-2005 er sammensat med det formål at skabe et 'normalår' uden perioder med ekstremt vejr (WUFI, 2013). Indeklimaets fugtbelastning er valgt til fugtbelastningsklasse 2 i henhold til DS/EN ISO 13788 (Dansk Standard, 2013) og SBi-anvisning 224 (Brandt E. , 2013), hvor fugttilskuddet til indeluften er 4 g/m<sup>3</sup> ved udeluftens temperatur under 0 °C, se Figur 3. Temperaturen indendørs er sat til 20 °C. Alle indledende forudsætninger og randbetingelser, som er gældende for beregningsmodellen i WUFI er noteret i Tabel 2.

Orientering, hældning og	<ul> <li>Tagfladen er orienteret mod nord.</li> </ul>
højde	<ul> <li>Tagets hældning er sat til 45 grader.</li> </ul>
	<ul> <li>Slagregnskoefficienter er sat til R1=1 og R2= 0 s/m - WUFI standardværdi for tag. Dvs.</li> </ul>
	al regn rammer taget.
Overfladens overgangsko-	– Udvendig overgangsisolans er 0,0526 m²K/W, inkl. langbølget stråling på 6,5 W/m²K -
efficienter	WUFI standardværdi for tag.
	<ul> <li>Vind-afhængig er ikke slået til.</li> </ul>
	<ul> <li>Ingen S<sub>d</sub>-værdi er valgt til den udvendige overflade.</li> </ul>
	<ul> <li>Absorptionstal for kortbølget stråling er valgt til 0,67 for røde teglsten - WUFI standard- værdi.</li> </ul>
	– Emissionstal for langbølget stråling er sat til 0,9 - WUFI standardværdi.
	<ul> <li>Eksplicit strålingsbalance er slået til med følgende WUFI standardværdier: jordoverfla- dens langbølget emissivitet = 0,9, jordoverfladens langbølget refleksion = 0,1, samt sky- indeks = 0,66.</li> </ul>
	<ul> <li>Jordoverfladens kortbølget refleksion = 0,2 - WUFI standardværdi.</li> </ul>
	– Påvirkning fra regn er iht. konstruktion og hældning = 1,0 - WUFI standardværdi.
	<ul> <li>Indvendig overgangsisolans er 0,125 m2K/W - WUFI standardværdi for tag.</li> </ul>
	<ul> <li>Ingen Sd-værdi er valgt til den indvendige overflade.</li> </ul>
Startbetingelser	<ul> <li>Start fugtindhold er sat til middelværdi over konstruktion med 80 % relativ fugtighed - WUFI standardværdi.</li> </ul>
	<ul> <li>Vandindhold er iht. de valgte materialers egenskaber.</li> </ul>
	- Start-temperatur er sat til middelværdi over konstruktion med 20 °C.
Beregningsperiode	- Beregningsperioden er sat til 3 år, for at fugtindholdet i konstruktionen kan observeres
	over tid, og samtidig sikre at indvirkningen af startbetingelserne er ophørt.
	<ul> <li>Starttidspunktet er sat til 01-10-2016, og simuleringen afsluttes 01-10-2019.</li> </ul>
	<ul> <li>Et tidstrin på 1 time er anvendt.</li> </ul>
Numeriske alternativer	- Beregningsmåde er inkl. varme- og fugttransport. Til termisk konduktivitet anvendes
	temperatur og fugt afhængighed.
	<ul> <li>Særlige hygrotermiske muligheder er sat til ikke ekskluderet.</li> </ul>
	<ul> <li>Numeriske parametre for øget nøjagtighed og tilpasset konvergens er slået til.</li> </ul>
	<ul> <li>Tilpasset kontrol af tidstrin er aktiveret: trin = 3, max. perioder = 5.</li> </ul>
	<ul> <li>Geometri er sat til kartesisk.</li> </ul>
Klimabetingelser ude og	<ul> <li>Udeklima er sat til Lund i Sverige, som værende tættest på klimaet i Danmark.</li> </ul>
inde	<ul> <li>Indeklima er sat til DS/EN ISO 13778 med fugtbelastningsklasse 2 med inde temperatur 20 °C.</li> </ul>

Tabel 2: Indledende forudsætninger og randbetingelser for beregningsmodel i WUFI.

#### 4.1.2 Fugtkritiske positioner

For at fastsætte hvilken eller hvilke positioner i tagkonstruktionen, som er mest fugtkritisk, er udført en række beregninger i forskellige dybder i referencekonstruktionen. Ud fra den betragtning, at en given position er fugtkritisk, når forholdet mellem temperatur og relativ fugtighed overskrider det kritiske fugtniveau for risiko for vækst af skimmelsvamp, RF<sub>\_kritisk</sub> som omtalt i afsnit 3.3. I det efterfølgende parameterstudie vil der således være fokus på den eller de mest fugtkritiske positioner. Det kan dog vurderes nødvendigt at studere andre positioner, hvis forudsætninger for konstruktionen ændres. Der er valgt fem positioner i tagkonstruktionen, som er beskrevet nedenfor med Pos A-E, og vist i Figur 10. Som nævnt i afsnit 4.1.1 indgår betydningen af spær, lægter og afstandslister i taget ikke i beregningsmodellen, da programmet er 1D. Ved vurdering af fugtkritiske positioner betragtes dog fx spær som angivet positionerne A-E.



- Pos A. Ved underside af krydsfiner (yderside af spær/-påforing)
- Pos B. Yderst i isoleringen (spær /-påforing)
- Pos C. Midt i isoleringen (midt på spær)
- Pos D. Inderst i isoleringen (inderside af spær) ved udvendig side af dampspærre

Pos E. Ved indvendig side af dampspærre (yderside af lægte)

Figur 10: Paralleltag - reference (P.Ref.) med angivelse af positionerne A-E, som studeres for at bestemme hvilken eller hvilke positioner i tagkonstruktionen, der er mest fugtkritisk.

#### 4.1.3 Parameterstudie

For at undersøge hvilken indvirkning forskellige faktorer i tagkonstruktionen og dennes randbetingelser har på fugtforholdene i konstruktionen, er udført et parameterstudie bestående af et antal beregninger med forskellige ændringer af konstruktionsopbygning / materialer, andre forhold i konstruktionen, samt randbetingelser ved inde- og udeklima. I Tabel 3 er oplistet alle gennemførte beregninger for paralleltag. Hver beregning har et modelnummer med angivelse af de parametervariationer, der gør sig gældende for den enkelte beregning. Referencekonstruktionen er benævnt P.Ref.

Tabel 3 er i afsnit 9.2 suppleret med en kort forklaring af parametrene og de anvendte variationer, opdelt som præsenteret i resultatafsnittet. Hvis intet andet er nævnt under de enkelte parametre, gælder forudsætningerne som beskrevet for referencekonstruktionen.

Para- me- ter	Modelnr. Variation	P.Ref	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18
Orientering Taghældn.	Nord Syd 45° 25° 0°	x x	x x	x x	x x	x	x x													
Indeklima	kl2-20°C kl3-20°C kl4-20°C kl2-18°C kl3-18°C	х	х	х	х	х	х	X	x	x	Х	х	х	х	х	х	х	х	Х	X
Luftskifte	30 h <sup>-1</sup> 1 h <sup>-1</sup> 4 h <sup>-1</sup> 10 h <sup>-1</sup> 100 h <sup>-1</sup>	х	х	х	х	х	х	Х	х	Х	х	x	X	x				Х	Х	х
Under- tagstype	Ventileret Uvent. Z=3 Uvent. Z=0,5 Uvent Z=0,5pl <sup>1</sup>	х	х	х	х	х	х	Х	х	Х	х	х	х	х	x	X	X	х	Х	X
T <sub>ag-</sub> dækning	Teglsten rød Teglsten lys Tagpap mørk Tagpap lys	Х	х	х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	х	х	Х	х	Х	X	x
I solering tykkelse	500 mm 200 mm 320 mm 680 mm	Х	х	х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	х	х	Х	х	Х	Х	х
Under- tag iso.	Uisoleret Isoleret Uisoleret U-lag <sup>2</sup> Isoleret U-lag <sup>2</sup>	х	х	х	х	х	х	Х	х	Х	х	х	х	х	х	х	х	х	Х	х
Byggefugt	80 % hele kon. 75 % hele kon. 90 % hele kon. 25% krydsfiner 100% isolering <sup>3</sup>	х	х	х	х	х	х	Х	х	Х	Х	х	х	х	х	х	х	Х	Х	х
Under- tag tæth.	Ingen utæthed 0,1 % utæthed <sup>4</sup> 0,2 % utæthed <sup>4</sup> 1,0 % utæthed <sup>4</sup>	X	x	x	X	X	х	Х	х	Х	Х	X	х	x	x	X	x	х	Х	x
Damp- spærre	Tæt Utæt 1x12,5 <sup>5</sup> Utæt 10x12,5 <sup>5</sup>	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	X	х	х	х

Tabel 3: Oversigt med gennemførte beregninger for paralleltag og med beskrivelse af parametervariationer. Reference konstruktionen er benævnt P.Ref. Afkrydsning i rubrik angiver hvilke forhold der gør sig gældende for den enkelte beregning - benævnt med et modelnr.

1: 13 mm porøs træfiberplade

2: Underlag for tagpaptag

3: 4 mm vand (4 l/m<sup>2</sup>) i yderste 90 mm isolering

4: Antal % af den samlet nedbør der falder taget som vil trænge igennem undertagsmembranen

5: Størrelsen på revnen i dampspærren angivet i mm/m²

### Tabel 3 fortsat

Para-	Modelnr.																		
me- ter	Variation	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30	P31	P32	P33	P34	P35	P36
Orientering Taghældn.	Nord Syd 45° 25° 0°	X X																	
Indeklima	kl2-20°C kl3-20°C kl4-20°C kl2-18°C kl3-18°C	Х	х	Х	Х	х	Х	Х	Х	х	Х	Х	Х	Х	х	х	Х	X	Х
Luftskifte	30 h <sup>-1</sup> 1 h <sup>-1</sup> 4 h <sup>-1</sup> 10 h <sup>-1</sup> 100 h <sup>-1</sup>	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	X	X
Under- tagstype	Ventileret Uvent. Z=3 Uvent. Z=0,5 Uvent Z=0,5pl <sup>1</sup>	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	X	Х
T <sub>ag-</sub> dækning	Teglsten rød Teglsten lys Tagpap mørk Tagpap lys	Х	х	х	х	х	Х	Х	Х	х	Х	Х	х	Х	х	х	Х	Х	Х
Isolering tykkelse	500 mm 200 mm 320 mm 680 mm	х	x	x	X	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	X	Х	х	х	Х	Х	Х
Under- tag iso.	Uisoleret Isoleret Uisoleret U-lag <sup>2</sup> Isoleret U-lag <sup>2</sup>	Х	X	X	X	x	X	X	X	X	х	х	X	X	X	X	Х	Х	х
Byggefugt	80 % hele kon. 75 % hele kon. 90 % hele kon. 25% krydsfiner 100% isolering <sup>3</sup>	Х	х	х	х	х	х	х	х	x	X	х	х	х	х	х	Х	Х	х
Under- tag tæth.	Ingen utæthed 0,1 % utæthed <sup>4</sup> 0,2 % utæthed <sup>4</sup> 1,0 % utæthed <sup>4</sup>	Х	X	x	X	X	х	х	х	X	X	X	X	X	X	X	Х	Х	X
Damp- spærre	Tæt Utæt 1x12,5 <sup>5</sup> Utæt 10x12,5 <sup>5</sup>	х	Х	х	х	Х	Х	Х	х	Х	Х	х	х	Х	х	X	X	X	x

1: 13 mm porøs træfiberplade

2: Underlag for tagpaptag

3: 4 mm vand  $(4 l/m^2)$  i yderste 90 mm isolering

4: Antal % af den samlet nedbør der falder taget som vil trænge igennem undertagsmembranen

5: Størrelsen på revnen i dampspærren angivet i mm/m²

### 4.2 Tagrum

#### 4.2.1 Referencekonstruktion og beregningsmodel

Reference konstruktion for tag med ventileret tagrum, hvor tværsnit ses i Figur 11, er opbygget som et traditionelt koldt tag med tæt dampspærre og ventileret undertag efter anvisninger, der er detaljeret beskrevet i afsnit 3.2.1. Loftkonstruktionen har 450 mm isolering, med dampspærren liggende helt på indvendig side, og beklædt med 2 lag gipsplader. Tagdækningen er teglsten, og der er fast undertag af krydsfiner med diffusionstæt membran.

Figur 11 viser ligeledes bygningsmodellen rummeligt afbildet fra programmet BSim (Wittchen, Johnsen, Grau, & Rose, 2013) med materialebeskrivelse af tagkonstruktionen. Tagrummets areal er 80 m<sup>2</sup> og har et volumen på 206 m<sup>3</sup>. Taghældning er 45°, og tagfladerne er orienteret mod nord og syd, dvs. gavle er øst-/vestvendt. Underliggende beboelse/bolig er 3 m høj.



Figur 11: Tag med ventileret tagrum - reference (T.Ref.), tværsnit i traditionel ventileret tagkonstruktion. Bygningsmodel rumlig afbildning fra programmet BSim, og med tilhørende materialelag.

Tagrummets omkringliggende konstruktioner består af en loftkonstruktion, to tagflader med tagfod og kip, samt to gavlflader. Konstruktionerne er opbygget med homogene materialelag, som følge af programmets begrænsning. Spær og lægter i isoleringslag er dermed udeladt, ligesom spær, afstandslister og lægter ikke indgår i luftlag. Konstruktionernes materialelag er med deres egenskaber oplistet i Tabel 4. Det er forudsat, at tagkonstruktionen er tæt, dvs. ingen nedbør trænger igennem undertaget og fugttransport gennem dampspærren sker kun ved diffusion.
Det var tilsigtet at opbygge tag- og loftkonstruktionen for tagrummet, så ens som muligt med paralleltaget, som beskrevet i afsnit 4.1.1. Men da det ikke var muligt, at gennemføre simuleringen med tilbageliggende dampspærre i loftkonstruktion (som paralleltaget) for beregningsmodellen med "naturlig ventilation" der indgår i parameterstudiet i afsnit 4.2.3 og beskrevet i afsnit 9.3.1, er det valgt, at sammensætte referencekonstruktionen som beskrevet ovenfor i Figur 11. Selv om isoleringstykkelsen er mindre end i paralleltaget, er isolansen den samme, da isoleringen i beregningsmodellen for tagrummet har lavere varmeledningsevne.

For at aktivere luftstrømmen i ventilationsspalten er den udvendige konstruktionsoverflade tilføjet vindtrykkoefficienter for vindretningerne nord, øst, syd og vest (Grau & Rode, 2005). Ud fra bygningsformen er vindtrykkoefficienterne bestemt til -0,3 for N, Ø, S, V iht. Tabel A.3 i By og Byg Anvisning 202 (Andersen, Heiselberg, & Aggerholm, 2002).

Materiale	BSim	Densitet	Diffusions-	Varme-	Varme-	Damppermeabilitet			
	materiale	$[kg/m^3]$	modstand	kapacitet	ledningsevne	[kg/m s Pa]			
			[m² s Pa/kg]	[J/kg K]	[W/m K]				
Tag:									
Tagsten	g6 - Roof tiles	1609	-	800	0,68 (mo-	1,72E-011 ved 1 % RF			
					isture)	1,73E-011 ved 29 % RF			
						1,82E-011 ved 56 % RF			
						1,92E-011 ved 70 % RF			
						2,04E-011 ved 79 % RF			
						3,01E-011 ved 91 % RF			
Luftspalte	v00 - Ventilated air	500	-	1000	0,1	1,35E-010 ved 50 % RF			
	gap								
Tagpap undertag	No type	-	5E+011	-	-	-			
Krydsfiner	i11 - Plywood 22	411	-	1800	0,11	3.20E-012 ved 72 % RF			
fast undertag	mm WBP P-30				,	,			
Loft:									
Isolering	m10 - Stone wool 36	45	-	800	0,036	1,57E-010 ved 26 % RF			
0					,	1,70E-010 ved 72,5%RF			
Dampspærre	No type	-	5E+011	-	-	-			
Gipsplade	f71 - plaster	1240	-	1000	0.45 (mo-	3.15E-011 ved 50 % RF			
	I				isture)	-,			
Gavl:									
Teglsten	g4 - Brick 1850	1800	-	800	0,8 (moistu-	se tagsten g6 - Roof tiles			
0	0				re)	0 0			

Tabel 4: Anvendte materialeparametre for tag med ventileret tagrum og deres egenskaber for beregningsmodel i BSim.

Indledende forudsætninger og randbetingelser for beregningsmodellen i BSim er beskrevet i det efterfølgende.

Luftskiftet i tagrummet er skabt med BSim systemet *Infiltration*, hvor lufttilførslen kommer ukontrolleret udefra. Luftskiftet er fast (temperatur- og vindfaktor er ikke aktiv) med tidsangivelsen altid og fuld døgnbelastning. Luftskiftet er sat til 3 h<sup>-1</sup>, baseret på en canadisk feltundersøgelse (Walker & Forest, 1995).

