



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. semester

Titel på masterprojekt:

Fugtforhold i træunderlag for tagpap i
ventilerede tage

Projektperiode:

1. februar 2017 – 1. juni 2017

Vejleder:

Eva B. Møller

Martin Morelli

Studerende:

Jonas Kolbe

Studie nr.: 20157040

Antal normalsider: 43

Vedlagt kvittering fra Digital Eksamen

Afleveringsdato: 01.06.2017

Resume:

Udviklingen af flade tagkonstruktioner med tagdækning af tagpap har gjort, at disse i dag i højere grad påvirkes af skygge fra installationer på tagfladen og yderligere anvendes som underlag for grønne tage, der er stadig mere populære i den danske arkitektur. Samtidig er varmetilskuddet fra vores indeklima til tagkonstruktionen mindsket, som følge af øgede isoleringskrav.

Ved projektet undersøges, hvordan skyggeforhold og etablering af udvendig isolering eller grønne tage påvirker de fugttekniske forhold i træunderlaget for tagpap i ventilerede tagkonstruktioner. Samtidig undersøges det, hvorvidt et højere luftskifte i disse ventilerede tagkonstruktioner, kan sikre en mere fugtsikker tagkonstruktion.

Undersøgelsen er sket ved validering af en simuleret referencemodel på baggrund af reelle fugtmålinger fra 2016 i en ventileret tagkonstruktion. Den følgende del af undersøgelsen er udført som et parameterstudie af udvalgte konstruktionsparametre, for sammenligning af fugttekniske forhold i tagkonstruktionen.

Skyggeforhold på tagfladen kunne konstateres at give en væsentlig forøgelse af fugtniveaet i træunderlaget og af perioder med risiko for skimmelvækst på træunderlaget. Etablering af 50 mm udvendig isolering mellem træunderlag og tagpap viste sig at sænke fugtniveaet i træunderlaget og mindske perioderne med risiko for skimmelvækst på træunderlaget.

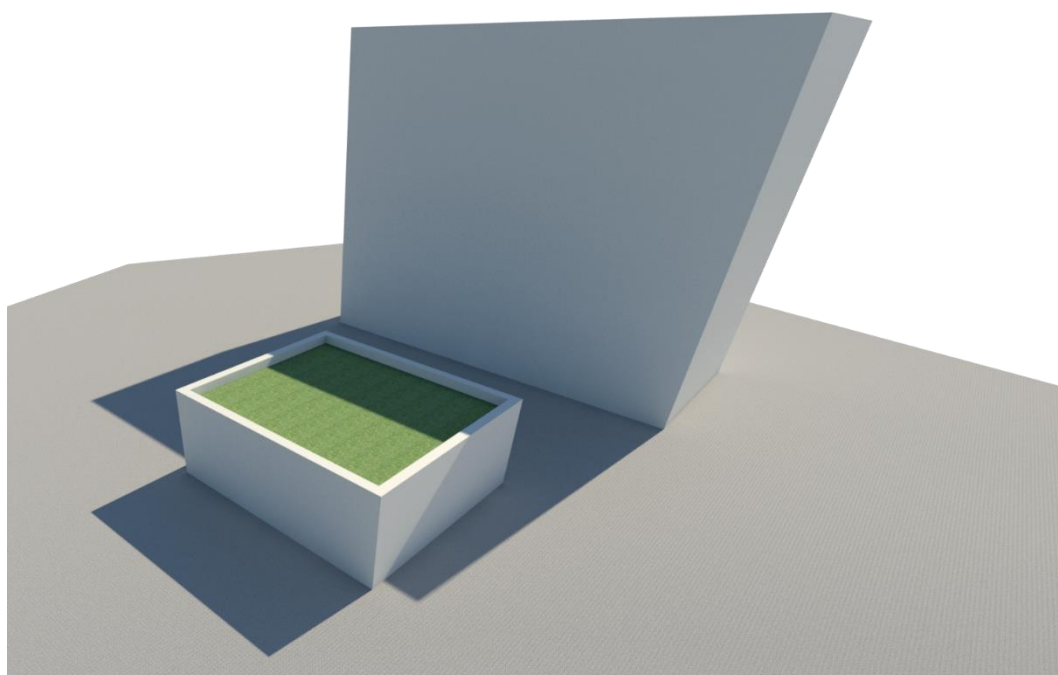
Etablering af grønne tage viste sig at resultere i en fugtteknisk forværring, hvor fugtniveaet blev forøget, ligesom risikoen for skimmelvækst på træunderlaget også blev forøget. Denne situation kunne forbedres ved etablering af 50 mm udvendig isolering under det grønne tag, idet dette gav en sænkning af fugtniveaet og af perioderne med risiko for skimmelvækst.

Det blev desuden vurderet, at det ikke var muligt at opnå en fugtteknisk mere sikker tagkonstruktion ved etablering af et markant højere luftskifte, uanset om der var tale om normale forhold, skyggeforhold eller forhold under grønne tage.



AALBORG UNIVERSITET

Fugtforhold i træunderlag for tagpap i ventilerede tage



4. semester F17

Vejledere: Eva B. Møller / Martin Morelli

Master i Bygningsfysik

Aalborg Universitet, København

Indhold

Resumé	4
Abstract	5
1. Indledning	6
2. Baggrund og teori	7
2.1 Problemformulering	8
2.2 Afgrænsning	8
2.3 Teori.....	9
2.3.1 Tagkonstruktioner.....	9
2.3.2 Grønne tage	14
2.3.3 Fugt i materialer og transport af fugt.....	16
2.3.4 Skimmelvækst på trædele	21
2.3.5 Solstråling	23
3. Metoder	26
3.1 Udeklimadata	26
3.2 Reference-fugtmålinger	28
3.3 Simuleringsprogrammer	29
3.5 Model for grønne tage	31
3.6 Vurdering af resultater	32
4. Materialer og forudsætninger	33
4.1 Konstruktioner	33
4.2 Beregningsforudsætninger, BSim.....	34
4.3 Beregningsforudsætninger, WUFI	37
4.4 Beregningsmodeller	40
5. Resultater	41
5.1 Validering af simuleringsmodel.....	41
5.2 Skyggevirkning.....	47
5.3 Udvendig isolering.....	49
5.4 Grønne tage	52
5.5 Risiko for skimmelvækst.....	58
6. Vurdering	66
6.1 Validering	66
6.2 Skyggevirkning.....	68
6.3 Udvendig isolering.....	69
6.4 Grønne tage	70

7. Konklusion	74
8. Bilag	76
9. Litteraturliste	77

Resumé

Udviklingen af flade tagkonstruktioner med tagdækning af tagpap har gjort, at disse i dag i højere grad påvirkes af skygge fra installationer på tagfladen og yderligere anvendes som underlag for grønne tage, der er stadig mere populære i den danske arkitektur. Samtidig er varmetilskuddet fra vores indeklima til tagkonstruktionen mindsket, som følge af øgede isoleringskrav.

Ved projektet undersøges, hvordan skyggeforhold og etablering af udvendig isolering eller grønne tage påvirker de fugttekniske forhold i træunderlaget for tagpap i ventilerede tagkonstruktioner. Samtidig undersøges det, hvorvidt et højere luftskifte i disse ventilerede tagkonstruktioner, kan sikre en mere fugtsikker tagkonstruktion.

Undersøgelsen er sket ved validering af en simuleret referencemodel på baggrund af reelle fugtmålinger fra 2016 i en ventileret tagkonstruktion. Den følgende del af undersøgelsen er udført som et parameterstudie af udvalgte konstruktionsparametre, for sammenligning af fugttekniske forhold i tagkonstruktionen.

Skyggeforhold på tagfladen kunne konstateres at give en væsentlig forøgelse af fugtniveauet i træunderlaget og af perioder med risiko for skimmelvækst på træunderlaget. Etablering af 50 mm udvendig isolering mellem træunderlag og tagpap viste sig at sænke fugtniveauet i træunderlaget og mindske perioderne med risiko for skimmelvækst på træunderlaget.

Etablering af grønne tage viste sig at resultere i en fugtteknisk forværring, hvor fugtniveauet blev forøget, ligesom risikoen for skimmelvækst på træunderlaget også blev forøget. Denne situation kunne forbedres ved etablering af 50 mm udvendig isolering under det grønne tag, idet dette gav en sænkning af fugtniveauet og af perioderne med risiko for skimmelvækst.

Det blev desuden vurderet, at det ikke var muligt at opnå en fugtteknisk mere sikker tagkonstruktion ved etablering af et markant højere luftskifte, uanset om der var tale om normale forhold, skyggeforhold eller forhold under grønne tage.

Abstract

The evolution of flat roof constructions with bituminous roofing felt has resulted in a greater influence of shading from installations now being located on the roof surface. Furthermore, green roofs are established on the flat, ventilated roof constructions, being increasingly popular in Danish architecture. At the same time, the heat from our indoor climate is reduced, due to increased insulation requirements.

This project investigates how shading, external insulation and green roofs affect the moisture conditions in wood substrate under roofing felt in ventilated flat roofs. Further is it investigated, whether higher air change rates in ventilated flat roofs, can ensure improved moisture conditions.

The study has been done by validating a simulated reference model by comparing the model with moisture measurements from 2016 in a ventilated flat roof. The following part of the study is performed as a parameter study of selected design parameters for comparison of moisture conditions in part of the roof structure.

Shading on the roof surface was found to significantly increase the moisture level in the wood substrate and increase periods with risk of mould growth on the wood. The insertion of 50 mm insulation between the wood substrate and the roofing felt was found to lower the moisture level and reduce the periods with risk of mould growth.

Green roofs proved to result in an increased moisture level and periods with risk of mould growth on the timber was also increased. This situation was found to be enhanced, by inserting 50 mm insulation between the roofing felt and wood substrate, under the green roof, which resulted in a lowering of the moisture level and of the periods with risk of mould growth.

In addition, it was found, that a significantly higher air change rate in the ventilated void did not result in improved moisture conditions, regardless whether the conditions were normal, with shading or with green roofs.

1. Indledning

Ventilerede tagkonstruktioner af træ er blevet opført gennem mange hundrede år, og tagdækning af tagpap har været kendt siden slutningen af 1700-tallet [1].

Alligevel er der sket en stor udvikling af disse tagkonstruktioner siden begyndelsen. Den flade tagkonstruktion vinder indpas i den danske arkitektur op gennem 1920'erne, og med det flade tag følger naturligt et ønske om, at udnytte pladsen på tagfladen. Det gælder både for ingeniørerne og deres ventilations- og solcelleanlæg, og for arkitekten og de stadigt mere populære grønne tage. Tagfladen omtales nu i større grad som "Den 5. facade" [2], og skal ikke længere blot udgøre klimaskærm, men bidrage mest muligt til bygningen og dennes arkitektur.

Samtidig skal der spares energi, hvilket skærper kravene til varmetab og øger mængden af isolering i tagkonstruktionerne [3]. Sænkning af varmetabet til det fri sænker ligeledes varmetilskuddet til det ventilerede hulrum og træunderlaget i tagkonstruktionen.

Denne udvikling gør at der fortsat er behov for, at vi sikrer os, at de flade ventilerede tagkonstruktioner med tagpap udføres på fugttechnisk forsvarlig vis, så fugtskader i tagkonstruktionen forhindres. Netop en forøget risiko for fugtskader i uventilerede tagkonstruktioner med grønt tag er konstateret ved [4], og i dansk regi menes grønne tage på paralleltage ifølge BYG-ERFA endnu ikke at være en veldokumenteret løsning [5]. Derudover menes skyggeforhold jf. [6] at kunne forøge risikoen for fugtskader i uventilerede tagkonstruktioner af træ, ligesom udvendig isolering mellem træunderlag og tagdækning jf. [7] menes, at kunne forbedre de fugttechniske forhold.

Med dette projekt ønskes der derfor, at undersøge hvordan ventilationsforhold, skygge og grønne tage påvirker fugtforholdene i træunderlaget for tagpapdækning, og om der er grund til at ændre måden vi bygger på i dag. Der undersøges desuden, hvorvidt der kan udføres mindre foranstaltninger i form af udvendig isolering, som kan gavne fugtforholdene.

Projektet udføres ved validering af aktuelle fugtmålinger fra 2016 fra en flad ventileret tagkonstruktion med tagdækning af tagpap. Valideringen sker med simuleringsprogrammer, hvorefter den følgende del af projektet udføres som et parameterstudie af udvalgte forhold. Projektet er udarbejdet som masterprojekt på 4. semester ved Masteruddannelsen i Bygningsfysik på Aalborg Universitet i København.

2. Baggrund og teori

Tagkonstruktioner med tagpap har været kendt siden slutningen af 1700-tallet, hvor den svenske læge Arvid Faxé fandt på at dyppe plader af pap i tjære og sand, som alternativ til datidens øvrige tagsten af ler eller skifer [1].

Langt senere, nemlig i slutningen af 1920'erne, vinder det flade tagpaptag indpas som modernismens arkitekters foretrukne valg af tagform. Det er oven i købet også her, at ønsket om taghaver – de grønne tage – præsenteres første gang, som en erstatning for det berøvede og nu bebyggede areal på jorden, og med en langt bedre udsigt [1]

Fra midten af 1920'erne og frem udføres det flade tag med tagpap f.eks. på Funkisvillaerne og Den Modernistiske Villa, og særligt fra 1960 bliver det flade tag med tagpap populært hos arkitekterne med de typiske rækkehuse [8].

I den spæde start med anvendelsen af tagpap på flade tagkonstruktioner med træ er der ikke megen information omkring ventilering af tagkonstruktioner med tagpap. Først i 1939 er det beskrevet i Københavns Byggeslov at "rummet under taget skal på forsvarlig måde ventileres" [9], og dette benævnes også senere hen i SBI-anvisning 5: Varmeisolering fra 1950 [10]. En forsvarlig måde defineres først nærmere i 1957 ved, at kravet til ventilation af det flade tag skal have et åbningsareal på mindst 1/300 del af det bebyggede areal, jævnt fordelt langs tagkanten [11]. Kravet slækkes senere til et åbningsareal på mindst 1/500 af tagets areal [12], hvilket har været næsten uændret sidenhen. I dag kan benyttes de anviste åbningsarealer på baggrund af bygningens størrelse eller anvendes reglen om et åbningsareal på mindst 1/500 af det bebyggede areal [13].

Selvom der ikke er sket store ændringer af kravet til ventilationsforholdene i de kolde tage, er der til gengæld sket markante skærpelser af kravet til varmeisolering af tagkonstruktionerne. Fra det første bygningsreglement i 1961 til det nuværende BR15 er kravet til mindste varmeisolering gået fra 0,40 W/m²K [14] til 0,20 W/m²K [3], altså en halvering for nye bygninger. Det anbefalede niveau for at overholde energirammen for nye bygninger er ca. 0,10 W/m²K [15], altså ¼ af kravet fra 1961. Der ledes derfor kun omkring ¼ af den tidligere mængde varme til det ventilerede hulrum i de kolde tagkonstruktioner.

Tagkonstruktionen bliver i arkitektmunde ofte omtalt som "Den 5. facade" [2], og indgår derved mere end tidligere i bygningens samlede arkitektoniske udtryk. Taget skal ikke længere blot beskytte mod regn, kulde og sne, men designes så det giver noget retur til os mennesker, som det var intentionen helt tilbage i 1920'ernes taghaver.

Netop de grønne tage bliver stadig mere populære, og med f.eks. Københavns Kommune som foregangsmand med retningslinjer om, at "tage med en hældning på 30 grader eller derunder så vidt muligt skal være grønne" [16] er der god grund til at tro, at det grønne tag bliver mere udbredt i Danmark end det allerede er tilfældet.

2.1 Problemformulering

På baggrund af resultaterne i dette projekt ønskes det belyst, hvorvidt de naturligt ventilerede tagkonstruktioner med fordel kan ventileres med et højere luftskifte for, at opnå en mere fugtsikker tagkonstruktion.

Derudover ønskes det afklaret om skyggeforhold på en flad, ventileret tagkonstruktion forværrer de fugttechniske forhold i træunderlaget, som det har kunne konstateret jf. [6], og om udvendig isolering bidrager til fugttechnisk forbedrede forhold for træunderlaget.

Endelig ønskes det at afklare om etablering af grønne tage på flade, ventilerede tagkonstruktioner bidrager til en forbedring af fugtforholdene for træunderlaget, og hvorvidt henholdsvis skyggeforhold eller udvendig isolering påvirker fugtforholdene yderligere.

2.2 Afgrænsning

Ved omhandlende projekt tages der udgangspunkt i at den udførte dampspærre er helt lufttæt, uanset at dette i praksis er meget svært opnåeligt. Dette er antaget af hensyn til de udførte simuleringer, og for at der ikke skal tages højde for utæthedernes indflydelse ved vurdering af resultaterne.

Der er ikke udført variationer i materialer inde i loftkonstruktionen. Betydningen af isoleringsmateriale, dampspærretype eller loftbeklædning er derved ikke undersøgt, selvom dette jf. [4] kan have en væsentlig betydning for fugtforholdene.

Undersøgelsen er udført med samme fugtbelastningsklasse – fugtbelastningsklasse 2 – ved alle beregninger. Denne fugtbelastningsklasse er vurderet bedst repræsentativ for referencemodellen og for flade ventilerede tagkonstruktioner med tagdækning af tagpap generelt. Der er ej heller udført variationer af det indvendige temperatursæt.

Udeklimaet er en væsentlig parameter for simuleringerne i projektet. Der er indhentet klimadata fra DMI, som derfor forudsættes at være valide. Da det normale Design Reference Year (DRY2013) ikke indeholder nedbør, er dette ikke anvendt som udeklima til parameterstudiet. Dette valg er yderligere beskrevet i afsnit 5.1.

Det er vurderet at udeklimaet i Danmark er tilstrækkelig sammenligneligt med udeklimaet i byerne, hvor forskningsprojektet til udarbejdelse af specifikationer til det grønne tag er udarbejdet, således at [17] kunne anvendes.

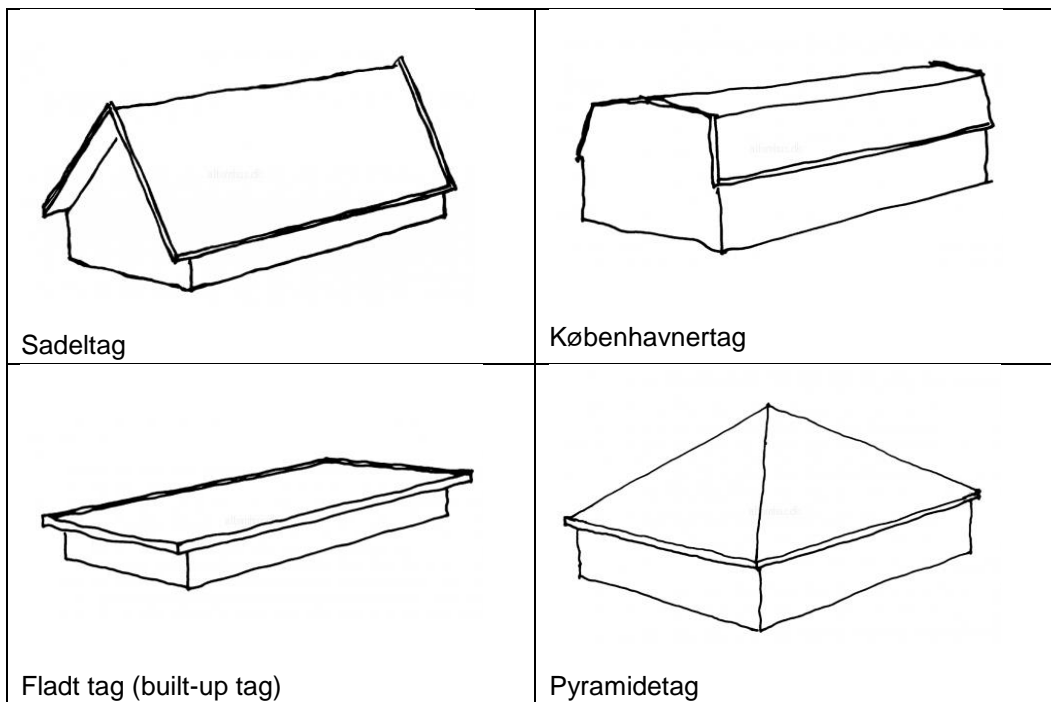
Ved vurdering af risikoen for skimmelvækst på træunderlaget i tagkonstruktionerne, er der ikke taget højde for varigheden af perioder med kritiske fugtforhold. Risikoen for skimmelvækst øges med varigheden af perioden med kritiske fugtforhold [18] og kan derfor også benyttes til den samlede vurdering af risiko for skimmelvækst.

2.3 Teori

2.3.1 Tagkonstruktioner

Ordet tagkonstruktion dækker overordnet over bygningens klimaskærm opadtil og rummer hele konstruktionen fra det indvendige loft til den udvendige tagdækning. Tagkonstruktionens primære formål er at sikre personer mod udeklimaets påvirkninger, herunder regn, sne, vind og kulde eller varme.

Samtidig rummer ordet et meget bredt spænd af tagformer. Det kan f.eks. være sadeltage, københavnertage, flade tage eller sågar pyramidetage. Nærværende projekt omfatter flade tage, også kaldet built-up tage. Benævnelsen "flade tage" definerer normalt tage med lille hældning, dvs. med maksimalt 10 graders hældning og mindst 1,4 grader (svarende til 1:40) af hensyn til bortledning af regnvand [19]. I dette projekt undersøges netop flade ventilerede tage med en hældning på 1:40. Den bærende konstruktion er af træ og underlaget for tagdækningen er ligeledes træbaseret.



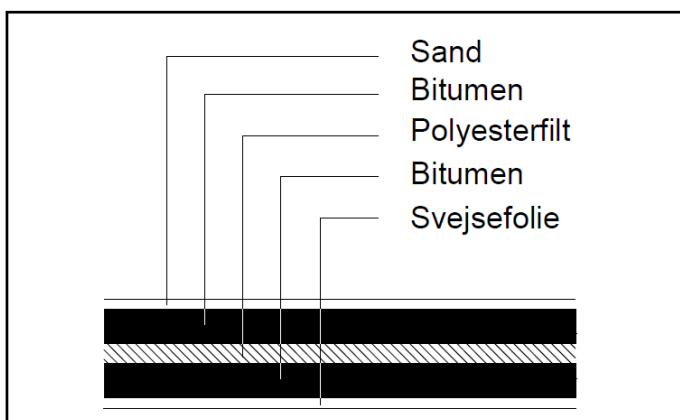
Figur 1: Eksempler på tagformer [20]

Tagpap

Tagkonstruktionens ydre tæthed kan udføres med flere forskellige typer af tagdækninger. Der kan være tale om f.eks. banevarer af tagpap eller tagfolie, tagsten, metalplader eller metalbeklædning. Vandtætheden kan udføres i det yderste lag, hvilket er tilfældet med tagpap, der svejses sammen i samlingerne. Andre typer tagdækning, f.eks. tagsten, behøver normalt et vandtæt underliggende lag, i form af et undertag.

I dette projekt er udvalgt tagkonstruktioner med tagdækning af tagpap. Tagpap består af et armeringslag, som er imprægneret med bitumen og belagt med bitumen på begge sider. Armeringslaget er normalt af polyesterfilt, som har gode elastiske, styrkemæssige og holdbare egenskaber, men det kan også være glasfilt eller glasvæv. Bitumen er et oliedestillat, som ofte kaldes asfalt i daglig tale. Oxyderet bitumen er den traditionelle bitumen som stadig anvendes, men til skandinaviske forhold er det fordelagtigt at anvende en SBS-bitumen, som har bedre elastiske egenskaber ved lave temperaturer. Betegnelsen SBS dækker over en kunstgummitype, som tilsættes til bitumenmassen (normalt omkring 10-15% SBS), hvorved de forbedrede elastiske egenskaber opnås. Der kan også anvendes APP-bitumen, hvor der i stedet er tilsat et plaststof til bitumenmassen, men dette er bedre egnet i de varmere klimaer [21]. Tagpap er normalt pålagt skifergranulat, sand, talkum eller svejsefolie på hver side. Bestrøningen med skifergranulat på oversiden anvendes normalt på overpap for at beskytte den underliggende bitumen mod solens UV-stråling, der nedbryder bitumenmassen på sigt.

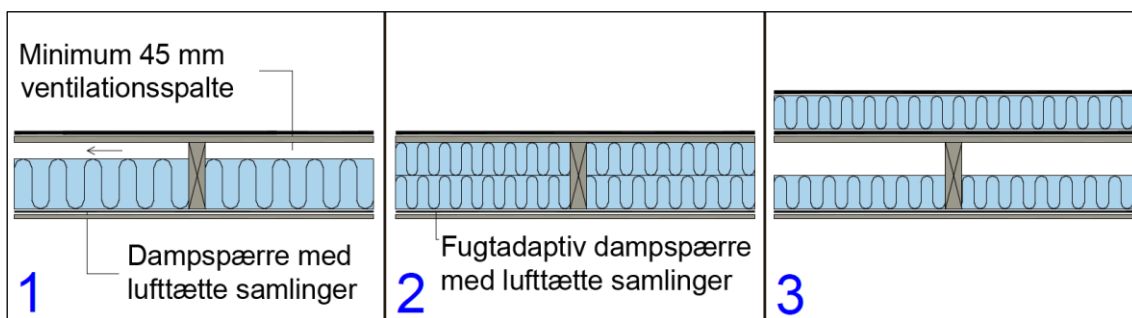
Tagpaptage udføres normalt med 2 lag, en underpap og en lidt tykkere overpap, som oftest svejses sammen til en ca. 8 mm tyk tagdækning. Underpappen er normalt angivet ved en tykkelse, der svarer til ca. 3.000 g/m² og bestrøet på oversiden med sand, mens overpappen har en tykkelse, der svarer til ca. 5.000 g/m² og er bestrøet med førnævnte skifergranulat.



Figur 2: Opbygning af et lag tagpap [22]

Varme og kolde tagkonstruktioner

Tagkonstruktioner opdeles ofte benævnt efter deres placering af isolering, dvs. som henholdsvis kolde eller varme tagkonstruktioner. I en varm tagkonstruktion placeres isoleringen oven på de bærende konstruktioner, så disse ligger varmt. I en kold tagkonstruktion placeres isoleringen mellem de bærende konstruktioner, så disse ligger delvist koldt. De kolde tage udføres almindeligvis naturligt ventilerede med udeluft, men kan også udføres uventilerede (se princippet for de tre typer på nedenstående figur). Da dette projekt omhandler kolde, ventilerede tagkonstruktioner vil de fugttechniske forhold i kolde uventilerede tage eller varme tage ikke blive beskrevet nærmere.



Figur 3: Nr. 1: koldt ventileret tag, nr. 2: koldt uventileret tag, nr. 3: varmt tag [23]

Naturlig ventilation med udeluft

Kolde ventilerede tagkonstruktioner ventileres almindeligvis naturligt med udeluft på den kolde side af isoleringen, dvs. mellem tagdækning og isolering. Dette bevirker at fugtig indeluft, som trænger op i tagkonstruktionen gennem utætheder eller ved diffusion ikke ophobes, men ventileres bort. Ophobet fugt pga.

underafkøling i tagkonstruktionen kan ligeledes ventileres bort når temperatur- og fugtforholdene er tilstrækkelig gunstige.

Ventilationen etableres ved at udføre åbninger jævnt fordelt langs tagkanterne på 2 sider af bygningen og en spalte på tværs, der kan forbinde disse åbninger.

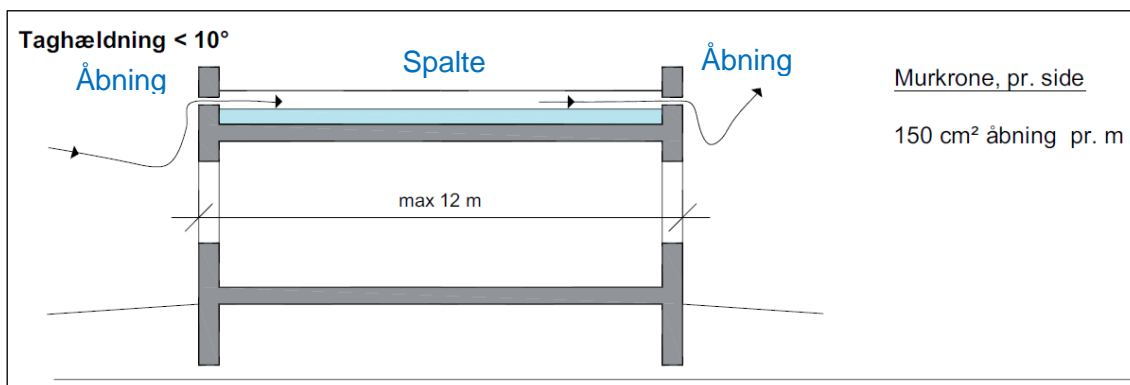
Luftbevægelsen sker, pga. forskelle i vindtryk og temperaturer. Ved flade tage er det dog hovedsageligt forskelle i vindtryk, da temperaturforskellene er små [13].

Størrelsen på ventilationsåbningerne afhænger af bygningens størrelse, idet åbningerne som hovedregel skal være mindst 1/500 af det bebyggede areal.

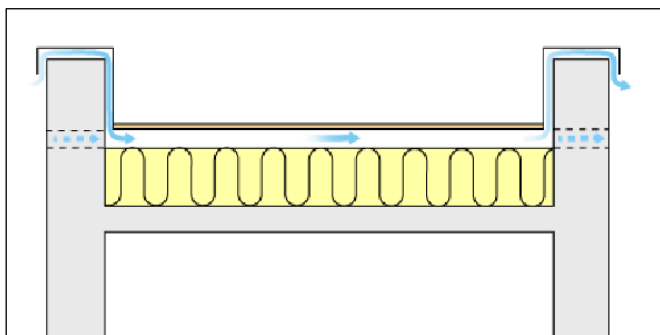
Ved flade tage på bygninger indtil 12 meters bredde kan åbningen f.eks. udgøres af en 15 mm høj åbning langs hele tagkanten, svarende til 150 cm² pr. meter (nettoareal). Udføres der spalter med snefangsrør eller insektnet skal dette areal normalt fordobles.

Åbninger ved murkroner udføres normalt ind under afdækningen af murkronen eller gennem punktvisse åbninger gennem murkronen (se nedenstående figur).

Ventilationsspalten mellem åbningerne skal på bygninger indtil 16 meters bredde være mindst 45 mm høj [24]. Ved større bygninger end dette må der foretages en konkret vurdering af den aktuelle tagkonstruktion.



Figur 4: Eksempel på arealer af ventilationsåbninger på flade tage [24]



Figur 5: Princip for ventilationsåbning ved murkroner. Ind under afdækningen af murkronen eller gennem punktvisse åbninger [25].

Fugtpåvirkninger

Ventilerede tagkonstruktioner udsættes for flere typer fugtpåvirkninger, og disse påvirkninger omfatter:

1. Nedbør, slagregn eller fygesne
2. Byggefugt
3. Fugt fra indeluften via diffusion eller konvektion
4. Fugtighed i udeluften
5. Kondensation af fugt i tagkonstruktionen pga. udstråling til rummet

Der sikres normalt mod alle former for *nedbør* ved konstruktiv fugtsikring, dvs. ved at sørge for at nedbøren ikke kan løbe eller blæse ind i tagkonstruktionen på nogen måde.