Indeklimaets fugtbelastning er valgt til fugtbelastningsklasse 2 i henhold til DS/EN ISO 13788 (Dansk Standard, 2013) og SBianvisning 224 (Brandt E. , 2013), hvor fugttilskuddet til indeluften er 4 g/m<sup>3</sup> ved udeluftens temperatur under 0 °C, se Figur 3. Temperaturen indendørs er 20 °C. Beboelsen/ boligen er i BSim moduleret som et rum uden termisk zone, hvor temperaturprofilet svarer til en cosinus-formet svingning hen over året, Figur 12, og er defineret ved max. temp. 20 °C og max. fugt 0,01 den 15.9 (sep.), samt min. temp. 20 °C og min. fugt 0,006, endvidere en døgnvariation på 5 °C og fugt på 0,0005, som er max. kl. 12.



Figur 12: Fugtbelastning i indeluften er angivet som månedsmiddelværdier (x-akse) for % RF (y-akse), fra BSim beregningsmodel. Måned 1 er gennemsnit fra januar osv.

Som udeklima er valgt den fælles nationale BSim klimafil "Danmark\_2013.DRY". Den er baseret på det danske design referenceår (DRY) på baggrund af målinger i periode 2001-2010, med en kombination af data fra stationerne Sjælsmark, DMI og Holbæk (Wang, Scharling, Wittchen, & Kern-Hansen, 2013). Af øvrige randbetingelser er terræntype valgt til landskab med spredt bevoksning, samt BSim standardværdier for: Horisont=7°,  $CO_2$ =350 ppm, jordfladens refleksion af solstråling=0,2, jordoverfladens refleksion af dagslys=0,1, jordoverfladens emmisivitet=0,9.

Den kombinerede (stråling og konvektion) overgangsmodstand for konstruktionsoverflader er anvendt som BSim standardværdier. Tagflader og gavle; udvendig: 0,04 m<sup>2</sup>K/W (langbølget stråling 1,60x10<sup>7</sup>). Mod tagrum: 0,13 m<sup>2</sup>K/W (langbølget stråling 5,10x10<sup>7</sup>). Loft; mod tagrum: 0,17 m<sup>2</sup>K/W (langbølget stråling 5,10 x10<sup>7</sup>). Mod bolig: 0,1 m<sup>2</sup>K/W (langbølget stråling 5,10 x10<sup>7</sup>).

Beregningsperioden er valgt til 3 år. Af Simuleringsmuligheder er tilvalgt: Optimized Simulation, XSun Distribution, Moisture Transport, Longwave Rad. to Sky, Longwave Radiation, Latent Heat, Reg. System Time Step. Tidsskridt (Time steps) er sat til 256 /h - det højst mulige. Layer thick er 0,05 m - BSim standardværdi. Solar Rad. Model er sat til "Petersen". Konstruktionernes starttilstand er sat til: first layer = 25 %, Faktor 1,5, Temp. 20 °C, RF 80 %.

# 4.2.2 Fugtkritiske positioner

Den eller de mest fugtkritiske positioner i tag med ventileret tagrum er fastsat på samme grundlag, som beskrevet for paralleltaget i afsnit 4.1.2. Der er valgt fem positioner i tagkonstruktionen (sammenlignelige med paralleltaget), som er beskrevet nedenfor med Pos A-E, og vist i Figur 13.



- Pos A. Ved underside af krydsfiner (yderside af spær/-påforing)
- Pos B. Yderst i isoleringen (spær /-påforing)
- Pos C. Midt i isoleringen (midt på spær)
- Pos D. Inderst i isoleringen (inderside af spær) ved udvendig side af dampspærre

Pos E. Ved indvendig side af dampspærre (yderside af gipsplade)

Figur 13: tag med ventileret tagrum - reference (T.Ref.) med angivelse af positionerne A-E, som studeres for at bestemme hvilken eller hvilke positioner i tagkonstruktionen, der er mest fugtkritisk.

# 4.2.3 Parameterstudie

For at undersøge, hvilken indvirkning forskellige faktorer i tagkonstruktionen og dennes randbetingelser har på fugtforholdene i konstruktionen, er et parameterstudie udført bestående af et antal beregninger med forskellige ændringer af konstruktionsopbygning / materialer og andre forhold i konstruktionen, samt randbetingelser ved inde- og udeklima. I Tabel 5 er oplistet alle gennemførte beregninger for tag med ventileret tagrum. Hver beregning har et modelnummer med angivelse af de parametervariationer, der gør sig gældende for den enkelte beregning. Referencekonstruktionen er benævnt T.Ref.

Tabel 5 er i afsnit 9.3 suppleret med en kort forklaring af parametrene og de anvendte variationer, opdelt som præsenteret i resultatafsnittet. Det skal bemærkes, at variationerne af luftskiftet er en gennemgående parameter og er vist sammen med hver af de øvrige parametre. Hvis intet andet er nævnt under de enkelte parametre, gælder forudsætningerne som beskrevet for referencekonstruktionen.

Para-		Luftskifte					Isoleringstykkelse		Skygge		Undertag		Dampspærre			
mete	21															
Modelnr.	Variation	3 h <sup>-1</sup>	$0,1 \ h^{-1}$	$0.5 \ h^{-1}$	Natvent <sup>1</sup>	10 h <sup>-1</sup>	450 mm	180 mm	610 mm	Uden	Med	Uisoleret	Isoleret	Tæt	Utæt 1x12,5 <sup>2</sup>	Utæt 10x12,5 <sup>2</sup>
T.Re	ef.	х					х			х		х		X		
T01			х				х			x		х		X		
T02				х			х			x		х		х		
T03					х		х			x		х		х		
T04						х	х			x		х		х		
T05		х						х		х		х		X		
T06			х					х		x		х		х		
T07				х				х		х		х		X		
T08					х			х		х		х		х		
T09						х		х		х		х		х		
T10		х							Х	х		х		х		
T11			х						х	x		х		Х		
T12				х					х	х		х		х		
T13					х				х	x		х		Х		
T14						х			х	х		х		х		
T15		х					х				x	х		x		
T16			х				х				х	х		х		
T17				х			х				х	х		х		
T18					х		х				х	х		х		
T19						х	х				X	х		x		
T20		х					х			x			х	X		
T21			х				х			x			х	x		
T22				х			х			x			х	х		
T23					х		х			x			х	х		
T24						х	x			x			х	x		
T25		х					х			x		х			х	
T26			х				х			х		Х			Х	
T27				х			х			х		Х			Х	
T28					Х		х			х		Х			Х	
T29						х	х			х		Х			Х	
T30		Х					х			х		Х				Х
T31			х				х			x		Х				Х
T32				х			х			х		Х				Х
T33					Х		Х			Х		х				Х
T34						Х	Х			X		Х				х
T35		Х					Х			Х		Х		Х		
T36			Х				Х			Х		х		Х		
T37				Х			Х			Х		Х		Х		
T38		1				х	х			х		х		х		

Tabel 5: Oversigt med gennemførte beregninger for tag med ventileret tagrum og med beskrivelse af parametervariationer. Reference konstruktionen er benævnt T.Ref. Afkrydsning i rubrik angiver hvilke forhold der gør sig gældende for den enkelte beregning - benævnt med et modelnr.

1: Varierende luftskifte i tagrum bestemt af naturlig ventilation

5: Størrelsen på revnen i dampspærren angivet i mm/m<sup>2</sup>

# 5 Resultater

Resultaterne er opdelt i to afsnit:

- Paralleltag
- Tag med ventileret tagrum

# 5.1 Paralleltag

#### 5.1.1 Reference, fugtkritisk positioner



Figur 14: Beregnet temperatur og relativ fugtighed i paralleltag ved underside af krydsfiner [Pos A], yderst i isoleringen [Pos B], midt i isoleringen [Pos C], ved udvendig side af dampspærre [Pos D], ved indvendig side af dampspærre [Pos E] sammenlignet med kritisk relativ fugtighed for skimmelvækst [RF <sub>kritisk</sub>] (Sedlbauer, 2001).

De beregnede fugtforhold i paralleltag med teglsten, ventileret undertag med luftskifte på 30 h<sup>-1</sup> og 500 mm isolering, som har orientering mod nord og taghældning på 45° - reference (P.Ref) som beskrevet under afsnit 4.1.1 - er vist i ovenstående Figur 1. Af de fem valgte positioner i tagkonstruktionen er det Pos A ved underside af krydsfiner og Pos B yderst i isoleringen, der er mest fugtkritiske positioner. Det er kun her den relative fugtighed overstiger den kritiske relative fugtighed for skimmelvækst RF<sub>\_kritisk</sub> (Sedlbauer, 2001). På baggrund heraf er det primært Pos A og til dels Pos B, der er anvendt til parameterstudiet, som fremgår af efterfølgende resultater. En undtagelse er undersøgelsen af forskellige indeklimaforhold, hvor det er Pos E, se afsnit 10.2. I parameterstudiet er det RF<sub>\_kritisk</sub> for referencekonstruktion der vises i diagrammet. Da RF<sub>\_kritisk</sub> varierer med temperaturen, kan de forskellige konstruktioner, der sammenlignes i parameterstu-

diet, have forskellig  $RF_{kritisk}$ . En lidt højere  $RF_{kritisk}$  opnået ved lavere temperatur er dog ubetydelig i sammenligning med den højere RF som følge af en temperatursænkning.



Figur 15: Beregnet temperatur og relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos A], for paralleltag orienteret mod nord og syd, og med hældning 0°, 25°, 45°. Kritisk relativ fugtighed [RF\_kritisk] afhængig af temperatur i nordvendt tag med 45° hældning (reference).

Sammenligning af paralleltag med forskellig hældning og orientering i Figur 15 viser, at det sydvendte (P02/P03) tag har betydelig lavere relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos A] end det nordvendte (P.Ref./P01). Den relative fugtighed i det nordvendte tag er i perioder i vinterhalvåret over den kritiske relative fugtighed for skimmelvækst RF<sub>\_kritisk</sub>, hvorimod det kun er meget få tilfælde for det sydvendte. En taghældning på 25° (P01/P03) eller 45° (P.Ref./P02) giver stort set samme fugtforhold ved underside af krydsfiner.

Det flade tags (P04) relative fugtighed følger overordnet set det nordvendte fra midt oktober til februar og det sydvendte i den resterende del af året, dog med større udsving til lavere % RF, når temperaturen stiger.



Figur 16: Beregnet temperatur og relativ fugtighed ved indvendig side af dampspærre [Pos E], for paralleltag ved indeklima som fugtbelastningsklasse 2, 3, 4, med hhv. 18 °C og 20 °C. Kritisk relativ fugtighed [RF\_kritisk] af-hængig af temperatur i tag med indeklima som fugtbelastningsklasse 2 og 20 °C (reference).

Beregningerne af fugtholdene i paralleltag ved Pos A, B, C og D viser ikke nogen væsentlig øget relativ fugtighed med de ændrede forhold fra indeklimaet, når tagkonstruktionen har helt tæt dampspærre, og resultaterne er derfor ikke vist. Ved indvendig side af dampspærre [Pos E] med indeklima som fugtbelastningsklasse 2 (P.Ref.) og 3 (P05), og temperatur på 20 °C vil beregnet relativ fugtighed ikke overstige RF\_kritisk på noget tidspunkt af året, som det fremgår af Figur 16. Ved fugtbelastningsklasse 4 (P06) overstiger RF derimod RF\_kritisk om vinteren fra først i november til midten af marts.

Sænkes indeluftens temperatur til 18 °C vil den relative fugtighed øges og ved indvendig side af dampspærre ligge periodevis over  $RF_{kritisk}$  fra midt august til midt september i fugtbelastningsklasse 2 (P07), og for fugtbelastningsklasse 3 (P08) fra juli til oktober. Der er her taget højde for at  $RF_{kritisk}$  for 18 °C ligger lidt højere (under 1 %, ikke vist) end for 20 °C.



Figur 17: Beregnet temperatur og relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos A], for paralleltag med luftskifte på hhv. 1, 4, 10, 30, 100 h<sup>-1</sup>. Kritisk relativ fugtighed [RF\_kritisk] afhængig af temperatur i tag med luftskifte 30 h<sup>-1</sup> (reference).

Sammenligningen af paralleltag med forskellige luftskifter i ventilationsspalten over isolering i Figur 17, viser, at nedsættes luftskiftet fra 30 h<sup>-1</sup> (P.Ref.) til 10 h<sup>-1</sup> (P11) falder den relative fugtighed beskedent ved underside af krydsfiner [Pos A] i vinteråret, og der ses yderligere et mindre fald med luftskifte på 4 h<sup>-1</sup> (P10). Reduceres luftskiftet yderligere til 1 h<sup>-1</sup> (P09), vil den relative fugtighed derimod stige i sommerhalvåret og være over  $RF_{kritisk}$  i perioder fra midt marts til midt i maj. Et øget luftskifte på 100 h<sup>-1</sup> (P12) medfører generelt en lille stigning af relativ fugtighed. For luftskifte på 30 h<sup>-1</sup> og 100 h<sup>-1</sup> vil den relative fugtighed i perioder om efteråret ligge over  $RF_{kritisk}$ .

Ændring af luftskiftets størrelse har ikke den store indflydelse på temperaturen ved underside af krydsfineren, på nær luftskiftet på 100 h<sup>-1</sup>, hvor temperaturen i sommerhalvåret er lidt lavere. Det ændre dog ikke overordnet på forholdet til  $RF_{kritisk}$  der er tæt ens for de forskellige variationer af luftskiftet (ikke vist).



Figur 18: Beregnet temperatur og relativ fugtighed yderst i isoleringen [Pos B], for paralleltag med ventileret undertag, og uventileret undertag med Z-værdi=0,5 og 0,5-træfiberpl og 3 GPa s  $m^2/kg$ . Kritisk relativ fugtighed [RF <sub>kritisk</sub>] afhængig af temperatur i tag med ventileret undertag (reference).

Resultatet i Figur 18 viser, at paralleltag med ventileret undertag (P.Ref.) i vinterhalvåret har lavere relativ fugtighed yderst i isoleringen [Pos B] i forhold til uventileret undertag med forskellige grader af diffusionsmodstand. Ses der alene på de uventilerede undertage er det de mest diffusionsåbne undertage med Z-værdi=0,5 som banevare (P14) og 13 mm porøs træfiberplade (P15), der har den laveste relative fugtighed det meste af den kritiske periode fra november til ind i april, hvor den porøse træfiberplade har lavest RF i de koldeste måneder. Men i september har de begge højere relativ fugtighed end banevaren med Z-værdi=3 (P13). For paralleltag både med ventileret og uventileret undertag er september og oktober den mest kritiske periode, hvor den relative fugtighed ligger over RF\_kritisk, men der er også kortere perioder om vinteren primært for det uventilerede undertag.

Temperaturen yderst i isoleringen variere lidt for paralleltag med ventileret og uventileret undertag, dog uden nævneværdig ændring af  $RF_{_{kritisk}}$  for de uventilerede undertage (ikke vist).



Figur 19: Beregnet temperatur og relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos A], for paralleltag med rød og lys teglsten, samt lys og mørk tagpap. Kritisk relativ fugtighed [RF\_kritisk] afhængig af temperatur i tag med rød teglsten (reference).

Sammenligning af paralleltag med forskellig tagdækningsmateriale i Figur 19 viser, at anvendelse af lyse teglsten P16) giver en højere relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos A] end anvendelse af røde teglsten (P.Ref.). Et mørkt tagpaptag (P17) har højere relativ fugtighed ved underside af krydsfiner om vinteren og lavere i sommerhalvåret. Et lyst tagpaptag (P18) har markant højere relativ fugtighed ved underside af krydsfiner, som er noget højere end RF\_kritisk det meste af vinterhalvåret.

 $RF_{kritisk}$  for lyse teglsten, samt lys og mørk tagpap (ikke vist) er ikke helt ens med  $RF_{kritisk}$  for røde teglsten. Det ændrer dog ikke overordnet på resultatet set i forhold til  $RF_{kritisk}$ , da temperaturforskellene er mest udtalte i sommerhalvåret, hvor RF er under RF <sub>kritisk</sub>.



Figur 20: Beregnet temperatur og relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos A], for paralleltag med hhv. 200, 320, 500, 680 mm isolering. Kritisk relativ fugtighed [RF\_kritisk] afhængig af temperatur i tag med 500 mm isolering (reference).

En øget isoleringstykkelse giver højere relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos A], som det fremgår af Figur 20. Stigningen i relativ fugtighed er dog forholdsvis beskeden; størst fra 200 mm (P19) til 320 mm isolering (P20) og næsten ikke eksisterende fra 500 mm (P.Ref.) til 680 mm isolering (P21). Selvom den relative fugtighed er lavest for paralleltaget med 200 mm isolering, ændrer det ikke ved at den, ligesom de øvrige konstruktioner med større isoleringstykkelse, er højere end RF\_kritisk i perioder om efteråret.

Temperaturen ved underside af krydsfiner er højst i paralleltaget med 200 isolering, og falder beskednet i takt med isoleringstykkelsen øges. Dermed er  $RF_{kritisk}$  for de forskellige beregnede isoleringstykkelser stort set ens (ikke vist).



Figur 21: Beregnet temperatur og relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos A], for paralleltag med hhv. uisoleret og isoleret undertag samt tagsten og tagpap. Kritisk relativ fugtighed [RF\_kritisk] afhængig af temperatur i tag med tagsten og uisoleret undertag (reference).

Resultatet i Figur 21 viser, at 50 mm isoleret undertag (P22) reducerer den relative fugtighed om vinteren ved underside af krydsfineren [Pos A] sammenlignet med et uisoleret undertag (P.Ref.). Det samme forhold gør sig gældende ved sammenligning af et uisoleret tagpapunderlag (P23) med et 50 mm isoleret tagpapunderlag (P24). Isolering af undertag / tagpapunderlag forhindrer dog ikke at den relative fugtighed ved underside af krydsfineren er højere end RF\_kritisk i korte perioder om efteråret.

 $RF_{kritisk}$  for isoleret undertag og u-/isoleret tagpapunderlag (ikke vist) er ikke helt ens med  $RF_{kritisk}$  for uisoleret undertag. Det ændrer dog ikke overordnet på resultatet set i forhold til  $RF_{kritisk}$ , da temperaturforskellene er mest udtalte i sommerhalvåret, hvor RF er under  $RF_{kritisk}$ .



Figur 22: Beregnet temperatur og relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos A], for paralleltag med indbygget fugt på hhv. 75, 80, 90 % i hele konstruktionen, samt krydsfiner med 25 % træfugt (og 80 % i øvrig konstruktion, og 4 mm vand yderst i isoleringen (og 80 % i øvrig konstruktion). Kritisk relativ fugtighed [RF <sub>kritisk</sub>] afhængig af temperatur i tag med indbygget fugt 80 % (reference).

Resultatet af forskellige variationer af indbygget fugt fremgår af Figur 22. Det ses, at paralleltag med start-fugtindhold på 80 % RF i hele konstruktionen (P.Ref.) udlignes med start-fugtindhold på 75 % RF (P25) hen over vinteren. Paralleltag med et start-fugtindhold på enten 90 % RF i hele konstruktionen (P26) eller 25 % træfugt i krydsfineren (og 80 % RF i den øvrige konstruktion) (P27) har sammenligneligt forløb af relativ fugtighed ved underside af krydsfineren, hvor fugt-indholdet er højere vinteren igennem. Efter et år er der dog stadig et lidt højere fugtindhold ved underside af krydsfiner i taget med start-fugtindhold på 25 % træfugt. Indbygges opfugtet isole-ringen svarende til 4 mm (4 1/m<sup>2</sup>) vand i yderste isoleringslag (P28), vil den relative fugtighed ved underside af krydsfineren helt hen i april stadig være betydelig høj og noget højere end RF<sub>\_kritisk</sub>. I starten af andet år er fugtforholdene i ligevægt med omgivelserne, og er derfor ikke vist her.



Figur 23: Beregnet temperatur og relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos A], for paralleltag med hhv. ingen | 0,1 | 0,2 | 1 % utæthed i undertag. Kritisk relativ fugtighed [RF\_kritisk] afhængig af temperatur i tag med ingen utæthed (reference).

Resultatet af utæt undertags indvirkning på fugtholdene ift. tæt undertag (P.Ref.) i paralleltag ved underside af krydsfiner [Pos A] fremgår af Figur 23. Det kan aflæses, at selv en mindre utæthed i undertaget svarende til 0,1 % (ca. 0,8 mm/år) af regnen (P29), der trænger gennem membranen, og mere udtalt for 0,2 % (ca. 1,6 mm/år) af regnen (P30), vil øge den relative fugtighed, så den overstiger RF\_kritisk i længere perioder i vinterhalvåret. En større utæthed i undertaget svarende til 1 % (ca. 8 mm/år) af regnen (P31) vil øge den relative fugtighed markant, så RF\_kritisk overstiges det meste af året.

Det ses endvidere, at der er sammenhæng mellem regn og stigende relativ fugtighed i taget.



Figur 24: Beregnet temperatur og relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos A], for paralleltag med hhv. ingen /  $1mm \times 1m$  /  $10 \times 1m$  utæthed i dampspærre. Kritisk relativ fugtighed [RF\_kritisk] afhængig af temperatur i tag med ingen utæthed (reference).

En mindre utæthed i dampspærren svarende til en revne på 1x12,5mm/m<sup>2</sup> i tagfladen (P32) vil fører til en noget højere relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos A] i vinterhalvåret end i paralleltag med tæt dampspærre (P.Ref.), men i sommerhalvåret udlignes denne forskel, som det fremgår af resultatet i Figur 24. Derimod vil en større utæthed i dampspærren svarende til en revne på 10x12,5mm/m<sup>2</sup> i tagfladen (P33) medføre betydelig højere relativ fugtighed, som ikke falder tilstrækkeligt til at komme under RF <sub>kritisk</sub> i perioder i sommerhalvåret.

Temperaturen ved underside af krydsfiner er næsten identisk for alle tre beregninger, og dermed vil konstruktionerne med utæt dampspærre have samme  $RF_{kritisk}$  som tag med tæt dampspærre.



Figur 25: Beregnet temperatur og relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos A], for paralleltag med  $1mm \times 1m$  utæthed i dampspærre og luftskifte på hhv. 4, 10, 30, 100 b<sup>-1</sup>. Kritisk relativ fugtighed [RF\_kritisk] afhængig af temperatur i tag med luftskifte 30 b<sup>-1</sup>.

Resultatet af en sammenligning af paralleltag med forskellige luftskifter og utæt dampspærre fremgår af Figur 25 og Figur 26. Reduceres luftskiftet fra 30 h<sup>-1</sup> (P32) i ventilationsspalten over isoleringen i paralleltag med utæt dampspærre svarende til en revne på 1x12,5mm/m<sup>2</sup> i tagfladen, vil den relative fugtighed ved underside af krydsfineren [Pos A] stige betydeligt hen over vinteren og det tidlige forår med et luftskifte på 10 h<sup>-1</sup> (P35), som det fremgår af Figur 25. Et lavt luftskifte på 4 h<sup>-1</sup> (P34) medfører gennemgående en højere relativ fugtighed end RF<sub>\_kritisk</sub> helt frem til starten juni. Et øget luftskifte på 100 h<sup>-1</sup> (P36) medfører generelt en lille reduktion af den relative fugtighed, på nær august - oktober, hvor den er lidt højere end RF <sub>kritisk</sub> i september.

Ændring af luftskiftets størrelse har ikke den store indflydelse på temperaturen ved underside af krydsfineren, på nær luftskiftet på 100 h<sup>-1</sup>, hvor temperaturen i sommerhalvåret er lidt lavere.

Tagkonstruktionen med luftskifte på 1 h<sup>-1</sup> indgår ikke i dette tilfælde pga. resultatet af beregningen i Figur 17, hvor RF>RF <sub>kritisk</sub> i foråret.



Figur 26: Beregnet temperatur og relativ fugtighed yderst i isoleringen [Pos B], for paralleltag med 1mm×1m utæthed i dampspærre og luftskifte på hbv. 10, 30, 100  $h^{-1}$ . Kritisk relativ fugtighed [RF\_kritisk] afhængig af temperatur i tag med luftskifte 30  $h^{-1}$ .

Beregning af relativ fugtighed yderst i isoleringen [Pos B], Figur 26 giver et resultat, der er forholdsvis sammenligneligt med forholdet ved underside af krydsfiner i Figur 25. Et lavere luftskifte på 10 h<sup>-1</sup> (P35) i ventilationsspalten over isoleringen i paralleltag med utæt dampspærre medfører en noget højere relativ fugtighed hen over vinteren og det tidlige forår, som i perioder ligger over  $\text{RF}_{kritisk}$  i forhold til et luftskifte på 30 h<sup>-1</sup> (P32). Et øget luftskifte på 100 h<sup>-1</sup> (P36) medfører en lille reduktion af den relative fugtighed om vinteren, men om sommeren og det tidlige efterår vil den relative fugtighed i perioder være over RF <sub>kritisk</sub>.

Ændring af luftskiftets størrelse har ikke den store indflydelse på temperaturen ved underside af krydsfineren, på nær luftskiftet på 100 h<sup>-1</sup>, hvor temperaturen i sommerhalvåret er lidt lavere. Det ændre dog ikke overordnet på forholdet til  $RF_{kritisk}$  der er tæt ens for de forskellige variationer af luftskiftet (ikke vist).

Ventileret undertag med luftskifte på 4 h<sup>-1</sup> (P34) indgår ikke i dette tilfælde pga. resultatet af beregningen i Figur 25, hvor  $RF>RF_{kritisk}$  i foråret.

# 5.2 Tag med ventileret tagrum



5.2.1 Reference, fugtkritisk årstid og position i tagkonstruktionen

Figur 27: Beregnet temperatur og relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos A], vist som ugemiddelværdi hvor de mest fugtkritiske uger er angivet med ugenummer, i tag med ventileret tagrum, og sammenlignet med kritisk relativ fugtighed for skimmelvækst [RF <sub>kritisk</sub>] (Sedlbauer, 2001).

De beregnede fugtforhold i tag med ventileret tagrum ved underside af krydsfiner [Pos A] er vist i ovenstående Figur 27 som ugemiddelværdier, for tagkonstruktion med teglsten, fast undertag, 450 mm isolering, med orientering mod nord og taghældning på 45°, samt luftskifte på 3 h<sup>-1</sup> - reference (T.Ref.) som er beskrevet under afsnit 4.2.1. Det ses, at den mest fugtkritiske periode på året er efteråret, hvor ugemiddelværdi for relativ fugtighed i uge 40-44 (~oktober) ligger over den kritiske relative fugtighed for skimmelvækst RF\_kritisk (Sedlbauer, 2001), samt ugerne 36-39 (~sidste ½ september) og 45-46 (~første ½ november) ligger lidt under.

På baggrund af ovenstående resultat, samt resultaterne i parameterstudiet for paralleltaget i afsnit 5.1 er det perioderne 15. marts - 15. april og 15. september - 15. november, der er anvendt i parameterstudiet for tag med ventileret tagrum.

Nedenstående Figur 28 viser beregnet fugtforhold i tagkonstruktionen ved underside af krydsfiner [Pos A], yderst i isoleringen [Pos B], midt i isoleringen [Pos C], ved udvendig side af dampspærre [Pos D], og ved indvendig side af dampspærre [Pos E] for perioderne 15. mar.- 15. apr. og 15. sep. - 15. nov. Af de fem valgte positioner i tagkonstruktionen er det Pos A ved underside af krydsfiner og Pos B yderst i isoleringen der er mest fugtkritiske positioner. Det er kun her den relative fugtighed overstiger den kritiske relative fugtighed for skimmelvækst RF <sub>kritisk</sub>.



Figur 28: Beregnet temperatur og relativ fugtighed fra 15. mar. - 15. apr. og 15. sep. - 15. nov. i tag med ventileret tagrum ved underside af krydsfiner [Pos A], yderst i isoleringen [Pos B], midt i isoleringen [Pos C], ved udvendig side af dampspærre [Pos D], ved indvendig side af dampspærre [Pos E] og sammenlignet med kritisk relativ fugtighed for skimmelvækst [RF <sub>kritisk</sub>] (Sedlbauer, 2001).

På grundlag af dette resultat er det valgt at Pos A ved underside af krydsfiner anvendes i parameterstudiet for tag med ventileret tagrum, som fremgår af efterfølgende resultater.

Månedsmiddelværdier for temperatur og relativ fugtighed fra beregningerne af tagrum i Pos A fremgår af afsnit 9.1.

# 5.2.2 Luftskifte, ventileret tagrum og isoleringstykkelse

Sammenligningen af det ventilerede tagrum med forskellige luftskifter i perioderne 15. mar. - 15. apr. og 15. sep. - 15. nov., Figur 29, viser, at nedsættes luftskiftet fra 3 h<sup>-1</sup> (T.Ref.), hvor RF>RF\_kritisk i nogen grad, til 0,5 h<sup>-1</sup> (T02) falder den relative fugtighed til i mindre grad RF>RF\_kritisk ved underside af krydsfiner [Pos A], og der ses yderligere et fald med luftskifte på 0,1 h<sup>-1</sup> (T01), hvor RF>RF\_kritisk ikke sker. Beregningen med simulering af 'naturlig ventileret' tagrum (T03), hvor luftskiftet varierer fra 0-19 h<sup>-1</sup> med årsgennemsnit på 4,3 h<sup>-1</sup>, viser et mindre fald i relativ fugtighed i forhold til luftskiftet på 3 h<sup>-1</sup>, mens et øget luftskifte på 10 h<sup>-1</sup> (T04) medfører en stigning af relativ fugtighed, så middelværdien ligger over RF\_kritisk. På denne baggrund er det valgt, at tilfældet med luftskifte på 10 h<sup>-1</sup> i tagrummet ikke præsenteres i resultatafsnittet, men månedsmiddelværdierne for temperatur og relativ fugtighed for et helt år fremgår af afsnit 9.1.

I den tilsvarende periode giver en reduceret isoleringstykkelse fra de 450 mm (T.Ref.) til 180 mm (T05) så lille et fald i relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos A], at det faktisk ikke kan registres af resultatet i Figur 29. Studeres tallene nærmere kan det konstateres, at den relative fugtighed falder med ca. 0,5 %, mens middeltemperaturen stiger ca. 0,1 °C ved luftskiftet på 3 h<sup>-1</sup>. Marginalt større fald i relativ fugtighed ses ved luftskifter på 0,1 h<sup>-1</sup> (T06), 0,5 h<sup>-1</sup> (T07) og 10 h<sup>-1</sup> (T09). Beregning af det 'naturlig ventileret' tagrum (T08) giver dog en marginal stigning. Med 610 mm isolering i konstruktionen er temperatur og relativ fugtighed reelt den samme som tilfældet med 450 mm isolering for alle varianter af luftskiftet.







Figur 29: Beregnet temperatur og relativ fugtighed fra 15. mar. - 15. apr. og 15. sep. - 15. nov. ved underside af krydsfiner [Pos A], for tag med ventileret tagrum og luftskifte 0,1  $h^1/0,5 h^1/3 h^1/Natvent$  (årsgennemsnit 4,3 $h^1$ )/10  $h^1$  og hhv. isoleret mod 180 mm, 450 mm og 610 mm isolering. Sammenlignet med kritisk relativ fugtighed for skimmelvækst [RF <sub>kritisk</sub>].

# 5.2.3 Luftskifte og skyggeforhold

Resultatet for periode 15. mar. - 15. apr. og 15. sep. til 15. nov. i Figur 30, viser en tydeligt højere relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos A] i det ventilerede tagrum, når tagfladen ligger i skygge midt på dagen i forhold til en solpåvirket tagflade (T.Ref./T01/T02/T03). For tagrummet med luftskifte på 3 h<sup>-1</sup> (T15) er stigningen ca. 5,5 % RF, samtidig falder middeltemperaturen ca. 1,4 °C. Størst stigning i relativ fugtighed ses ved de lave luftskifter på 0,1 h<sup>-1</sup> (T16) og 0,5 h<sup>-1</sup> (T17). Mens stigningen i det 'naturligt ventilerede' tagrum (T18) er ca. halvt så stor som konstruktionen med luftskifte på 3 h<sup>-1</sup>. Ved alle luftskifter går den relative fugtighed fra ingen eller mindre overskridelse af RF<sub>\_kritisk</sub> ved solpåvirkning til nogen eller større overskridelse når taget ligger i skygge.





Figur 30: Beregnet temperatur og relativ fugtighed fra 15. mar. - 15. apr. og 15. sep. - 15. nov. ved underside af krydsfiner [Pos A], for tag med ventileret tagrum og luftskifte 0,1  $b^{-1}/0,5 b^{-1}/3 b^{-1}/natvent$  (årsgennemsnit 4,3  $b^{-1}$ ) og tagflade hhv. med og uden skygge. Sammenlignet med kritisk relativ fugtighed for skimmelvækst [RF\_kritisk].

# 5.2.4 Luftskifte og isoleret undertag

Fugtforholdene ved underside af krydsfiner [Pos A] i det ventilerede tagrum er tæt på ens ved sammenligning af tagkonstruktion med uisolerede (T.Ref./T01/T02/T03) og isoleret undertag for perioderne 15. mar. - 15. apr. og 15. sep. - 15. nov., som det fremgår af Figur 31. Studeres værdierne for temperatur og relativ fugtighed nærmere registreres det, at tagrum med luftskifte på 3 h<sup>-1</sup> (T20) giver et fald på ca. 0,6 % RF, samtidig med at middeltemperaturen stiger ca. 0,1 °C, når undertaget har 50 mm isolering på udvendig side. Et lidt større fald i relativ fugtighed ses ved de lave luftskifter på 0,1 h<sup>-1</sup> (T21) og 0,5 h<sup>-1</sup> (T22). I det 'naturlig ventilerede' tagrum (T23) kan dog registreres en lille stigning.