Byggefugt skal også undgås ved konstruktiv fugtsikring, så der ikke lukkes uhensigtsmæssige mængder af fugt inde i tagkonstruktionen, som efterfølgende skal udtørre naturligt. Risikoen for at der sker en opfugtning vil ved denne type tagkonstruktioner være størst under opførelsen, hvorfor sikring mod byggefugt ofte sker ved totaloverdækning eller interimsafdækning og ved sikring af tilstrækkelig tørre materialer inden lukning af konstruktionen.

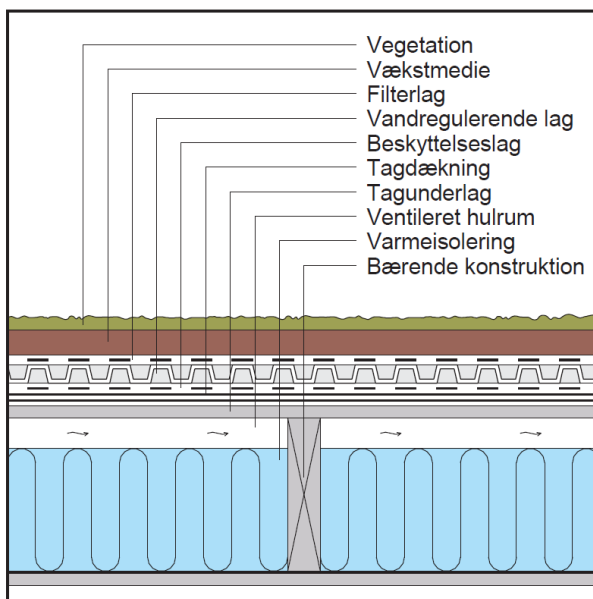
Sikring mod *fugt fra indeluften* via diffusion og konvektion udføres ligeledes konstruktivt ved etablering af så luft- og damp-tætte konstruktioner som muligt. I mange ventilerede tagkonstruktioner udføres dette f.eks. ved etablering af en dampspærre af plastfolie med tapede samlinger.

Fugtighed i udeluften påvirker den ventilerede tagkonstruktion, idet der ventileres med udeluft. Fugtniveauet i udeluften afhænger helt og aldeles af udeklimaet, hvorfor fugtpåvirkningen fra udeluften i naturligt ventilerede tagkonstruktioner er meget svær at styre.

Kondensation af fugt i tagkonstruktionen kan ske hvis fugtig indeluft trænger op i det ventilerede hulrum og møder en tilstrækkelig kold overflade. Derudover kan det ske som følge af underafkøling af tagfladen pga. udstråling til rummet. Underafkølingen pga. udstråling til rummet sker på skyfrie nætter, hvor temperaturen i rummet er lav pga. den manglende varmeeffekt fra solens stråling. Ved strålingsudveksling med tagfladen kan tagdækningen og underlaget derved blive koldere og under dugpunkttemperaturen for udeluften, hvilket resulterer i kondensdannelse på undersiden af underlaget for tagdækningen. Underlaget for tagdækningen kan bl.a. udgøres af træ, hvilket resulterer i opfugtning af træet. Kraftig ventilation af tagkonstruktionen kan derfor resultere i en øget fugtophobning, fordi det større luftskifte kan afsætte mere fugt som kondens, når luften passerer den underafkølede flade [7]. Fugten kan først ventileres bort når underlaget igen varmes op og udeluften kan optage fugten på vejen gennem tagkonstruktionen.

2.3.2 Grønne tage

Grønne tage, der som tidligere nævnt har været kendt i mange år, defineres som tagflader med forskellige former for beplantning. De grønne tage kan udføres på både varme og kolde tagkonstruktioner, og leverandørerne har specifikke beskrivelser for de grønne tage afhængig af hvilke krav, der stilles til brug, udseende, taghældning mv. Principielt kan de grønne tage opbygges som på nedenstående figur.



Kategori:	Vækstmedie [mm]:
Ekstensive grønne tage	≤ 60 mm
Semi-intensive grønne tage	60 – 150 mm
Intensive grønne tage	≥ 150 mm

Figur 6: princip for opbygning af grønne tage på en ventileret tagkonstruktion [26]

Normalt opdeles de grønne tage i tre kategorier: ekstensive, semi-intensive og intensive grønne tage, hvor tykkelsen af vækstmediet er afgørende.

De ekstensive grønne tage egner sig normalt ikke til ophold og kræver mindst vedligehold af de tre typer. Vegetationen består ofte kun af plantearten sedum, selvom mos ofte ses på de områder af taget, hvor vækstbetingelser ikke er gode nok til sedumplanterne. Vækstmediet udføres normalt i en højde på maksimalt 60 mm.

På de semi-intensive grønne tage består vegetationen normalt af græs eller urter, hvorfor der kræves et tykkere vækstmedie på 60-150 mm og samtidig et større vedligehold end på det ekstensive grønne tag.

På de intensive grønne tage er der langt større muligheder for forskellige typer af vegetationen, idet vækstmediet er mere end 150 mm. De intensive grønne tage er derfor mere velegnede til deciderede taghaver med ophold. Netop pga. de større planter og deraf større påvirkninger fra rodnettet udføres intensive grønne tage normalt på tagkonstruktioner udført som omvendte tage, hvor den vandtætte membran beskyttes af et lag isolering [26]. De intensive grønne tage er derfor normalt uinteressante i sammenhængen med kolde ventilerede tagkonstruktioner.

Fordelene ved etablering af de grønne tage spænder vidt ifølge tilhængerne. Der refereres både til øget æstetik og øget velvære pga. grønne omgivelser. De giver en bedre regnvandshåndtering pga. forsinkelse af regnvand og mindsker de høje temperaturer i storbyerne pga. naturlig afkøling ved evapotranspiration (afkøling pga. fordampning fra både jord og planter). Derudover nævnes også giver en forbedret luftkvalitet og en øget levetid på tagdækningen [27].

Fordelene er altså mange, men på den fugttekniske del er der endnu ikke nedfældet en enstemmig konklusion for de kolde tage med grønt tag. ”Grønne tage etableret på kolde tage er endnu ikke en veldokumenteret løsning” ifølge BYG-ERFA-bladet: Grønne tage [5]. Også TOR-vejledning 8: Grønne tage [26] beskriver, at etableringen af denne type tagkonstruktioner kan være kritisk, idet det grønne tag kan påvirke fugtforholdene i tagkonstruktionens trædele fordi solpåvirkningen reduceres. Opfugtning af trædele pga. underafkøling ved udstråling til himmelrummet menes dog også at blive reduceret, hvorfor der ifølge denne vejledning mangler forskningsbaseret viden, som kan hjælpe med at afklare disse forhold. Ventilerede paralleltag med grønt tag betragtes desuden som en risikobehæftet konstruktion, idet den ikke kan inspiceres for utætheder indefra [5].

Ifølge [4] kan etablering af grønne tage på kolde uventilerede tagkonstruktioner give anledning til problemer, idet udtørringspotentialer især i sommerperioden nedsættes. Heri konkluderes det også at materialevalget, herunder særligt valg af dampspærre-type og isolering er væsentlig for, om der kan opnås en fugtteknisk acceptabel konstruktion.

Ved svenske undersøgelser [28] er der sammenlignet fugt- og temperaturforhold i tagkonstruktioner med tagdækning af metalplader eller tagdækning med grønt tag (sedum). Der blev anvendt udeklimadata fra Stockholm og på baggrund af en række simuleringer i beregningsprogrammet WUFI 2D blev det konkluderet, at der ved tagdækning med grønt tag var en lavere risiko for vækst af skimmelsvamp end ved tagdækninger af metalplader.

2.3.3 Fugt i materialer og transport af fugt

Fugtoptagelse

For at forstå hvordan fugt transporteres gennem konstruktioner, er det vigtigt at have en grundlæggende forståelse for materialernes opbygning.

De fleste byggematerialer optager fugt, hvis de kommer kontakt med fugtige omgivelser, hvad enten dette er decideret vand eller høj luftfugtighed.

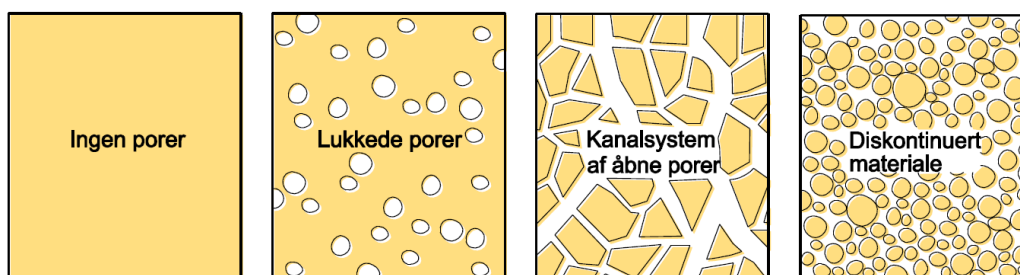
Optagelsen af fugt sker uanset om der er tale om fugt fra direkte vandpåvirkning, fra fugtige tilstødende materialer eller fra fugtig omgivende luft.

Optagelsen af fugten afhænger særligt af porestrukturen i det enkelte materiale, dvs. størrelsen og formen på porerne i materialet. Udover optagelsen af fugt i materialet, har porestrukturen også stor betydning for hvordan fugten kan transporteres gennem materialet.

Materialers poresystem opdeles almindeligvis i 4 kategorier, som vist i nedenstående tabel [13]:

Kategori	Beskrivelse	Eksempler
1	Materialer (kontinuerte) uden porer. Disse materialer kan ikke optage fugt, og kaldes derfor "ikke hygroskopiske"	Glas, metal
2	Materialer (kontinuerte) med lukkede porer. Hygroskopiske	Celleglas, ekstruderet polystyren (XPS)
3	Materialer (kontinuerte) med kanalsystem af åbne porer Hygroskopiske	Træ, beton, tegl
4	Materialer (diskontinuerte) med sammenhængende porer Hygroskopiske	Sand, grus, Mineraluld

Tabel 1: Kategorier for materialers poresystem.



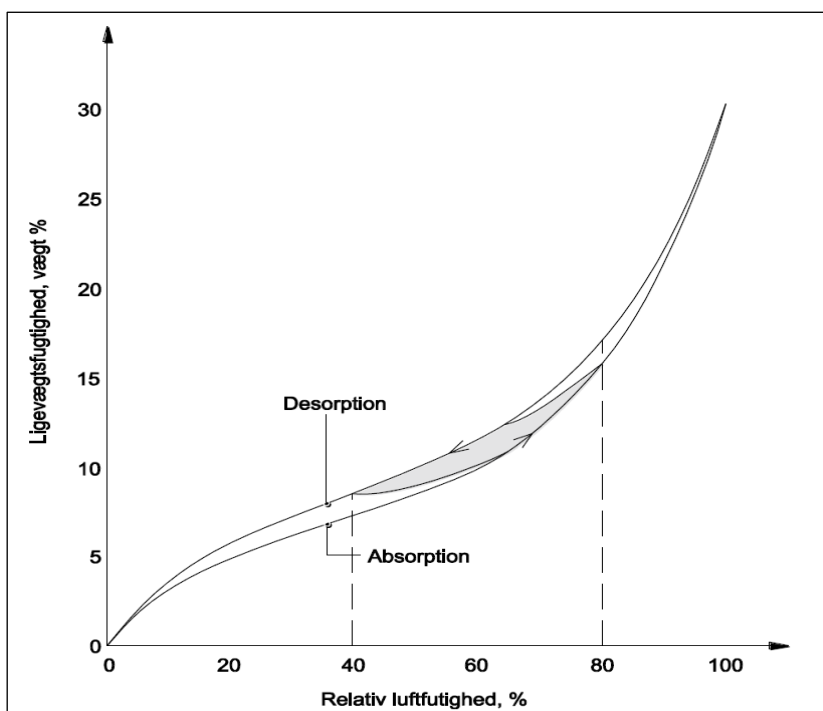
Figur 7: Grafisk princip på de 4 poresystemer. Fra venstre ses nr. kategori 1 [13].

Mange byggematerialer er hygroskopiske og har et kanalsystem med åbne porer eller helt sammenhængende porer, hvorfor de hører til kategorierne 3 og 4, som er gennemtrængelige for fugt i større eller mindre grad.

Hygroskopiske materialer kan optage fugt ved absorption eller kapillarsugning. Ved absorption er der tale om optagelse af fugt fra dampform, hvor der ved kapillarsugning er tale om opfugtning fra væskeform.

Hvis man ønsker at sammenligne eller vurdere et materiales fugttekniske egenskab ser man gerne på materialets sorptionskurver. Disse kurver viser vandindholdet i materialet når dette er i ligevægt med luft i forskellige relative fugtigheder, både når materialet opfugtes ved absorption og når materialet udtørres ved desorption. Kurven for desorption ligger normalt lidt højere end ved absorption, også kaldet hysteres, og materialer kan derfor normalt indeholde mere vand ved f.eks. 70% RF når det udtørres end når det opfuges. I praksis bruges dog ofte en middelkurve for de to scenarier [13].

Materialernes fugtkapacitet kan også aflæses af sorptionskurverne, idet materialer med en stejl kurve har en højere fugtkapacitet end materialer med en flad kurve. Her skal det dog nævnes at fugtkapaciteten ikke inddrager materialernes densitet, hvorfor man må huske også at tage hensyn til dette ved sammenligning af materialer.



Figur 8: Princip for sorptionskurver med absorption og desorption [29].

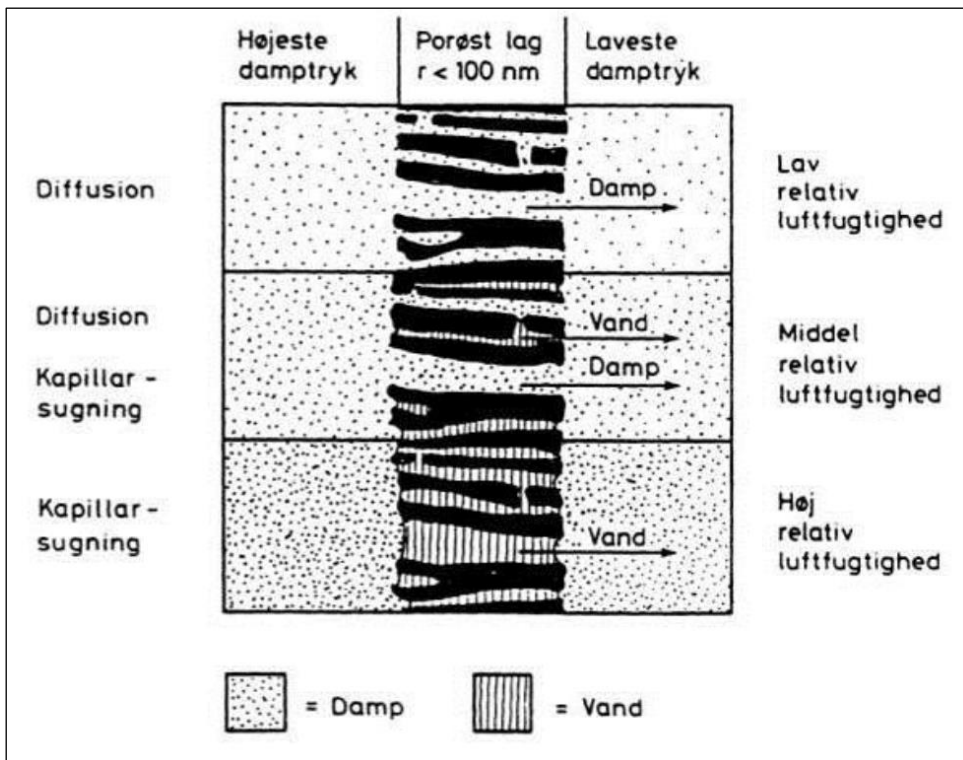
Kapillarsugning

Ved kapillarsugning optager materialet som tidligere nævnt fugt fra væskeform. Generelt vil materialer med grove porer optage vand hurtigere end materialer med fine porer. Til gengæld kan fugten vandre længere op (en højere stighøjde) i materialer med fine porer. Et praktisk eksempel er en teglstensfacade, hvor teglstenen har en grov porestruktur som opfugtes hurtigt nedefra. Modsat en pudset facade, hvor pudsen har en fin porestruktur, der opfugtes langsommere nedefra, men hvor fugten transporteres længere op [13].

Fugttransport

Fugttransport gennem materialer i bygningskonstruktioner kan ske både i dampform og væskeform, og sker altid pga. en forskel i potentialet på hver side af materialet. Siden med det højeste potentiale definerer retningen for fugttransporten, fra højt mod lavt, og størrelsen af forskellen mellem potentialerne definerer hvor hurtigt og hvor meget fugt, der transporteres. For fugttransport kan potentialet f.eks. være vanddamptryk eller vandtryk.

Fugttransport i dampform kan ske ved henholdsvis diffusion, konvektion og effusion (fugttransport pga. termiske forskelle). Fugttransport i væskeform sker normalt ved kapillarsugning eller ved væskeledning som følge af tryk.



Figur 9: Diffusion og kapillarsugning [30].

Diffusion

Fugttransport ved diffusion sker ved bevægelse af vandmolekyler i luften, eller i luften inde porøse materialer, og fugttransporten drives af potentialeforskelle i damptryk eller vanddampindhold. Det vil sige at områder med høje koncentrationer af vandmolekyler vil forsøge at skabe ligevægt med nærtliggende områder, hvor koncentrationen af vandmolekyler er lavere.

Diffusion kan beskrives ved Fick's 1. lov for diffusion [13]:

$$g = -\delta \cdot \frac{\Delta p}{d}, \text{ hvor}$$

$$g = \text{dampstrømtæthed} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \right]$$

$$\delta = \delta_v, \text{ vanddamppermeabiliteten} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \text{ eller}$$

$$\delta_p, \text{ vanddamppermeabiliteten} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m s Pa}} \right]$$

$$\Delta p = \text{potentialeforskellen ved damptryk [Pa] ell. vanddampindhold} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$d = \text{tykkelsen af materialet [m]}$$

Vanddamppermeabiliteten definerer således den vanddampstrøm, som går gennem en fladeenhed ved en given gradient. Ved fugttekniske beregninger anvendes normalt også vanddampdiffusionsmodstanden, betegnet Z-værdien, og denne defineres ved:

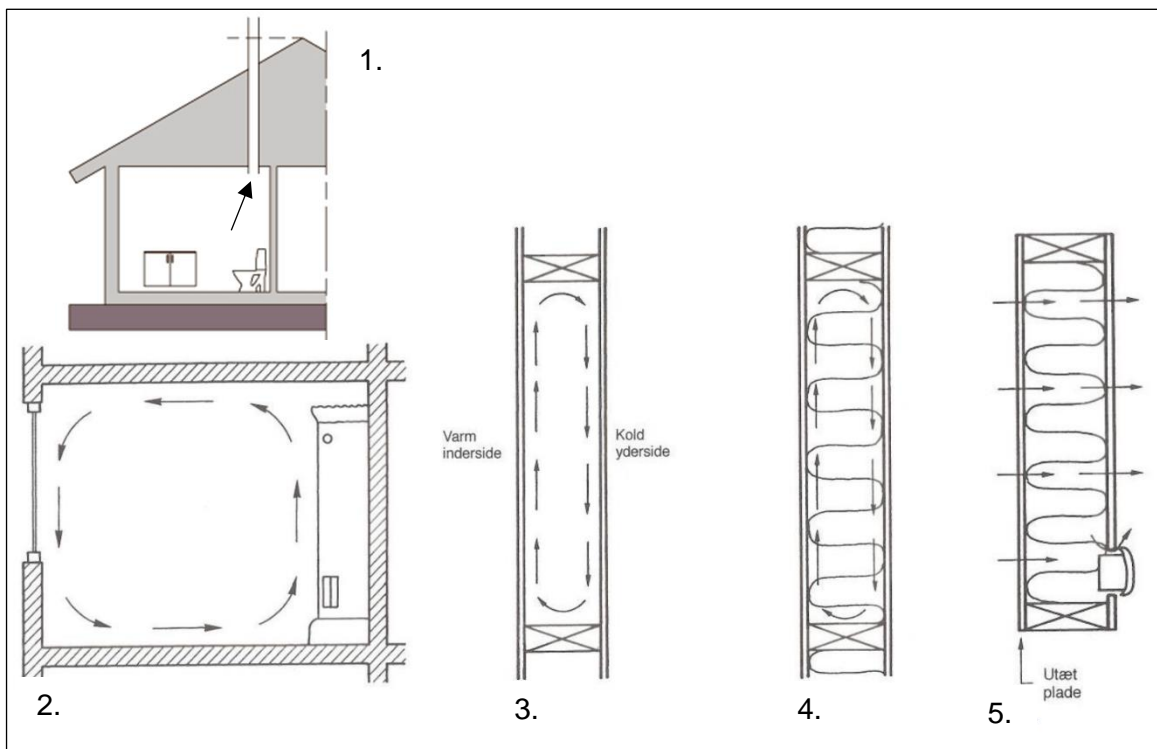
$$Z = \frac{d}{\delta_p} \left[\frac{\text{GPa s m}^2}{\text{kg}} \right], \text{ hvor}$$

$$d = \text{tykkelsen af materialet}$$

Ovenstående er gældende for stationære forhold, hvor der er et balanceret forhold mellem tilført og fjernet fugt. I praksis er forholdene ikke-stationære (dynamiske), hvorfor der ved beregning af fugtstrømning benyttes numeriske metoder, som tager udgangspunkt i stationær fugttransport.

Fugtkonvektion

Ved fugttransport via konvektion sker transporten ved at vanddampindholdet i luften flyttes sammen med en luftstrøm. Luftstrømmen etableres ved at der dannes en forskel i lufttrykket over luftvolumenen, hvilket kan skyldes vindpåvirkning på bygningen, mekanisk ventilation eller temperaturforskelle (f.eks. skorstenseffekt). Naturlig konvektion forekommer flere steder i vores byggeri, f.eks. i aftrækskanaler, i vores indeklima, i luftfyldte spalter i bygningskonstruktioner, i meget porøse isoleringsmaterialer og sågar gennem utætte bygningsdele.



Figur 10: Principper for konvektion. 1. Aftrækskanaler, 2. Indeklimaet, 3. Luftfyldte hulrum, 4. Meget porøse isoleringsmaterialer, 5. Gennem utætte bygningsdele [31].

Luftstrømmen gennem et porøst materiale på grund af en trykforskel kan beregnes ud fra tilnærmede formler baseret på Darcys lov, hvoraf det fremgår at luftstrømmen ved konvektion er proportional med lufttrykket over konstruktionen, arealet og materialets luftgennemtrængelighed [13].

Dannes disse trykforskelle over f.eks. en tagkonstruktion vil der ved konvektion kunne transporteres luft og vanddamp op gennem utætheder i konstruktionen. Særligt på flade tage, hvor der almindeligvis er undertryk på tagfladen, sammen med et let overtryk indenfor ved loftet (pga. skorstenseffekten), er det vigtigt at der udføres en lufttæt konstruktion, så fugtkonvektion forhindres.

Hvis vanddamp transporteres ved konvektion fra indeklimaet og ud gennem konstruktionen til den kolde side, stiger den relative luftfugtighed og der er risiko for kondensdannelse på konstruktionens koldeste overflader [13].

2.3.4 Skimmelvækst på trædele

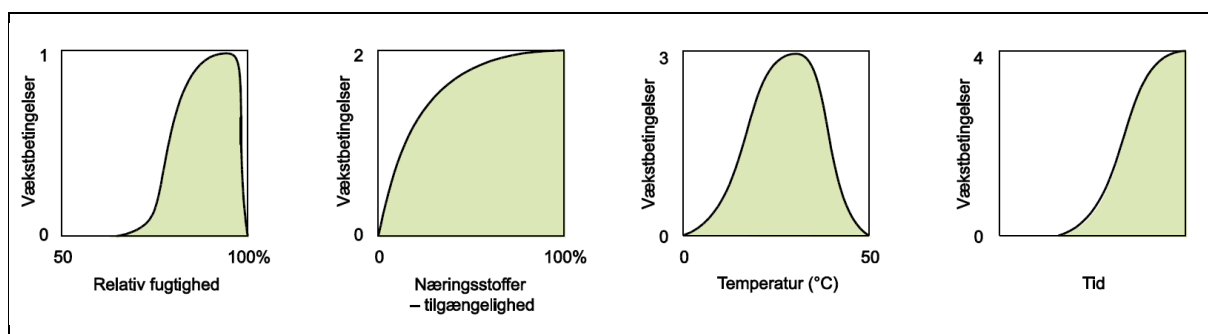
I et organisk materiale som træ er der risiko for vækst af både skimmelsvampe og trænedbrydende svampe, hvis fugtniveauet i materialet bliver tilstrækkeligt højt. Skimmelsvampe vokser på materialets overflade i modsætning til de trænedbrydende svampe, der vokser ind i træet.

Det kritiske fugtindhold for angreb af skimmelsvamp er normalt 15-16% træfugt – svarende til 75% RF, hvorimod det kritiske fugtindhold for nye angreb af trænedbrydende svampe normalt er 20% træfugt – svarende til ca. 87% RF.

Derfor vurderes bygningskonstruktioners fugtforhold normalt på baggrund af risikoen skimmelsvamp, der kan opstå ved de laveste fugtforhold. Nogle arter af trænedbrydende svampe kan dog videreudvikles efter et tidligere angreb ved ned til 15% træfugt – svarende til ca. 73% RF [13].

Vækst af skimmelsvampe er ikke kun afhængig af fugtniveau, men af flere faktorer:

1. Relativ fugtighed	Vækst af skimmelsvamp sker kun ved forholdsvis høj relativ fugtighed, og ved for høje fugtniveauer omkring 100% forværres vækstbetingelserne
2. Næringsstoffer	Svampene skal have næring, hvilket i omhandlende tilfælde udgøres af træunderlaget. Næringen kan også bestå af andre organiske materialer eller støv på overfladerne.
3. Temperatur	Vækst af skimmelsvamp er størst omkring 20-30°C og mindre ved lavere eller højere temperaturer end dette. Under 0°C eller over 50°C ophører væksten normalt
4. Tid	Vækst af skimmelsvamp kræver en vis tid, som er forskellig afhængig af de andre ovenstående faktorer.

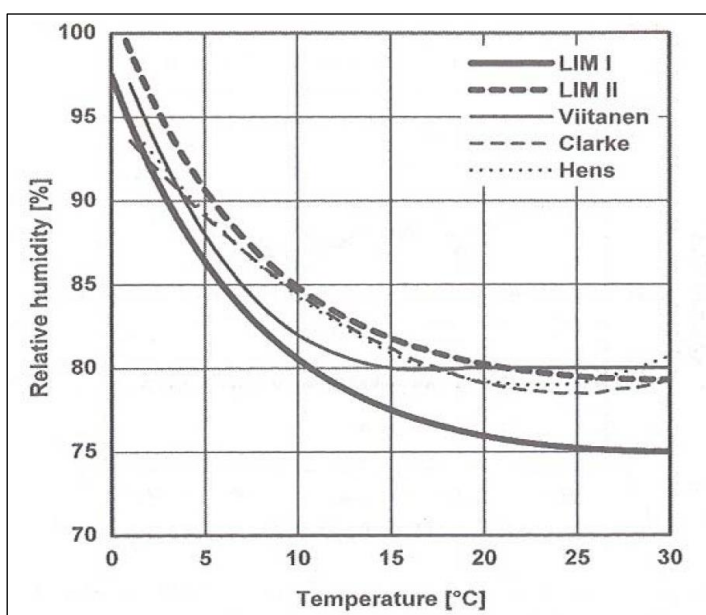


Figur 11: Faktorer for vækstbetingelser for skimmelsvampe [13].

Det kritiske fugtniveau for skimmelvækst er derved ikke en fast størrelse. Temperaturen indflydelse kan inddrages i vurderingsgrundlaget ved anvendelse af en række skimmelmodeller, som er udarbejdet på baggrund af en række laboratorieforsøg. På nedenstående figur kan ses en sammenligning af forskellige skimmelmodeller, hvor der tages højde for temperaturens betydning [32]. Der findes desuden i dansk sammenhæng forskningsprogrammet "Skimmelsvampe i bygninger" [33], hvor der blev fundet følgende funktion for det kritiske fugtniveau for træ og træbaserede materialer:

$$RF_{\text{kritisk}} = 0,02 \theta^2 - 1,18 \theta + 95,2, \text{ hvor } \theta = \text{Temperatur } [^{\circ}\text{C}]$$

Denne funktion er jf. [33] meget sammenlignelig med Viitanen's skimmelmodel fra 1999. Afhængig af de aktuelle forudsætninger kan disse skimmelmodeller anvendes til vurdering af risikoen for skimmelvækst på materialer i bygningskonstruktioner.

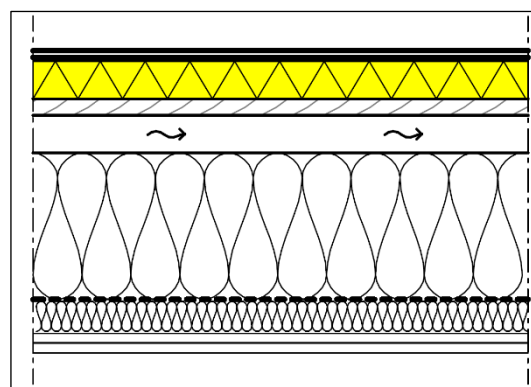


Figur 12: Sammenligning af skimmelmodeller. LIM I og LIM II fra Sedlbauer (2001), Viitanen (2000), Clarke (1998), Hens (1999) fra [32]

Udvendig isolering

Ved skimmelvækst på træunderlag for tagpap kan der jf. [7] suppleres med 45-50 mm trykfast isolering mellem træunderlag og tagpap, idet dette øger træunderlagets temperatur. Dette ændrer fugtforholdene i træunderlaget, så skimmelvækst modvirkes, da den relative fugtighed sænkes. Denne løsning er undersøgt som en del af parameterstudiet og benævnes som "udvendig isolering" i projektet, fordi isoleringen placeres uden på det ventilerede hulrum. Den kan dermed ikke forventes at have den normale varmeisolerende effekt.

En lignende løsning anbefales ligeledes i [26], idet der kan udføres et ekstra lag tagdækning og sladreafløb fra isoleringslaget, for synliggørelse af utætheder i tagdækningen under paralleltage med grønt tag.



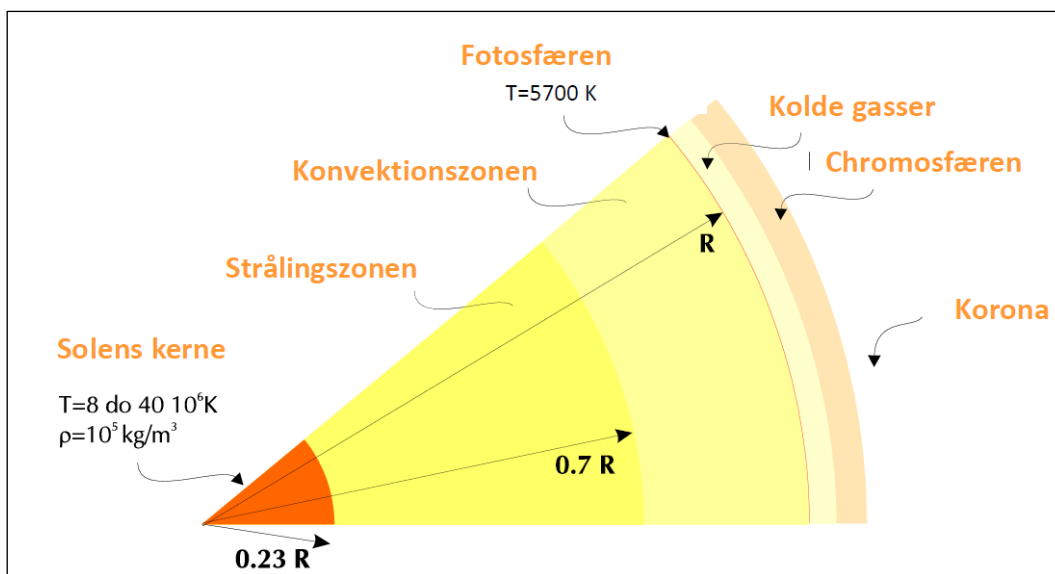
Figur 13: Princip for udvendig isolering på ventilerede tagkonstruktioner (egen figur)

2.3.5 Solstråling

Solen er en enorm energikilde og er derfor også en væsentlig parameter ved udarbejdelsen af fugttekniske beregninger.