Figur 31: Beregnet temperatur og relativ fugtighed fra 15. mar. - 15. apr. og 15. sep. - 15. nov. ved underside af krydsfiner [Pos A], for tag med ventileret tagrum og luftskifte 0,1  $b^{-1}/0,5 b^{-1}/3 b^{-1}/natvent$  (årsgennemsnit 4,3  $b^{-1}$ ) og bhv. uisoleret og isoleret undertag. Sammenlignet med kritisk relativ fugtighed for skimmelvækst [RF\_kritisk].

## 5.2.5 Luftskifte og Dampspærrens tæthed

I forhold til tagkonstruktion med tæt dampspærre (T.Ref./T01/T02/T03) vil en mindre utæt dampspærre svarende til konvektion gennem en revne på 1 mm x 1 m i loftet (80 m<sup>2</sup>) føre til en lidt højere relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos A] for perioden fra 15. mar. - 15. apr. og 15. sep. - 15. nov., når luftskiftet i tagrummet er 3 h<sup>-1</sup> (T25) eller 'naturlig ventileret' (4,3 h<sup>-1</sup>) (T28), som det fremgår af Figur 32. Den relative fugtighed vil være noget større med luftskifte på 0,5 h<sup>-1</sup> (T27). Med et beskedent luftskifte på 0,1 h<sup>-1</sup> (T26) vil den relative fugtighed være markant større og gennemgående ligge over det kritiske niveau for skimmelvækst RF kritisk.

En mere utæt dampspærre svarende til konvektion gennem en revne på 10 mm x 1 m i loftet (80 m<sup>2</sup>) giver betydelig højere relativ fugtighed ved underside af krydsfiner, som for alle luftskifter (T30-T33) overvejende ligger over det kritiske niveau for skimmelvækst RF<sub>\_kritisk</sub>, mest udtalt for luftskiftet på 0,5 h<sup>-1</sup> (T32). Beregning for ventileret tagrum med luftskifte på 0,1 h<sup>-1</sup> (T31) er ikke udført, da RF overvejende > RF<sub>kritisk</sub> i tilfældet med en mindre utæt dampspærre (T26).





Figur 32: Beregnet temperatur og relativ fugtighed fra 15. mar. - 15. apr. og 15. sep. - 15. nov. ved underside af krydsfiner [Pos A], for tag med ventileret tagrum og luftskifte 0,1  $b^{1}/0,5$   $b^{1}/3$   $b^{5}/Natvent$  (årsgennemsnit 4,3  $b^{-1}$ ) og bhv. tæt og utæt dampspærre. Sammenlignet med kritisk relativ fugtighed for skimmelvækst /RF <sub>kritisk</sub>].

# 6 Diskussion

# 6.1 Diskussion af resultater

Fugtberegningerne er simulering af virkeligheden, hvor det ikke er muligt at gengive de faktiske forhold fuldstændig, da tagkonstruktioner er påvirket af flere faktorer, der ikke kendes præcist fx omgivende klimaforhold (Brandt E. , 2013). Endvidere har anvendte programmer en række begrænsninger, se afsnit 3.4, som kan have medført unøjagtigheder i de beregnede værdier for temperatur og relativ fugtighed, som ligger til grund for den fugttekniske vurdering af tagkonstruktionerne.

Ved 1-dimensionelle beregninger ses der bort fra kuldebroer pga. spær mv. Indflydelsen af de flerdimensionelle faktorer ved spærene, især den udvendig side af konstruktionen, forårsager i virkeligheden højere temperatur og dermed lavere relativ fugtighed (Olsson, 2011), som omtalt afsnit 3.2.2. Dette forhold er visualiseret i Isopleth diagrammet, Figur 33, hvor overskridelsen af RF<sub>\_kritisk</sub> er lidt større ved udvendig side af isoleringen end på udvendig side af træstolpen. Det skal dog bemærkes, at tagkonstruktionerne i dette studie er opbygget med krydsende lægter på indvendig side af spærene, hvorved kuldebroen gennem spærene reduceres kraftigt, og det er derfor rimeligt at antage, at den relative fugtighed ved yderside af spærene er som yderst i isoleringen Pos B.



Figur 33: Forskel på målt temperatur og relativ fugtighed hhv. yderst i isolering og på udvendig side af massiv træstolpe (Olsson, 2011), og sammenlignet med RF <sub>kritisk</sub> i Isopleth diagrammet.

1D beregninger begrænser ligeledes muligheden for at overveje betydningen af startfugtindholdet i spær og lægter, og dermed hvordan det kunne have påvirket trækonstruktion, der ikke er en del af beregningsmodellen. I paralleltage vil en øget isoleringstykkelse medføre en større mængde træ, da spærene skal øges tilsvarende. Udtørringstørringstiden vil i princippet øges i takt med isoleringstykkelse, ligesom øget isoleringstykkelse giver større modstand mod udtørringen (Geving & Holme, 2010). Altså forhold, der kan have indflydelse på de beregnede værdier af fugtholdene i tagkonstruktionen.

Ventilationens størrelse i ventilationsspalter i paralleltag, og i tagrum er generelt udført med fast luftskifte. I virkeligheden er luftskiftet varierende, da det afhænger af vindtryk og temperaturforskelle samt udformning af ventilationsåbningerne (Walker & Forest, 1995) (Falk, 2014). Enkelte beregninger af tagrum er udført med varierende luftskifte, som beskrevet i afsnit 9.3.1. Beregnede værdier for relativ fugtighed og temperatur med varierende luftskifte giver dog ikke nødvendigvis bedre overensstemmelse sammenlignet med de faktiske forhold (Hägerstedt & Harderup, 2011). De anvendte størrelser på luftskiftet for paralleltag og tagrum er baseret på svensk studie (Mundt-Petersen & Harderup, 2015), hvor der generelt var godt overensstemmelse mellem beregnede og målte værdier for temperaturer og relativ fugtighed i ventilerede tage, som omtalt i afsnit 3.2.2.

Beregning af fugttransport ved konvektion er udført på en stationær måde, idet tagkonstruktionen er tilført en fast fugtbelastning i månederne november - marts, se afsnit 9.2.10 og afsnit 9.3.5. Fugttransport ved konvektion er forårsaget af forskelle i lufttryk, som fx skyldes vindtryk og temperaturforskelle (Brandt E. , 2013), som beskrevet i afsnit 3.1. Der vil således være perioder hvor fugttransporten ud i tagkonstruktionen er større end den beregnede faste fugtbelastning, ligesom der vil være perioder hvor fugttransporten er mindre. Det vurderes dog, at anvendte metode giver en rimelig indikationen af hvilken indvirkning forskellige grader af utæthed i dampspærren har for fugtforholdene i tagkonstruktionen.

Referencekonstruktionen for paralleltag i afsnit 4.1.1 og tagrum i afsnit 4.2.1 er begge udført med helt tæt dampspærre. Det kan diskuteres om det ikke er mere realistisk generelt at regne med en dampspærre med utætheder, der evt. modsvarer Bygningsreglements krav til lufthed (Trafik- og Byggestyrelsen, 2016).

Databehandling fra BSim for timeværdier på temperatur og relativ fugtighed har sat begrænsninger for fremstillingen af resultaterne af fugtforholdene i tagrummet, som beskrevet i afsnit 4. Det har derfor ikke været muligt at anvende Folos 2D visual mould diagram (Mundt-Petersen, Wallentén, Toratti, & Heikkinen, 2012), hvor tidsfaktoren indgår i vurderingen af risikoen for vækst af skimmelsvamp. Det betyder, at det ikke på sammen måde som paralleltaget har været muligt at analysere resultaterne og de underliggende faktorer. Endvidere er det kun resultater fra en begrænset periode, der er præsenteret i afsnit 5.2. Det er dog de mest fugtkritiske perioder på året iht. beregning af referencekonstruktion for tagrum i afsnit 5.2.1 og parameterstudiet for paralleltag i afsnit 5.1. Da nogle resultater i parameterstudiet for tagrummet er ret ens, har det været nødvendigt af kende det videre forløb at temperatur og relativ fugtighed uden for de mest fugtkritiske perioder. Derfor er månedsmiddelværdier for temperatur og relativ fugtighed ved underside af krydsfiner, Pos A, for alle beregninger i BSim vist i afsnit 9.1.

Det er ikke den fulde version af analyseværktøjet Folos 2D visual mould diagram (Mundt-Petersen, Wallentén, Toratti, & Heikkinen, 2012), der fremgår af resultaterne af parameterstudiet

i afsnit 5.1. Den præcise angivelse af hvornår RF>RF\_kritisk for de enkelte tagkonstruktioner indgår ikke. Det er kun RF\_kritisk for referencekonstruktionen der vises i diagrammet, og da RF\_kritisk afhænger temperaturen, kan der således være forskelle på linjen RF\_kritisk for de forskellige konstruktioner der sammenlignes, og dermed forskel på forholdet mellem RF for de enkelte konstruktioner og RF\_kritisk for referencekonstruktionen. En lidt højere RF\_kritisk opnået ved lavere temperaturer er dog ubetydelig i sammenligning med den højere RF som følge af en temperatursænkning.

# 6.2 Hvad fører resultaterne med sig

#### 6.2.1 Fugtkritiske positioner og årstid

Resultatet af beregningerne både for ventileret paralleltag (P.Ref.), Figur 14, og tagrum (T.Ref.), Figur 28, viser, at den mest fugtkritiske position under normale forhold er i de ydre dele af tagkonstruktionerne, der udsat udeklimaet, ved underside af krydsfiner Pos A og yderst i isoleringen Pos B. Det er kun her den relative fugtighed overskrider RF\_kritisk (Sedlbauer, 2001), der definerer grænsen for hvornår der er risiko for vækst af skimmelsvamp. Øvrige positioner i tagkonstruktionerne er således ikke fugtkritiske med normale forhold.

Den mest fugtkritiske periode på året er med almindelige forhold længere peroder om efteråret, hvor den relative fugtighed yderst i tagkonstruktionerne overstiger det kritiske fugtniveau RF\_kritisk (Sedlbauer, 2001), som anses for det laveste niveau hvorved skimmelsvampevækst er mulig på træ og træbaserede materialer. Udover det vil der fra november - april være kortere perioder den relative fugtighed i yderst i tagkonstruktionerne overstiger RF\_kritisk. Dette gælder både for paralleltag, bl.a. Figur 20 og tagrum, Figur 27.

#### 6.2.2 Paralleltag

#### 6.2.2.1 Orientering og taghældning

En nordvendt tagflade (P.Ref./P01) har betydelig højere relativ fugtighed ved underside af krydsfiner Pos A end en tagflade der vender mod syd (P02/P03), som Figur 15 viser. Dette skyldes, at solens indflydelse er mindre på en nordvendt tagflade, som derved har lavere temperatur sammenlignet med den sydvendte (Brandt E. , 2013). I den nordvendte tagflade er RF>RF\_kritisk i perioder i vinterhalvåret - der er korte om vinteren og lidt længere om efteråret - hvor der således er risiko for vækst af skimmelsvamp. Den sydvendte tagflade har kun få meget korte perioder hvor RF>RF\_kritisk, og risikoen for skimmelsvampevækst er dermed yderst begrænset. Om det nordvendte tag har en taghældning på 45° (P.Ref.) eller 25° (P01) har reelt ingen indflydelse på risikoen, da den relative fugtighed er tæt på ens i den fugtkritiske periode. Det flade tag (P04) er tagpaptag, og giver (i modsætning til de øvrige tagkonstruktioner med tegltag) store temperaturforskelle, hvor risikoen for skimmelsvampevækst er øget i de koldeste måneder, som det fremgår af Figur 15. Det skyldes solopvarmning af en mørk overflade og udstråling til et koldt himmelrum (Brandt E. , 2013). Tage orienteret mod nord har større risiko for vækst af skimmelsvamp end tage med andre orienteringer pga. mindre solopvarmning. Taghældningen i den sammenhæng betyder mindre. Nordvendte tage kan derfor normalt anses for dimensionsgivende set fra et fugtteknisk synspunkt (Brandt E. , 2013).

#### 6.2.2.2 Indeklima

Ændrede forhold i indeklimaet i form af større fugtbelastning og lavere temperatur øger ikke den relative fugtighed væsentligt på udvendig side af dampspærren i Pos. A, B, C og D, når tagkonstruktionen har helt tæt dampspærre vel at mærke - resultaterne er derfor ikke vist i rapporten. Dette skyldes, at fugttransport ved diffusion gennem dampspærren er forholdsvis lille (Brandt E. , 2013), som omtalt i afsnit 3.1. Derimod sker en betydelig ændring af fugtforholdene ved indvendig side af dampspærren Pos E som vist i Figur 16. Med stigning fra fugtbelastningsklasse 2 (P.Ref.) til 3 (P05) vil den relative fugtighed ikke overskride det kritiske niveau. Men i fugtbelastningsklasse 4 (P06) er RF>RF kritisk fra start november til midt i marts, hvor temperaturen ved dampspærren er lavere, omkring 18 °C, da den ligger 50 mm inde i isoleringen. Der er dermed stor risiko for skimmelsvampevækst. Resultatet er i god overensstemmelse med angivelsen af kritisk indvendig overfladetemperatur på 18,8 °C ved indetemperatur på 20 °C og udetemperatur på -0,6 °C i SBi-anvisning 224 (Brandt E., 2013). Temperaturen ved overfladen af dampspærren kan hæves, hvis dampspærren placeres lige bag gipspladerne, men risikoen for skader på dampspærre øges betydeligt pga. gennemføringer af el-installationer (Brandt E., 2013). Sænkes temperaturen til 18 °C, hvad der i praksis sjældent er tilfældet om sommeren, vil der være risiko for skimmelvækst i august og september allerede i fugtbelastningsklasse 2 (P07), og risikoen er øget med indeklima i fugtbelastningsklasse 3 (P08), som vist i Figur 16.

Et indeklima svarende til fugtbelastningsklasse 2 eller 3 giver normalt ingen risiko for vækst af skimmelsvamp i tagkonstruktioner med tæt dampspærre. Dette er derimod ikke tilfældet med indeklima i fugtbelastningsklasse 4 eller hvis indetemperaturen er for lav. Resultat er således i overensstemmelse med SBi-anvisning 224 *fugt i bygninger* (Brandt E., 2013).

#### 6.2.2.3 Ventilation

Det er undersøgt hvilken betydning ventilationens størrelse i luftspalten har på fugtforholdene i paralleltaget ved underside af krydsfiner, Pos A. Forskellige faste luftskifter på hhv. 1 h<sup>-1</sup> (P09), 4 h<sup>-1</sup> (P10), 10 h<sup>-1</sup> (P11) og 100 h<sup>-1</sup> (P12) er i Figur 17 sammenlignet med luftskiftet 30 h<sup>-1</sup> (P.Ref.). Med et lavt luftskifte på 1 h<sup>-1</sup> øges den relative fugtighed i sommerhalvåret, hvor RF i længere perioder fra midt i marts til midt i maj overstiger RF<sub>\_kritisk</sub>, og risikoen for skimmelsvampevækst er dermed til stede. Den høje relative fugtighed forekommer, eftersom det lave luftskifte ikke formår at fjerne al den fugt, der er tilført tagkonstruktionen (Brandt E. , 2013). De øvrige luftskifter har mere eller mindre sammenlignelig forløb af relativ fugtighed henover året, dog har de lave luftskifter også lavere relativ fugtighed i den fugtkritiske periode fra september - april. Tagkonstruktionen er i tilfældet i Figur 17 helt tæt, dvs. ingen nedbør trænger igennem undertaget og fugttransport gennem dampspærren kun sker ved diffusion.

Resultatet af en tilsvarende undersøgelse af ventilationens betydning for fugtforholdene i paralleltaget, dog med den forskel at dampspærren er utæt, fremgår af Figur 25 ved underside af krydsfiner Pos A og Figur 26 yderst i isoleringen Pos B. Dampspærren har en revne på 1x12,5mm/m<sup>2</sup> hvor igennem der trænger fugt op i tagkonstruktionen ved konvektion. De samme faste luftskifter på hhv. 4, 10, 30 og 100 h<sup>-1</sup> studeres som tilfældet i Figur 17 med tæt dampspærre på nær luftskiftet på 1 h<sup>-1</sup>, der ikke er vurderet tilstrækkeligt. Den øgede fugtmængde, der tilføres tagkonstruktion som følge af utæt dampspærre medfører at et luftskifte på 4 h<sup>-1</sup> (P34) giver en markant højere relativ fugtighed, der er større end RF\_kritisk helt ind juni ved underside af krydsfiner Pos A, som vist i Figur 25. Det vil med stor sandsynlighed føre til skimmelsvampevækst. Et luftskifte på 4 h<sup>-1</sup> er dermed ikke højt nok til at fjerne den øgede fugtmængde. Det sammen gør sig gældende (dog i mindre grad) for et luftskifte på 10 h<sup>-1</sup> (P35), hvor den relative fugtighed i længere perioder fra januar - maj vil være højere end RF\_kritisk ved underside af krydsfiner i Pos A, Figur 25, samt yderst i isoleringen Pos B, Figur 26.

Et højt luftskifte på 100 h<sup>-1</sup> (P36) har en positiv effekt på fugtforholdene om vinteren både ved underside af krydsfiner Pos A og yderst i isoleringen Pos B, som det fremgår af Figur 25 og Figur 26. Det høje luftskifte på 100 h<sup>-1</sup> fjerner således den tilførte fugtmængde hurtigere end luftskiftet på 30 h<sup>-1</sup> (P32). Et højt luftskifte sænker imidlertid temperaturen (på nær vinteren) og det øger den relative fugtighed. Dette er mest udtalt yderst i isoleringen Pos. B, hvor RF>RF\_kritisk i perioder om sommer og det tidlige efterår, og dermed en øget risiko for vækst af skimmelsvamp.

Luftskiftet i ventilationsspalten skal således være tilpas stort til at fjerne den mængde fugt, der uundgåeligt vil blive tilført tagkonstruktionen. Er luftskiftet for lavt vil dette ikke ske, og risikoen for fugtproblemer i tagkonstruktionen bliver stor. Luftskiftet må dog ikke være så højt, at det sænker temperaturen i konstruktionen, da det vil øge den relative fugtighed, og dermed risikoen for skimmelsvampevækst. Det er derfor i denne sammenhæng vigtigt, at dampspærren udføres så tæt som muligt, da større fugtmængder som følge af utætheder i dampspærren ikke kan fjernes selv med kraftig (Brandt E. , 2013).

#### 6.2.2.4 Undertagstype

Sammenligningen af paralleltag med ventileret og uventileret undertag, Figur 18, viser, at konstruktionerne med uventileret undertag har højere relativ fugtighed yderst i isoleringen Pos B fra oktober til april, hvorved risikoen for skimmelsvampevækst er større end med et ventileret undertag. Det diffusionsåbne undertag (banevare) med størst diffusionsmodstand, Z-værdi på 3 GPa s m<sup>2</sup>/kg (P13), har den højeste relative fugtighed i denne periode, da fugten der skal diffundere ud her bremses mest. Hvis dampspærren ikke er tæt (som i dette tilfælde), vil den større fugtmængde som følge heraf dermed ikke kunne forventes at blive fjernet hurtigt nok (Brandt E. , 2013). Undertaget (banevare) med Z-værdi på 0,5 GPa s m<sup>2</sup>/kg (P14) har i denne periode lidt lavere relative fugtighed yderst i isoleringen. Undertaget af 13 mm porøs træfiberplade (P15) med Z-værdi på 0,5 GPa s m<sup>2</sup>/kg er reelt ca. 10 gange mere diffusionsåbent, da Z-værdien er defineret som hele tykkelsen af materialet. Træfiberplade er så tilpas diffusionsåben, at den relative fugtighed ikke er meget højere end det ventilerede undertag (P.Ref.) i den fugtkritiske periode fra oktober til april. Noget af forklaringen på den lavere relative fugtighed skal dog tilskrives den porøse træfiberplades isolerende effekt, der betyder at temperaturen yderst i isoleringen er lidt højere end banevarerne. Det skal bemærkes, at de mest diffusionsåbne undertage har den højeste relative fugtighed i september. Dette indikerer, at der er fugttransport gennem materialet udefra og ind i isoleringen, da temperaturen er ens for angår banevare med Z-værdi på 0,5 og 3 GPa s m<sup>2</sup>/kg.

Resultatet er ikke helt sammenligneligt med det norske studie, som omtalt i afsnit 3.2.2 (Blom & Bøhlerengen, 2012), der uden forbehold anbefaler undertagsmateriale med lav diffusionsmodstand svarer til Z-værdi på 0,5 GPa s m<sup>2</sup>/kg, eller at materialet har høj absorptionsevne som en porøs træfiberplade. Det norske studie vedrører udtørring af byggefugt, lige det er med norske klimaforhold.

I Paralleltage med ventilerede undertag er risikoen for skimmelsvampevækst mindre end med uventilerede undertage. Når det gælder de uventilerede undertage er undermateriale med lavest diffusionsmodstand og høj absorptionsevne, hvor risikoen er mindst.

# 6.2.2.5 Tagdækningsmaterialer

Som det fremgår af Figur 19, har farven på tagets overflade samt type af tagdækning betydning for fugtforholdene ved underside af krydsfiner Pos A. En lys teglsten (P16) kan absorbere en mindre andel af solens stråler (har lavere absorptionstal for kort bølget stråling), se afsnit 9.2.5, hvilket resultere i lavere temperatur og højere relative fugtighed, og dermed en større risiko for skimmelvækst end ved tagdækning med røde teglsten (P.Ref.), som vist i Figur 19. Det samme gør sig gældende ved sammenligning af en lys (P18) og mørk tagpap (P17), hvor risikoen for skimmelvækst er høj med en lys tagpap, hvor RF>RF\_kritisk i kortere og længere perioder fra midt i august til maj. Ved sammenligning af de to tagdækningstyper ses det, at tag med tagpap har højere relativ fugtighed ved underside af krydsfiner pga. lavere temperatur i de koldeste måneder end tag med teglsten, og dermed er risikoen for skimmelsvampevækst større i tagpaptaget. Det skyldes, at tegltaget beskytter bedre mod udstråling til koldt himmelrum og har større varmekapacitet (Byg-Erfa, 2011). Det er derimod omvendt forår og efterår, hvor temperaturen er højere i tagpaptaget pga. solens øget påvirkning.

Mørke tagdækningsmaterialer kan bedre absorbere solens stråler sammenlignet med lyse tagdækningsmaterialer, og det giver lavere relativ fugtighed som følge af højere temperatur i tagkonstruktioner, og dermed er risiko for skimmelsvampevækst mindre. Sammenlignes tegltage med tagpaptage, så er risikoen for skimmelsvampevækst større i tagpaptage om vinteren, hvorimod risikoen er større i tegltage forår og efterår.

# 6.2.2.6 Isoleringstykkelse

I paralleltaget medfører en øget isoleringstykkelse som forventet en højere relativ fugtighed pga. lavere temperaturer, ved underside af krydsfiner Pos A, som det fremgår af beregningerne vist i Figur 20. Stigningen er størst ved isoleringstykkelse fra 200 mm (P19) til 320 mm (P20) og mindre ved isoleringstykkelser over 320 mm, hvor der fra 500 mm (P.Ref.) til 680 mm (P21) stort set ikke registres stigende relativ fugtighed. En øget isoleringstykkelse vil alt andet lige give en større risiko for vækst af skimmelsvamp i den fugtkritiske periode fra september til april. Men normalt er isoleringstykkelsen i tage i nybyggeri allerede mindst 300 mm for at overholde energirammen i Bygningsreglementet (Munch-Andersen, 2008). Det antages derfor, så længe ikke andre faktorer præger fugtforholdene i tagkonstruktionen negativt, at den øgede risiko for skimmelsvampevækst er begrænset. Alene på denne baggrund er der ikke behov for principielle ændringer af ventilerede tage.

Der er generel god overensstemmelse med det norske studie (Geving & Holme, 2010), som optalt i afsnit 3.2.2. De norske beregninger indikerer, at når isoleringstykkelsen overstiger 250 mm, vil den negative effekt på fugtforholdene aftage, og den øgede risiko for skimmelsvampevækst er derfor begrænset. Det skal dog bemærkes, at vurderingen bygger på en undersøgelse af lette ydervægge, som derfor ikke er helt sammenlignelig med opbygningen af paralleltaget i nærværende studie samt at udeklimaet er norsk.

### 6.2.2.7 Isoleret undertag

Isolering af hhv. undertag (P22) og tagpapunderlag (P24) med 50 mm mineraluld på udvendig side af krydsfiner øger temperaturen ved underside af krydsfiner Pos A så meget at den relative fugtighed falder til under det kritiske niveau for skimmelvækst fra november til april sammenlignet med det uisoleret undertag (P.Ref.) og tagpapunderlag (P23), som vist i Figur 21. Men resultatet viser også, at isoleringens beskyttende effekt nedsætter temperaturen ved underside af krydsfiner, når solens påvirkning på tagfladen øges. Isoleringen har således ikke nogen større effekt i den fugtkritiske periode i april og september/oktober, hvor den relative fugtighed er tæt på ens med hhv. det uisolerede undertag og uisolerede tagpapunderlag.

Udvendig isolering af undertag og tagpapunderlag har en positivt effekt i størstedelen af den fugtkritiske periode, da isoleringen øger temperaturen i de kolde perioder. En undtagelse er dog i perioder om efteråret, hvor isolering ingen effekt har, og risikoen for skimmelsvampevækst vil eksistere.

#### 6.2.2.8 Byggefugt

Beregningsresultaterne for de forskellige variationer af byggefugt i tagkonstruktionen viser i Figur 22, at forskellen mellem et startfugtindhold 1. oktober på hhv. 75 % RF (P25) og 80 % (P.Ref) RF i hele konstruktionen næsten udlignes om vinteren ved underside af krydsfineren Pos A, hvorved risikoen for vækst af skimmesvamp ikke er meget større med et startfugtindhold 80 % RF. Et højere startfugtindhold på enten 90 % RF i hele konstruktionen (P26) eller 25 % træfugt i krydsfineren med 80 % RF i den øvrige konstruktion (P27) vil næsten medfører sammen relative fugtighed ved underside krydsfineren hen over vinteren, hvor RF er noget højere end tilfældet med startfugtindhold på 80 % RF, og risikoen for skimmelsvampevækst er noget større. I tilfældet med indbygget fugtig isolering svarende til 4 1/m<sup>2</sup> vand yderst i isoleringen (P28), ses det at krydsfineren påvirkes længe med stigende relativ fugtighed helt ind i marts. Krydsfineren opsuger dermed fugt fra den opfugtede isolering, som pga. damptrykket i udadgående retning skal fjernes

med luftstrømmen i ventilationsspalten. Krydsfinerens større fugtkapacitet betyder at materialet kan optage store fugtmængder ved stigning i relativ fugtighed (Brandt E., 2013). Den indbyggede fugt i isolering giver betydelig større risiko for vækst af skimmelsvamp.

Udtørringstiden for alle varianter af indbygget fugt vil reelt være afsluttet med udgangen af den fugtkritiske periode i slutningen af april, hvor den relative fugtighed ved underside af krydsfiner vil være tæt på ens i alle konstruktionerne.

Resultatet af beregningerne i Figur 22 vurderes, at være i god overensstemmelse med erfaringer om at det under vinterforhold er acceptabelt, at indbygge træ i ventilerede tagkonstruktioner med et fugtindhold på op til 85 % RF pga. lave temperaturer (Møller, 2010), som dermed også gælder tagkonstruktionens øvrige materialer. Ifølge et norsk studie (Geving & Holme, 2010) vil udtørringstiden være længst, hvis fugten befinder sig lige på udvendig side af dampspærren, hvor fugtens vej ud af konstruktionen bliver længst, og dermed længere i højisolerede tagkonstruktioner end i mindre isolerede konstruktioner.

Under vinterforhold vil det være acceptabelt at indbygge træ i ventilerede tage med et fugtindhold på op til 85 % RF, da træet er i ligevægt med omgivelserne pga. de lave temperaturer. I varmere perioder skal fugtindholdet dog være mindre end 75 % RF, herunder produktion, transport og opbevaring (Møller, 2010). Indbygget våd isolering giver størst risiko for vækst af skimmelsvamp, da fugten vil opsuges af træet, pga. dets større fugtkapacitet.

# 6.2.2.9 Undertagets tæthed

Vandindtrængen igennem undertagsmembranen har stor indvirkning på fugtholdene i tagkonstruktionerne, som vist i Figur 23. Selv en mindre utæthed på 0,1 % (P29) af den regn der falder på taget, vil øge den relative fugtighed ved underside af krydsfiner Pos A, og det betyder derfor en noget øget risiko for skimmelsvampevækst i forhold til tagkonstruktion med helt tæt undertag (P.Ref.). Er utætheden i undertaget lidt større svarende til 0,2 % (P30) vil risikoen for skimmelsvampevækst i princippet øges tilsvarende. En større utæthed i undertaget, svarende til 1 % (P31) af den regn der falder på taget, vil med stor sandsynlighed føre til omfattende fugtskader og skimmelsvampevækst. Den relative fugtighed ved underside af krydsfineren ligger over den fugtkritiske niveau  $RF_{kritisk}$  det meste af året og ligger gennemgående om vinteren og det tidlige forår på omkring 100 % RF, hvorved kondens opstår og i øvrigt skimmelsvampevækst aftager (Brandt E. , 2013). Det kritiske fugtniveau, hvor træ og træbaserede materialer angribes af råd og trænedbrydende svampe anses i øvrigt normal til ca. 87 % RF.

Resultatet viser, at tagkonstruktioner er følsomme over for utætheder i undertaget, og skal bestemt undgås. Selv mindre utætheder medfører øget risiko for skimmelsvampevækst. Større utætheder i undertaget vil med stor sandsynlighed føre til omfattende fugtskader og skimmelsvampevækst.
#### 6.2.2.10 Dampspærrens tæthed

Fugttransport ved konvektion gennem utætheder i dampspærren kan have stor betydning for fugtforholdene i tagkonstruktionerne, som vist i Figur 24. En mindre utæthed i dampspærren svarende til en revne på 1x12,5mm/m<sup>2</sup> (P32), vil øge den relative fugtighed ved underside af krydsfiner Pos A i vinterhalvåret, og det medfører en noget øget risiko for skimmelsvampevækst i forhold til tagkonstruktion med helt (luft)tæt dampspærre (P.Ref.). I sommerhalvåret udlignes forskellen i relativ fugtighed. Dette skyldes, at fugttilskuddet til indeluften aftager med stigende temperatur i udeluften, hvor fugtindholdet om sommer normalt antages at være nær det samme inde og ude (Brandt E. , 2013), som omtalt i afsnit 3.1.1. En større utæthed i dampspærren, svarende til en revne på 10x12,5mm/m<sup>2</sup> (P33), vil med stor sandsynlighed føre til skimmelsvampevækst, da den relative fugtighed ved underside af krydsfineren ligger over RF<sub>\_kritisk</sub> i lange perioder det meste af året. Figur 24 viser, at den ophobede fugtmængde er så stor, at den ikke kan nå at tørre ud hen over sommeren inden fugtig rumluft igen strømmer ud i tagkonstruktionen.

Utætheder i dampspærren kan have stor indvirkning på fugtforholdene i tagkonstruktioner og skal derfor undgås. Mindre utætheder medfører øget risiko for vækst af skimmelsvamp det meste af den fugtkritiske periode. Fugtforholdene vil dog udlignes om sommeren med fugtforholdene i tagkonstruktionen med tæt dampspærre. Større utætheder vil med stor sandsynlighed føre til skimmelsvampevækst i tagkonstruktionen pga. høj relativ fugtighed meste af året.

#### 6.2.3 Tagrum

### 6.3 Sammenligning BSim og WUFI

En sammenligning af beregnet temperatur og relativ fugtighed i BSim (T.Ref./T01/T02/T03) med en tilsvarende tagkonstruktion beregnet i WUFI (T35/T36/T37/T38) viser generel god overensstemmelse mellem temperatur og relativ fugtighed ved underside af krydsfiner Pos A i perioden fra 15. september til 15. oktober for alle varianter af luftskifter i tagrummet, som det fremgår af Figur 34. Det ses, at det ventilerede tagrum med luftskifte på 3 h<sup>-1</sup> (T.Ref.) beregnet i BSim har middeltemperatur 13,1 °C og relativ fugtighed 77,6 %, og i WUFI (T35) har middeltemperatur på 13,6 °C og relativ fugtighed 77,8 %. Gennemsnitligt svarer beregninger overens, men BSim har langt større spredning af de beregnede timeværdier for temperatur og relativ fugtighed resultat. En forskellen i spredningen vurderes ikke at have væsentlig betydning for det samlede resultat. En forklaring på årsagen til spredningen er ikke undersøgt.

Det skal bemærkes, at beregninger i BSim og WUFI er udført med to forskellige sæt klimadata, BSim med 'Danmark\_2013.DRY' og WUFI med 'Lund; LTH Data'. I BSim er udetemperatur og relativ fugtighed hhv. 12,5 °C og 82,9 % RF for perioden 15. september til 15. oktober, mens de i WUFI er 13,4 °C. og 82,1 % RF.





Figur 34: Beregnet temperatur og relativ fugtighed fra 15. sep. - 15. okt. ved underside af krydsfiner [Pos A], for tag med ventileret tagrum og luftskifte 0,1  $b^{-1}/0,5 b^{-1}/3 b^{-1}/10 b^{-1}$  og sammenlignet med WUFI. Sammenholdt med kritisk relativ fugtighed for skimmelvækst [RF kritisk].