Solen består af flere lag uden på en kerne, hvor solenergien genereres. I kernen er temperaturen nemlig så høj, at brintatomer kan fusionere og blive til heliumkerner, hvilket skaber al solens energi.

Uden om kernen ligger strålingszonen, hvor solenergien bevæger sig ud gennem. Herefter ligger først konvektionszonen og derefter fotosfæren, hvorfra solen afgiver varme som elektromagnetisk stråling med en temperatur på 5700 K og i en bølgelængde på 0,3 – 3,0 μm . Størstedelen af energien udsendes som synligt lys og infrarød stråling, og en mindre del udsendes som ultraviolet lys.



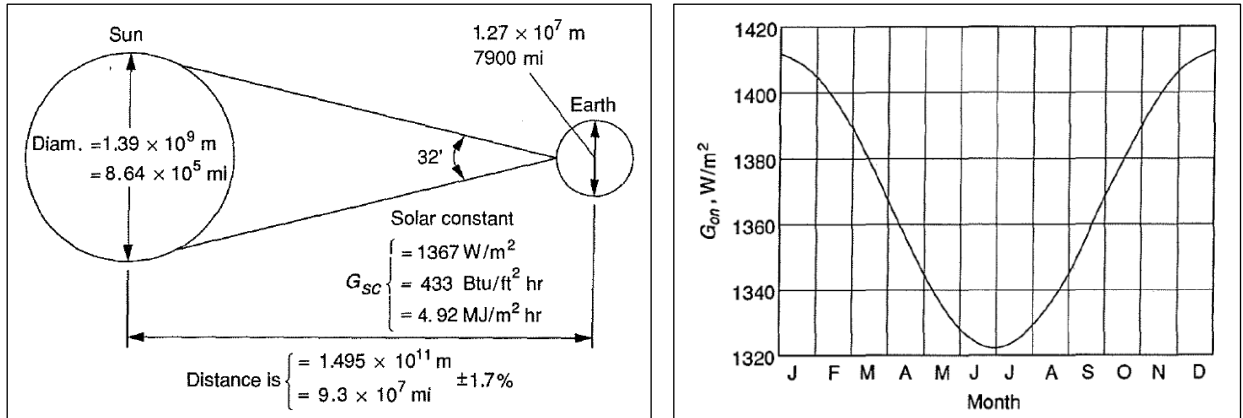
Figur 14: Solens opbygning [34].

Solkonstanten

Ved hjælp af Stefan Boltzmann's lov kan den totale varmestrøm, der strømmer ud fra solens fotosfære beregnes og dernæst kan også solkonstanten (G_{sc}) beregnes. Solkonstanten er justeret af flere omgange gennem tiden til den værdi, som normalt anvendes i dag på 1367 W/m^2 . Solkonstanten definerer den energi, som rammer en overflade vinkelret på strålingens retning uden for atmosfæren. Denne solkonstant er i virkeligheden ikke konstant, idet den varierer henover året med ca. $\pm 3\%$ som følge af en varierende afstand mellem solen og jorden pga. jordens elipseformede bane om solen. Dette tages der hensyn til ved følgende formel [35]:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360n}{365} \right)$$

Hvor G_{on} er den aktuelle solkonstant i W/m^2 på den n 'te dag i året.

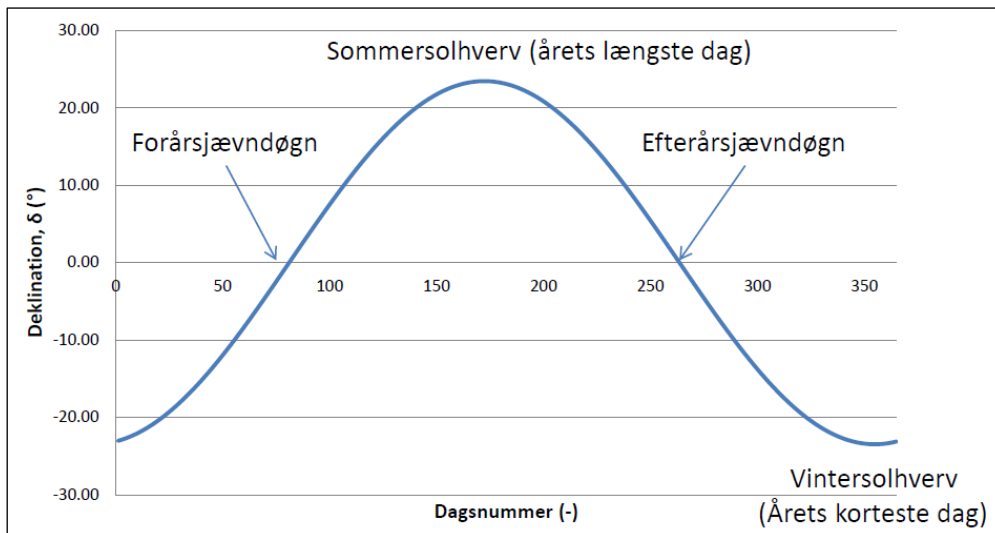


Figur 15: Visuel oversigt over forholdet mellem solen og jorden, samt solkonstanten over året [35].

Solens deklination

Udover solkonstanten spiller også solens position på himlen en vigtig rolle for mængden af solens stråling henover året et givent sted på jorden. Solens position beskrives ved solens deklination, som angiver vinklen mellem en linje vinkelret på ækvator og solen, når solen står på sit højeste – også kaldet solens zenit. Solens deklination bevæger sig mellem $-23,45^\circ$ og $+23,45^\circ$ og kan beregnes jf.:

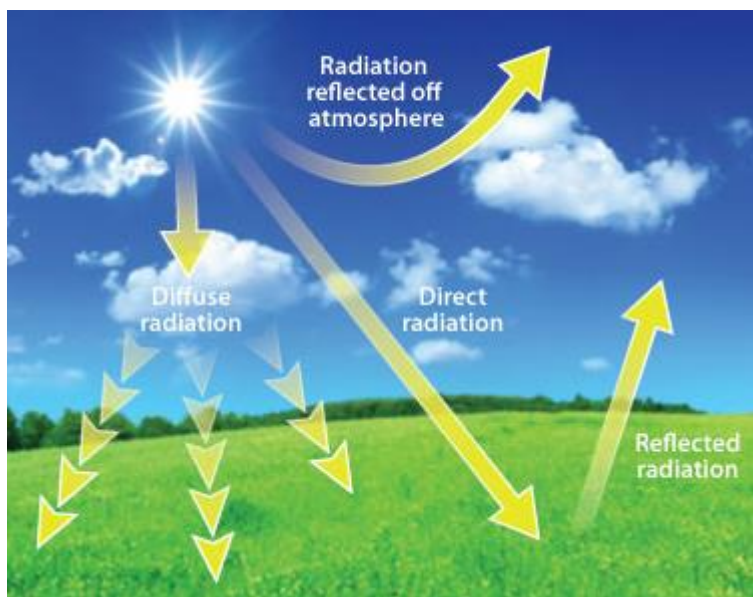
$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right), \text{ hvor } n \text{ er dagsnummeret på dagen.}$$



Figur 16: Solens deklination [34]

Strålingstyper

Udenfor atmosfæren betegnes mængden af stråling som den udenjordiske stråling. Når solstrålingen passerer jordens atmosfære absorberes og spredes en del af strålingen pga. indholdet af gasser og partikler i vores atmosfære. Den samlede solstråling er derfor lavere på jordens overflade end uden for atmosfæren. Summen af stråling, som når gennem atmosfæren betegnes som globalstrålingen. Globalstrålingen består af summen af direkte stråling og diffus stråling. Den direkte stråling er den stråling, som er nået igennem atmosfæren uden at have ændret retning. Den diffuse stråling er den stråling som er blevet spredt på vejen gennem atmosfæren og som er reflekteret i atmosfæriske komponenter som f.eks. skyer. Derudover er der yderligere en mængde af strålingen som reflekteres fra jordens overflade – den atmosfæriske modstråling [35].



Figur 17: Stråling fra solen [36]

3. Metoder

Til projektet anvendes den naturvidenskabelige metode, idet der først er indsamlet empirisk data som baggrund for at kunne opbygge en model og derpå simulere en række udvalgte konstruktionsparametre. Der er indsamlet klimadata fra 2016 og fugtmålinger i et træunderlag for tagpap på et fladt, ventileret tag, til brug for validering af den forudsatte referencemodel. Valideringen er foregået efter en iterativ proces, idet modelopbygning, simulering, analyse og sammenligning med praktiske fugtmålinger er fuldendt før den følgende del af projektet kunne gennemføres.

Herefter er der benyttet kvantitative metoder, et såkaldt parameterstudie, for at kunne sammenligne resultater fra forskellige situationer med referencemodellen og med hinanden.

Parameterstudiet er udført som en mere agil proces, idet formålet kendes ved begyndelsen af projektet. Undervejs indbyder nogle resultater dog til flere spørgsmål, hvilket betyder at der flere gange undervejs er afgrænset eller udbygget afhængig af resultaterne.

3.1 Udeklimadata

En væsentlig del af forudsætningerne for fugtberegninger er de anvendte udeklimadata. Da det er ønsket at validere faktiske fugtmålinger fra 2016, er der indhentet klimadata fra DMI's vejstation Sjælsmark. Sjælsmark er udvalgt på baggrund af, at målestationen er den nærmeste placerede på referenceprojektet i Jægersborg, som samtidig måler næsten alle de nødvendige klimaparametre. De indhentede data omfatter temperatur, relativ fugt, vindhastighed, vindretning, lufttryk, globalstråling, skydække og nedbør.

En sidste, men nødvendig parameter for udeklimaet er den diffuse stråling på en vandret overflade. Den diffuse stråling er beregnet på baggrund af den målte globalstråling fra DMI, ved forholdet mellem den diffuse stråling, den globale stråling og det timemæssige clearness index iht. "Erbs et al" [35].

Forholdet beregnes ved følgende:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.09k_T & \text{for } k_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4 & \text{for } 0.22 < k_T \leq 0.80 \\ 0.165 & \text{for } k_T > 0.8 \end{cases} \quad (2.10.1)$$

Figur 18: Erbs et al korrelation [35]

Clearness index, K_T beregnes ved:

$$K_T = \frac{I \text{ (Globalstråling)}}{I_o \text{ (Udenjordisk stråling)}}$$

Derfor må først beregnes den timemæssige udenjordiske stråling (extraterrestrial radiation).

Denne beregnes ved:

$$I_o = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \phi \cdot \sin \delta)$$

Hvor:

G_{sc} = Solkonstant, 1367 W/m²

n = nummer på dagen

ϕ = Breddegrad på lokationen

δ = Jordens deklination

ω = Solens timevinkel

Den timemæssige diffuse stråling i W/m² er herved beregnet til de anvendte klimafilere i beregningsprogrammerne.

3.2 Reference-fugtmålinger

Faktiske fugtmålinger til brug for validering af beregningsresultaterne er udført med langtidsmåling af fugt- og temperaturforhold i en tagkonstruktion beliggende i Gentofte. Tagkonstruktionens opbygning er den samme, som benyttes i referencemodellen.

Fugtmålingerne er udført ved montering af en fugtmålerondel på undersiden af tagbrædderne iht. [37] i forbindelse med en renovering af tagkonstruktionen. En fugtmålerondel består af en 12 mm krydsfinerskive med en diameter på 50 mm, hvori der er monteret 2 elektroder. Elektroderne er monteret med en afstand på 15 mm hvorimellem en elektrisk modstand kan måles, f.eks. med et Ohmmeter. Fugtrondellen er kalibreret og modstanden kan derfor omsættes til et absolut vandindhold i vægtprocent med $\pm 1\%$ nøjagtighed.

Den målte modstand skal dog temperaturkorrigeres, såfremt temperaturen afviger fra 20°C, hvilket er væsentligt ved måling i træunderlag for tagpap, hvor udetemperaturen og solpåvirkningen har stor indflydelse på temperaturen i målepunktet. Den elektriske modstand korrigeres efter den målte temperatur i et indbygget termoelement.

Målingerne udføres hver ½ time og sendes trådløst via en transmitter på fugtrondellen til en dataopsamlinger placeret i bygningen. Via telefonnetværk i dataopsamleren sendes alle målinger én gang i døgnet til en server, hvorfra målingerne præsenteres og kan downloades på en hjemmeside [38].

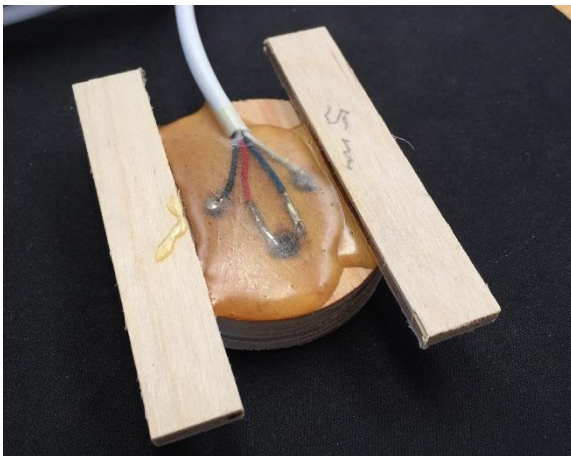


Foto 1: Elektronisk fugtrondel



Foto 2: Placering af elektronisk fugtrondel i tagkonstruktionen

3.3 Simuleringsprogrammer

BSim

Beregningsprogrammet BSim kan bl.a. beregne fugttransporten gennem konstruktionernes materialer ved diffusion [39]. Denne egenskab og programmets øvrige muligheder for at definere parametervariationer på konstruktioner, indeklima, udeklima, ventilationsforhold og skygger danner baggrund for, at det er valgt som analyseværktøj i parameterstudiet. Det skal dog bemærkes at BSim ikke regner med konvektion gennem konstruktionerne.

I BSim består en bygning af et antal termiske zoner, der adskilles fra hinanden, fra udeluften og/eller fra andre eventuelle fiktive zoner. Adskillelsen består af bygningsdele sammensat af brugeren.

I en numerisk model som BSim, er de tidsmæssige forløb af forskellige processer (der i virkeligheden ændres kontinuert), beskrevet ved ændringer fra ét tidsskridt til et andet, hvor tidsskridtene er af en endelig størrelse. Så længe ét tidsskridt varer, regnes forholdene at være konstante. Ved at benytte tilpas små tidsskridt giver dette en rimelig tilnærmelse til virkeligheden. På tilsvarende måde er byggematerialer inddelt i kontrolvolumener, der hver repræsenteres ved et knudepunkt. Zonernes luft er også beskrevet ved knudepunkter, der dog ikke tillægges nogen varme- eller fugtmæssig kapacitet, og hvis tilstand derfor ændres øjeblikkeligt efter påvirkninger fra omgivelserne.

For enhver model i BSim er det hensigtsmæssigt at udelade unødvendige forhold og konstruktionsdetaljer. Ved at simplificere modellen minimeres nemlig både arbejdstid og beregningsdata.

Beregninger i BSim giver nyttige informationer i planlægnings- og projekteringsfasen af bygninger, især ved sammenligning og analyse af forskellige designforslag mht. energiforbrug, termisk indeklima, fugtforhold og dagslysforhold.

For samtlige rum eller zoner der simuleres, kan programmet bl.a. beregne; varmetab ved transmission, infiltration, mekaniske ventilationsforhold, naturlig udluftning og varmetilførsel fra solpåvirkning. Inddata angives generelt som timeværdier og resultaterne produceres derfor også ned til aktuelle timeværdier. Programmet er bl.a. verificeret ved [40].

3.4 WUFI

Projektets simuleringer er ligeledes udført i WUFI Pro version 5.3, som er et tysk beregningsprogram udviklet af Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP). Beregningsprogrammet regner med dynamiske klimabetingelser, og det tager højde for fugttransport både ved diffusion og kapillartransport i én dimension. Konvektion medregnes ved at tildele luftlag i konstruktionen specielle egenskaber, der derved simulerer en tilnærmet værdi af den reelle konvektion. Ved anvendelse af simuleringssprogrammet indregnes desuden materialers varierende egenskaber afhængig af temperatur- og fugtforhold i materialet, således at der tages hensyn til materialernes hysteres, som ofte forekommer i takt med fugtoptagelse og afgivelse i materialet [13].

Selve simuleringen foregår efter samme principper som i BSim ved numerisk beregning af den i virkeligheden kontinuerte proces. Forholdene er ligeledes konstante så længe et tidsskridt varer. Ved opdeling af disse processer til timeværdier fås en rimelig tilnærmelse til virkeligheden.

Simuleringsværktøjet er jf. producenten tiltænkt anvendelse i designfasen til at forudsige skimmelrisici og belyse konstruktionens hygrotermiske ydeevne. Beregningsmetoderne i WUFI er verificeret af uafhængige forskere i 2013 jf. [41]

Opbygning af simuleringssmodellen fremgår af afsnit 4.3. Her er ligeledes beskrevet forudsætningerne for de anvendte materialer, overfladeegenskaber, orientering, indeklima, udeklima, startbetingelser mv. for de enkelte parametre.

3.5 Model for grønne tage

Opbygningen af grønne tage kan udføres på flere måder og i varierende lagtykkelser afhængigt af egne ønsker om ekstensiv eller intensiv beplantning. I dette projekt er udvalgt en generisk udgave af grønt tag, som benyttes i modellerne til simulering af fugtforholdene i det bærende træunderlag.

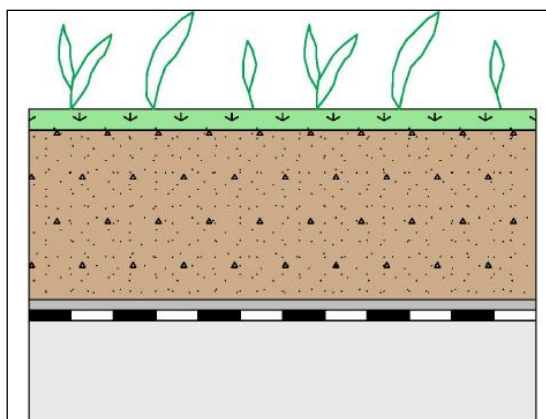
Der er valgt et ekstensivt grønt tag med sedumplanter på 60 mm eller et semi-intensivt grønt tag på 150 mm bestående af vegetation/vækstlag i et samlet lag oven på den vandtætte membran af tagpap. Den generiske udgave er valgt pga. ønsket om en generel undersøgelse, frem for undersøgelse af et specifikt system af grønne tage. Derudover er det valgt, da der ikke har kunnet indsamles data for atmosfærisk modstråling, som skal benyttes ved valg af et specifikt system. Opbygningen af det generiske grønne tag er verificeret ved [42] og forskningsprojektet er udmøntet i en guideline til opsætning og beregning af konstruktioner med grønne tage i WUFI [17].

Specifikationerne kan normalt anvendes i klimaer, som er sammenlignelige med klimaet i de 4 byer, hvor forskningsprojektet er udført. Disse byer er henholdsvis Holzkirchen, Kassel og Leipzig i Tyskland, og Wien i Østrig. En egentlig sammenligning af det anvendte danske klima og klimaet i disse byer har ikke fundet sted, men det danske klima er dog fundet tilstrækkelig tæt på både Kassel og Leipzig til, at der kunne anvendes samme specifikationer til simuleringerne. De tekniske informationer er tilnærmet implementeret i BSim.

Materiale	Dimension [mm]	Densitet [kg/m ³]	Varmeledning [W/mK]	Varmekapacitet [J/kg K]	Vanddampdiffusionsmodstandsfaktor [μ]
Grønt tag (vækstlag)	60	1500	0,9	1500	5,0

Materiale	Fugt-tilførsel	Emissivitet [-]	Absorption, stråling [-]
Grønt tag (vækstlag)	40% af nedbør i de nederste 2 cm	0,0	0,3

Tabel 2: Inddata for simulering af det generiske grønne tag.



Figur 19: Opbygning af det grønne tag til simuleringerne.

3.6 Vurdering af resultater

Validering af fugtmålingerne fra reference-modellen er udført ved at sammenholde resultater for fugtindhold og temperatur i de forskellige beregninger med de faktiske reference-fugtmålinger. Den bedst sammenlignelige beregningsmodel er benyttet som reference for den resterende undersøgelse af udvalgte parametre.

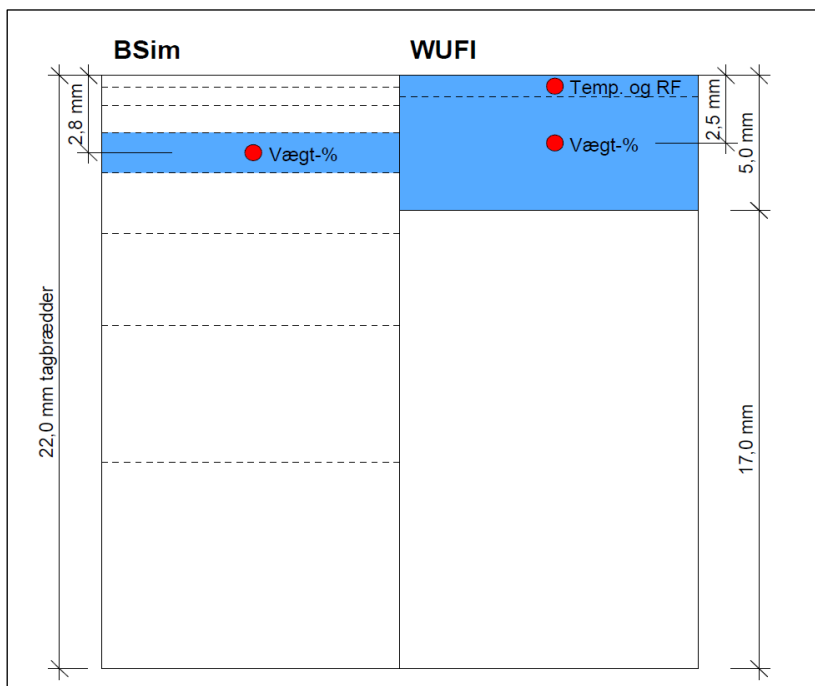
Analysering af de derpå følgende resultater ved forskellige parametre er sket ved at sammenholde fugtindholdet i træunderlagets underside. Den første vurdering er foretaget med baggrund i, at et højere fugtniveau i træet normalt vil resultere i en højere risiko for skimmelvækst eller nedbrydning pga. trænedbrydende svampe [18].

Vurdering af risikoen for skimmelvækst på undersiden af træunderlaget i de forskellige parametervariationer, er sket ved vurdering af temperatur og relativ luftfugtighed på undersiden af træunderlaget. Resultaterne er sat op i isopleth-diagrammer med skimmelmodellen jf. "Skimmelsvampe i bygninger" [33] beskrevet i afsnit 2.2.3.

For at overskueliggøre sammenligningen, er resultaterne yderligere defineret ved det antal timer, hvor det relative fugtniveau på undersiden af træunderlaget er over det kritiske fugtniveau jf. skimmelmodellen. Vurderingen af risikoen for skimmelvækst er sket på baggrund af resultaterne fra det 3. simuleringsår i beregningsprogrammet WUFI.

Den procentvise andel af årets timer med risiko for skimmelvækst er beregnet ved:

$$\frac{\text{Antal timer med } RF > RF_{\text{kritisk}}}{24 \text{ timer} \cdot 365 \text{ dage}} \cdot 100\% = xx \% \text{ risiko for skimmelvækst pr. år}$$



Figur 20: Placering af målepunkter til vurdering af simuleringsresultater

4. Materialer og forudsætninger

Bygningen, som er udvalgt til reference for projektet er valgt, idet tagkonstruktionen vurderedes at være repræsentativ for nutidige opbygninger af flade ventilerede tagkonstruktioner med tagdækning af tagpap.

Isoleringsmængden passer til det nuværende krav i bygningsreglementet, og bygningen er desuden placeret, så der ikke opstår væsentlig skygge i løbet af dagen fra nabobygninger eller træer. Derudover er der tale om en konstruktion, hvor der foreligger fugtmåledata for hele 2016, hvilket derved har kunnet anvendes til validering af simuleringerne.

Den udvalgte bygning måler 6,5 x 7,5 meter og har en højde på 5 meter.

Den naturlige ventilation er sikret via ventilationsåbninger mod øst og vest pr. 600 mm – svarende til hvert spærfag. Åbningsarealet opfylder kravet om mindst 1/500 af det bebyggede areal.

4.1 Konstruktioner

Tagkonstruktion:

8 mm tagpap – 2 lag

22 mm tagbrædder

Opskalkning til faldopbygning 50-200 mm, (gennemsnitligt 100 mm forudsat),
c-c 600 mm

45x245 mm spær, c-c 600 mm, med 245 mm mineraluld kl. 37

45x45 mm rigler m. 45 mm mineraluld kl. 37

Dampspærre af 0,20 mm PE-folie

45x45 mm rigler m. 45 mm mineraluld kl. 37

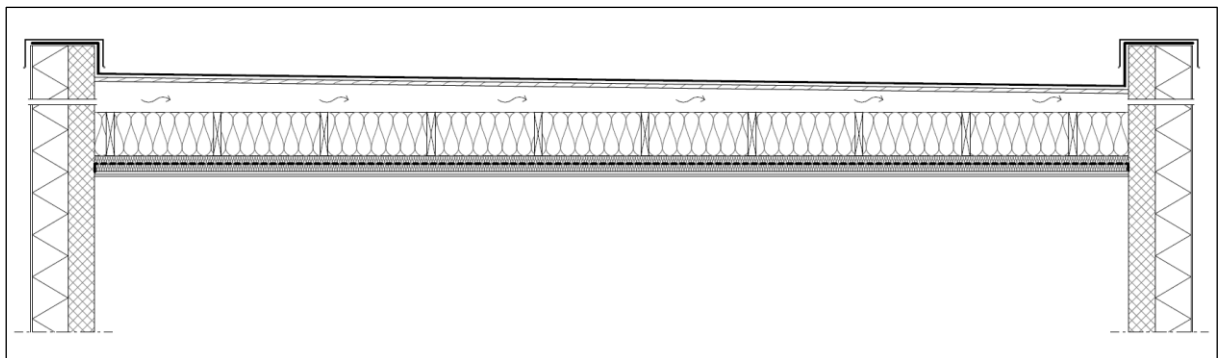
2 lag 13 mm gips

Ydervægge:

150 mm letklinkerblokke

200 mm hård mineraluld

10 mm puds



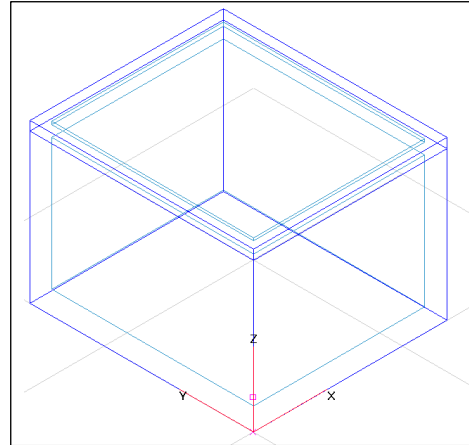
Figur 21: Princip for opbygning af tagkonstruktion på referencemodel (egen tegning).

4.2 Beregningsforudsætninger, BSim

Modellen er opdelt i en loftkonstruktion og en tagflade, hvor imellem der er defineret en termisk zone, der udgør den ventilerede luftspalte.

BSim model

8 mm tagpap
22 mm tagbrædder - gran
100 mm ventileret hulrum – Termisk Zone
290 mm mineraluld
Dampspærre
45 mm mineraluld
2 lag 12,5 mm gips



Figur 22: BSim referencemodel

Materialeparametre

Materiale	Densitet [kg/m ³]	Varmeledning [W/mK]	Varmekapacitet [J/kg K]	Damppermeabilitet [μg/m s Pa]	Diffusions- modstand [GPa m ² s/kg]
Tagpap	-	-	-	-	1.000
Tagbrædder gran	470	0,12	1800	0,0143 (ved 70% RF)	-
Mineraluld	25	0,036	800	0,17 (ved 72% RF)	-
Gips	881	0,20	1000	0,0315 (ved 50% RF)	-
Dampspærre 0,20 PE-folie	-		-	-	500
Grønt tag	1500	0,9	1500	0,035 (ved 60 % RF)	-
Udvendig tagisolering	25	0,036	800	0,17 (ved 72% RF)	-

Tabel 3: Udvalgte materialeparametre for beregningsmodeller i BSim.

Overfladeegenskaber

Materiale	Farve	Emissivitet [-]	Absorption [-]
Tagpap	Sort	0,90	0,88
Lofter	Hvid	0,88	0,10
Grønt tag	Grøn	0,0	0,3

Tabel 4: Overfladeegenskaber for beregnings-modeller i BSim.

Udeklima

Der er indsamlet følgende måledata på timebasis fra DMI's målestationen 06188 Sjælsmark, til udarbejdelse af en ny DRY-fil med klimadata for 2016. Filen er udarbejdet iht. [39].

BSim regner ikke med nedbør, hvorfor dette ikke er en del af udeklimaet.

- Temperatur, °C
- Relativ fugt, %
- Vindhastighed, middel, m/s
- Vindretning, middel, °
- Lufttryk, middel, hPa
- Globalstråling, middel, W/m²
- Skydække, %
- Diffus stråling, W/m²
(beregnet på baggrund af globalstrålingen iht. afsnit 3)

Øvrige udeklimaforudsætninger

Terræntype: Urban (forstad). Horizon: 7°. Reflective Solar: 0,2. Jord emissivitet: 0,9. Ingen data for grunden.

Indeklima

Fugtbelastningsklasse 2 iht. DS13788:2013.

Temperatur: 20-23 °C (vinter-sommer).

Max. 0,0112 kg/kg (23°C, 64% RF, SBI 224, tabel 4), 15. august.

Mindst 0,0066 kg/kg (20°C, 46% RF, SBI 224, tabel 4), 15. februar.