Nedenstående Figur 35 viser WUFI-beregningen for et helt kalenderår af temperatur og relativ fugtighed ved underside af krydsfiner for tag med ventileret tagrum og forskellige varianter af luftskiftet. Heraf ses det, at middel og høje luftskifter på 3 h<sup>-1</sup>, 6 h<sup>-1</sup> og 10 h<sup>-1</sup> har tilnærmelsesvis samme forløb af relativ fugtighed ved underside af krydsfiner. Det største luftskifte har dog den højeste relative fugtighed og omvendt. Med et mindre luftskifte på 0,5 h<sup>-1</sup> ligger den relative fugtighed generelt lidt lavere på nær hen over foråret. For luftskifterne 3 h<sup>-1</sup>, 6 h<sup>-1</sup> og 10 h<sup>-1</sup> vil den relative fugtighed i perioder om efteråret ligge over RF<sub>\_kritisk</sub>. Et lavt luftskifte på 0,1 h<sup>-1</sup> giver en noget lavere relativ fugtighed i vinterhalvåret, mens den er højere i april og maj, og tilmed i perioder er højere end RF<sub>\_kritisk</sub>.

Ændring af luftskiftets størrelse har ikke den store indflydelse på temperaturen ved underside af krydsfineren, og dermed er RF kritisk tilsvarende ens for de forskellige variationer af luftskiftet.



Figur 35: WUFI-Beregning af temperatur og relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos A], for tag med ventileret tagrum og luftskifte på hhv. 0,1/0,5/3/6/10 h<sup>-1</sup>. Kritisk relativ fugtighed [RF\_kritisk] afhængig af temperatur i tag med luftskifte 3 h<sup>-1</sup>.

# 7 Konklusion

Masterprojektet viser generelt, at der er risiko for vækst af skimmelsvamp i højisolerede, ventilerede tage med trækonstruktion, som er udført efter gældende regler og anvisninger samt med danske klimaforhold. Den øgede isoleringstykkelse, bestemt af Bygningsreglementets skærpede krav for at reducere bygningers energiforbrug, er dog ikke årsag til dette, da risikoen for skimmelsvampevækst allerede er til stede i mindre isolerede tage. En øget isoleringstykkelse vil dog øge risikoen for vækst af skimmelsvamp i tagkonstruktionerne, men så længe ikke andre faktorer præger fugtforholdene i tagkonstruktionen negativt, vurderes det, at den øgede risiko for skimmelsvampevækst er begrænset. Det giver alene på denne baggrund ikke anledning til ændringer af ventilerede tage.

Resultaterne i dette studie, baseret på 75 fugtberegninger i ventilerede paralleltage og tagrum, viser, at det ikke er muligt at udelukke risikoen for vækst at skimmelsvamp i naturligt ventilerede tage, hvor de ydre dele af tagkonstruktionen udsættes for danske udeklimaforhold. Risikoen for skimmelsvampevækst kan dog begrænses ved korrekt projektering og udførelse af de ventilerede tage, hvor række væsentlige faktorer har indvirkning på fugtforholdene i tagkonstruktionerne, og derfor skal indgå overvejelserne for at opnå bedre fugtsikkerhed. Disse faktorer er oplistet nedenfor:

- Tage orienteret mod nord har større risiko for vækst af skimmelsvamp end tage med andre orienteringer pga. mindre solopvarmning. Taghældningen i den sammenhæng betyder mindre. Nordvendte tage kan derfor normalt anses for dimensionsgivende ved fugttekniske vurderinger.
- Et indeklima svarende til fugtbelastningsklasse 2 eller 3 giver normalt ingen risiko for vækst af skimmelsvamp i tagkonstruktioner med tæt dampspærre. Dette er derimod ikke tilfældet med indeklima i fugtbelastningsklasse 4 eller hvis indetemperaturen er for lav.
- Luftskiftet i ventilationsspalten skal være tilpas stort til at fjerne den mængde fugt, der uundgåeligt vil blive tilført tagkonstruktionen. Er luftskiftet for lavt vil dette ikke ske, og risikoen for fugtproblemer i tagkonstruktionen bliver stor. Luftskiftet må dog ikke være så højt, at det sænker temperaturen i konstruktionen, da det vil øge den relative fugtighed, og dermed risikoen for skimmelsvampevækst.
- I Paralleltage med ventilerede undertag er risikoen for skimmelsvampevækst mindre end med uventilerede undertage. Af de uventilerede undertage er undermateriale med lavest diffusionsmodstand og høj absorptionsevne, hvor risikoen er mindst.
- Mørke tagdækningsmaterialer kan bedre absorbere solens stråler sammenlignet med lyse, og det medfører mindre risiko for skimmelsvampevækst pga. højere temperatur. Sammenlignes tegltage med tagpaptage, så er risikoen for skimmelsvampevækst større i tagpaptage om vinteren, hvorimod risikoen er større i tegltage forår og efterår.
- En øget isoleringstykkelse vil give en større risiko for vækst af skimmelsvamp i den fugtkritiske periode. Risikoen øges mest ved mindre isoleringstykkelser op til ca. 300 mm, over 300 mm isolering øges risikoen mindre, og ved isoleringstykkelser større end 500

mm øges risikoen for skimmelsvampevækst stort set ikke. Normalt er isoleringstykkelsen i tage i nybyggeri allerede mindst 300 mm for at overholde Bygningsreglementet. Dette forhold alene vil betyde, at den øgede risiko for skimmelsvampevækst er begrænset.

- Udvendig isolering af undertag og tagpapunderlag har en positivt effekt i størstedelen af den fugtkritiske periode, da isoleringen øger temperaturen i de kolde perioder. En undtagelse er dog i perioder om efteråret, hvor isolering ingen effekt har, og risikoen for skimmelsvampevækst er uændret.
- Under vinterforhold vil det være acceptabelt at indbygge træ i ventilerede tage med et fugtindhold på op til 85 % RF, da træet er i ligevægt med omgivelserne pga. de lave temperaturer. I varmere perioder skal fugtindholdet dog være mindre end 75 % RF. Indbygget våd isolering medfører stor risiko for vækst af skimmelsvamp.
- Tagkonstruktioner af træ er følsomme over for utætheder i undertaget og skal bestemt undgås. Selv mindre utætheder medfører øget risiko for skimmelsvampevækst. Større utætheder i undertaget vil med stor sandsynlighed føre til omfattende fugtskader og skimmelsvampevækst.
- Utætheder i dampspærren kan have stor indvirkning på fugtforholdene i tagkonstruktioner af træ og skal derfor undgås. Mindre utætheder medfører øget risiko for vækst af skimmelsvamp det meste af den fugtkritiske periode, men vil dog udlignes om sommeren med fugtforholdene i tagkonstruktionen med tæt dampspærre. Større utætheder vil med stor sandsynlighed føre til skimmelsvampevækst i tagkonstruktionen pga. høj relativ fugtighed meste af året.

# 8 Litteratur

- Andersen, K. T., Heiselberg, P., & Aggerholm, S. (2002). Naturlig ventilation i erhvervsbygninger -Beregninger og dimensionering (By og Byg Anvisning 202). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Andersen, N. E., Blach, K., & Christensen, G. (1974). Fugt og tage (Fugt 8). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Andersen, N. E., Christensen, G., & Nielsen, F. (1984). Bygningers fugtisolering (SBi-anvisning 139). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Andersen, N. E., Christensen, G., & Nielsen, F. (1993). Bygningers fugtisolering (SBi-anvisning 178). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Becher, P., & Korsgaard, V. (1957). Fugt og isolering. SBi-anvisning 7 (2. udgave). København: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Blom, P., & Bøhlerengen, T. (2012). Kondensfare uluftede loft feltundersøgelse (Projektrapport 108). Oslo, Norge: SINTEF Byggforsk.
- Brandt, E. (2009). Fugt i bygninger (SBi-anvisning 224, 1. udgave). Hørsholm: Statens Byggeforskninginstitut.
- Brandt, E. (2013). Fugt i bygninger (SBi-anvisning 224, 2. udgave) (2 udg.). København: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Bunch-Nielsen, T. (2010). Projektering af tage med tagpap og tagfolie. Fugt og tage afvanding, fugtteknik og lufttæthed (TOR-anvisning 30) + tillæg. Hørsholm: Tagpapbranchens Oplysningsråd.
- BvB. (2004). *Statistik om tage*. København: BvB, Byggeskadefonden vedrørende Bygningsfornyelse.
- Byg-Erfa. (2005). Skimmel i bygninger vækstbetingelser og forebyggelse (BYG-ERFA blad (99) 05 12 31). Ballerup: Byg-Erfa.
- Byg-Erfa. (2007). Undertage diffusionstætte og diffusionsåbne (BYG-ERFA blad (27) 07 06 29). Ballerup: Byg-Erfa.
- Byg-Erfa. (2011). Tagunderlag af krydsfiner misfarvning efter skimmelvækst (BYG-ERFA blad (47) 11 07 19). Gilleleje: Byg-Erfa.
- Byg-Erfa. (2012). Fugtkriterier og risikovurdering ved nybyggeri og renovering (BYG-ERFA blad (99) 12 12 28). Gilleleje: Byg-Erfa.

- Byg-Erfa. (2015). Dampspærremateriale og fugttransport væg- og loftkonstruktioner (BYG-ERFA blad (39) 15 12 28). København: Byg-Erfa.
- Dansk Standard. (2013). Byggekomponenter og -elementers hygrotermiske ydeevne: Indvendig overfladetemperatur for at unfgå kritisk overflade- og mellemrumskondens - Beregningsmetode (DS/EN ISO 13788:2013). Charlottenlund: Dansk Standard.
- de Place Hansen, J. E. (red.). (2016). Anvisning om Bygningreglement 2015 (SBi-Anvisning 258). København: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Falk, J. (2014). Rendered rainscreen walls Cavity ventilation rates, ventilation drying and moisture-induced cladding deformation, Report TVBM 1032. Lund, Sweden: Department of Building Materials, Lund University.
- Fraunhofer Institute for Building Physics. (2014). WUFI Tutorial 2014. Handling of typical constructions in WUFI. Holzkirchen, Germany: Fraunhofer Institute for Building Physics.
- Geving, S., & Holme, J. (2010). Høyisolerte konstruksjoner og fukt. Analyse av fukttekniske konsekvenser av økt isolasjonstykkelse (Prosjektrapport 53). Oslo, Norge: SINTEF Byggforsk.
- Grau, K., & Rode, C. (2005). A Model for Air Flow in Ventilated Cavities Implemented in a Tool for Whole-Building Hygrothermal Analysis. Working paper A41-T1-DK-06-1 for IEA Annex 41 Meeting, October 25-27 2006. Lyon.
- Hägerstedt, S. O., & Harderup, L.-E. (2010). Importance of a proper applied airflow in the facade air gap when moisture and temperature are calculated in wood framed walls. 5th International Symposium on Building and Ductwork Air-tightness. Copenhagen/Lyngby, Denmark.
- Hägerstedt, S. O., & Harderup, L.-E. (2011). Comparison of mesured and calculated temperature and relative humidity with varied and constant air flow in the facade air gap. NSB 2011, 9th Nordic Symposium on Building Physics. May 29th - June 2th . Tampere, Finland.
- Kehrer, M., & Schmidt, T. (2008). Radiation Effects On Exterior Surfaces. Nordic Symposium on Building Physics 2008. København.
- Munch-Andersen, J. (2008). Traskelethuse (TRÆ56). Lyngby: Trainformationen.
- Mundt-Petersen, S. O. (2012). Literature study / State-of-the-art Mould and moisture safety in constructions (Report TVBH-3053). Lund, Sweden: Department of Building Physics, Lund University.
- Mundt-Petersen, S. O. (2013a). Comparison of hygrothermal measurements and calculations in a single-family wooden house on the west coast of Sweden (Report TVBH-3054). Lund, Sweden: Department of Building Physics, Lund University.

- Mundt-Petersen, S. O. (2013b). Comparison of hygrothermal measurements and calculations in a multifamily wooden house on the north-eastern coast of Sweden (Report TVBH-3055). Lund, Sweden: Department of Building Physics, Lund University.
- Mundt-Petersen, S. O. (2013c). Comparison of hygrothermal measurements and calculations in a single-family wooden house in the Swedish town of Växjö (Report TVBH-3056). Lund, Sweden: Department of Building Physics, Lund University.
- Mundt-Petersen, S. O. (2013d). Comparison of hygrothermal measurements and calculations in a multifamily wooden house in the Swedish town of Växjö (Report TVBH-3057). Lund, Sweden: Department of Buildning Physics, Lund University.
- Mundt-Petersen, S. O. (2013e). Comparison of hygrothermal measurements and calculations in a single-family wooden house in the Swedish municipality of Upplands-Bro (Report TVBH-3058). Lund, Sweden: Department of Building Physics, Lund University.
- Mundt-Petersen, S. O., & Harderup, L.-E. (2015). Predicting hygrothermal performance in cold roofs using a 1D transient heat and moisture calculation tool. *Building and Environment Vol.* 90, (s. pp. 215-231).
- Mundt-Petersen, S. O., Wallentén, P., Toratti, T., & Heikkinen, J. (2012). Moisture risk evaluation and determination of required measures to avoid mould damage using the Folos 2D visual mould chart. Thermophysics 2012, 17th International Meeting of Thermophysical Society. Podkylava, Slovak Republic.
- Murerfagets Oplysningsråd. (2005). Oplægning af tegltage (Tegl 36). København: Murerfagets Oplysningsråd.
- Møller, E. B. (2010). Vejledning om håndtering af fugt i byggeriet. København: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Olsson, L. (2011). Laboratoriestudie av träregelväggar med olika vindskydd. SP-rapport 2011:56. Borås, Sverige: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.
- Rockwool. (2016). Personlig kommunikation.
- Rode, C., Grau, K., & Mitamura, T. (2001). Model and experiments for hygrothermal conditions of the envelope and indoor air of buildings. *Performance of exterior envelopes of whole buildings* VIII. Integration of building envelopes 2. Florida, United States.
- Sedlbauer, K. (2001). Vorhersagen von Schmmelpilzbildung auf und in bauteilen. Stuttgart: Lehrstuhl für Bauphysik.
- Sivertsen, E. (1939). Byggelov af 29. Marts 1939 for Staden København med dertil hørende Vedtægter m.m. Kommenteret udgave. København: Københavns Magistrat.

- TenWolde, A. (2008). ASHRAE Standard 160P Critiria for moisture Control Design Analysis in Buildings. ASHRAE Transaction, Vol. 114, Part 1, pp. 167-171.
- Thelandersson, S., Isaksson, T., & Niklewski, J. (2014). Fuktsäker utformning av klimatskiljande byggnadsdelar med fuktkänsliga material. Vägledning för projektering och riskvärdering. Rapport TVBK-3065. Lund: Inst. för Bygg- och Miljöteknologi, Lunds Tekniska Högskola.
- Trafik- og Byggestyrelsen. (2016). Bekendtgørelse om offentliggørelse af bygningsreglement 2015 (BR15) (BEK nr 1028 af 30/06/2016). København. Lokaliseret på:: https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=183152.

Træinformationen. (2013). Undertage (TRÆ 67). Lyngby: Træinformationen.

- Walker, I. S., & Forest, T. W. (1995). Field Measurements of Ventilation Rates in Attics. Building and Environment, Vol. 30, No. 3, pp. 333-347.
- Wallentén, P. (2013). Räkna F Rekommendationer för fuktberäkninger (presentation). Fuktcentrums informationsdag. Lund, Sweden.
- Wittchen, K. B., Johnsen, K., Grau, K., & Rose, J. (2013). BSim Brugervejledning, version 7.13.10.1. København: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- WUFI. (2013). WUFI Pro 5.3 Release: 5.3.4.1363.DB.24.78. Holzkirchen, Germany: Fraunhofer Insitute for Building Physics.
- WUFI. (2013). WUFI Pro 5.3, Brugermanual, Materialedatabase og Klimadatabase, Release: 5.3.4.1363.DB.24.78. Holzkirchen, Germany: Fraunhofer Insitute for Building Physics.