Dagsvariation: 1°C og 0,0004 kg/kg

Maximum kl. 14 hver dag (SBI 224, figur 27)

Ventilation af hulrum

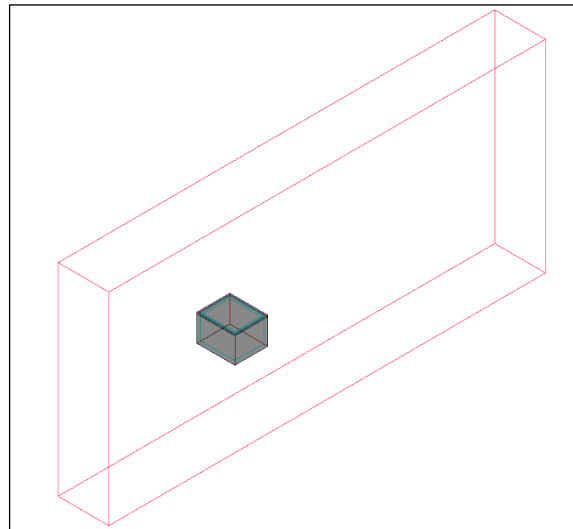
Luftskiftet i hulrummet er defineret ved i programmet at antage et fast udeluftskifte pr. time via infiltration. Luftskiftet er defineret med fuld belastning hele året. Der varierer mellem henholdsvis 1h⁻¹, 10h⁻¹, 30h⁻¹ og 100 h⁻¹.

De valgte luftskifter er antaget på baggrund af [43], [44] og [28].

Derudover er luftskiftet beregnet med BSim's system naturlig ventilation (venting), hvor luftskiftet simuleres iht. SBI-anvisning 202: Naturlig ventilation i erhvervsbygninger [45].

Skygge

Skyggeforhold simuleres ved stor nabobygning mod syd, der resulterer i næsten total skygge på tagkonstruktionen over året. Bygningen er 85 meter lang, 10 meter bred og 40 meter høj og placeret 5 meter fra referencemodellen.



Figur 23: Simulering af skyggeforhold med nabobygning. Referencebygning er mørk pga. skyggeforhold

Grønt tag

Jordlag og emissivitet iht. afsnit 3.4.

Øvrige BSim simuleringsforudsætninger

Startbetingelser: 20°C og 80 % RF
Solar Radiation model: Petersen
Beregningsperiode: 01.01.2014 → 01.01.2017
Time steps: 240.

Målepunkt til sammenligning:
First Layer 25 %. Factor 1,5.

Naturlig ventilation (Nat.Vent)

Der er etableret en 15 mm høj åbning ind til det ventilerede hulrum langs husets facade mod øst og mod vest. De to åbninger måler 15x6500 mm, svarende til kravet i anvisningerne [23].

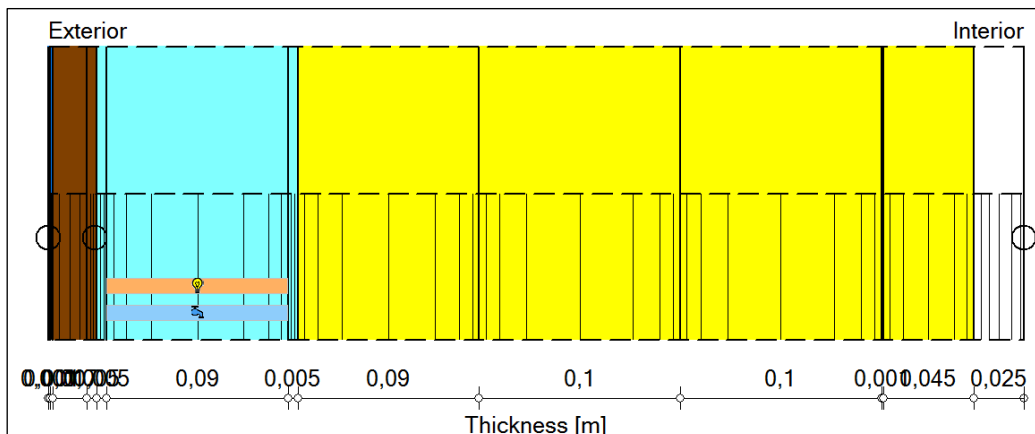
Åbningerne har nedenstående inddata:

Cd = 0,7 (Bsim vejledning) Cnt = 0,5 (midt i spalte) Afrac = 1,0 (kan åbnes 100%) Ka = 5,0	Max airchange = 200 h-1 Max wind = 0 m/s Automatisk (Cross)	Setpoint = -30°C Setpoint CO2 = 0 Factor 1,0 Tidsregulering = Altid
--	---	--

Tabel 5: BSim faktorer for beregning af luftskifte ved funktionen "Venting".

4.3 Beregningsforudsætninger, WUFI

WUFI model



Figur 24: WUFI reference-model til simulering af fugtforhold i træunderlaget

2 lag tagpap

22 mm tagbrædder – gran (opdelt i 17+5 mm)

5 mm luftlag med fugtkapacitet

90 mm luftlag uden fugtkapacitet

5 mm luftlag med fugtkapacitet

290 mm mineraluld (opdelt i 90+100+100 mm)

Dampspærre

45 mm mineraluld

2 lag 12,5 mm gips

Materialeparametre

Materiale	Densitet [kg/m ³]	Varmeledning [W/mK]	Varmekapacitet [J/kg K]	Vanddampdifusions- modstandsfaktor [μ]	Diffusions- modstand [GPa m ² s/kg]
Tagpap	-	-	-	-	1.000
Tagbrædder gran	430	0,14	1600	83,3	-
Mineraluld	60	0,04	850	1,3	-
Gips	625	0,20	850	8,3	-
Dampspærre 0,20 PE-folie	-		-	-	Sd = 100 Z ≈ 500
Grønt tag	1500	0,9	1500	5,0	-
Udvendig tagisolering	60	0,04	850	1,3	-

Tabel 6: Materialeparametre for beregningsmodeller i WUFI.

Orientering: -

Hældning: 0°

Regnbelastning R1: 1,0; R2: 0,0 (normal regnbelastning iht. [46])

Bygning op til 10 meter

Overfladeegenskaber:

Udvendig overgangsisolans, $R_{si} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$

Indvendig overgangsisolans, $R_{se} = 0,10 \text{ m}^2\text{K/W}$

Ground short-wave reflectivity = 0,20

Fraction of rain = 1,0

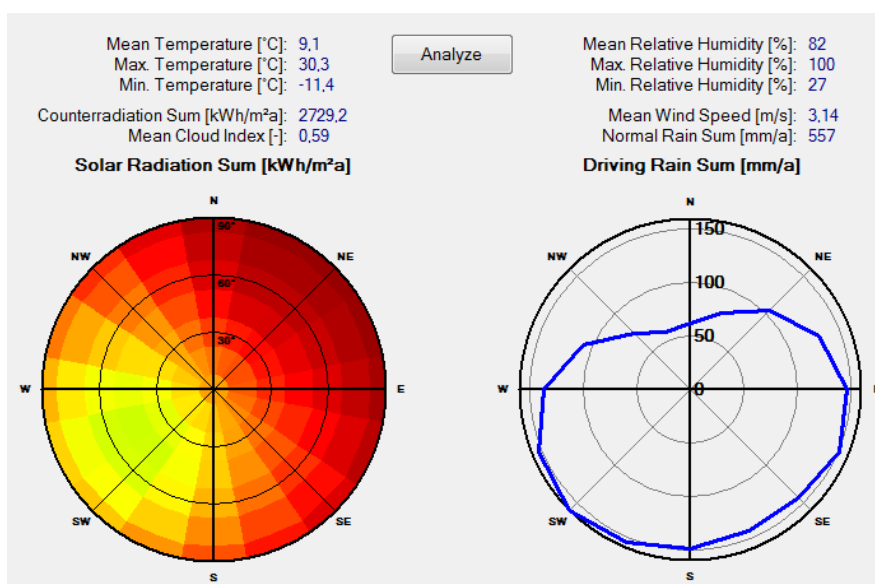
Materiale	Farve	Emissivitet [-]	Absorption [-]
Tagpap	Sort	0,90	0,88
Grønt tag	Grøn	0,0	0,3

Tabel 7: Overfladeegenskaber for beregningsmodeller i WUFI

Udeklima

Der er indsamlet følgende måledata på timebasis fra DMI's målestationen 06188 Sjælsmark, til udarbejdelse af en ny WAC-fil med klimadata for 2016. Filen er udarbejdet iht. [46].

- Temperatur, °C
- Relativ fugt, %
- Vindhastighed, middel, m/s
- Vindretning, middel, °
- Lufttryk, middel, hPa
- Globalstråling, middel, W/m^2
- Diffus stråling, W/m^2 (beregnet på baggrund af globalstråling)
- Skydække, %
- Nedbør, mm



Figur 25: Vejranalyse af anvendte vejrdato fra 2016 i WUFI.

Indeklima

Fugtbelastningsklasse 2 iht. DS/EN 13788

Indetemperatur: 21°C

Ventilation af hulrum

Luftskiftet i hulrummet er defineret ved at antage et fast udeluftskifte pr. time ved systemet infiltration i programmet. Luftskiftet er defineret med fuld belastning hele året. Der varierer mellem henholdsvis 1h^{-1} , 10h^{-1} , 30h^{-1} og 100h^{-1} .

De valgte luftskifter er antaget på baggrund af tidligere undersøgelser beskrevet i [43], [44] og [28].

Skygge

Skyggeforhold på tagfladen er defineret ved ændring af overfladeegenskaberne i modellerne.

Absorption er sat til 0,0. Emissivity til 0,9 iht. [46].

Grønt tag

Jordlag, overfladeegenskaber og fugttilførelse iht. afsnit 3.4.

Øvrige WUFI forudsætninger

Startbetingelser, fugt og temp: 20°C, 80% RF

Beregningsperiode: 01.01.2014 → 01.01.2017

Øvrige talværdier:

Varme- og fugttransport, varmeledningsegenskaber afhængig af temperatur og fugtforhold i materialet

4.4 Beregningsmodeller

Principtegninger på modellernes opbygning kan ses af bilag 1.

W.x.x.x.x = WUFI model

B.x.x.x.x = BSim model

Nummersystem:	A,B,C,D
A. Luftskifte	1,2,3,4,5
B. Skygge	1,2
C. Grønt tag	1,2,3
D. Udvendig isolering	1,2,3

NR.	PARAMETRE												
	Luftskifte [A]					Skygge [B]		Grønt tag [C]			Udvendig isolering [D]		
	[1] 1 h ⁻¹	[2] 10 h ⁻¹	[3] 30 h ⁻¹	[4] 100 h ⁻¹	[5] Nat.Vent	[1] Nej	[2] Ja	[1] Nej	[2] 60 mm	[2] 150 mm	[1] 0 mm	[2] 50 mm	[3] 100 mm
1.1.1.1	x					x		x			x		
2.1.1.1		x				x		x			x		
3.1.1.1 (reference)			x			x		x			x		
4.1.1.1				x		x		x			x		
5.1.1.1					x	x		x			x		
2.2.1.1		x					x	x			x		
3.2.1.1			x				x	x			x		
4.2.1.1				x			x	x			x		
3.1.1.2			x			x		x				x	
3.2.1.2			x				x	x				x	
3.2.1.3			x				x	x					x
2.1.2.1		x				x			x		x		
3.1.2.1			x			x			x		x		
4.1.2.1				x		x			x		x		
3.1.3.1			x			x				x	x		
3.2.2.1			x				x		x		x		
3.1.2.2			x			x			x			x	
3.1.2.3			x			x			x				x
3.2.2.2			x				x		x			x	
3.2.2.3			x				x		x				x

Tabel 8: Oversigt for udførte beregninger og deres parametre

5. Resultater

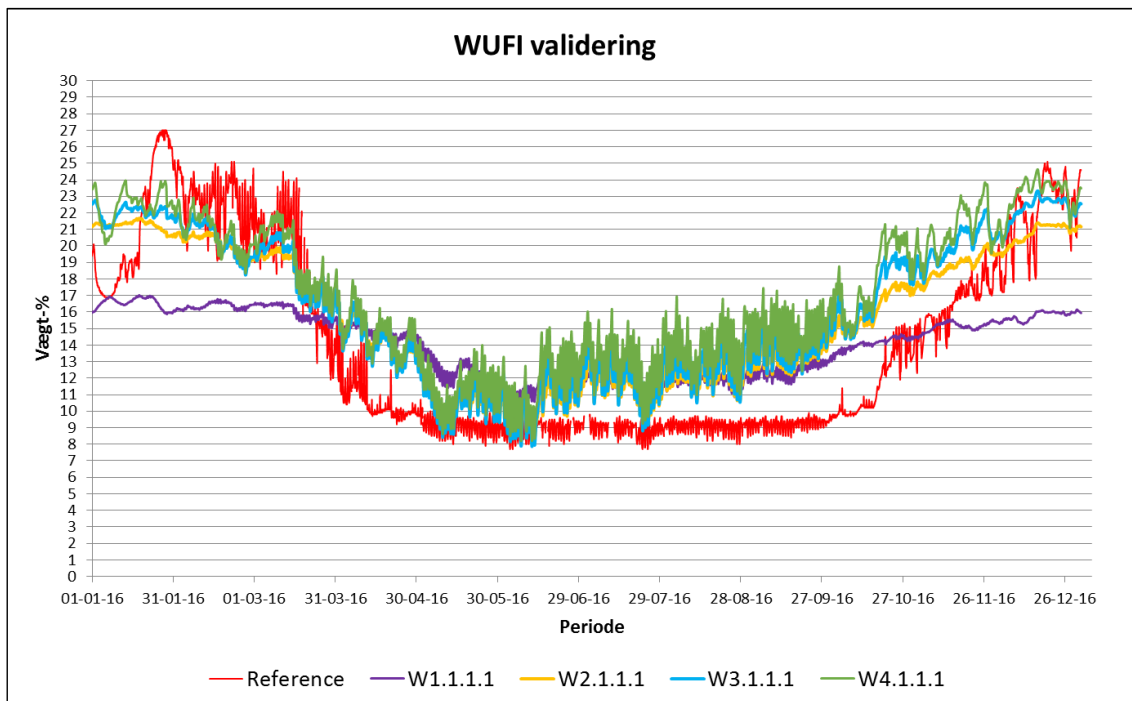
5.1 Validering af simuleringsmodel

Simuleringer af de fugttekniske forhold i konstruktionen med WUFI kan ses på nedenstående figur. Denne viser resultaterne for fugtforholdene i træunderlaget for det 3. simuleringår ved forskellige luftskifter, og sammen med referencemålingerne fra 2016.

W1.1.1.1 (luftskifte 1h^{-1}), W2.1.1.1 (luftskifte 10h^{-1}), W3.1.1.1 (luftskifte 30h^{-1}) og W4.1.1.1 (luftskifte 100h^{-1}).

Af disse resultater viste model W3.1.1.1 med et fast luftskifte på 30h^{-1} sig, at være bedst sammenligneligt med referencen.

Et luftskifte på 1h^{-1} og 10h^{-1} resulterede særligt i vinterhalvåret i et lavere fugtniveau end referencemodellens. Et luftskifte på 100h^{-1} resulterede i et fugtniveau, der lå over referencemodellens undtagen i januar, februar og marts, og som samtidig havde et større udsving i fugtniveauet.



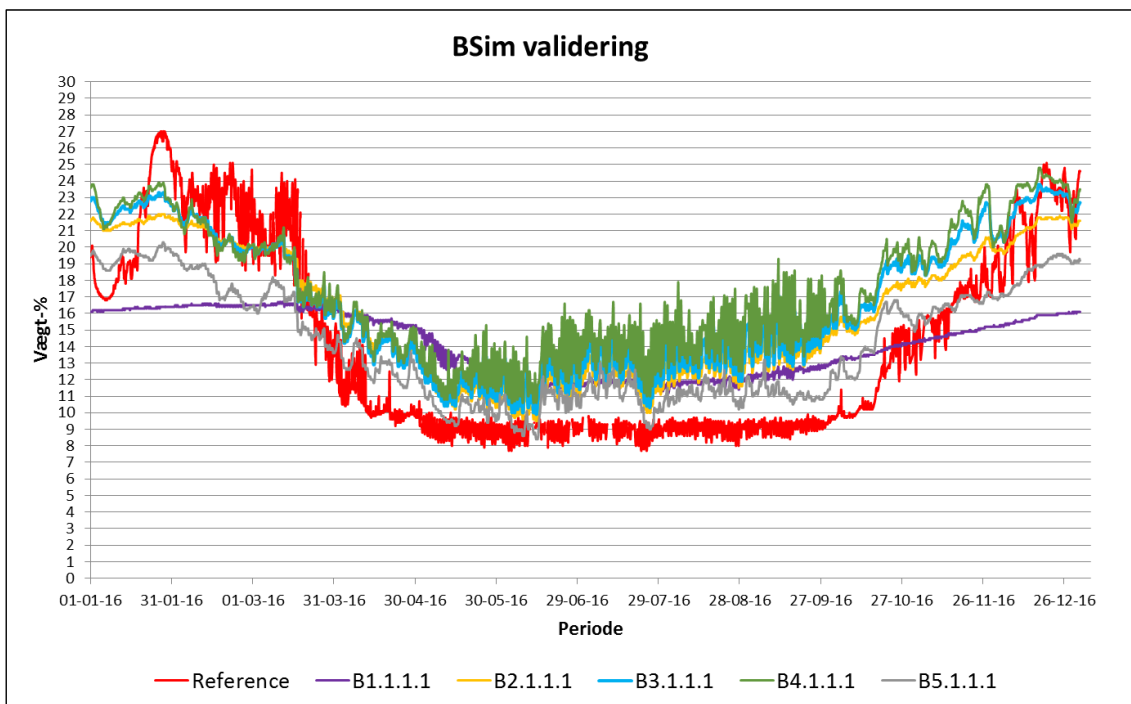
Figur 26: Resultater for simuleringer i WUFI

Resultaterne for simulering af de fugttekniske forhold i konstruktionen med BSim kan ses på nedenstående figur. Denne viser resultaterne for fugtforholdene i træunderlaget for det 3. simulerings år ved de forskellige luftskifter, og sammen med referencemålingerne.

B1.1.1.1 (luftskifte 1h^{-1}), B2.1.1.1 (luftskifte 10h^{-1}), B3.1.1.1 (luftskifte 30h^{-1}), B4.1.1.1 (luftskifte 100h^{-1}) og B5.1.1.1 (naturlig ventilation beregnet af BSim).

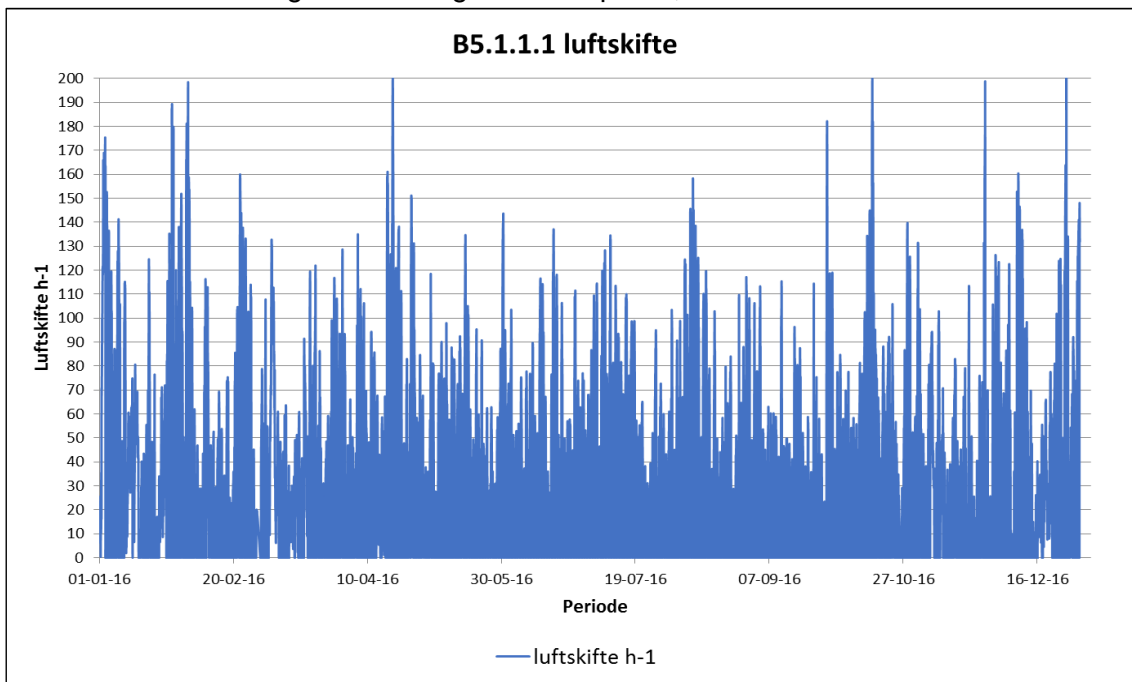
Af disse resultater viste model B3.1.1.1 med et fast luftskifte på 30h^{-1} sig, at være bedst sammenligneligt med referencen.

B5.1.1.1 med BSim's dynamiske beregning af luftskiftet over året viste sig bedst sammenligneligt med referencen henover sommerhalvåret, men med et lavere fugtniveau end referencen i vinterhalvåret.



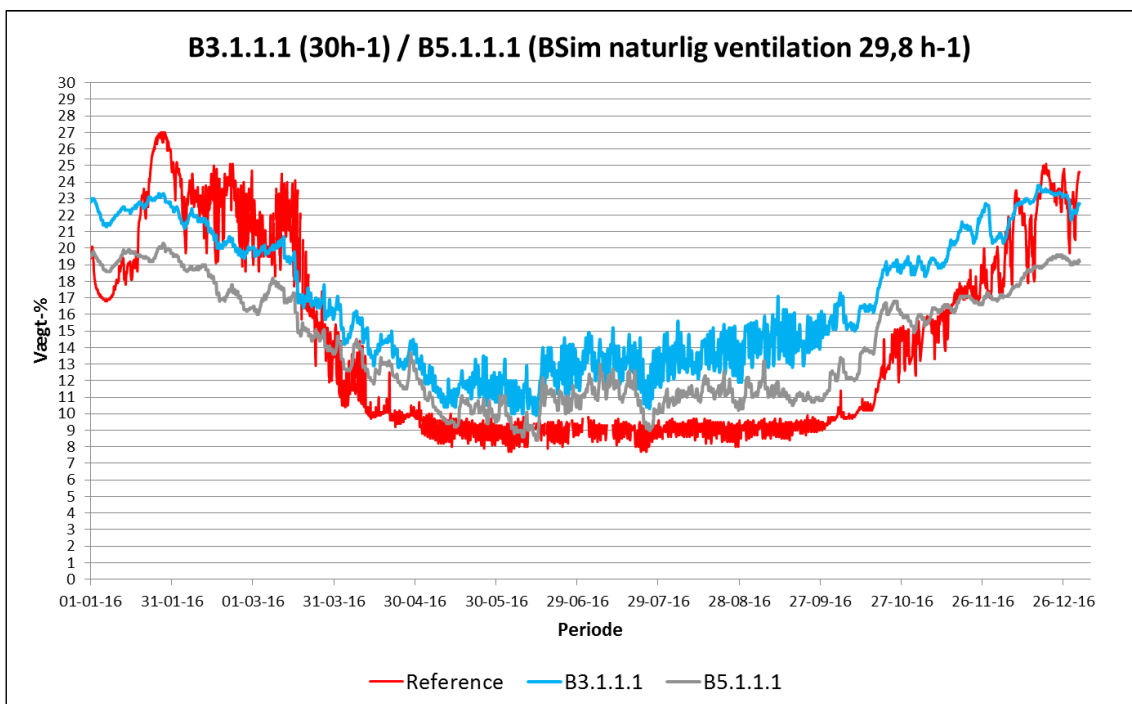
Figur 27: Resultater for simuleringer i BSim sammen med referencemålingerne.

Ved simulering af et dynamisk luftskifte i det ventilerede hulrum ved brug af BSim, viste luftskiftet sig at variere mellem 0 og 200 h⁻¹ over året. Samlet set gav det et resultat med et gennemsnitligt luftskifte på 29,8 h⁻¹ over året.



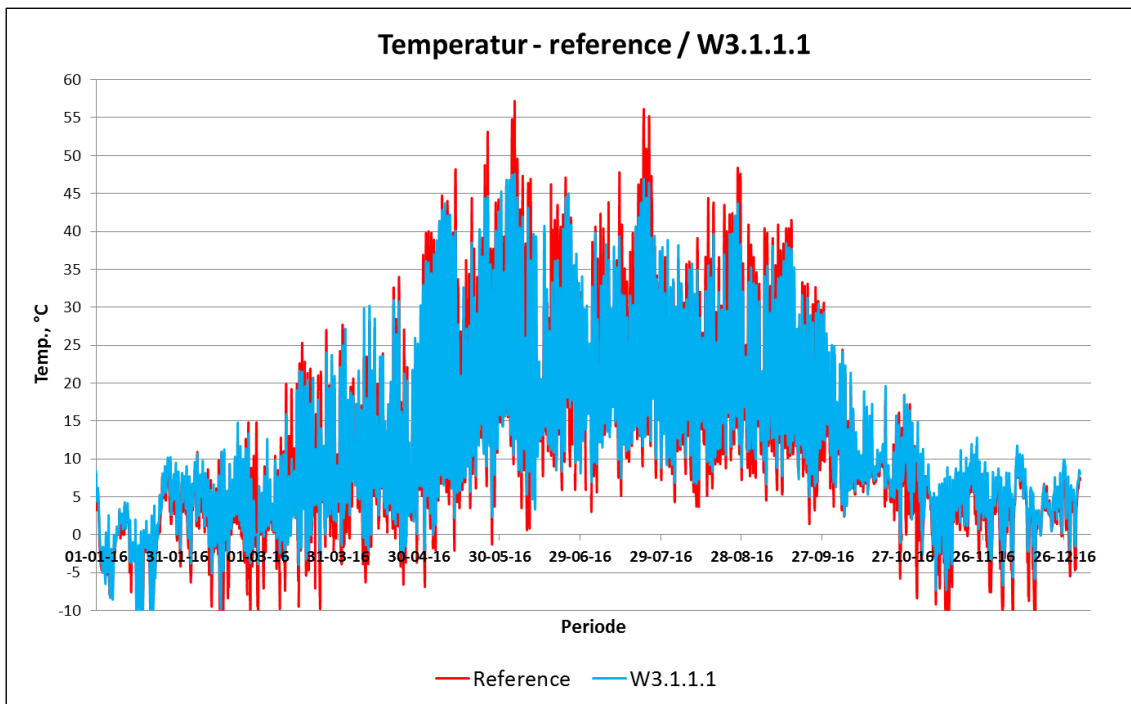
Figur 28: Luftskifte i det ventilerede hulrum ved simulering i BSim. Fra BSim beregning B5.1.1.1

Der kunne dog ses en tydelig forskel i fugtniveauet for træunderlaget ved beregning B3.1.1.1 med et fast luftskifte på 30 h⁻¹ og beregning B5.1.1.1 med et dynamisk luftskifte, der gennemsnitligt ender på 29,8 h⁻¹. Særligt i vinterhalvåret kunne der ses et højere fugtniveau ved et fast luftskifte end ved et dynamisk luftskifte.



Figur 29: Sammenligning af referencemåling, B3.1.1.1. (fast luftskifte 30 h⁻¹) og B5.1.1.1. (dynamisk luftskifte med gennemsnitligt 29,8 h⁻¹)

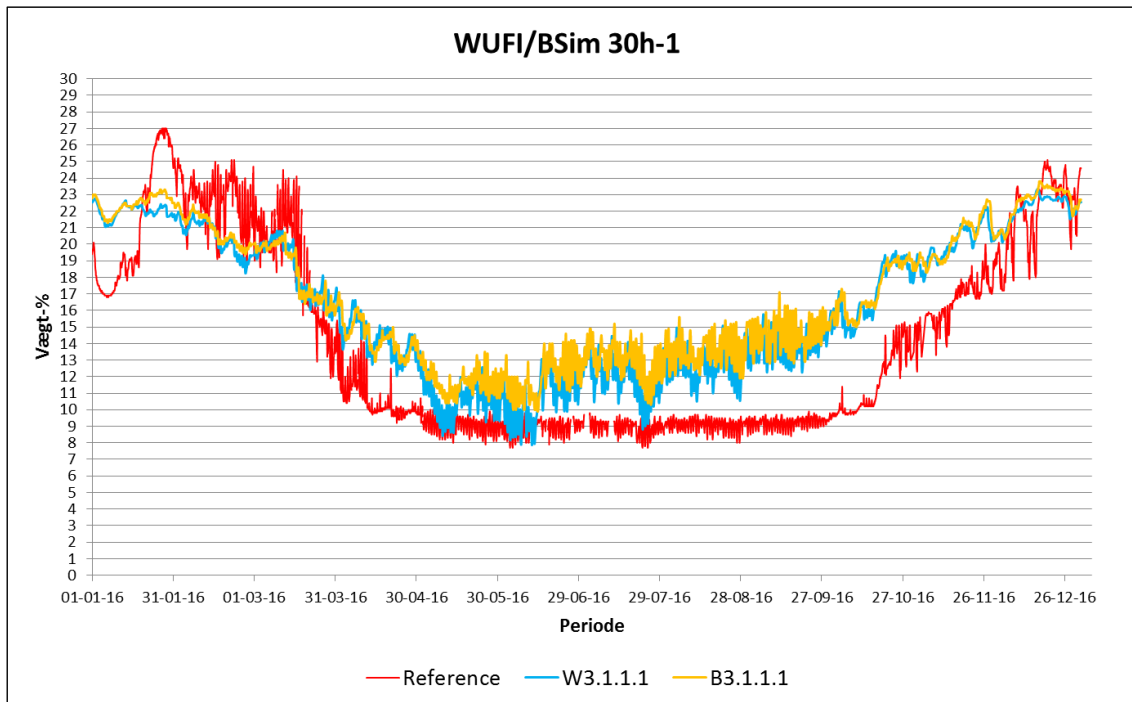
Sammenligning af temperaturer på undersiden af træunderlaget for referencemålingerne og den udvalgte simulering W3.1.1.1 (med fast luftskifte på 30 h^{-1}) fra WUFI ses af nedenstående figur. Temperaturerne viste sig at være sammenlignelige, men generelt blev temperaturudsvingene i simuleringen mindre end referencemålingerne. Der forekom altså højere temperaturer i sommerhalvåret og koldere temperaturer i vinterhalvåret ved referencemålingerne end simuleringens resultater viste. Gennemsnitligt var der højere temperaturer i sommerhalvåret ved referencemålingerne end ved simuleringen.



Figur 30: Sammenligning af temperaturforhold fra reference-målinger og den udvalgte simulering W3.1.1.1. fra WUFI med et fast luftskifte på 30 h^{-1} .

De udvalgte resultater for de to simuleringsprogrammer er sammenholdt på nedenstående figur. Resultaterne i WUFI og BSim med et fast luftskifte på 30 h^{-1} sås meget sammenlignelige, men begge resultater lå generelt over fugtniveauet i referencen.

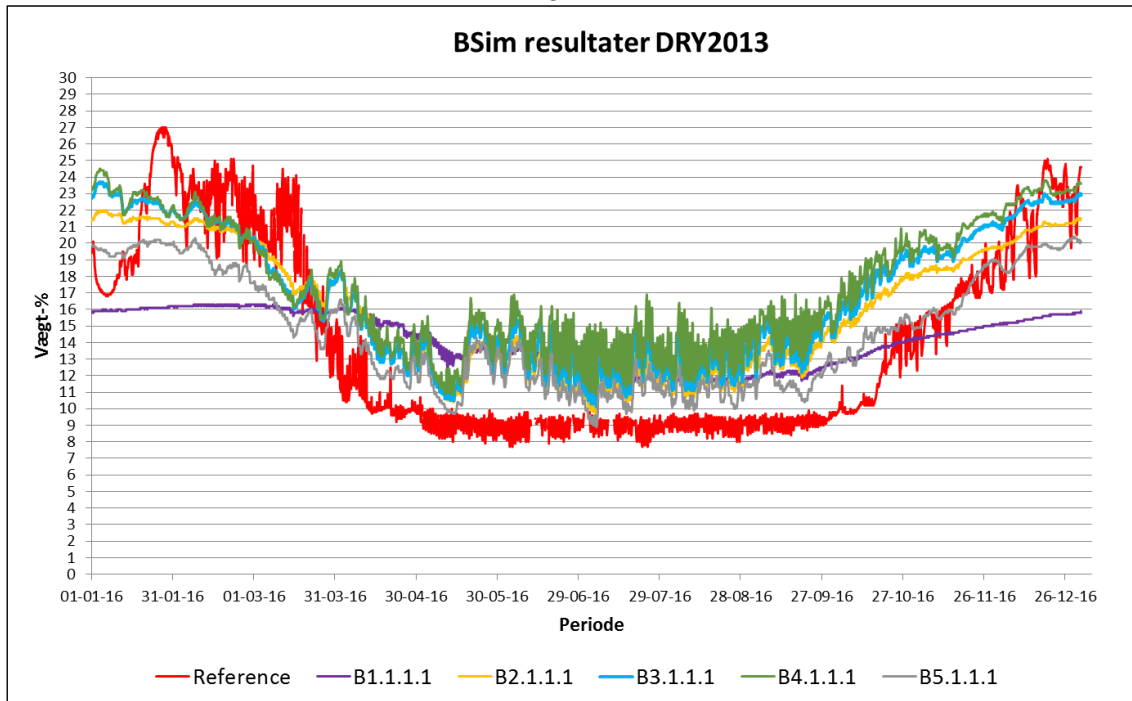
WUFI model W3.1.1.1 og BSim model B3.1.1.1 blev valgt som referencemodeller til det følgende parameterstudie i projektet.



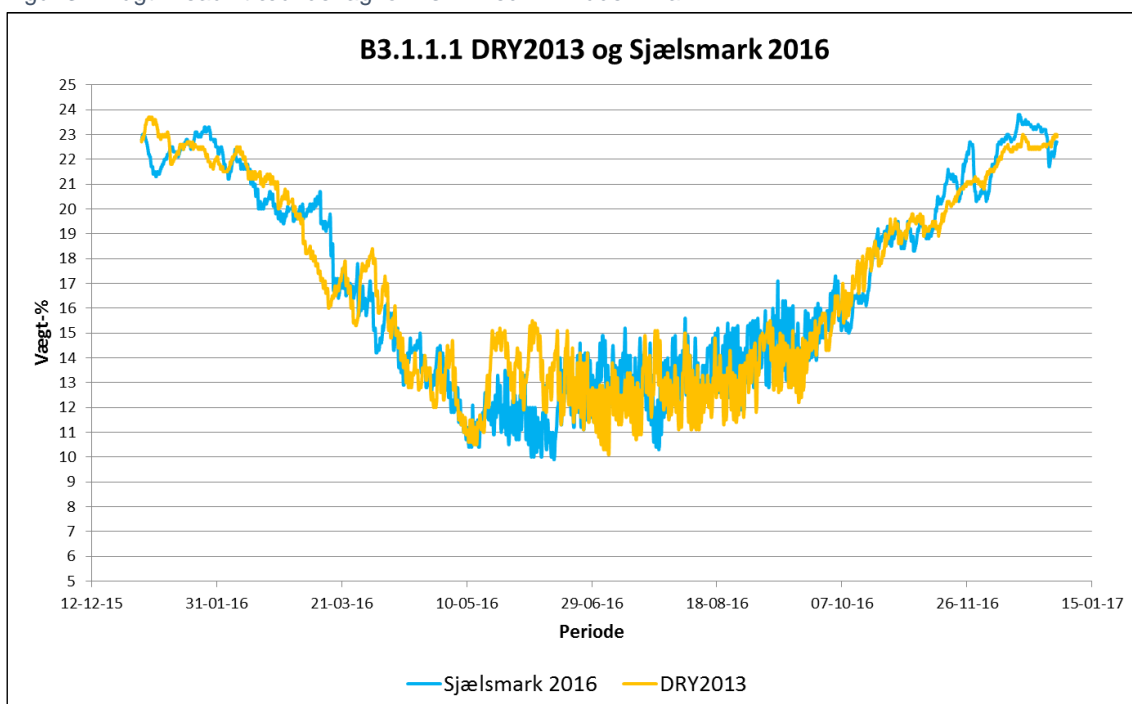
Figur 31: Sammenligning af udvalgte resultater for de to beregningsprogrammer WUFI og BSim med referencemålingerne

Udeklima-data

Normalt udføres fugtsimuleringer med udeklimadata iht. Danish Design Year, DRY2013 [13], der udgør et fælles vedtaget standardår. Da DRY ikke indeholder nedbør på timebasis, er det vurderet at det indsamlede klimadata fra Sjælsmark i 2016, der også indeholder nedbør på timebasis, udgør det samlede bedste udeklima-grundlag til parameterstudiet. Baggrunden for denne beslutning er sket ved sammenligning af resultater med henholdsvis DRY og Sjælsmark 2016 som udeklima (uden nedbør). Derudover er temperatur, fugtniveau og solstråling sammenholdt for de 2 udeklimaer. Se bilag 2.



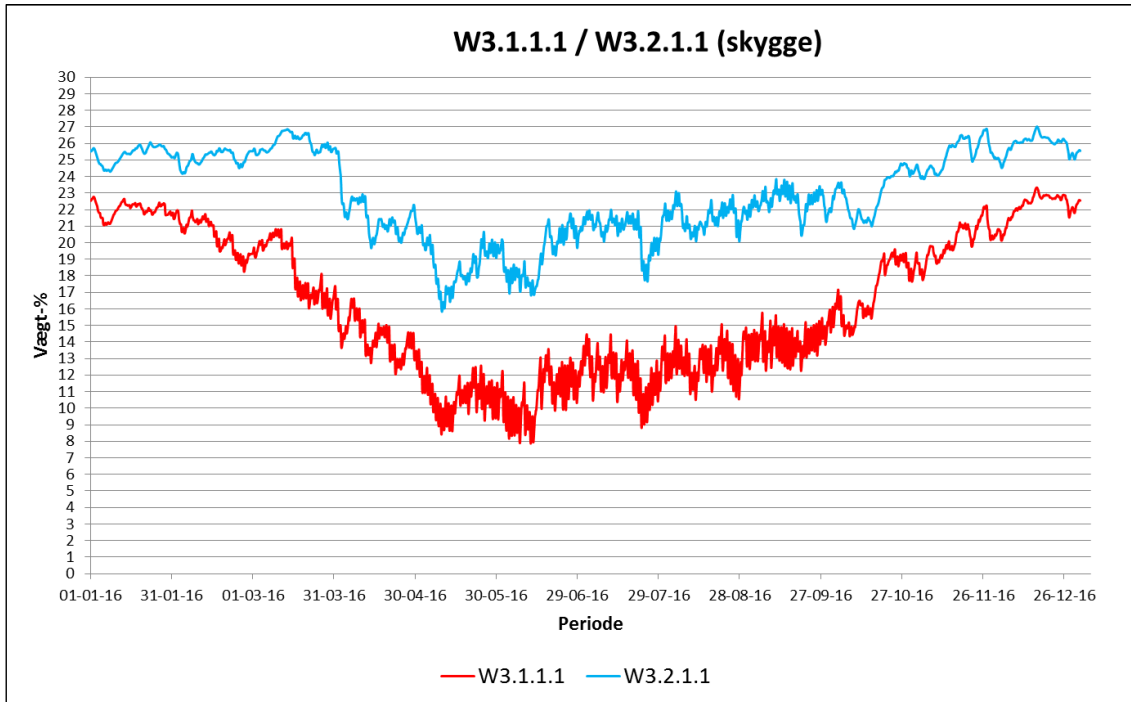
Figur 32: Fugtniveau i træunderlag for Bsim med DRY udeklima.



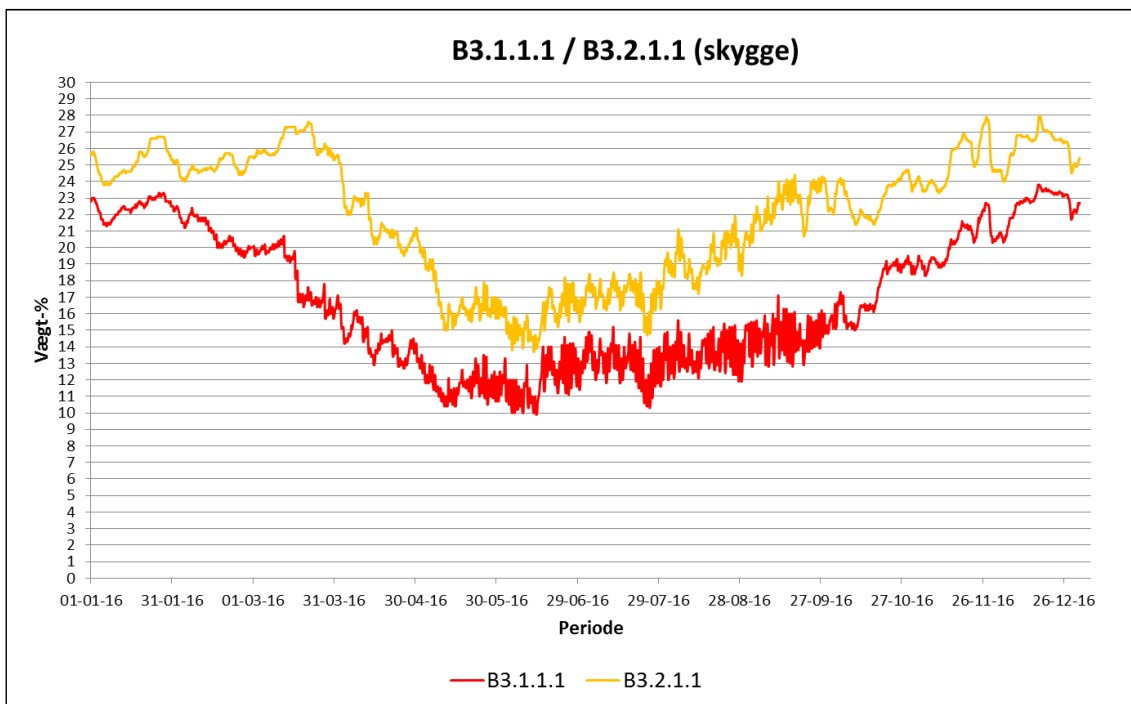
Figur 33: Fugtniveau i træunderlag med DRY eller Sjælsmark udeklima.

5.2 Skyggevirkning

Den første parameter, som blev undersøgt ved simulering, var betydningen af skygge på tagfladen. På nedenstående figur ses den udvalgte reference fra WUFI W3.1.1.1 sammenholdt med samme konstruktion med skygge på tagfladen W3.2.1.1. Ved skygge på tagfladen kunne ses et højere fugtniveau i træunderlaget over hele året end på referencemodellen med solpåvirkning.



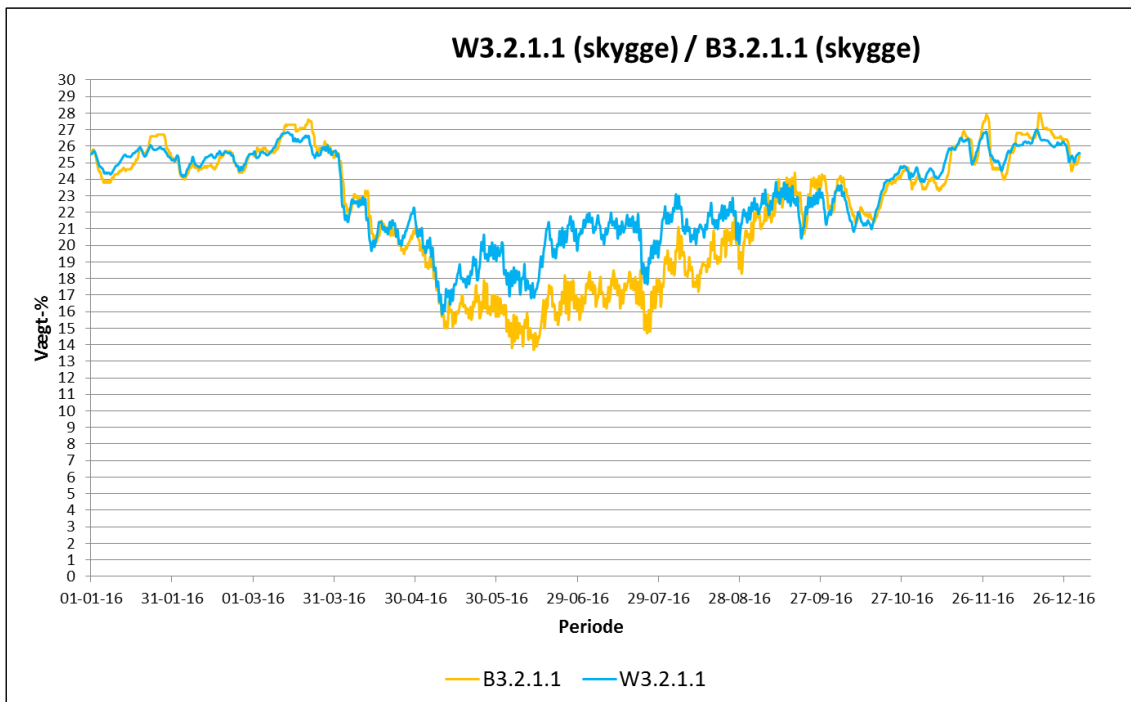
Figur 34: WUFI referencemodel W3.1.1.1 og samme model med skyggeforhold W3.2.1.1



Figur 35: B3.1.1.1 (reference-simulering) og B3.2.1.1 (reference-simulering med skygge)

Skyggeforholdet blev ligeledes undersøgt ved simulering i BSim. Her kunne ses samme tendens ved sammenligning mellem den udvalgte referencemodel B3.1.1.1 og samme konstruktion med skygge på tagfladen B3.2.1.1. Fugtniveauet blev også højere i træunderlaget over hele året.

Ved sammenligning af simuleringer i WUFI og BSim kunne fugtforholdene ses sammenlignelige. Dog sås der et højere fugtniveau i sommermånederne i resultaterne fra WUFI end der gjorde i BSim.

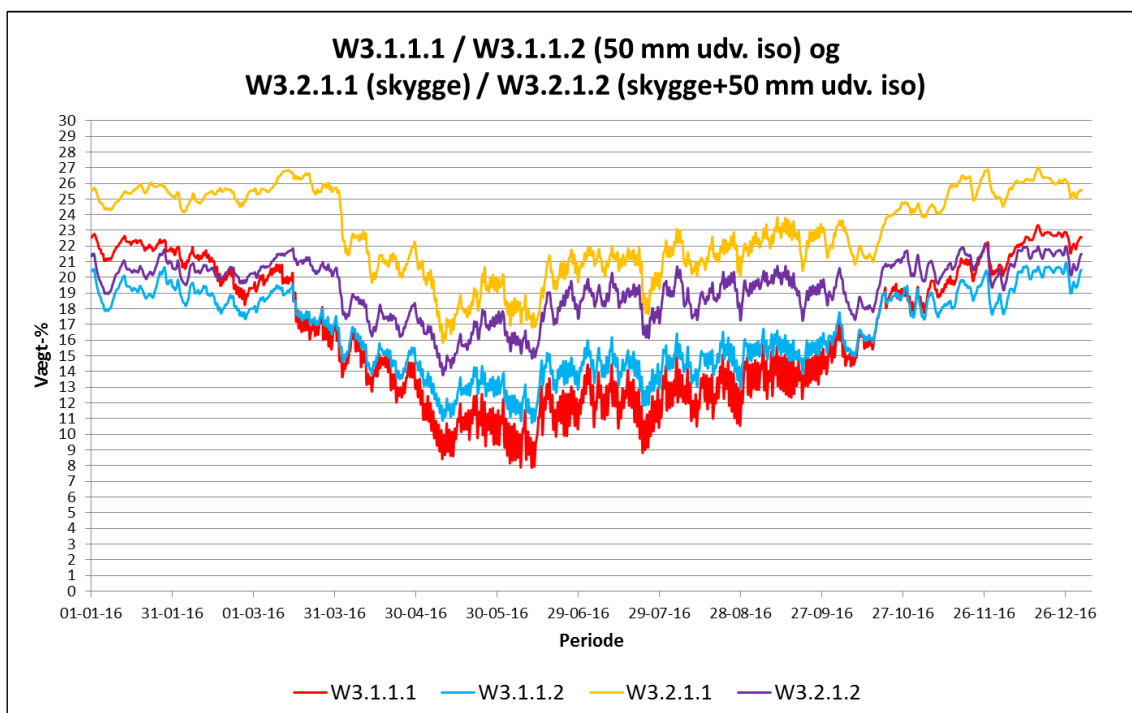


Figur 36: Sammenligning af skyggeeffekten i WUFI og BSim.

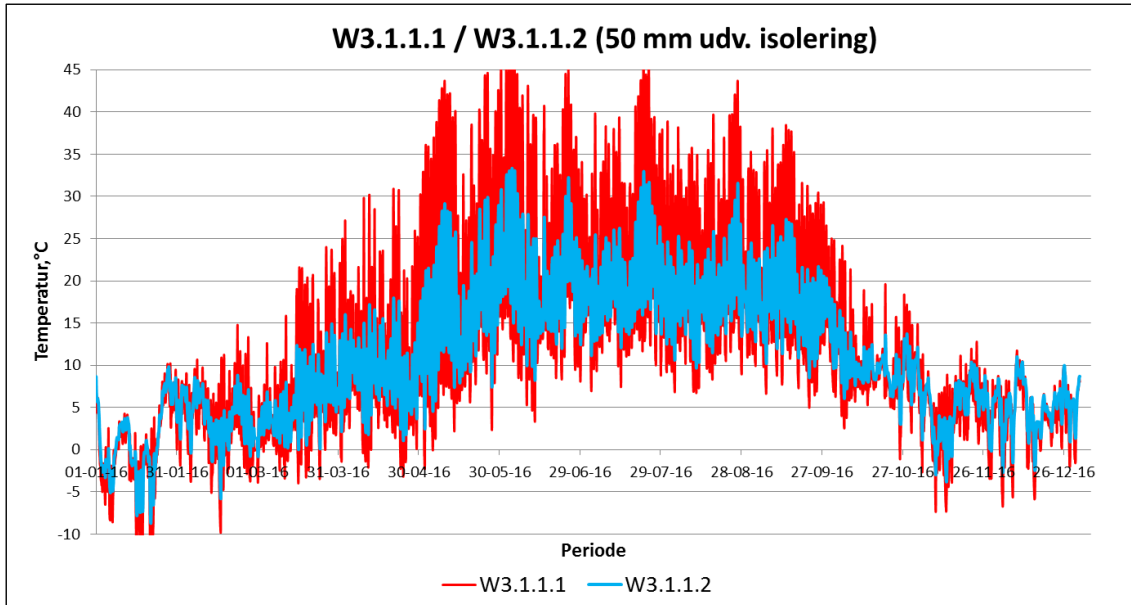
5.3 Udvendig isolering

Ved tilføjelse af 50 mm mineraluld mellem tagpap og tagbrædder på referencemodellen resulterede dette i en sænkning af fugtniveauet i træunderlaget i vinterhalvåret og en forøgelse af fugtniveauet i sommerhalvåret. Dette ses af nedenstående figur (rød og blå graf).

Ved skygge på tagfladen sænkede den udvendige isolering fugtniveauet over hele året sammenholdt med fugtniveauet på referencemodellen W3.1.1.1. (gul og lilla graf). Fugtniveauet ved skygge og udvendig isolering blev også generelt højere over hele året, end hvis der var sol på tagfladen, dog med undtagelse af vintermånederne (lilla og rød graf).

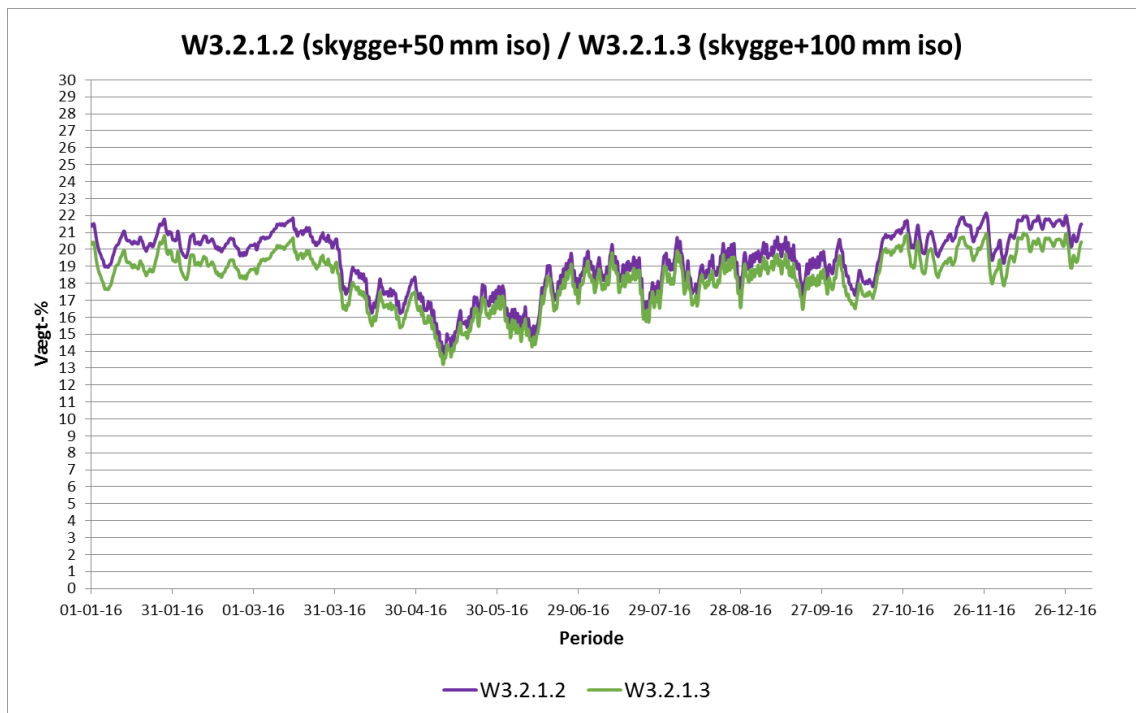


Figur 37: W3.1.1.1 (referencemodel), W3.1.1.2 (udvendig isolering), W3.2.1.2 (udvendig isolering og skygge), W3.2.1.1 (referencemodel med skygge).



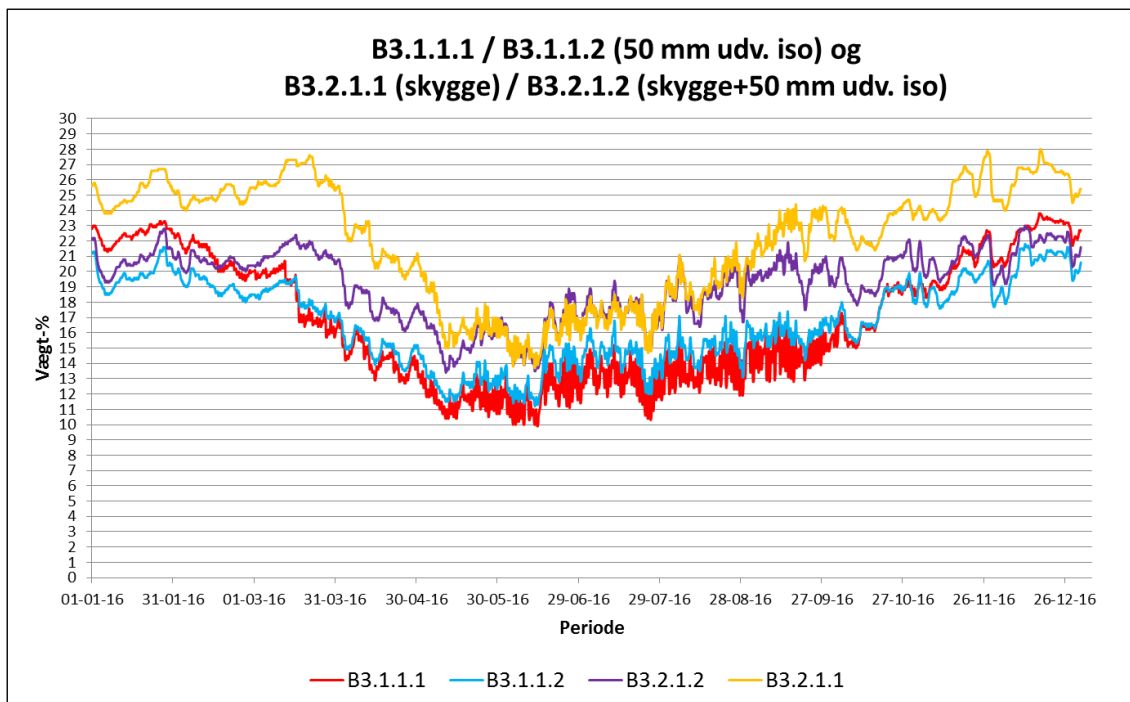
Figur 38: Temperaturer på undersiden af træunderlaget på referencemodel (W3.1.1.1) og med udvendig isolering (W3.1.1.2)

Temperaturudsvinget i træunderlaget kunne ses at blive mindsket ved etablering af den udvendige isolering.



Figur 39: W3.2.1.2 (skygge med 50 mm udvendig isolering) og W3.2.1.3 (skygge med 100 mm udvendig isolering)

Der ses samtidig en yderligere sænkning af fugtniveauet i træunderlaget, såfremt der anvendes 100 mm udvendig isolering i stedet for 50 mm isolering ved skygge på tagfladen.



Figur 40: B3.1.1.1 (referencemodel), B3.1.1.2 (udvendig isolering), B3.2.1.2 (udvendig isolering og skygge), B3.2.1.1 (referencemodel med skygge)

Ved simulering i BSim ses samme tendenser.

Den udvendige isolering mellem tagbrædder og tagpap sænkede fugtniveauet i vinterhalvåret og forhøjede fugtniveauet i sommerhalvåret.

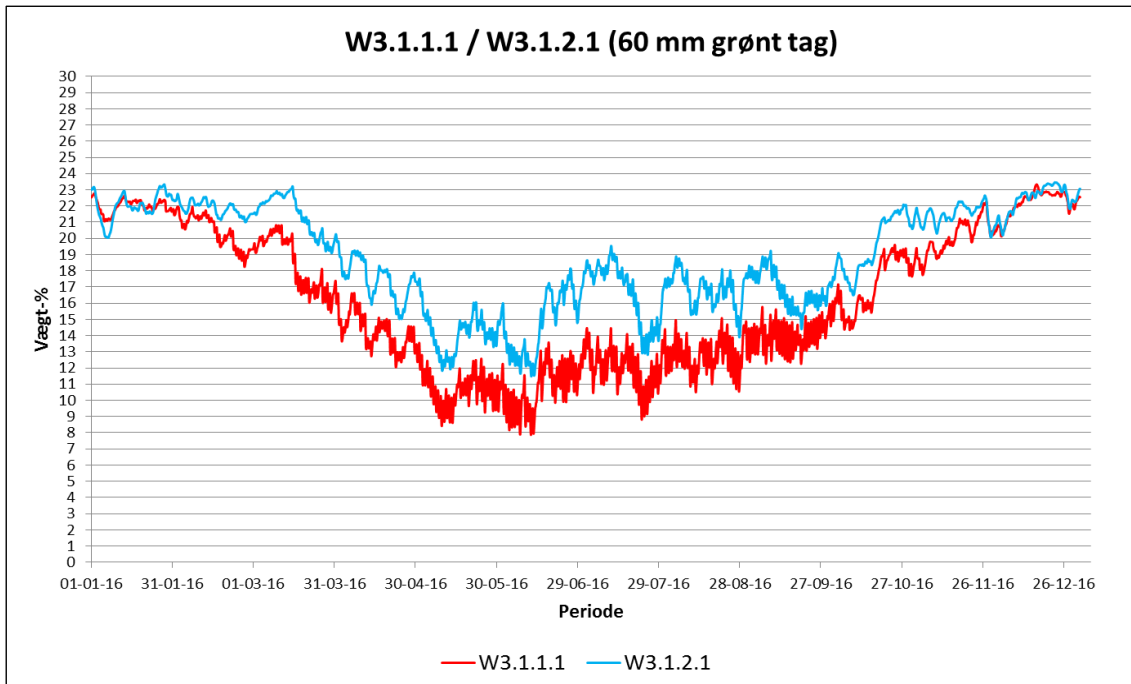
Ved skygge på tagfladen nedsatte den udvendige isolering fugtniveauet i vinterhalvåret, hvor der i sommerhalvåret kunne ses et mere ensartet fugtniveau i resultaterne fra BSim end der gjorde i WUFI.

5.4 Grønne tage

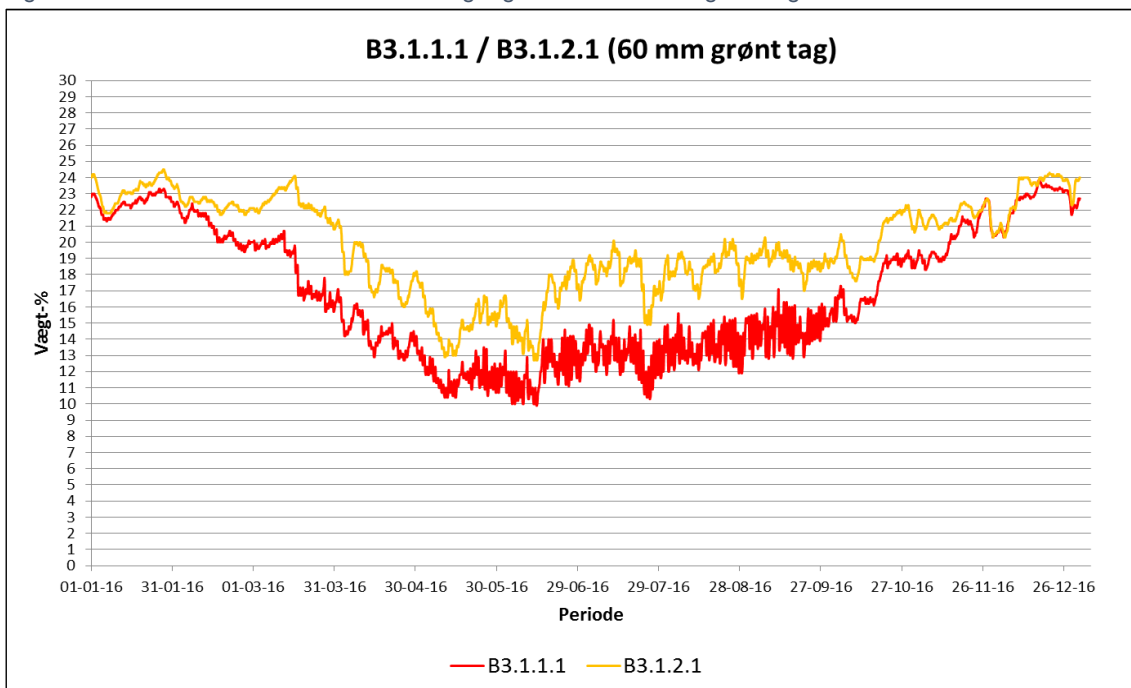
Ved simulering i WUFI sås fugtniveauet i træunderlaget med det grønne tag at være forøget, særligt i sommerhalvåret, i forhold til referencemodellens fugtniveau.