# 9 Bilag

# 9.1 Bilag A: Tagrum, månedsmiddelværdier for temperatur og RF

Tabel 6: Månedsmiddelværdier for temperatur og relativ fugtighed ved underside af krydsfiner [Pos. A] for ventileret tagrum i parameterstudiet

Variant		Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
Modelnr.		5			1	,	5	5	U U	1			
450mm iso/3h-1	T ∘C	0,8	1,2	0,8	9,3	14,6	18,2	21,3	20,2	15,4	10,4	3,6	0,9
T. Ref.	RF %	87,8	85,6	77,8	67,0	62,2	64,4	61,3	64,0	72,4	83,1	86,3	90,1
450mm iso/0,1h <sup>-1</sup>	T ∘C	0,9	1,4	1,3	9,8	15,2	19,0	22,1	20,7	15,8	10,6	3,8	1,0
T01	RF %	83,1	83,5	80,5	71,9	62,3	62,2	57,6	59,4	65,9	73,8	79,1	82,9
450mm iso/0,5h <sup>-1</sup>	T ⁰C	0,9	1,4	1,2	9,7	15,1	18,8	21,9	20,6	15,7	10,5	3,7	1,0
T02	RF %	86,9	85,2	77,5	66,7	60,0	61,4	58,0	60,7	68,9	79,7	84,3	88,3
450mm iso/natvent	T ⁰C	0,8	1,0	0,4	8,2	13,3	16,6	19,8	19,1	14,9	10,1	3,6	0,9
T03	RF %	85,2	85,0	77,7	69,7	65,7	67,0	64,1	65,0	71,0	80,6	84,8	87,8
450mm iso/10h-1	T ∘C	0,7	1,0	0,5	8,9	14,1	17,6	20,7	19,8	15,1	10,2	3,5	0,8
T04	RF %	88,5	86,7	79,2	68,5	64,1	66,9	63,7	65,7	73,9	84,3	87,1	91,0
180mm iso/3h <sup>-1</sup>	T ⁰C	1,0	1,4	1,0	9,4	14,6	18,2	21,3	20,1	15,4	10,5	3,8	1,1
T05	RF %	86,7	84,6	76,8	66,6	62,1	64,4	61,5	64,1	72,3	82,7	85,4	88,9
180mm iso/0,1h <sup>-1</sup>	T ⁰C	1,1	1,7	1,5	10,0	15,3	19,0	22,0	20,7	15,8	10,7	4,0	1,3
T06	RF %	81,9	82,2	78,8	70,9	61,7	61,9	57,5	59,4	65,8	73,5	78,1	81,7
180mm iso/0,5h <sup>-1</sup>	T ∘C	1,1	1,6	1,4	9,8	15,1	18,8	21,9	20,6	15,7	10,6	3,9	1,2
T07	RF %	85,5	83,9	76,0	66,0	59,7	61,3	58,1	60,8	68,7	79,3	83,2	87,0
180mm iso/natvent	T ∘C	1,1	1,2	0,6	8,4	13,4	16,7	19,8	19,1	14,9	10,3	3,8	1,2
T08	RF %	84,8	84,4	77,2	69,5	65,6	67,0	64,0	64,9	70,9	80,9	84,2	87,2
180mm iso/10h-1	T ⁰C	0,9	1,2	0,7	8,9	14,1	17,6	20,7	19,7	15,1	10,3	3,7	1,0
T09	RF %	87,4	85,7	78,2	68,0	64,0	66,9	63,9	65,8	73,7	83,8	86,2	89,8
610mm iso/3h-1	T ∘C	0,8	1,1	0,8	9,3	14,6	18,2	21,3	20,2	15,4	10,3	3,6	0,9
T10	RF %	88,0	85,8	78,0	67,1	62,3	64,4	61,3	64,0	72,4	83,2	86,4	90,4
610mm iso/0,1h <sup>-1</sup>	T ∘C	0,8	1,4	1,2	9,8	15,2	19,0	22,1	20,7	15,8	10,6	3,7	1,0
T11	RF %	88,3	83,7	80,8	72,1	62,4	62,2	57,5	59,4	65,9	73,8	79,2	83,0
610mm iso/0,5h <sup>-1</sup>	T ∘C	0,8	1,3	1,2	9,7	15,1	18,8	21,9	20,6	15,7	10,5	3,7	0,9
T12	RF %	87,1	85,5	77,8	66,8	60,0	61,4	57,9	60,7	68,9	80,0	84,4	88,5
610mm iso/natvent	T ⁰C	0,8	0,9	0,3	8,2	13,3	16,6	19,8	19,1	14,8	10,1	3,5	0,8
T13	RF %	85,3	85,1	77,9	69,8	65,8	67,0	64,2	65,1	71,1	80,6	84,9	87,7
610mm iso/10h-1	T ∘C	0,7	1,0	0,5	8,9	14,1	17,6	20,7	19,8	15,1	10,2	3,5	0,8
T14	RF %	88,5	86,7	79,2	68,5	64,1	66,9	63,7	65,7	73,9	84,3	87,1	91,0
Tag i skygge	T ∘C	0,3	0,3	-0,5	7,8	13,2	17,0	19,8	18,8	14,1	9,4	3,1	0,5
- 450mm iso/3h-1	RF %	91,4	91,9	86,4	73,7	67,4	68,7	66,3	69,0	78,3	88,6	90,1	93,1
T15				Í	ŕ	ĺ.						, í	ĺ ĺ
Tag i skygge	T ∘C	0,3	0,3	-0,5	8,0	13,5	17,4	20,2	19,0	14,1	9,4	3,1	0,5
- 450mm iso/0,1h <sup>-1</sup>	RF %	87,4	87,9	87,2	80,0	70,8	69,7	65,9	67,1	73,6	81,3	85,4	87,3
T16													
Tag i skygge	T ⁰C	0,3	0,3	-0,5	8,0	13,4	17,3	20,1	18,9	14,1	9,4	3,1	0,5
- 450mm iso/0,5h <sup>-1</sup>	RF %	90,7	91,0	87,1	75,3	67,2	67,5	64,6	67,5	76,7	86,6	89,0	91,6
T17													
Tag i skygge	T°C	0,5	0,4	-0,5	7,7	13,2	16,6	19,7	18,8	14,0	9,5	3,2	0,6
-450mm iso/natvent	RF %	86,4	87,3	81,8	72,2	66,0	67,0	64,3	67,0	75,7	83,2	85,9	87,8
T18													
Tag i skygge	T °C	0,3	0,3	-0,6	7,7	12,9	16,6	19,4	18,6	14,1	9,4	3,1	0,5
- 450mm iso/10h-1	RF %	91,5	92,0	86,4	73,8	68,5	70,3	67,8	69,8	78,8	88,9	90,4	93,5
T19													

50 mm iso undertag	T ⁰C	1,1	1,3	0,9	9,1	13,9	17,2	20,3	19,8	15,4	10,4	3,8	1,1
- 450mm iso/3h-1	RF %	86.4	85.0	77.6	67.6	64.8	67.6	64.6	65.0	72.3	82.8	85.7	88.9
T20		,-	,-		,-	,-		,-	,.		,-	,.	,-
50 mm iso undertag	T ∘C	1,4	1,9	2,0	10,4	15,4	18,9	22,0	21,0	16,3	10,9	4,2	1,5
- 450mm iso/0,1h <sup>-1</sup>	RF %	80,5	80,0	75,5	68,5	61,6	62,4	58,6	59,2	64,5	72,5	77,7	81,1
T21													
50 mm iso undertag	T °C	1,3	1,8	1,7	10,1	15,0	18,5	21,5	20,7	16,0	10,8	4,1	1,4
- 450mm iso/0,5h <sup>-1</sup>	RF %	84,2	82,5	74,8	65,3	60,6	62,6	59,3	60,7	67,9	78,7	82,5	86,0
122	<b>T</b> 0	0.0	1.0	0.0	0.0	100		10.0	10.0	110	10.1	2 (	1.0
50 mm iso undertag	T°C	0,9	1,0	0,3	8,3	12,9	16,1	19,2	18,9	14,8	10,1	3,6	1,0
-450mm iso/natvent	RF %	84,7	85,3	78,0	70,2	67,6	69,9	67,6	68,2	73,6	81,9	84,6	87,0
50 mm iso undorteg	ToC	0.0	1.0	0.4	95	12.2	16.4	10.5	10.2	15.0	10.2	36	0.0
450 mm iso $/10$ h <sup>-1</sup>		0,9 87.7	1,0	80.4	0,5 70.2	67.0	71.2	19,5	19,2 67.7	74.6	10,2 84.7	3,0 87.3	0,9
T24	<b>KI</b> <sup>+</sup> 70	07,7	07,0	00,4	70,2	07,9	/1,2	00,2	07,7	74,0	04,7	07,5	90,0
Damps mindre utæt	T ∘C	0.8	1.2	0.9	9.3	14.6	18.2	21.3	20.2	15.4	10.4	3.6	0.9
- 450mm iso/3h <sup>-1</sup>	RF %	88,8	86,5	78,8	67,6	62,4	64,4	61,3	64,0	72,5	83,6	87,1	91,1
T25			Í	Í	Í	Í	Í	Í	Í	Í	Í		
Damps mindre utæt	T ∘C	0,9	1,4	1,3	9,8	15,3	19,0	22,1	20,7	15,8	10,6	3,7	1,0
- 450mm iso/0,1h <sup>-1</sup>	RF %	98,1	98,8	97,9	90,9	73,2	66,9	59,7	60,3	67,5	82,4	91,3	96,7
T26													
Damps mindre utæt	T °C	0,9	1,4	1,2	9,7	15,1	18,8	21,9	20,6	15,7	10,5	3,7	1,0
$-450$ mm $1$ so $/0,5h^{-1}$	RF %	92,1	90,6	83,4	70,5	61,3	61,7	58,1	60,8	69,4	82,4	88,3	93,2
Damos mindre utæt	T∘C	0.8	1.0	0.3	82	133	16.6	10.8	10.1	14.9	10.1	3.6	0.0
-450mm iso/natvent	RE %	87.3	86.3	79.1	70.5	66.0	67.0	64.1	65.1	71.2	81.6	85.9	89.4
T28	111 70	07,5	00,5	12,1	10,5	00,0	07,0	01,1	05,1	71,2	01,0	0.5,5	0,1
Damps mindre utæt	T ⁰C	0,7	1,0	0,6	8,9	14,1	17,6	20,7	19,8	15,1	10,2	3,5	0,8
450mm iso/10h-1	RF %	88,6	86,9	79,4	68,6	64,2	66,9	63,7	65,7	73,9	84,4	87,2	91,1
T29							-					-	
Dampsp mere utæt	T °C	0,8	1,2	0,9	9,3	14,6	18,2	21,3	20,2	15,4	10,4	3,6	0,9
- 450mm iso/3h <sup>-1</sup>	RF %	95,7	93,4	86,5	72,9	64,0	64,5	61,4	64,0	73,4	87,9	92,8	97,2
T30													
Dampsp mere utæt	T°C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
450 mm $1$ so/ $0$ , 1 h <sup>-1</sup>	KF %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Damoso mere utert	T∘C	0.8	13	12	0.0	15.2	18.0	21.0	20.6	15.7	10.5	37	0.9
- $450$ mm iso $/0.5$ h <sup>-1</sup>	RE %	99.2	99.2	99.4	97.5	72.3	63.2	58.5	60.9	73.5	97.5	98.9	99.0
T32	111 70	,2	,2	,,,	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	12,5	05,2	50,5	00,5	10,0	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	,0
Dampsp mere utæt	T °C	0,8	1,0	0,3	8,2	13,3	16,6	19,8	19,1	14,8	10,1	3,5	0,9
-450mm iso/natvent	RF %	95,2	92,7	86,8	76,7	67,9	67,2	64,3	65,2	72,6	88,4	92,0	95,7
T33													
Dampsp mere utæt	T ∘C	0,7	1,0	0,6	8,9	14,1	17,6	20,7	19,8	15,1	10,2	3,5	0,8
- 450mm iso/10h <sup>-1</sup>	RF %	91,0	89,2	81,8	70,2	64,6	66,9	63,8	65,7	74,2	85,7	89,2	93,4
134	ToC	2.5	2.0	2.2	0.0	117	1(2	10 E	17.0	1()	0.2	FO	2.2
450mm iso /2h-1		2,5	2,0	3,3	8,2	11,/	16,5	19,5	17,9	16,2	9,2	5,0	2,2
- 430mm 1807 5m T35	<b>KI</b> <sup>+</sup> 70	07,5	07,0	00,0	70,2	00,2	09,1	07,0	07,0	74,5	79,0	03,9	05,0
Samlign. m. WUFI	T ⁰C	2.4	2.1	3.5	8.5	12.2	17.0	20.0	18.2	16.3	9.3	5.0	2.2
- 450mm iso/0,1h <sup>-1</sup>	RF %	83.8	84.2	84.2	81.0	74.0	68.9	66.7	66.4	71.4	76.5	79.8	81.9
T36							ĺ.						ĺ.
Samlign. m. WUFI	T °C	2,4	2,1	3,5	8,4	12,1	16,8	19,8	18,1	16,2	9,3	5,0	2,2
- 450mm iso/0,5h <sup>-1</sup>	RF %	86,4	86,9	86,1	79,3	68,4	67,4	66,2	66,1	73,2	78,8	82,5	84,7
T37	-							10					
Samlign. WUFI	T °C	2,4	2,0	3,2	8,0	11,4	16,0	19,2	17,7	16,2	9,2	5,0	2,2
- 450mm 1so/10h-1	КР %	88,9	88,5	86,9	79,1	69,7	/1,0	69,1	69,3	/5,1	81,2	84,7	86,7
1.30													

## 9.2 Bilag B: Paralleltag, parametre og variationer

#### 9.2.1 Orientering og taghældning

En nordvendt tagflade anses normalt som dimensionsgivende set fra et fugtteknisk synpunkt, da solopvarmningen af den udvendige overflade er mindst ved denne orientering. Analysen vedrører nord- og sydvendt tagflade med hældning på hhv. 45° og 25°, samt fladt tag med hældning 0°. Tagkonstruktionen for det flade tag er ændret på følgende måde:

 Materialelagene 25 mm tagsten og 70 mm luftspalte er fjernet. Tagpaplaget er udvendig overflade, og absorptionstal for kortbølget stråling er ændret til 0,88 for tagpapdækning -WUFI standardværdi.

#### 9.2.2 Indeklima

Fugtbelastningen fra indeluften kan variere meget alt efter bygningens anvendelse. I boliger er der også en betydelig variation i fugtproduktion. En høj luftfugtighed indendørs kan bl.a. skyldes manglende opvarmning, ventilation og udluftning, samt tørring af tøj (Byg-Erfa, 2005). På denne baggrund er udført beregninger med indeklima i fugtbelastningsklasse 2-4, Figur 3, i kombination med temperatur på 18 °C og 20 °C. Med tilbageliggende dampspærre i tagkonstruktionen vil dennes overflade være lidt koldere end inde-temperaturen, derfor vedrører undersøgelsen også indersiden af dampspærren, Pos. E.

#### 9.2.3 Luftskifte, ventileret undertag

Da luftgennemstrømning i ventilationsspalten kan variere meget, idet den styres af forskelle i vindtryk og temperatur (Brandt E. , 2013), er der undersøgt forskellige værdier på hhv. 1, 4, 10, 30 (reference) og 100 h<sup>-1</sup> for luftskiftet i ventilationsspalten under det diffusionstætte undertag - på grundlag af (Wallentén, 2013).

#### 9.2.4 Undertagstype

Paralleltag med uventileret undertag kan anvendes i bygninger med samme fugtbelastning fra indeklimaet som tag med ventileret undertag, såfremt dampdiffusionsmodstanden for undertagsmaterialet er mindre end 3 GPa s m<sup>2</sup>/kg (Brandt E. , 2013). En norsk undersøgelse (Blom & Bøhlerengen, 2012) anbefaler, at undertagets dampdiffusionsmodstand er mindre end S<sub>d</sub>=0,1 m, som svarer til 0,5 GPa s m<sup>2</sup>/kg, samt at materialet har høj kondensoptagsevne som fx en porøs træfiberplade.

Til analysen af de forskellige typer diffusionsåbne undertagsmaterialer er anvendt følgende materialelag i WUFI:

- Uventileret undertag banevare Z-værdi =  $3 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$ .

Materialelagene 1 mm tagpap, 22 mm krydsfiner og 50 mm luftspalte fjernes og erstattes af diffusionsåbent undertagsmateriale *Weather resistive barrier (S<sub>d</sub>=0,5 m)* 1 mm med densitet

130 kg/m3, porøsitet 0,001 %, Varmekapacitet 2300 J/kg K, Varmeledningsevne 2,3 W/m K, Vanddampdiffusionsmodstandstal 500.

- Uventileret undertag banevare Z-værdi = 0,5 GPa s m²/kg. Materialelagene 1 mm tagpap, 22 krydsfiner og 50 mm luftspalte fjernes og erstattes af diffusionsåbent undertagsmateriale *Weather resistive barrier (S<sub>d</sub>=0,1 m)* 1 mm med densitet 130 kg/m3, porøsitet 0,001 %, Varmekapacitet 2300 J/kg K, Varmeledningsevne 2,3 W/m K, Vanddampdiffusionsmodstandstal 100.
- Uventileret undertag træfiberplade Z-værdi = 0,5 GPa s m²/kg. Materialelagene 1 mm tagpap, 22 krydsfiner og 50 mm luftspalte fjernes og erstattes af diffusionsåbent undertagsmateriale *Woodfibre board, soft* 13 mm med densitet 270 kg/m3, porøsitet 0,83 %, Varmekapacitet 1700 J/kg K, Varmeledningsevne 0,06 W/m K, Vand-dampdiffusionsmodstandstal 6,25.

#### 9.2.5 Tagdækningsmateriale

Farven på tagets overflade kan have stor betydning for fugtforholdene i tagkonstruktionen, da en mørk overflade absorberer en større andel af solens stråling end en lys overflade (Thelandersson, Isaksson, & Niklewski, 2014). Endvidere kan beskyttelse mod udstråling til koldt himmelrum og materialets evne til at lagre varme have betydning (Byg-Erfa, 2011).