I midten af vinterhalvåret blev fugtniveauet mere ensartet, mens der i den resterende del af vinterhalvåret ses en mindre forøgelse i fugtniveau.

Ved simulering i BSim blev fugtniveauet ligeledes forøget mest i sommerhalvåret og mindre i vinterhalvåret. Fugtniveauet blev forøget over hele året i forhold til referencemodellens fugtniveau.

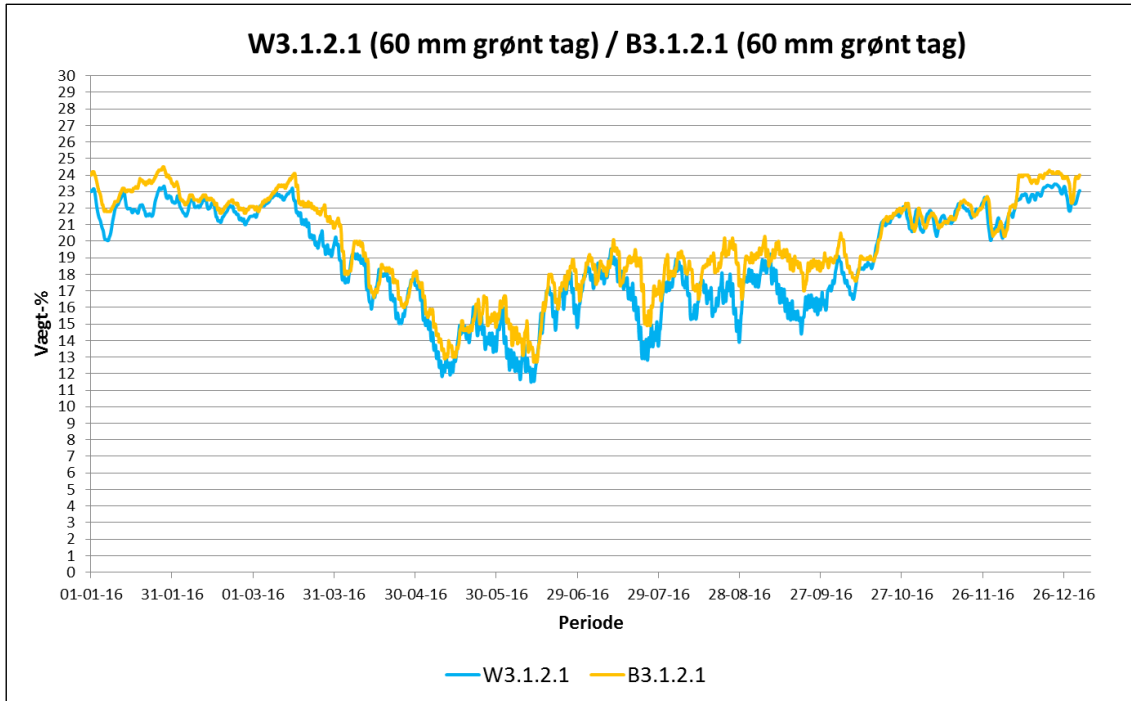


Figur 41: WUFI referencemodel W3.1.1.1 og tagkonstruktion med grønt tag W3.1.2.1

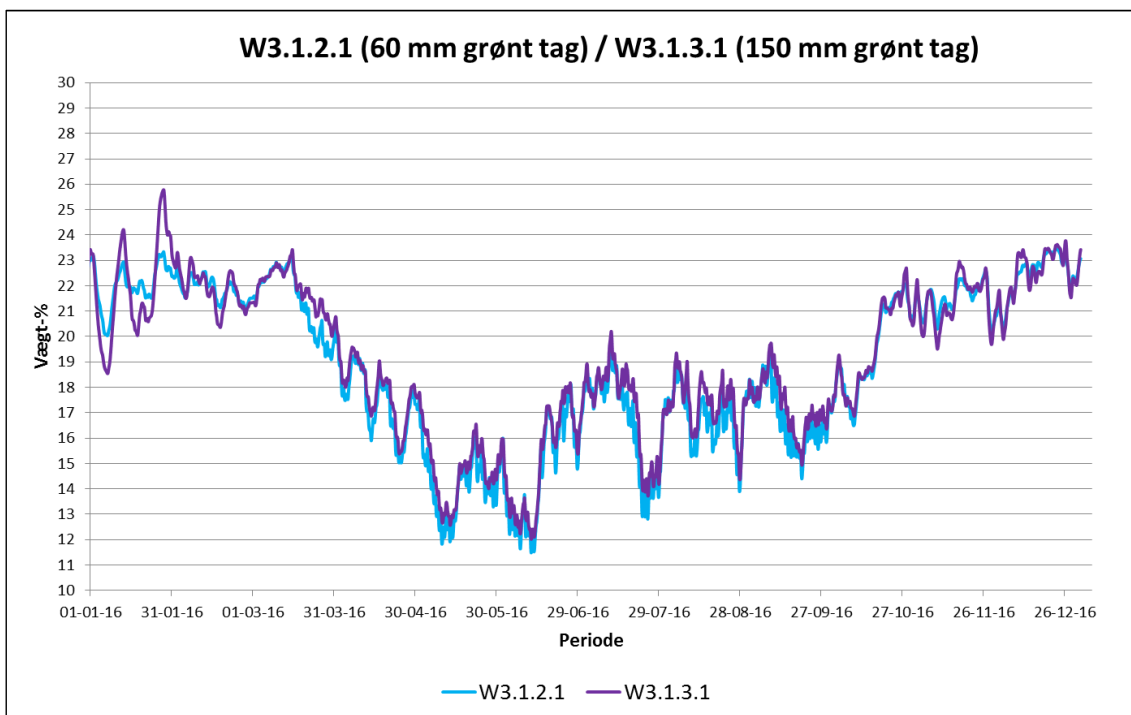


Figur 42: BSim referencemodel B3.1.1.1 og tagkonstruktion med grønt tag B3.1.2.1

Resultatet fra de to programmer ses desuden at være meget sammenlignelige over hele året. Ved forøgelsen af tykkelsen på det grønne tag til 150 mm (semi-intensivt) ses en mindre forøgelse af fugtniveauet over hele året i resultaterne fra WUFI.



Figur 43: Sammenligning af resultater for grønt tag i WUFI W3.1.2.1 og BSim B3.1.2.1

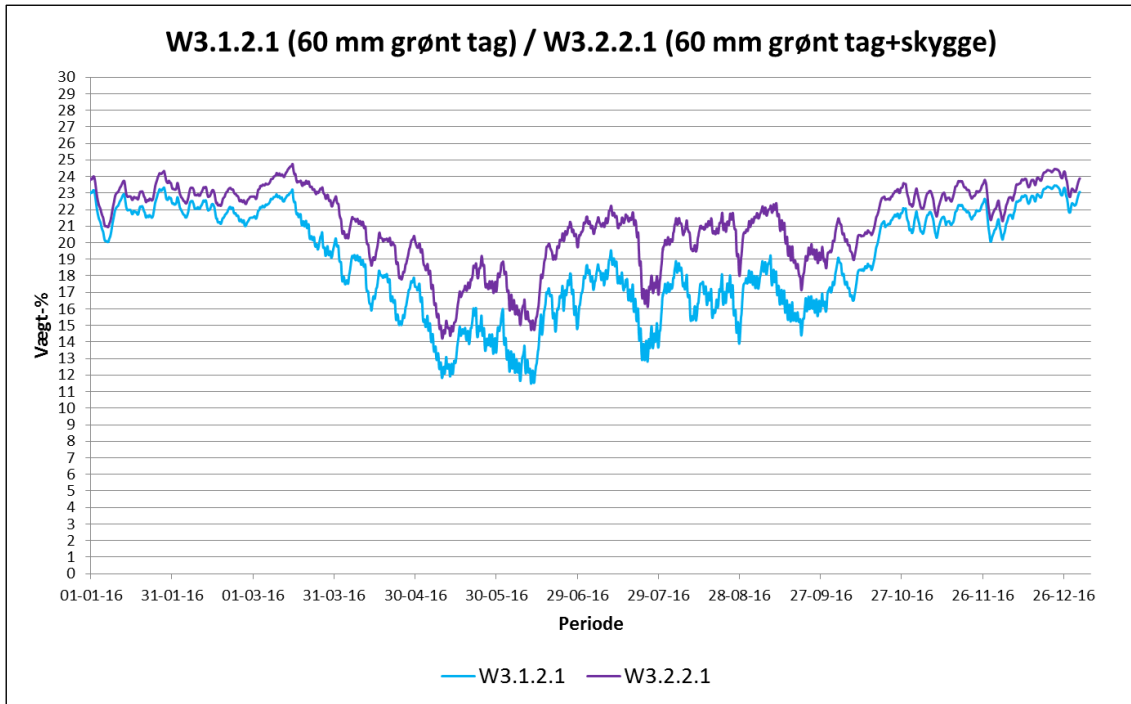


Figur 44: Fugtniveau i træunderlag for W3.1.2.1 (60 mm grønt tag) og W3.1.3.1 (150 mm grønt tag)

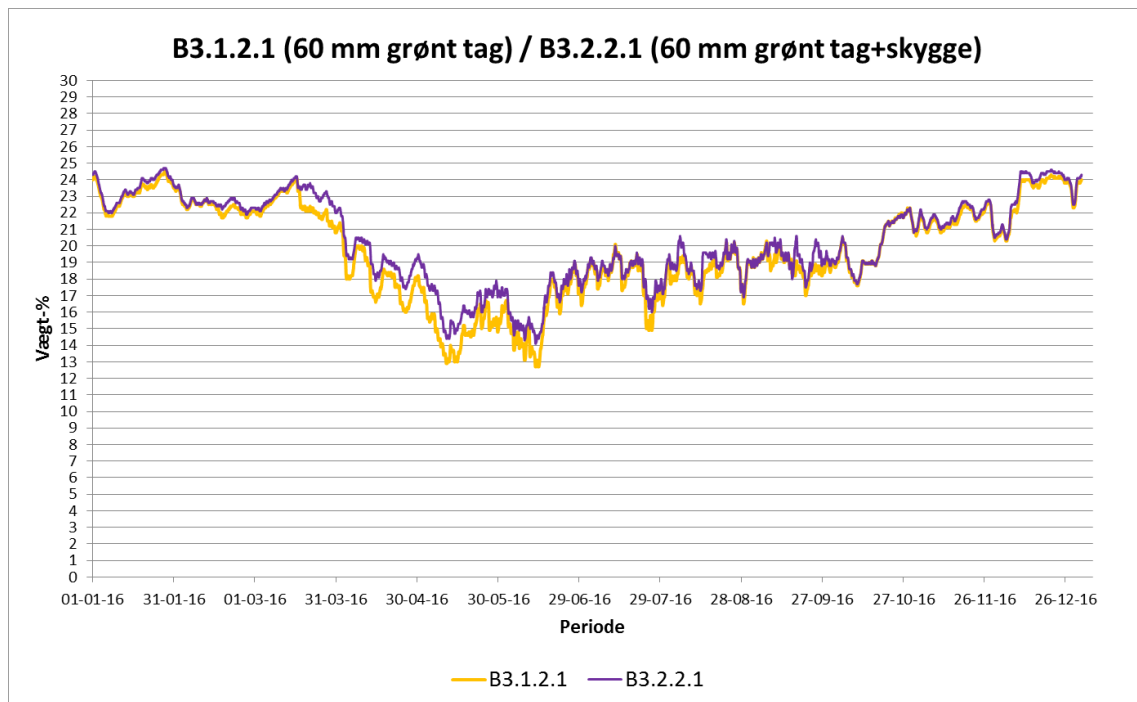
Skygge på grønne tage

I WUFI blev fugtniveauet, ved skyggeforhold på det grønne tag, forøget over hele året. Forøgelsen var størst i sommerhalvåret.

I BSim blev fugtniveauet, ved skyggeforhold på det grønne tag, let forøget over hele året.



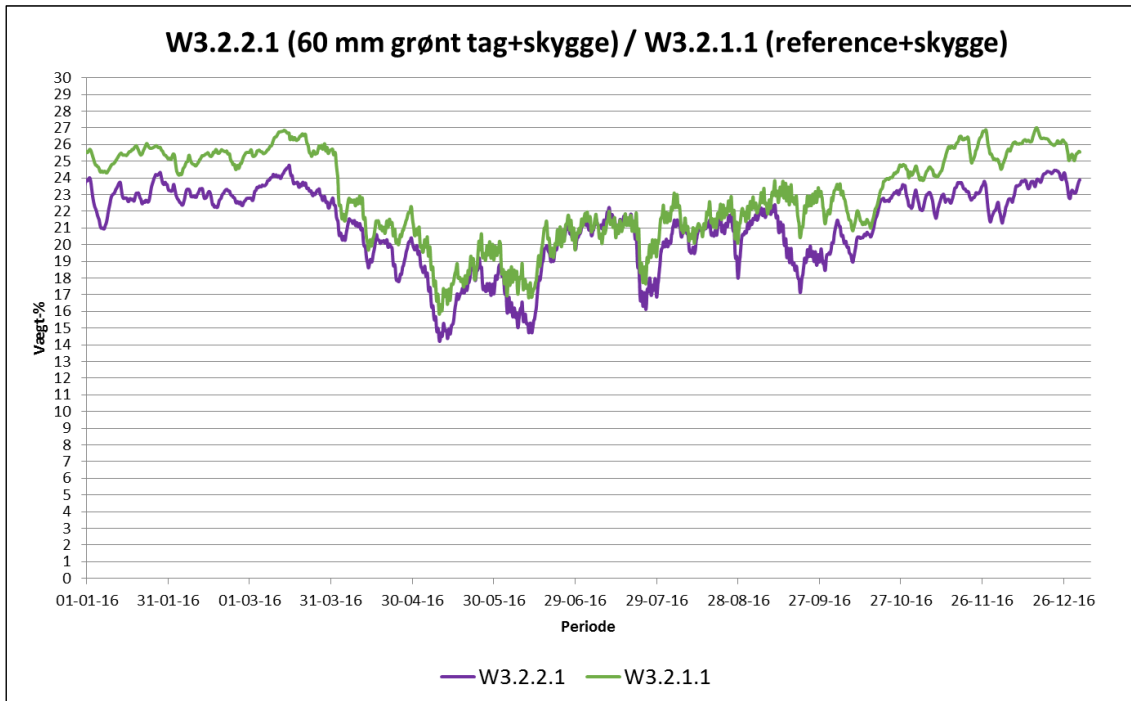
Figur 45: Fugtniveau i træunderlag for simulering i WUFI. W3.1.2.1 (tagkonstruktion med grønt tag) og W3.2.2.1 (tagkonstruktion med grønt tag og skygge)



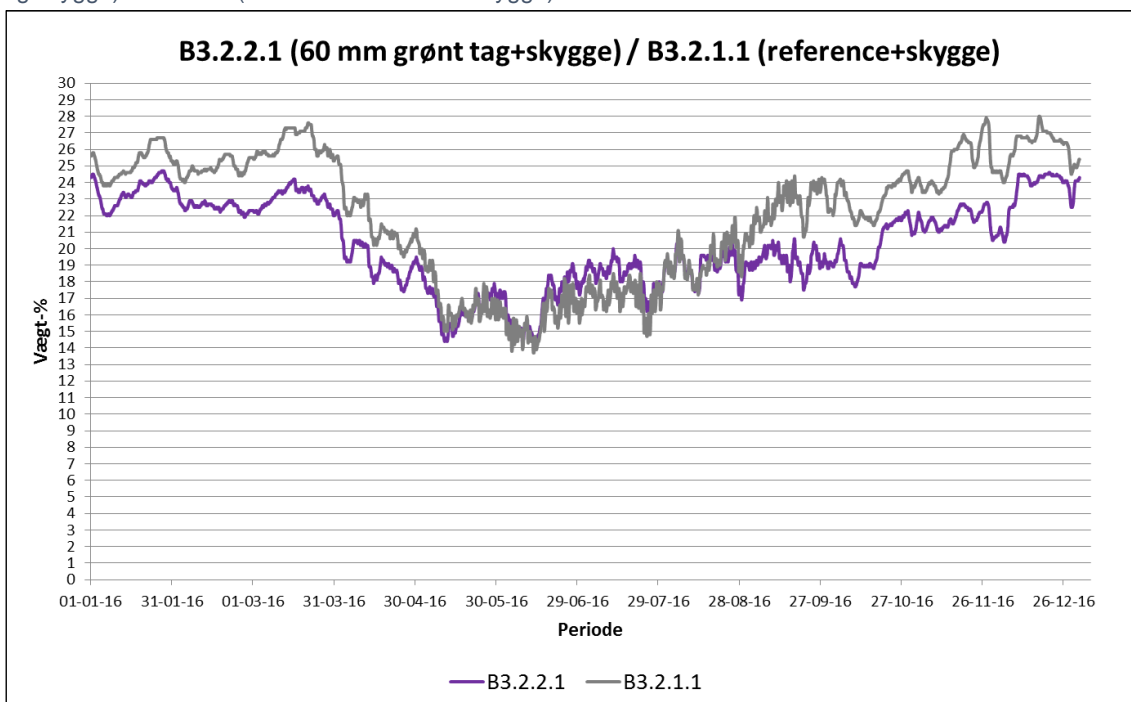
Figur 46: Fugtniveau i træunderlag for simulering i BSim. B3.1.2.1 (tagkonstruktion med grønt tag) og B3.2.2.1 (tagkonstruktion med grønt tag og skygge)

Ved at sammenholde det grønne tag med skygge og referencemodellen med skygge, kunne der ses et lavere fugtniveau om vinteren ved tagkonstruktionen med grønt tag.

Ved resultater fra BSim kunne ligeledes ses en sænkning af fugtniveauet i vinterhalvåret. Midt på sommeren ses en mindre forøgelse af fugtniveauet i træunderlaget, og resten af sommeren blev fugtniveauet for de to situationer sammenligneligt.



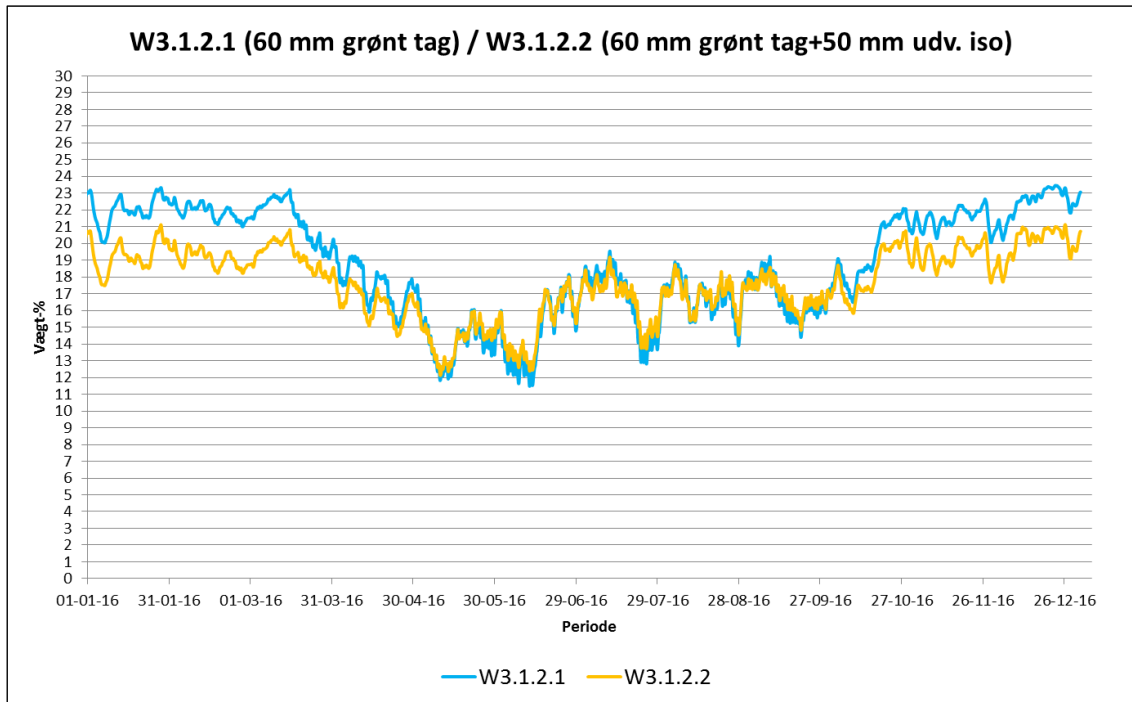
Figur 47: Fugtniveau i træunderlag for simulering i WUFI. W3.2.2.1 (tagkonstruktion med grønt tag og skygge). W3.2.1.1 (referencemodell med skygge).



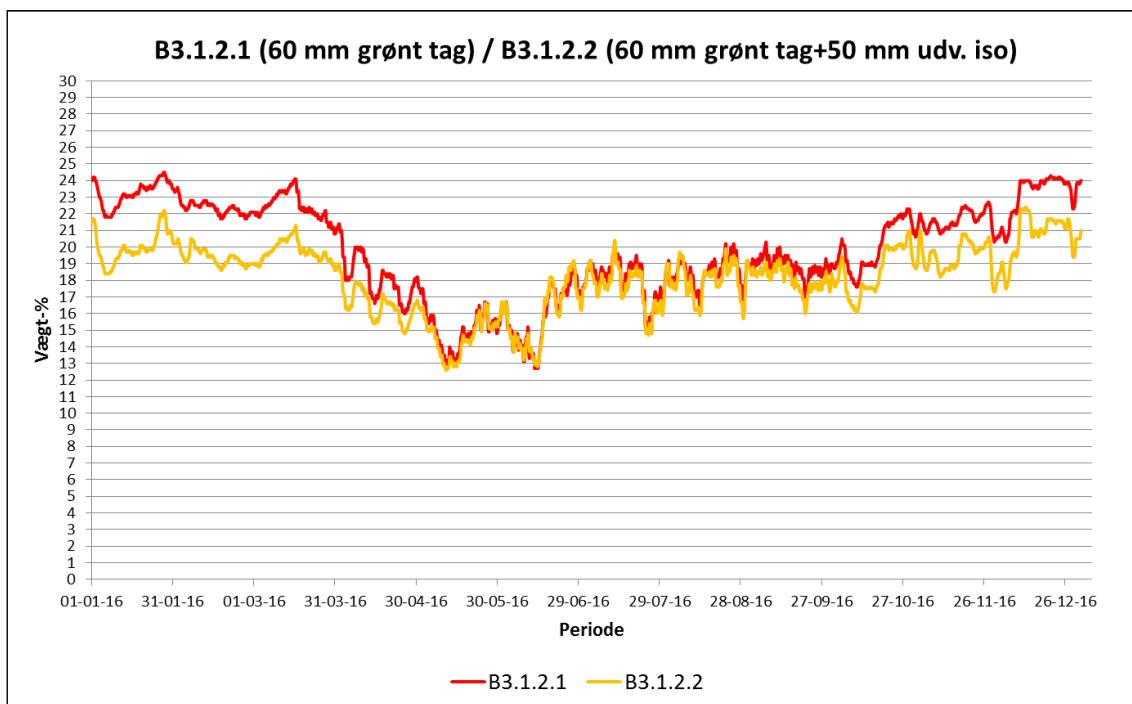
Figur 48: Fugtniveau i træunderlag for simulering i BSim. B3.2.2.1 (tagkonstruktion med grønt tag og skygge). B3.2.1.1 (referencemodell med skygge).

Grønt tag med udvendig isolering

Ved etablering af 50 mm isolering under det grønne tag blev fugtniveauet i træunderlaget sænket i vinterhalvåret. I sommerhalvåret viste fugtniveauet sig med og uden isolering under det grønne tag at være meget ensartet. Dette kunne ses af resultaterne fra både WUFI og BSim.



Figur 49: Fugtniveau i træunderlag for simulering i WUFI. W3.1.2.1 (tagkonstruktion med grønt tag). W3.1.2.2 (tagkonstruktion med grønt tag og 50 mm udvendig isolering).

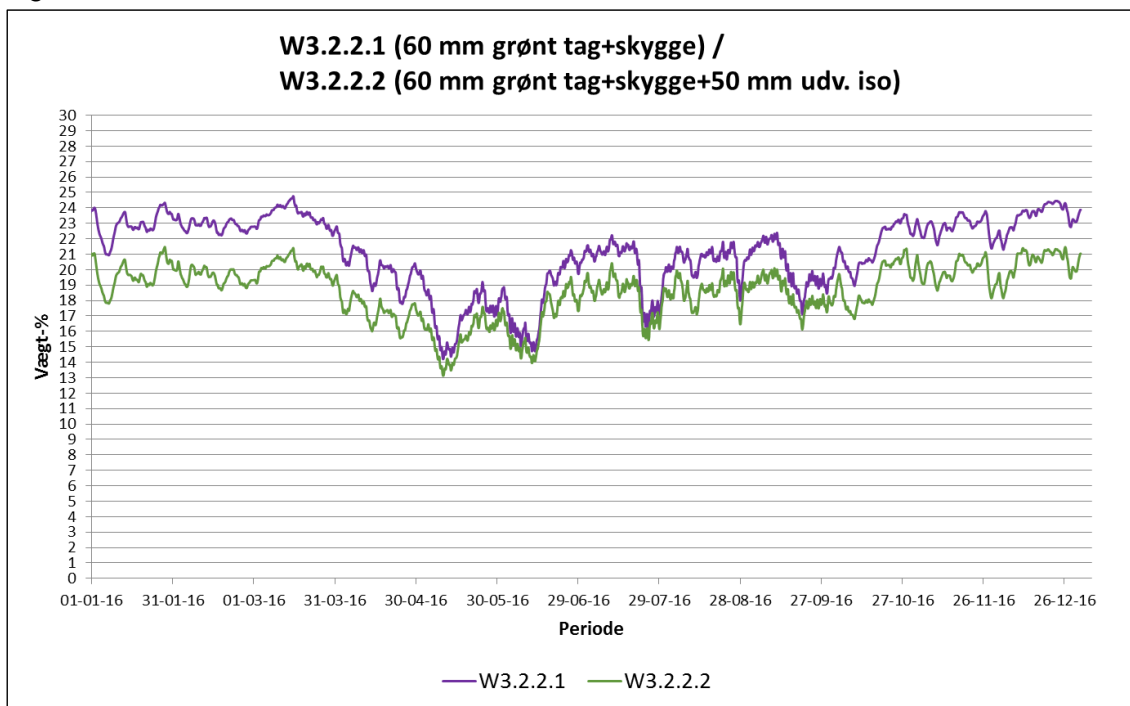


Figur 50: Fugtniveau i træunderlag for simulering i BSim. B3.1.2.1 (tagkonstruktion med grønt tag). B3.1.2.2 (tagkonstruktion med grønt tag og 50 mm udvendig isolering).

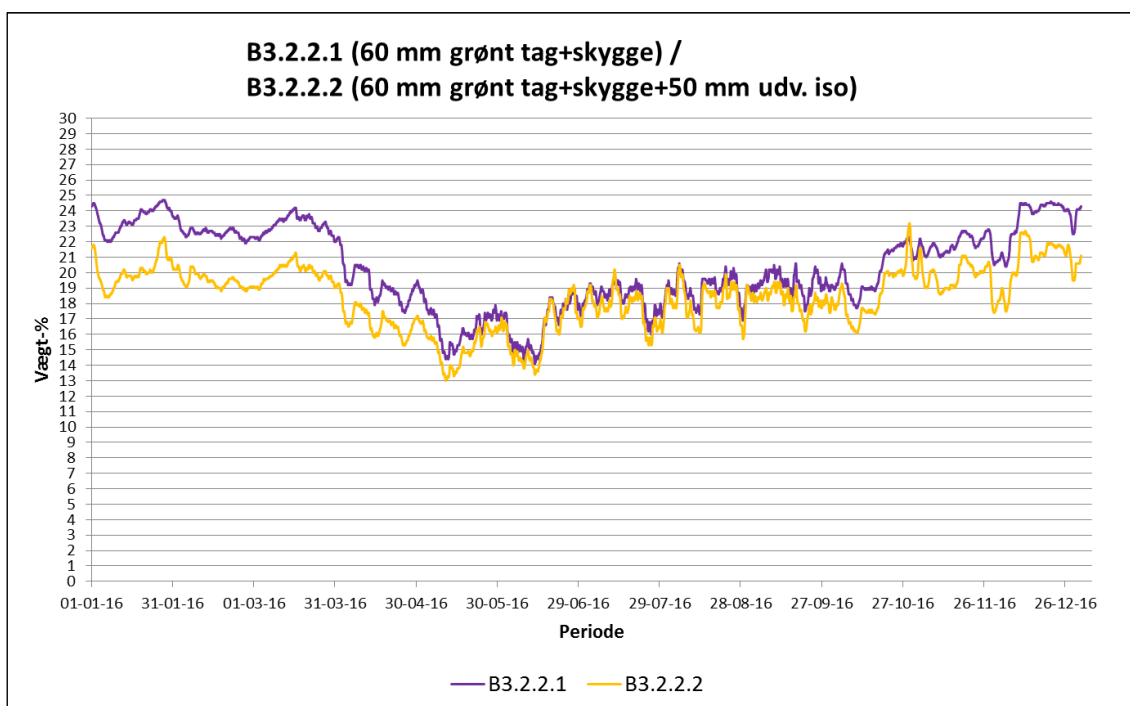
Grønt tag med skygge og udvendig isolering

Hvis der var skygge på tagfladen og samtidig blev udført 50 mm isolering under det grønne tag, viste fugtniveauet i træunderlaget sig, at blive sænket over hele året ved simulering i WUFI. Fugtniveauet blev sænket mest i vinterhalvåret.

Ved simulering i BSim blev fugtniveauet sænket i vinterhalvåret, mens fugtniveauet om sommeren var næsten uændret.



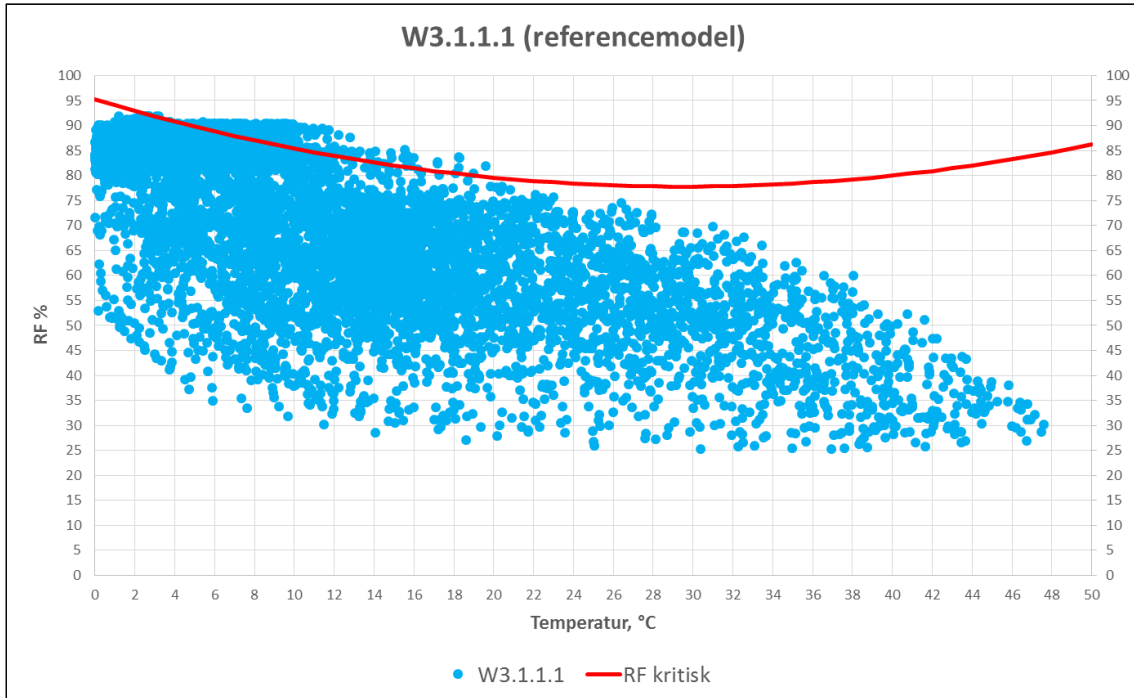
Figur 51: Fugtniveau i træunderlag for simulering i WUFI. W3.2.2.1 (tagkonstruktion med grønt tag og skygge). W3.2.2.2 (tagkonstruktion med grønt tag og 50 mm udvendig isolering).



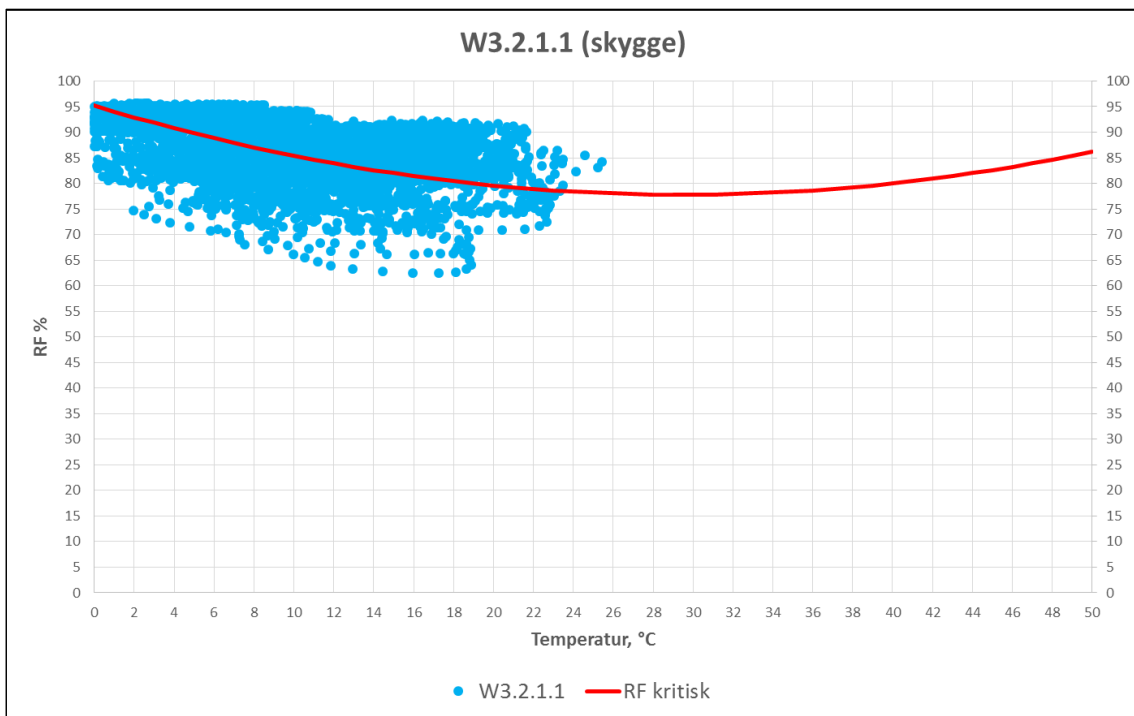
Figur 52: Fugtniveau i træunderlag for simulering i BSim. B3.2.2.1 (tagkonstruktion med grønt tag og skygge). B3.2.2.2 (tagkonstruktion med grønt tag og 50 mm udvendig isolering).

5.5 Risiko for skimmelvækst

Resultaterne på timebasis for det 3. simuleringsår fra WUFI, er udført som isopleth-diagrammer, der ses af nedenstående figurer. $RF_{kritisk}$ er iht. afsnit 3.6. Resultaterne kan ses i tabeloversigt i afsnittets slutning.



Figur 53: Isopleth-diagram med resultater for temperatur og RF fra WUFI.
W3.1.1.1 (referencemodel)



Figur 54: Isopleth-diagram med resultater for temperatur og RF fra WUFI.
W3.2.1.1 (referencemodel med skygge)

Referencemodel – figur 53

Ved referencemodellen W3.1.1.1 viste der sig at være 470 timer ud af 8760, hvor den relative fugtighed var over RF_{kritisk} . Dette svarer til 5,4% af året.

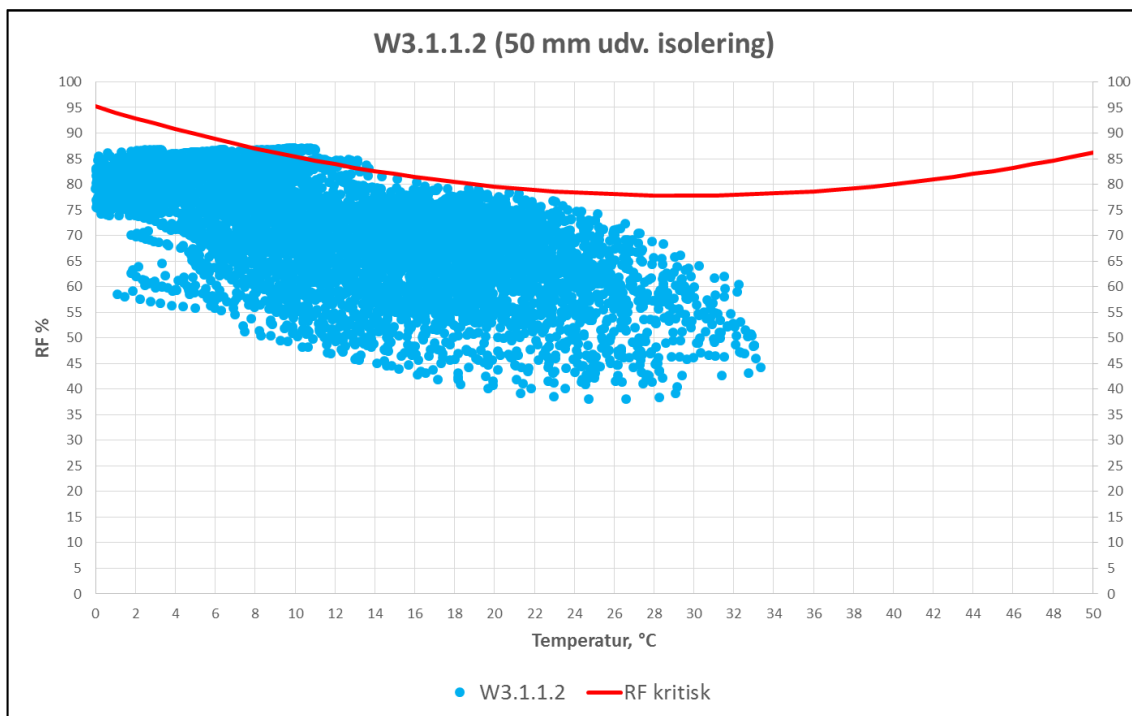
Timerne ses særligt ved temperaturer fra 4-16°C.

Referencemodel med skygge – figur 54

Ved skygge på tagfladen viste der sig at ske en forøgelse af tilfælde, hvor den relative fugtighed blev over RF_{kritisk} . Her var der 4994 timer ud af 8760, svarende til 57,0% af året.

Resultaterne kunne samtidig ses mindre spredt end for referencemodellen, og temperaturerne blev maksimalt omkring 26°C.

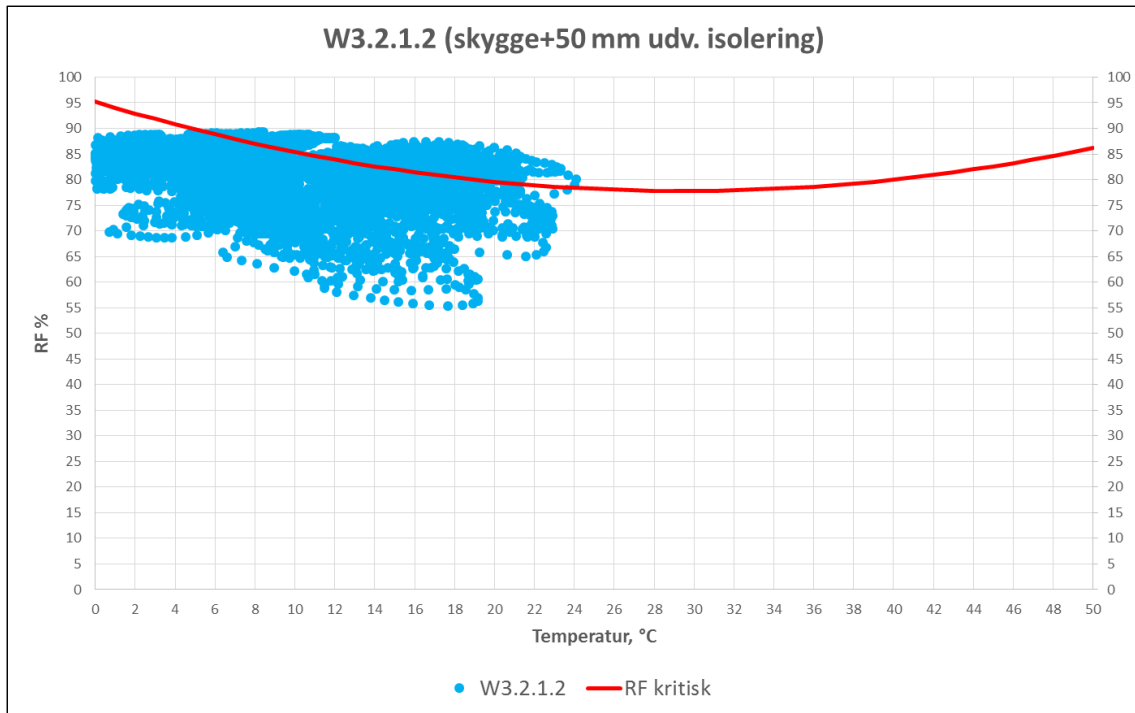
Ved et højere luftskifte på 100 h^{-1} blev perioderne med risiko for skimmelvækst formindsket til 53,5% af året, og ved et lavere luftskifte på 10 h^{-1} blev risikoen forøget til 61,3% af året.



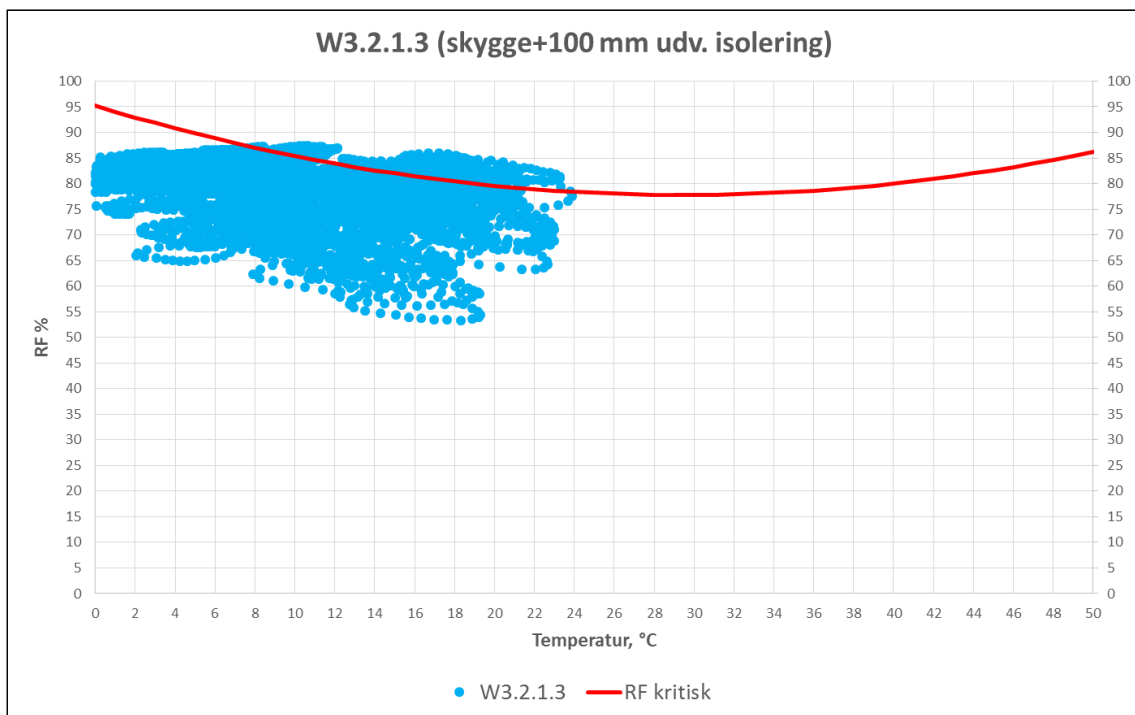
Figur 55: Isopleth-diagram med resultater for temperatur og RF fra WUFI.
W3.1.1.2 (referencemodel med 50 mm udvendig isolering)

Referencemodel med 50 mm udvendig isolering – figur 55

Ved tilføjelse af 50 mm udvendig isolering mellem træunderlag og tagpap kunne dette ses at nedsætte antallet af timer, hvor den relative fugtighed blev over RF_{kritisk} . Der blev nu 111 timer ud af 8760, svarende til 1,3% af året.



Figur 56: Isopleth-diagram med resultater for temperatur og RF fra WUFI.
W3.2.1.2 (referencemodel med skygge og 50 mm udvendig isolering)



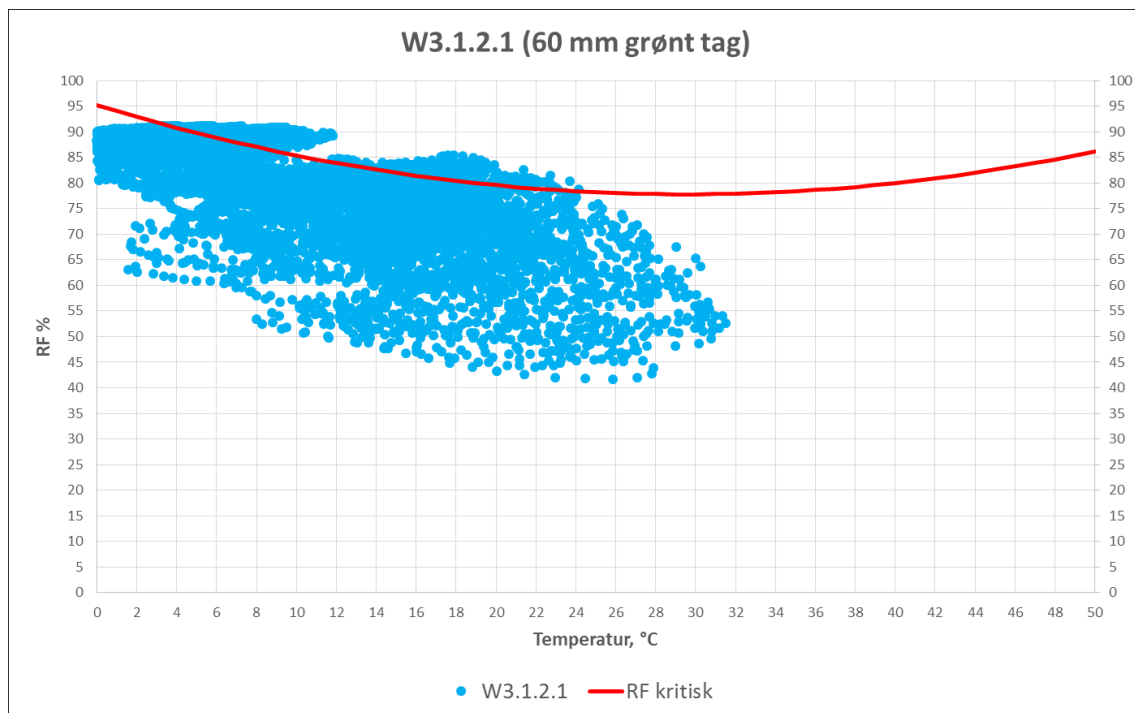
Figur 57: Isopleth-diagram med resultater for temperatur og RF fra WUFI.
W3.2.1.3 (referencemodel med skygge og 100 mm udvendig isolering)

Referencemodel med skygge og 50 mm udvendig isolering – figur 56

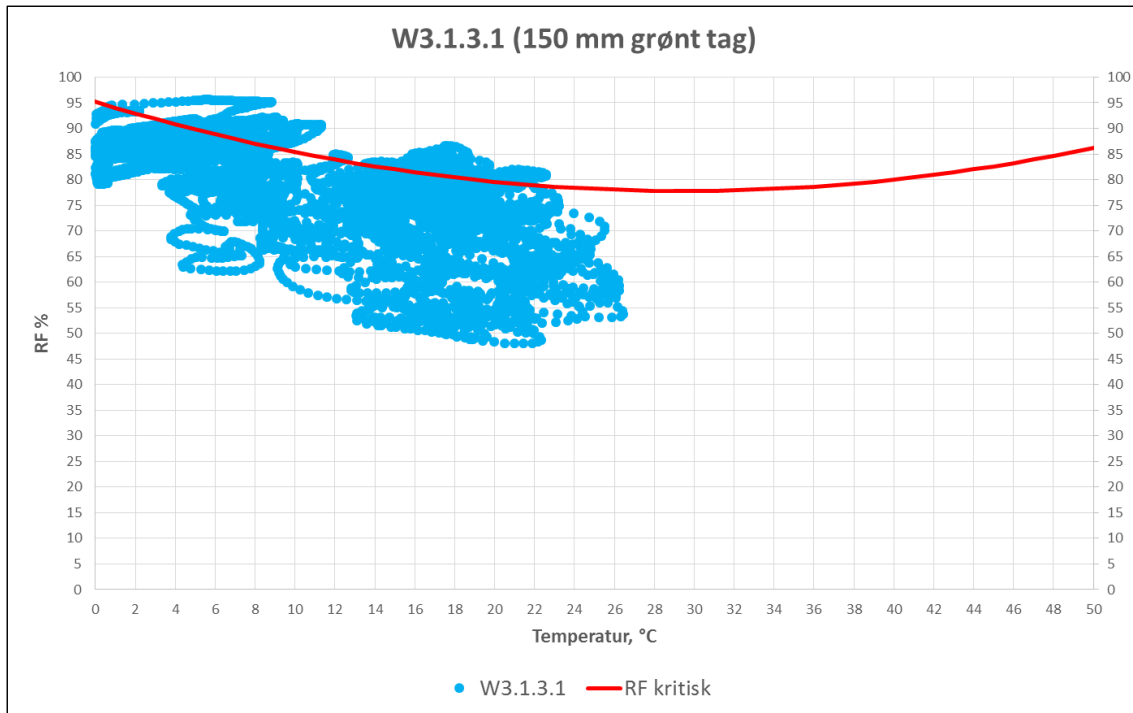
Ved skygge på tagfladen og tilføjelse af 50 mm udvendig isolering mellem træunderlag og tagpap viste dette sig at resultere i 1840 timer ud af 8760, hvor den relative fugtighed blev over $RF_{kritisk}$. Dette svarede til 21,0% af året. Ved forøgelse af isoleringsmængden til 100 mm blev risikoen sænket til 12,7% af året.

Referencemodel med skygge og 100 mm udvendig isolering – figur 57

Ved forøgelse af isoleringsmængden til 100 mm blev risikoen sænket til 12,7% af året.



Figur 58: Isopleth-diagram med resultater for temperatur og RF fra WUFI. W3.1.2.1 (referencemodel med 60 mm grønt tag)



Figur 59: Isopleth-diagram med resultater for temperatur og RF fra WUFI.
W3.1.3.1 (referencemodel med 150 mm grønt tag)

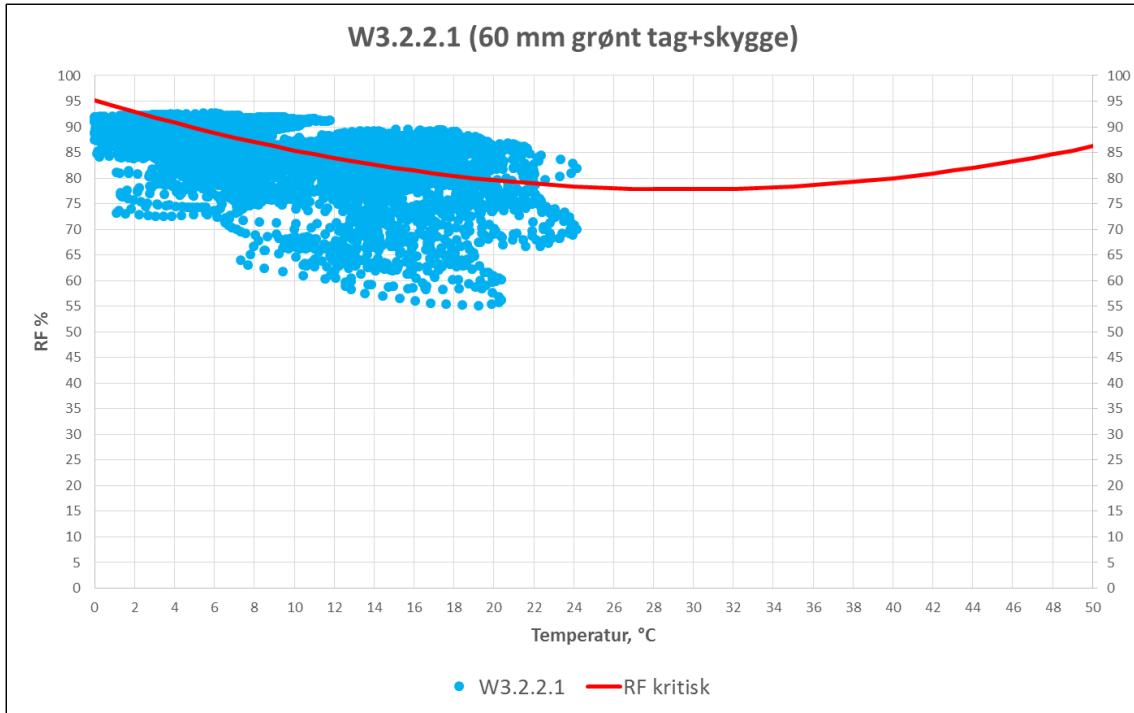
Referencemodel med 60 mm grønt tag – figur 58

Ved etablering af grønt tag på tagfladen viste dette at resultere i 1194 timer ud af 8760, hvor den relative fugtighed blev over $RF_{kritisk}$. Dette svarede til 13,6% af året. Der ses en sænkning af timer med høje temperaturer, f.eks. over 30°C, i forhold til referencemodellen.

Ved et højere luftskifte på 100 h^{-1} blev perioderne med risiko for skimmelvækst forøget til 22,4% af året, og ved et lavere luftskifte på 10 h^{-1} blev perioderne formindsket til 2,4% af året.

Referencemodel med 150 mm grønt tag – figur 59

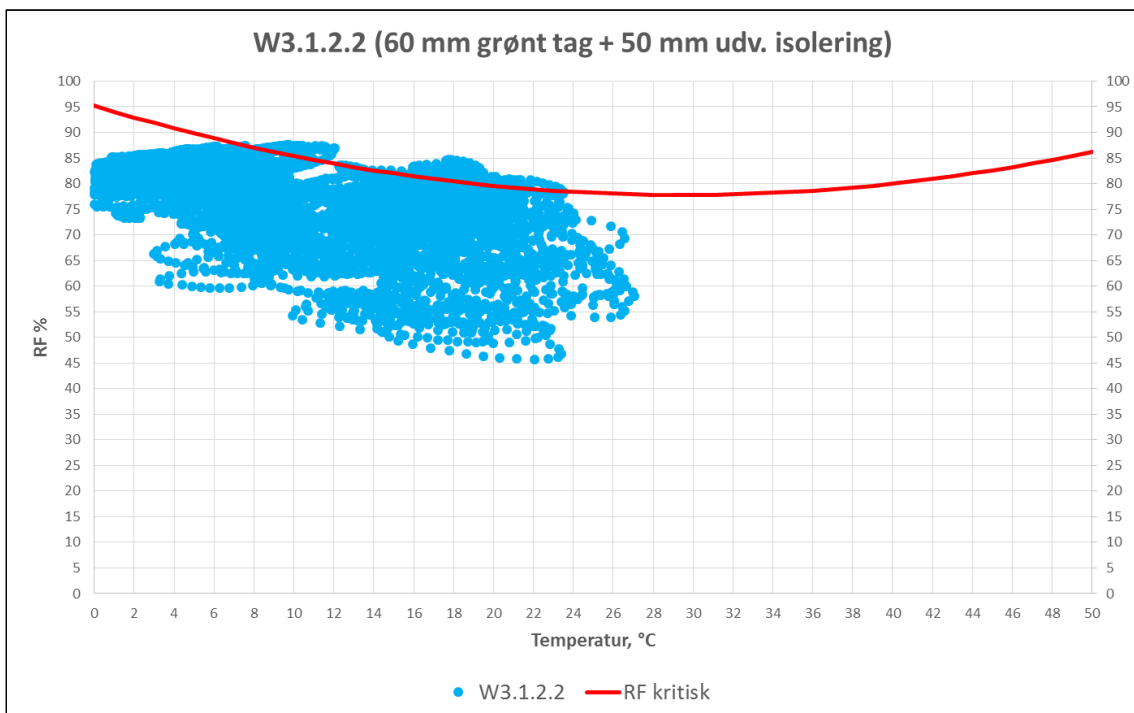
Ved etablering af 150 mm semi-intensivt grønt tag på tagfladen viste dette at resultere i 1510 timer ud af 8760, hvor den relative fugtighed blev over $RF_{kritisk}$. Dette svarede til 17,2% af året.



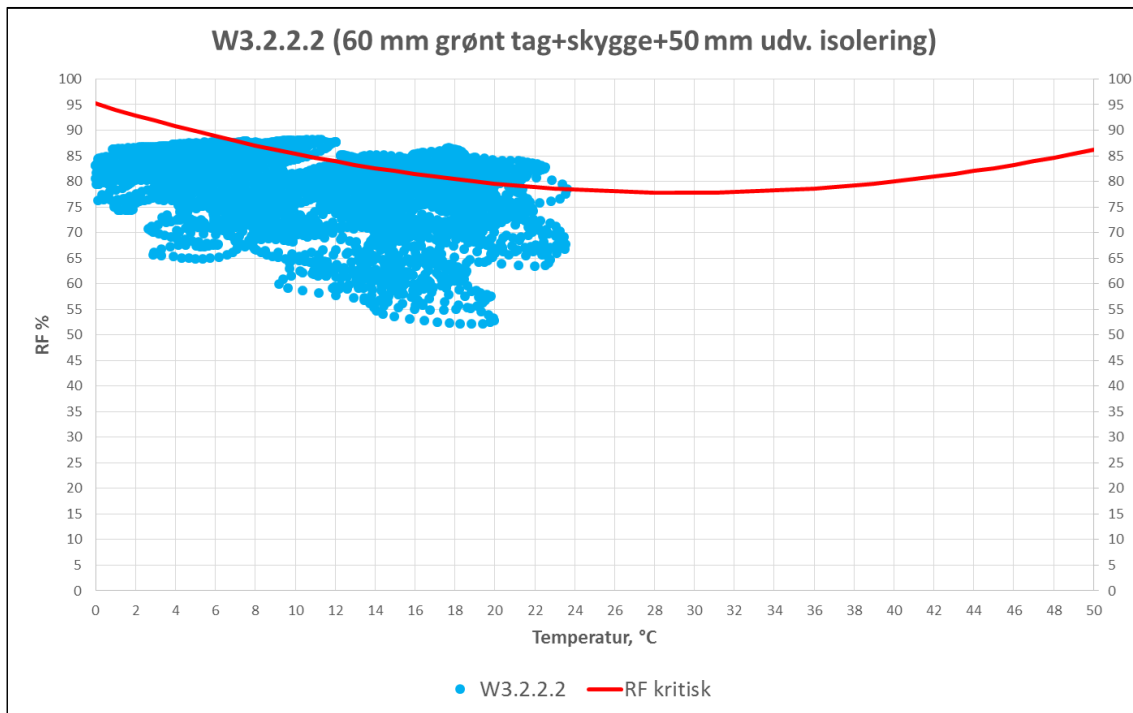
Figur 60: Isopleth-diagram med resultater for temperatur og RF fra WUFI.
W3.2.2.1 (referencemodel med skygge og grønt tag)

60 mm grønt tag med skygge – figur 60

Ved skygge på tagfladen og etablering af grønt tag viste dette at resultere i 3405 timer ud af 8760, hvor den relative fugtighed blev over $RF_{kritisk}$. Dette svarer til 38,9% af året.



Figur 61: Isopleth-diagram med resultater for temperatur og RF fra WUFI.
W3.1.2.2 (referencemodel med grønt tag og 50 mm udvendig isolering)



Figur 62: Isopleth-diagram med resultater for temperatur og RF fra WUFI.
W3.2.2.2 (referencemodel med grønt tag, skygge og 50 mm udvendig isolering)

60 mm grønt tag med 50 mm udvendig isolering – figur 61

Ved etablering af grønt tag og 50 mm udvendig isolering viste dette at resultere i 454 timer ud af 8760, hvor den relative fugtighed blev over $RF_{kritisk}$. Dette svarer til 5,2% af året.

60 mm grønt tag med skygge og 50 mm udvendig isolering – figur 62

Ved skygge på tagfladen, hvor der er etableret grønt tag og 50 mm udvendig isolering viste dette at resultere i 1430 timer ud af 8760, hvor den relative fugtighed blev over $RF_{kritisk}$. Dette svarer til 16,3% af året.

Ved ændring af den udvendige isolering til 100 mm ses perioden med risiko for skimmelvækst sænket til 10,5% af året.

Resultater for de forskellige modeller kan af nedenstående tabeloversigt.