Det røde teglstentag på referencekonstruktionen sammenlignes derfor med:

Teglsten lys

Absorptionstal for kortbølget stråling er ændret til 0,36 for *brick, clay, cream, glazed* - WUFI standardværdi.

Tagpap mørk

Materialelagene 25 mm tagsten og 70 mm luftspalte er fjernet. Tagpaplaget er udvendig overflade, og absorptionstal for kortbølget stråling er ændret til 0,88 for tagpapdækning - WUFI standardværdi.

- Tagpap lys

Materialelagene 25 mm tagsten og 70 mm luftspalte er fjernet. Tagpaplaget er udvendig overflade, og absorptionstal for kortbølget stråling er ændret til 0,3 for lys tagpapdækning - baseret på (Kehrer & Schmidt, 2008).

#### 9.2.6 Isoleringstykkelse

Isoleringstykkelser, som er noget mindre end den typiske isoleringstykkelse for nybyggeri, er medtaget i undersøgelsen for at få et bredere grundlag for analyse af effekten af en øget isoleringstykkelse.

#### 9.2.7 Isolereret undertag

For at nedsætte risikoen for skimmelvækst på tagunderlag af krydsfiner, der pga. udstråling til himmelrummet underafkøles, foreslås tilføjelse af ca. 50 mm trykfast isolering på udvendig side af

krydsfineren (Byg-Erfa, 2011). Dette forhold er undersøgt både for tegltaget og et tagpaptag, hvor beregningsmodellen er ændret på følgende måde for hhv.:

Isoleret undertag.

Mellem krydsfiner og tagpap tilføjes et 50 mm isoleringsmaterialelag; *Mineral Wool (heat con: 0,04 W/m<sup>2</sup>)* med densitet 60 kg/m3, porøsitet 0,95 %, Varmekapacitet 850 J/kg K, Varmeledningsevne 0,4 W/m K, Vanddampdiffusionsmodstandstal 1,3.

Uisoleret tagpapunderlag.

Materialelagene 25 mm tagsten og 70 mm luftspalte er fjernet. Tagpaplaget er udvendig overflade, og absorptionstal for kortbølget stråling er ændret til 0,88 for tagpapdækning -WUFI standardværdi.

Isoleret tagunderlag.

Opbygning som uisoleret tagunderlag, med tilføjelse af et 50 mm isoleringsmaterialelag mellem krydsfiner og tagpap; *Mineral Wool (heat con: 0,04 W/m<sup>2</sup>)* med densitet 60 kg/m3, porøsitet 0,95 %, Varmekapacitet 850 J/kg K, Varmeledningsevne 0,4 W/m K, Vand-damp-diffusionsmodstandstal 1,3.

#### 9.2.8 Byggefugt

I mange byggerier indbygges fugtige/våde materialer eller tørre materialer opfugtes af nedbør efter indbygning, uden at det fører til den nødvendige udtørring eller udskiftning af materialerne (Byg-Erfa, 2012). Der er herfor valgt følgende varianter af start fugtindhold som referencen sammenlignes med:

- 75 % RF i hele konstruktionen
- 90 % RF i hele konstruktionen
- 25 % træfugt i krydsfiner (vandindhold 150 kg/m<sup>3</sup>), 80 % RF i den øvrige konstruktion.
- 4 mm vand (4 l/m<sup>2</sup>) i yderste 90 mm isoleringslag (vandindhold 44,79 kg/m<sup>3</sup>, 100 % RF), og 80 % RF i den øvrige konstruktion.

#### 9.2.9 Undertagets tæthed

Uhensigtsmæssigt valg eller forkert udførelse af undertag er årsag til at nedbør trænger ind i tagkonstruktionen (Byg-Erfa, 2007) (BvB, 2004). En antagelse kan være, at 0,1-0,2 % af den regn der falder på taget vil nå det faste undertag /krydsfineren (Wallentén, 2013). Endvidere antager ASHRAE standard (TenWolde, 2008), at 1 % af slagregn trænger ind i ydervæggen. Det er valgt, at overføre denne antagelse til paralleltaget. For at simulere en utæthed i undertagsmembranen er en fugtkilde, svarende til en utæthed på hhv. 0,1 %, 0,2 % og 1 % af den regn der falder på taget, tilføjet hele krydsfinerens tykkelse i beregningsmodellen. Fugtkilden afskæres ved fri vandmætning, dvs. hvis krydsfineren opnår et vandindhold på 100 % vil yderligere nedbør efterfølgende løbe af konstruktionen.

#### 9.2.10 Dampspærrens tæthed

Ved bygningsundersøgelser ses ofte revner i dampspærren, som er større end 1 mm bred og 1m lang (Byg-Erfa, 2015). Effekten af en ikke lufttæt dampspærre, svarende til konvektion gennem en revne på hhv. 1 mm x 1 m [P32] og 10 mm x 1 m [P33] i en 80 m<sup>2</sup> tagflade, er sammenlignet med en tæt dampspærre [P.ref.]. Tagfladens størrelse er valgt på grundlag af BSim bygningsmodellen for tag med ventileret tagrum, der er beskrevet i afsnit 4.2.1. Fugtmængden, som tranporteres ved konvektion gennem utætheder i dampspærren, er bestemt ved metode, som beskrevet i SBi-anvisning 224 (Brandt E. , 2013):

Ligning 3: Beregning af fugttransport ved konvektion gennem utæthed i dampspærre

$$G = c A \Delta p^{0,5} v 3600$$

hvor

G	er fugtmængden [g/time]
С	er ca. 0,8 [m/(s Pa <sup>0,5</sup> )]
A	er arealet af åbningens størrelse [m <sup>2</sup> ]
Дp	er trykforskellen over konstruktionen [Pa]
v	er indeluftens vanddampindhold [g/m <sup>3</sup> ]

med trykforskellen som:

Ligning 4: Beregning af trykforskel over tagkonstruktionen

$$\Delta p_t(h) = a h \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_i}\right)$$

hvor

$\Delta p_t(h)$	er trykforskellen over konstruktionen (mellem den neutrale zone og højden $b$ ) [Pa]
a	er en konstant = 3414 Pa K/m
h	er højden over den neutrale zone [m]
Ти	er den absolutte udetemperatur [K]
Ti	er den absolutte inde temperatur [K]

Vanddampindholdet i indeluften er sat til 8,5 g/m<sup>3</sup>, på grundlag af 20 °C og 49 % RF om vinteren, svarende til fugtbelastningsklasse 2. Udetemperaturen er sat til 0 °C. Højden over den neutrale zone er sat til 1,5 m ud fra antagelsen, at den neutrale zone ligger midt i en enetages bygning med etagehøjde på 3 m, baseret på Figur 11 i afsnit 4.2.1.



Figur 36: Skorstenseffekt i bygning, undertryk nederst og overtryk øverst pga. varm luft er lettere og stiger til vejrs neutral zone, hvor trykket inde svarer til trykket ude. Fra SBi-anvisning 224 (Brandt E., 2013).

Med ovenstående forudsætninger vil fugtmængden, som tranporteres ved konvektion gennem revnen i dampspærren på 1 mm x 1 m være 28 g/time og 280 g/time gennem revnen på 10 mm x 1 m.

Beregningsmodellen i WUFI er tilføjet en fugtkilde i hele isoleringslaget på den udvendige side af dampspærren. Fugtkilden er sat til konstant månedlig fugtbelastning og fordelt på månederne november - marts. Den årlige fugtbelastning ved konvektion udgør 1260 g/år m<sup>2</sup> (28 g/time x 24 timer x 150 døgn / 80 m<sup>2</sup>) for revnen på 1 mm x 1 m i den 80 m<sup>2</sup> store tagflade, der således ved 1D beregning er omsat til 1x12,5mm/m<sup>2</sup>, og 12.600 g/år m<sup>2</sup> for revnen på 10 mm x 1 m i den 80 m<sup>2</sup> store tagflade, der således ved 1D beregning er omsat til 1x12,5mm/m<sup>2</sup>, og 12.600 g/år m<sup>2</sup> for revnen på 10 mm x 1 m i den 80 m<sup>2</sup> store tagflade, der således ved 1D beregning er omsat til 10x12,5mm/m<sup>2</sup>. Fugtkilden afskæres ved fri vandmætning, dvs. hvis krydsfineren opnår et vandindhold på 100 % vil yderligere nedbør efterfølgende løbe af konstruktionen.

#### 9.2.11 Luftskifte og utæt dampspærre

Den øgede fugtmængde, der trænger op i tagkonstruktion som følge af en utæt dampspærre, kan ikke forventes fjernet selv ved kraftig ventilation af undertaget (Brandt E. , 2013). Til denne undersøgelse er anvendt en utæt dampspærre svarende til en revne på 1 mm x 1 m i en 80 m<sup>2</sup> tagflade, som beskrevet ovenfor i afsnit 9.2.10. Ligesom der er brugt luftskifter iht. tidligere beskrivelse i afsnit 9.2.3.

## 9.3 Bilag C: Tagrum, parametre og variationer

#### 9.3.1 Luftskifte, ventileret tagrum

Da luftgennemstrømning i tagrummet kan variere meget, idet den styres af forskelle i vindtryk og temperatur (Brandt E. , 2013), er undersøgt forskellige faste værdier for luftskiftet i tagrummet - baseret på (Walker & Forest, 1995) og (Wallentén, 2013).

En variant af luftskiftet i tagrummet er ikke udført med fast værdi, men er beregnet som "naturlig ventileret" med BSim-systemet *venting (udluftning)*, baseret på By og Byg Anvisning 202 (Andersen, Heiselberg, & Aggerholm, 2002). For simulering af naturlig ventilation er følgende ændret eller tilføjet:

- Ventilationsåbninger med bredde på 19 mm er tilføjet ved hver tagfod og kip i hele tagets længde tilnærmet (Brandt E., 2013), med udstrømningskoefficient Cd=0,65 og indblæsnings-temperaturkonstanten Ka=5. Rygning og tagudhæng er påbygget over åbningerne i bygningsmodellen.
- I dialog *Finish Property* er vindforhold *Wind Exposure* sat til *Semi-exposed* for konstruktionernes overflader - BSim standardværdi.
- Systemet venting, som definerer naturlig ventilation, er sat til automatic (combined kombineret opdrift- og tværventilation) med Max Airchange 50 h<sup>-1</sup> og Max Vind 0 m/s (naturlig ventilation kan forekomme uanset vindhastighed). Reguleringen er sat til Setpoint = -20 °C, SetP Co2 = 0 ppm, Faktor = 1, og tidsangivelse always.

Da ventilationsgraden / luftskiftets størrelse har stor unøjagtighed, er denne parameter gennemgående for studiet og vist sammen med hver af de øvrige parametre i resultatafsnittet.

#### 9.3.2 Isoleringstykkelse

Isoleringstykkelser, som er noget mindre end den typiske isoleringstykkelse for nybyggeri, er medtaget i beregningen for at få et bredere grundlag for analysen af effekten af en øget isoleringstykkelse. De valgte isoleringstykkelser er lidt mindre end tilsvarende valgte for paralleltaget, men dette opvejes af isoleringsmaterialets bedre isoleringsevne.

#### 9.3.3 Tag med skyggeforhold

For at simulere værste tilfælde af skyggepåvirkning er en skyggegiver (evt. træer) placeret noget væk fra tagfladen. Den nærmere placering er en distance af 10 m i sydlig retning med underside svarende til tagfod og en højde på 15 m. Bredde af skyggen er 30 m og er centeret i tagfladen.

#### 9.3.4 Isoleret undertag

For at nedsætte risikoen for skimmelvækst på tagunderlag af krydsfiner foreslås tilføjelse af ca. 50 mm trykfast isolering på udvendig side af krydsfineren (Byg-Erfa, 2011). Dette forhold er undersøgt for tegltaget, hvor det således er det faste undertag der isoleres. I beregningsmodellen er følgende tilføjet:

50 mm isoleringsmaterialelag mellem krydsfiner og tagpapmembran; *m11 - Stone Wool* med densitet 32 kg/m<sup>3</sup>, modstand 0 m<sup>2</sup>sPa/kg, Varmekapacitet 800 J/kg K, Varmeledningsevne 0,39 W/m K, damppermeabilitet 1,57x10<sup>-10</sup> kg/m s Pa ved 26 % RF og 1,70x10<sup>-10</sup> kg/m s Pa ved 72,5 % RF.

#### 9.3.5 Dampspærrens tæthed

Den fugtmængde, som tranporteres ved konvektion gennem utætheder i dampspærren, er bestemt ved metode, som beskrevet for paralleltaget i afsnit 9.2.10. Ligesom for paralleltaget er fugtbelastningens størrelse forårsaget af konvektion gennem en revne på hhv. 1 mm x 1 m og 10 mm x 1 m i den 80 m<sup>2</sup> store loftkonstruktion. Da BSim ikke kan håndtere fugttransport i konstruktioner ved konvektion er hele den beregnede fugtmængde placeret i tagrummet i beregningsmodellen ved tilføjelse af følgende:

En fugtkilde er placeret i tagrummet med systemet *MoistureLoad*, hvor fugtbelastning er sat til hhv. 0,028 kg/h for revnen på 1 mm x 1 m (1x12,5mm/m<sup>2</sup>) og 0,280 kg/h for revnen på 10 mm x 1 m (10x12,5 mm/m<sup>2</sup>) iht. beregning i afsnit 9.2.10, tidsangivelsen er sat til *HeatingSeason* (uge 39 - uge 19) med fuld døgnbelastning.

#### 9.3.6 BSim sammenlignet med WUFI

Bearbejdning af et helt års data fra BSim er som tidligere nævnt yderst tidskrævende. WUFI Pro er derfor også anvendt til beregning af fugtforholdene i tag med ventileret tagrum, da programmet generelt viser god overensstemmelse med feltmålinger under svenske klimaforhold (Mundt-Petersen & Harderup, 2015). Resultatet af beregningerne i BSim er sammenlignet med WUFI over en enkelt måned. Tagrummet med simulering af naturlig ventilation i BSim indgår ikke i sammenligningen. Dernæst er resultatet af WUFI beregningen vist for et helt kalenderår.

I WUFI er tagkonstruktionen opbygget som en tilnærmet 1-dimensionel beregningsmodel, Figur 37, hvor det ventilerede tagrum er moduleret som beskrevet i (Thelandersson, Isaksson, & Niklewski, 2014). Det består af to 130 mm luftspalter med ventilationen / luftskiftet placeret i nederste luftspalte. Det reelle luftskifte  $A_0$  er omregnet til en modelværdi  $A_m$  der er indtastet i beregningsmodellen, og beregnet som:

Ligning 5: Beregning af tagrummets luftskifte for beregningsmodel (Thelandersson, Isaksson, & Niklewski, 2014)

$$A_m = \frac{V}{a t} A_0$$

hvor

 $A_0$ er det reelle luftskifte  $[h^{-1}]$  $A_m$ er modelværdi af luftskifte til beregningsmodel  $[h^{-1}]$ Ver tagrummets volumen  $[m^3]$ aer tagrummets gulvareal  $[m^2]$ ter tykkelse af luftlag i beregningsmodel [m]

Med tagrummets volumen på 206 m<sup>3</sup> og areal på 80 m<sup>2</sup> er luftskiftet omregnet til følgende for:

- 
$$A_0 = 3 h^{-1} : A_m \approx 60 h^{-1}$$

- 
$$A_0 = 0,1 h^{-1} : A_m \approx 2 h^{-1}$$

-  $A_0 = 0,5 h^{-1} : A_m \approx 10 h^{-1}$ 

$$- A_0 = 6 h^{-1} : A_m \approx 120 h^{-1}$$

 $- A_0 = 10 \text{ h}^{-1} : A_m \approx 120 \text{ h}^{-1}$  $- A_0 = 10 \text{ h}^{-1} : A_m \approx 200 \text{ h}^{-1}$ 



Figur 37: Tag med ventileret tagrum, tværsnit i traditionel ventileret tagkonstruktion. 1-dimensionel beregningsmodel fra programmet WUFI, og med tilhørende materialelag.

Materialeparametre, indledende forudsætninger og randbetingelser for beregningsmodel i WUFI er som følger:

- Tagrummets øverste luftlag er *Air layer 130 mm* (med ekstra fugtkapacitet) med densitet 1,3 kg/m<sup>3</sup>, porøsitet 0,999 %, Varmekapacitet 1000 J/kg K, Varmeledningsevne 0,79 W/m K, Vanddampdiffusionsmodstandstal 0,1. Mens nederste lag er *Air layer 130 mm; without additional moisture capacity* med densitet 1,3 kg/m<sup>3</sup>, porøsitet 0,999 %, Varmekapacitet 1000 J/kg K, Varmeledningsevne 0,79 W/m K, Vanddampdiffusionsmodstandstal 0,1.
- Øvrige materialer er identiske med materialelag for paralleltaget, som fremgår af Tabel 1.
- Indledende forudsætninger og randbetingelser for beregningsmodellen i WUFI er som beskrevet i Tabel 2 for paralleltaget.