Model-nr.	Luftskifte [h ⁻¹]	Skygge	Grønt tag	Udvendig isolering	Timer med risiko for skimmelvækst pr. år [%]
W1.1.1.1 (ingen graf)	1	-	-	-	0,0
W2.1.1.1 (ingen graf)	10	-	-	-	0,7
W3.1.1.1 Reference	30	-	-	-	5,4
W4.1.1.1 (ingen graf)	100	-	-	-	11,8
W2.2.1.1 (ingen graf)	10	JA	-	-	61,3
W3.2.1.1	30	JA	-	-	57,0
W4.2.1.1 (ingen graf)	100	JA	-	-	53,5
W3.1.1.2	30	-	-	50 mm	1,3
W3.2.1.2	30	JA	-	50 mm	21,0
W3.2.1.3	30	JA	-	100 mm	12,7
W2.1.2.1 (ingen graf)	10	-	60 mm	-	2,4
W3.1.2.1	30	-	60 mm	-	13,6
W4.1.2.1 (ingen graf)	100	-	60 mm	-	22,4
W3.1.3.1	30	-	150 mm	-	17,2
W3.2.2.1	30	JA	60 mm	-	38,9
W3.1.2.2	30	-	60 mm	50 mm	5,2
W3.1.2.3 (ingen graf)	30	-	60 mm	100 mm	4,4
W3.2.2.2	30	JA	60 mm	50 mm	16,3
W3.2.2.3 (ingen graf)	30	JA	60 mm	100 mm	10,5

Tabel 9: Oversigt med simuleringresultater for risikoen for skimmelvækst afhængig af tagkonstruktionens opbygning

6. Vurdering

6.1 Validering

Af de udførte simuleringer med faste luftskifter, ser det ud til af fugtniveauet i træunderlaget stemmer bedst overens med reference-målingerne fra den flade, ventilerede tagkonstruktion, såfremt der forekommer et fast luftskifte på 30 h^{-1} i hulrummet. Det viser sig at være gældende i resultaterne fra både WUFI og BSim.

Fugtniveauet fra de bedst passende simuleringer stemmer dog ikke helt overens med referencemålingerne. I de første 3 måneder af 2016 er simuleringerne 2-4% lavere end referencemålingen. I kraft af at der sammenlignes resultater fra det 3. år, beregnet med samme udeklimadata, vurderes dette at kunne være en mulig årsag til afvigelsen. Referencemålingerne er nemlig påvirket af det reelle udeklima fra vinteren 2015, mens simuleringerne er påvirket af udeklimaet fra vinteren 2016, som ikke er undersøgt, og derfor kan være væsentlig anderledes end vinteren 2016.

Fra primo april til ultimo november ligger fugtniveauet i simuleringerne generelt højere end reference-målingerne. Dette kan skyldes flere forhold, såsom forskellen i temperaturen, der kunne ses af figur 30, hvor temperaturen i sommerhalvåret var gennemsnitligt højere i referencemålingerne end i simuleringen. Det er også muligt at placeringen af fugtmålepunktet i referencemålingen, der er monteret på undersiden af tagbrædderne, betyder at der ikke forekommer samme afkøling og kondensering af fugt på undersiden af træunderlaget, som der gør i simuleringerne.

Det mest realistiske luftskifte i det ventilerede hulrum er vurderet at være med et fast luftskifte på 30 h^{-1} , idet det stemmer bedst overens med referencemålingerne. Den dynamiske beregning af luftskiftet fra model B5.1.1.1, udført med åbningsarealer iht. [13], bekræfter ligeledes et gennemsnitligt luftskifte på 30 h^{-1} . Hertil må dog nævnes at det dynamiske luftskifte også ser ud til at have en væsentlig indflydelse på det faktiske fugtniveau i træunderlaget henover året, idet fugtniveauet generelt blev lavere ved det dynamiske luftskifte end ved det faste luftskifte.

Overordnet vurderes simuleringerne repræsentative for anvendelse til parameterstudiet, idet fugtniveauet for de udvalgte modeller W3.1.1.1 og B3.1.1.1 med et fast luftskifte på 30 h^{-1} , er højere i størstedelen af året og dermed kan betegnes som værende på den sikre side i forhold til referencemålingerne.

Ved simuleringerne kan der ses at være overensstemmelse mellem luftskifte og fugtniveau i træunderlaget. Ved lavere fast luftskifte viser der sig også et lavere fugtniveau i træunderlaget. Tilsvarende ved højere luftskifte viser der sig et højere fugtniveau i træunderlaget. Ved simuleringerne bliver den fugtteknisk bedste situation derfor et luftskifte på 1 h^{-1} . I virkeligheden må der dog tages højde for, at situationen i simuleringen er ideel, idet der ikke kan ske tilførelse af fugt fra indeklimaet ved konvektion. Dette er der risiko for i praksis, såfremt der er utætheder i dampspærren. Samtidig vurderes det meget svært at etablere naturlig ventilation med et gennemsnitligt luftskifte på 1 h^{-1} . Til gengæld viser simuleringerne at det ikke er ønskværdigt, at etablere et højt luftskifte på 100 h^{-1} , idet fugtniveauet i træunderlaget forøges ved dette.

Sammenholdes forskellige luftskifter og deres relative fugtighed og temperatur på undersiden af træunderlaget, kan det ses at have en væsentlig indflydelse på risikoen for skimmelvækst på træet. Referencemodellen W3.1.1.1 med et fast luftskifte på 30 h^{-1} har en risiko for skimmelvækst i 5,4% af timerne for året. Øges luftskiftet til 100 h^{-1} forøges antallet af timer med risiko for skimmelvækst til 11,8% af året, og nedsættes luftskiftet til 10 h^{-1} sænkes risikoen til 0,7% af året. Der ses derved yderligere en sammenhæng mellem et højere luftskifte og en øget risiko for skimmelvækst i træunderlaget, hvorfor det underbygger at det ikke skal tilstræbes at etablere et luftskifte på 100 h^{-1} i tagkonstruktionen.

Vurdering af risikoen for skimmelvækst kunne også sammenlignes på tværs af resultaterne fra de to beregningsprogrammer, ved at udarbejdelse af tilsvarende isopleth-diagrammer for resultaterne fra BSim. Der er dog vurderet at være tilstrækkelig sammenhæng mellem resultaterne fra de to programmer til, at dette ikke var nødvendigt. Det er valgt at grundlaget til vurdering af risikoen for skimmelvækst skulle være resultater fra WUFI, idet disse indregner effekten fra nedbøren i udeklimaet.

6.2 Skyggevirkning

Skygge på tagfladen viser sig at resultere i en markant forøgelse af fugtniveauet i træunderlaget, når der sammenlignes med referencemodellen. Det gælder både for hele året og for begge beregningsprogrammer.

Skyggen er i WUFI defineret ved overfladeegenskaber med et absorptionstal på 0,0 svarende til, at der ikke absorberes hverken direkte eller diffus solstråling på tagfladen. Dette vurderes at være på den sikre side. Skyggevirkning fra omkringliggende bygninger, beplantning eller installationer på tagfladen menes nemlig ikke at kunne fjerne effekten fra den diffuse solstråling helt.

Fugtniveauet i resultatet fra BSim med skygge på tagfladen stemmer godt overens med WUFI i vinterhalvåret, men i sommeren er fugtniveauet 2-3% lavere i resultaterne fra BSim. Forskellen vurderes at hænge sammen med at skyggen er defineret geometrisk i BSim, og at programmet derfor medregner nogen effekt fra solstrålingen, modsat WUFI, hvor der ikke absorberes nogen solstråling. Fugtniveauet i sommerhalvåret fra BSim vurderes derfor at være mere realistisk end resultatet fra WUFI. Set i relation til undersøgelsen i dette projekt, anses resultaterne fra WUFI dog fortsat at kunne anvendes til fugttekniske vurderinger og sammenligninger, da resultatet netop er på den sikre side.

Ved skygge på tagfladen ses perioderne med risiko for skimmelvækst at øges markant fra 5,4% af året til hele 57,0% af året når der er skygge på tagfladen. Uanset at dette er værste tilfælde, set i relation til ovenstående omkring absorbering af solstråling, vurderes resultatet at vise, at skygge ikke er en ubetydelig faktor for tagkonstruktionen. Såfremt der er skygge på tagfladen viser isopleth-diagrammerne en mindre reducere af risikoen for skimmelvækst ved et højere luftskifte på 100 h^{-1} og en mindre forøgelse af risikoen ved et lavere luftskifte på 10 h^{-1} . Højere og lavere luftskifte ser derved ud til at have modsatte effekt ved skygge på tagfladen, selvom alle 3 tilfælde alligevel vurderes at være fugtteknisk uacceptable tilfælde.

Resultaterne underbygger derved at skyggevirkning på tagfladen kan give en øget risiko for fugtskader i tagkonstruktioner af træ, som beskrevet i [6], og at dette også kan være tilfældet for ventilerede tagkonstruktioner og ikke blot uventilerede tagkonstruktioner. Skyggeforhold skal derfor tages i betragtning ved projektering af ventilerede tagkonstruktioner med tagpap. Samtidig vurderes risikoen ikke at kunne nedsættes til et acceptabelt niveau ved ændring af luftskiftet.

6.3 Udvendig isolering

Etablering af 50 mm udvendig isolering mellem tagbrædder og tagpap giver en positiv effekt i vinterhalvåret, hvor fugtniveauet i træet reduceres omkring 1-2%. Det tyder derved på at udeluften ikke afsætter samme mængde fugt i træunderlaget som normalt, formentlig som følge af nedsat underafkøling, idet temperaturudsvinget i træunderlaget mindskes, så der ikke bliver lige så koldt i de koldeste perioder, eller ligeså varmt i de varmeste perioder. Til gengæld forøger den udvendige isolering fugtniveauet i sommerhalvåret. Årsagen til dette vurderes at skyldes nedsættelse af udtørringseffekten via solstrålingen til træunderlaget.

Forøgelsen om sommeren ligger på 1-2%, men da fugtniveauet i forvejen er lavt, vurderes det ikke at udgøre en væsentlig forringelse af fugtforholdene. Dette underbygges af resultatet fra isopleth-diagrammet, hvor det ses at risikoen for skimmelvækst sænkes fra 5,4% af året for reference-modellen (W3.1.1.1) til 1,3% af året når der tilføjes 50 mm udvendig isolering (W3.1.1.2). Isoleringen nedsætter altså perioder med risiko for skimmelvækst på undersiden af træunderlaget.

Med skygge på tagfladen nedsættes fugtniveauet i træunderlaget over hele året ved etablering af 50 mm udvendig isolering. I de mere realistiske skyggeforhold i BSim ses der dog ingen større ændring af fugtniveauet i sommermånederne med den udvendige isolering. Den tilbageværende effekt fra solstråling i skyggen i BSim ser derved ud til at være elimineret ved etablering af den udvendige isolering.

Risikoen for skimmelvækst på undersiden af træunderlaget mindskes ligeledes på tagfladen med skygge, når der etableres 50 mm udvendig isolering. Her nedbringes antallet af timer fra 57,0% til 21,0% af året. Hvorvidt tagkonstruktionen herved er fugtteknisk acceptabel kan ikke konkluderes alene på baggrund af timerne med risiko for skimmelvækst. Der kan både være tale om korte, spredte perioder eller længerevarende sammenhængende perioder, hvoraf korte, spredte perioder normalt vil udgøre en mindre risiko.

Af modellen med skygge på tagfladen og 100 mm udvendig isolering (W3.2.1.3) ses dette at sænke fugtniveauet i træunderlaget yderligere i vinterhalvåret og ligeledes sænke perioderne med risiko for skimmelvækst fra 21,0% ved 50 mm isolering (W3.2.1.2) til 12,7% med 100 mm isolering i stedet (W3.2.1.3). Der er altså et fugtteknisk potentiale i merisoleringen.

Af resultaterne kan udledes at både referencemodellen, svarende til den almindelige flade, ventilerede tagkonstruktion, såvel som samme tagkonstruktion med skygge begge har en positiv fugtteknisk effekt af de 50 mm udvendig isolering, der derfor underbygger [7]. Det kan ligeledes udledes, at en øget udvendig isoleringsmængde på 100 mm giver yderligere en fugtteknisk positiv effekt i forhold til 50 mm isolering.

Effekten er dog af en karakter der betragtes som mindre væsentlig set i et større perspektiv af økonomi og arkitektur, hvorfor de ekstra 50 mm i de fleste tilfælde vil være irrelevant. 100 mm udvendig isolering kan desuden også være sværere at argumentere for, frem for etablering af en almindelig varm tagkonstruktion uden ventilation, især når den betalende bygherre i forvejen skal betale for den underliggende varmeisolering udført efter bygningsreglementets krav.

6.4 Grønne tage

Af resultaterne fra WUFI og BSim ses der en forøgelse af fugtniveauet i træunderlaget, der er generel over hele året. Især i sommerhalvåret er forøgelsen markant, hvor fugtniveauet er 2-5% højere med det grønne tag end i referencemodellens træunderlag. Det gælder både i resultater fra WUFI og fra BSim, og faktisk er der en god overensstemmelse mellem resultaterne, selvom der ikke regnes med nedbør i BSim. Nedbøren burde resultere i en forringelse af den varmeisolerende effekt fra det grønne tag, idet vækstlaget tilføres denne nedbør, og da opfugtede materialer normalt får en nedsat isoleringsevne [13].

Med en nedsat isoleringsevne for vækstlaget vurderes dette at resultere i, at fugtniveauet med indregning af nedbør fra WUFI burde blive lidt højere end fugtniveauet fra BSim. Forklaringen for dette kan muligvis være at den fugtafhængige varmeledningsevne for vækstmedie i BSim ikke svarer nøjagtigt til vækstlagets egenskaber i WUFI.

Samtidig burde der i WUFI også ske en yderligere afkøling af konstruktionen pga. fordampningsvarme, ved opvarmning af et vandmættet vækstmedie pga. nedbør. Dette forhold er dog ikke undersøgt nærmere, men det bemærkes også at udeklimaet for Sjælsmark 2016, jf. bilag 2, har været haft mindre nedbør end normalåret (556 mm i 2016 vs. 712 mm for normalåret), hvorfor påvirkningen fra nedbør normalt kan være større.

Overfladeegenskaberne i form af emissivitet og absorption har normalt en væsentlig betydning for simulering af fugtforhold [47], og der kan stilles spørgsmål ved om en emissivitet på 0,0 og absorption på 0,3 er korrekt for et grønt tag. Dvs. at der ikke reflekteres varme fra det grønne tag og blot absorberes 30% af strålingen. Iht. opsætningsguiden til det grønne tag [17] er disse egenskaber simplificeret og kan kun anvendes såfremt det undersøgte klima er sammenligneligt med de undersøgte lokationer i Centraleuropa [42]. Resultaterne kan derved, såfremt udeklimaet i forskningsprojektet har været væsentlig anderledes end det danske udeklima fra Sjælsmark 2016, give en usikkerhed på simuleringens resultater med grønne tage. På baggrund af afstanden mellem Leipzig og Sjælsmark på blot 600 km vurderes klimaforskellen og dermed usikkerheden at være af mindre betydning.

Alene på baggrund af fugtniveauerne ser det dog samlet ud til, at det grønne tag bidrager til et fugtteknisk dårligere forhold for træunderlaget. Ved en forøgelse af vækstlagets tykkelse på det grønne tag til et 150 mm semi-intensivt grønt tag, er der yderligere en mindre forøgelse af fugtniveauet i træunderlaget. Vækstlagets tykkelse ses derfor også ud til at have betydning for fugtforholdene i træunderlaget.

Når man derpå inddrager resultaterne fra isopleth-diagrammerne og perioder med risiko for skimmelvækst på træunderlaget, ses der tilsvarende en sammenhæng. Ved etablering af 60 mm grønt tag på referencemodellen stiger perioderne med risiko for skimmelvækst fra 5,4% af året for referencemodellen til 13,6% af året på det grønne tag. På baggrund af både fugtniveauer og isopleth-diagrammer, resulterer det grønne tag altså i fugtteknisk dårligere forhold for træunderlaget, der underbygger resultaterne fra [42].

Ved et semi-intensivt grønt tag med 150 mm vækstlag, ses der yderligere en forøgelse af perioderne med risiko for skimmelvækst til 17,2% af året. Der ses altså både en forøgelse af fugtniveauet og af risikoen for skimmelvækst ved et tykkere, semi-intensivt grønt tag.

Med et højere luftskifte i det ventilerede hulrum under det grønne tag forhøjes antallet af perioder med risiko for skimmelvækst efter samme tendenser som på referencemodellen. Ved et højere luftskifte på 100 h^{-1} stiger risikoen fra 13,6% af året til 22,4% af året, og ved et lavere luftskifte på 10 h^{-1} falder risikoen til 2,4% af året. Det vurderes på denne baggrund heller ikke at være løsningen for de grønne tage, at sikre et højere luftskifte i det ventilerede hulrum. Tværtimod ville det være en fordel med et lavere luftskifte, set alene ud fra disse resultater.

Skyggeforholdene på det grønne tag resulterer i et højere fugtniveau i træunderlaget set over hele året. I resultaterne med skyggeforhold fra BSim giver det dog kun en mindre forøgelse af fugtniveauet, hvor forøgelsen af fugtniveauet i WUFI er mere markant. Som tidligere nævnt, kan der her være tale om at resultaterne fra WUFI bliver på den sikre side, idet der regnes uden absorbering af nogen form for solstråling.

Skyggeforholdet på det 60 mm grønne tag forøger perioderne med risiko for skimmelvækst på træunderlaget fra 13,6% af året til 38,9% af året. Der ses derved samme tendens af effekt fra skyggen, men i mindre udstrækning end på referencemodellen. Dette kan ligeledes ses ved sammenligning af det grønne tag med skygge og referencemodellen med skygge. Her ses der i begge resultater et generelt mindre fugtniveau i træunderlaget med det grønne tag. Der er også færre perioder med risiko for skimmelvækst – fra 57,0% på referencen med skygge ned til 38,9% for det grønne tag med skygge. Ved skyggeforhold på tagfladen vurderes det grønne tag på denne baggrund at have en fugtteknisk positiv effekt for træunderlaget. Dette vurderes at skyldes en mindre varmeisolerende effekt fra det grønne tag, hvilket hæver temperaturen i træunderlaget særligt i vinterhalvåret. Det er altså tale om samme princip som for den udvendige isolering, men med en væsentlig ringere effekt.

Hvis der etableres 50 mm udvendig isolering under det 60 mm grønne tag bliver fugtniveauet sænket, dog kun i vinterhalvåret. Den udvendige isolering ses derved ikke at have nogen effekt på fugtniveauet i sommerhalvåret. Dette ses af resultaterne i begge beregningsprogrammer og resultaterne ser desuden meget ensartede ud. Perioderne med risiko for skimmelvækst reduceres også med den udvendige isolering under det grønne tag fra 13,6% af året til 5,2% af året. Af dette resultat kan det ses, at såfremt der etableres 50 udvendig isolering under et 60 mm ekstensivt grønt tag, vil perioderne med risiko for skimmelvækst på træunderlaget være i samme størrelse som for referencemodellen, der havde en risiko i 5,4% af året. Selvom risikoen i denne sammenligning forekommer meget ens, er det dog med et forbehold for at perioderne kan være fordelt på forskellig vis i de to resultater.

På denne baggrund menes resultaterne alligevel at være repræsentative nok til at konstatere, at de 50 mm udvendig isolering under det grønne tag giver en væsentlig forbedring af de fugttekniske forhold i træunderlaget, set i forhold til et grønt tag udført direkte på tagdækningen og træunderlag. Den udvendige isolering vil samtidig give anledning til montering af sladreafløb, som beskrevet i [26].

Ved skygge på tagfladen med 50 mm udvendig isolering og 60 mm grønt tag forekommer der en generel sænkning af fugtforholdene over hele året i resultaterne fra WUFI, mens der i BSim kun ses en sænkning af fugtniveauet i vinterhalvåret. Forskellen mellem disse resultater vurderes fortsat at være som følge af, at resultaterne med skygge i WUFI bliver på den sikre side pga. definitionen af skyggen, hvor der ikke absorberes nogen solstråling.

Uanset dette falder antallet af perioder med risiko for skimmelvækst også ved tilføjelse af den udvendige isolering under det grønne tag, når der forekommer skygge på tagfladen. Her falder risikoen fra 38,9% af året ved grønt tag med skygge (W3.2.2.1) til 16,3% af året (W3.2.2.2) med isolering under det grønne tag med skygge.

Hvorvidt 16,3% er tilstrækkeligt vil altid kunne diskuteres, hvorfor der også her bør ses på periodernes varighed og sammenhæng. Uanset dette vurderes løsningen med 50 mm isolering under det grønne tag også at resultere i en væsentlig forbedring af de fugttekniske forhold i træunderlaget, når der forekommer skygge på tagfladen.

Af resultatet med 50 mm isolering, 60 mm grønt tag og skygge (W3.2.2.2) kan der også ses færre perioder med risiko for skimmelvækst, end hvis der blot kun er 50 mm udvendig isolering og skygge (W3.2.1.2). Risikoen sænkes nemlig fra 21,0% af året med 50 mm udvendig isolering og skygge til 16,3% af året med udvendig isolering, grønt tag og skygge. Dette kunne indikere at der er yderligere potentiale i at anvende mere end 50 mm udvendig isolering på tagfladen. Modsat ses der en forøgelse af risikoen fra referencemodellen med udvendig isolering og solpåvirkning fra 1,3% af året (W3.1.1.2) til 5,2% af året med udvendig isolering, grønt tag og solpåvirkning (W3.1.2.2). Dette tyder på at der ikke er burde være nogen fugtteknisk positiv effekt i en yderligere isolering.

Af resultatet for 100 mm udvendig isolering under det grønne tag med solpåvirkning (W3.1.2.3) ses der en mindre sænkning af perioden med risiko for skimmelvækst fra 5,2% af året til 4,4% af året. Ligeledes ses der en sænkning af risikoen såfremt der er skygge på tagkonstruktionen fra 16,3% med 50 mm isolering (W3.2.2.2) til 10,5% med 100 mm isolering (W3.2.2.3). På baggrund af disse resultater vurderes den fugttekniske effekt i den ekstra 50 mm generelt at være mindre væsentlig. Man kan også diskutere om effekten af de ekstra 50 mm isolering er tilstrækkelig i forhold til f.eks. økonomi, udseende eller lignende, hvilket nok vil afhænge af den konkrete tagkonstruktion.

Samlet set vurderes resultaterne at give belæg for, at det kan anbefales at etablere 50 mm udvendig isolering under det grønne tag, som et velegnet bidrag til forbedring af fugtforholdene i træunderlaget uanset om der forekommer skygge eller ej på tagfladen.

7. Konklusion

Validering

I projektets første etape kunne det konstateres, at der var bedst sammenlignelighed mellem de indsamlede reference-fugtmålinger og det simulerede fugtniveau i træunderlaget, hvis der var defineret et fast luftskifte på 30 h^{-1} i simuleringmodellen. Det viste sig gældende for både WUFI og BSim. Simulering med et dynamisk luftskifte i BSim viste sig samlet set ikke at stemme bedre overens med fugtniveauet fra referencemålingerne end simuleringerne med det faste luftskifte. Simuleringerne med et fast luftskifte på 30 h^{-1} blev derfor valgt som referencemodel for parameterstudiet.

Skyggeforhold

Skyggeforhold på tagfladen kunne konstateres at give en væsentlig forøgelse af fugtniveauet i træunderlaget og en væsentlig forøgelse af perioder med risiko for skimmelvækst på undersiden af træunderlaget, selvom resultaterne blev vurderet at være på den sikre side. Den forøgede risiko for skimmelvækst ved skyggeforhold blev vurderet at være i en sådan grad, at dette skal tages i betragtning ved projektering af ventilerede tagkonstruktioner med træunderlag for tagpap, hvilket derved kunne underbygge resultaterne fra det tyske forskningsprojekt [6], uagtet at dette var vedr. uventilerede tagkonstruktioner.

Udvendig isolering

Etablering af 50 mm udvendig isolering mellem træunderlag og tagpap kunne konstateres at have en fugttechnisk positiv effekt på fugtniveauet i træunderlaget og på risikoen for skimmelvækst på undersiden af træunderlaget, idet perioderne med risiko for skimmelvækst blev reduceret. Dette viste sig for begge beregningsprogrammer og kunne således underbygge [7]. Den fugttechniske forbedring viste sig både positiv for referencemodellen og for referencemodellen med skyggeforhold. Ved skyggeforhold viste der sig desuden yderligere en fugttechnisk gevinst i at anvende 100 mm udvendig isolering frem for 50 mm. Den fugttechniske gevinst ved de ekstra 50 mm udvendig isolering blev dog vurderet, at være af så lille en karakter, at det i langt de fleste ville være irrelevant, når økonomi og arkitektur inddrages.

Grønne tage

Etablering af det grønne tag viste sig derimod at resultere i en fugttechnisk dårligere konstruktion, hvor fugtniveauet i træunderlaget blev forøget, og antallet af perioder med risiko for skimmelvækst ligeledes blev forøget. Herunder viste det sig også, at tykkelsen på det grønne tag havde en betydning for fugtniveau og risiko for skimmelvækst i konstruktionen, idet der ved et 150 mm semi-intensivt, grønt tag var et højere fugtniveau og med flere perioder med risiko for skimmelvækst blev sammenlignet med et ekstensivt grønt tag på 60 mm.

Når der forekom skygge på det grønne tag kunne konstateres samme tendens, som på referencemodellen, nemlig en forøgelse af fugtniveau og risiko for skimmelvækst. Forskellen var dog mindre end for referencen, og de fugttekniske forhold i skyggen blev altså overordnet forbedret med etablering af det grønne tag.

Blev der udført 50 udvendig isolering under det grønne tag kunne dette konstateres at have en fugtteknisk positiv effekt på fugtniveauet i træunderlaget og resultere i færre perioder med risiko for skimmelvækst. Dette i sådan en grad at risikoen blev på samme niveau som for referencemodellen. Der kunne ses samme tendens med forbedring af fugtniveau og risiko for skimmelvækst ved etablering af 50 mm udvendig isolering, når der var skyggeforhold på det grønne tag, om end resultatet med skyggeforhold fortsat blev et værre scenarie.

Ligesom ved den udvendige isolering på tagfladen med skygge, kunne der også ses en mindre fugtteknisk positiv effekt i etablering af 100 mm udvendig isolering frem for 50 mm udvendig isolering under det grønne tag. Denne effekt blev dog vurderet at være mindre væsentlig, særligt når der ikke forekom skygge.

På baggrund af disse resultater kunne det derfor anbefales at udføre 50 mm udvendig isolering under de grønne tage, til forbedring af fugtforholdene for træunderlaget i tagkonstruktionen både med og uden skyggeforhold.

Luftskifte

Luftskiftet i det ventilerede hulrum kunne konstateres at have en markant betydning for fugtniveauet i træunderlaget og for perioderne med risiko for skimmelvækst. For referencemodellen og for det grønne tag kunne ses et højere fugtniveau og flere perioder med risiko for skimmelvækst, såfremt der var et højere luftskifte på 100 h^{-1} frem for de udvalgte 30 h^{-1} . Ligeledes kunne ses et lavere fugtniveau og færre perioder med risiko for skimmelvækst, såfremt, der var et lavere luftskifte på 10 h^{-1} . Ved skyggeforhold på referencemodellen kunne konstateres den modsatte effekt af luftskiftet. Et højere luftskifte gav lidt færre perioder med risiko for skimmelvækst og et lavere luftskifte gav lidt flere perioder med risiko for skimmelvækst.

Det blev på denne baggrund vurderet at en mere fugtteknisk sikker tagkonstruktionen ikke kan opnås med et markant forhøjet luftskifte uanset om der er tale om normale forhold, skyggeforhold eller forhold under grønne tage.

8. Bilag

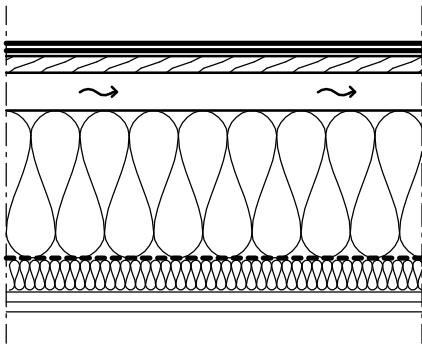
- Bilag 1 Princip-modeller af beregninger (iht. tabel 4) - egne figurer
- Bilag 2 Sammenligning af udeklima - Sjælsmark 2016 vs. DRY2013

9. Litteraturliste

- [1] T. Bunch-Nielsen, TOR-anvisning 25: Tagpap og arkitektur, Tagpapbranchens Oplysningsråd, 1998.
- [2] E. Bystrup, »Den 5. facade,« Boligministeriet, Bygge- og Boligstyrelsen, 1996.
- [3] Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, »Bygningsreglement 2015,« 2015. [Online]. Available: http://bygningsreglementet.dk/br15_02_id120/0/42.
- [4] S. Winter, C. Fülle og N. Werther, »Experimentelle und numerische Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens von flach geneigten Dächern in Holzbauweise mit oberer dampfdichter Abdichtung unter Einsatz ökologischer Bauprodukte zum Erreichen schadensfreier, markt- und zukunftsgerechter Kon,« Fraunhofer IRB Verlag, 2009.
- [5] Byg-Erfa, »Grønne tage,« BYG-ERFA blad (27) 16 12 17, 2016.
- [6] C. Bludau, T. Schmidt og H. M. Künzel, »Hygrothermal effects in lightweight roofs shaded by PV-elements,« Thermophysics 2010, Brno University of Technology, 2010.
- [7] Byg-Erfa, »(47) Tagunderlag af krydsfiner - misfarvning efter skimmelvækst,« BYG-ERFA blad (47) 11 07 19, 2011.
- [8] Erhvervsstyrelsen, »Huseftersynsinfo - Hustypebeskrivelse: Rækkehus 1 etage /med terrændæk og fladt tagpaptag,« Oktober 2015. [Online]. Available: <http://huseftersynsinfo.dk/file/569661/30raekkehus1etageterrandaekfladttagpaptag.pdf>.
- [9] E. Sivertsen, »Københavns Byggelov,« Københavns Magistrat, 1939.
- [10] P. Becher, SBI-anvisning 5: Varmeisolering, Statens Byggeforskningsinstitut, 1950.
- [11] P. Becher og V. Korsgaard, SBI-anvisning 7: Fugt og isolering, Statens Byggeforskningsinstitut, 1957.
- [12] N. E. Andersen, K. Blach og G. Christensen, SBI, Fugtpjece 8: Fugt og tage, Statens Byggeforskningsinstitut, 1974.
- [13] E. Brandt og m.fl., SBI-anvisning 224: Fugt i bygninger, Statens Byggeforskningsinstitut, 2013, 2. udgave.
- [14] »Bygningsreglement for købstæderne og landet,« Bygge- og Boligstyrelsen, 1961.
- [15] Rockwool, »Den lille lune,« 2017. [Online]. Available: <http://www.rockwool.dk/r%C3%A5dgivning/den+lille+lune/bygningsreglement/isoleringstykkelser>.
- [16] Københavns Kommune, »Retningslinjer for grønne tage,« 2010.
- [17] WUFI, »Guideline for the calculation of extensive green roofs,« 2013.

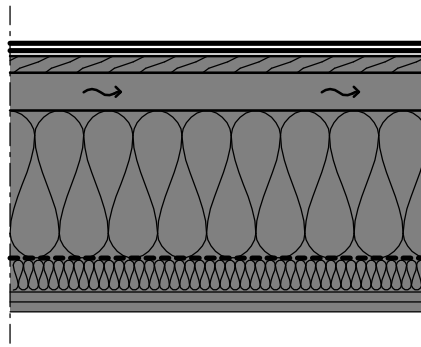
- [18] O. Valbjørn, SBI-anvisning 204: Undersøgelse og vurdering af fugt og skimmelsvampe i bygninger, Statens Byggeforskningsinstitut, 1. udg. 2003.
- [19] Byg-Erfa, »Tagkonstruktioner med lille hældning - ventilation og fugtforhold,« BYG-ERFA blad (27) 13 06 05, 2013.
- [20] U. A. Hovmand, Illustreret byggeordbog, 5. udgave, Huset Hovmand, 2009.
- [21] T. Bunch-Nielsen, TOR-anvisning 20: Tagpaptage, Tagpapbranchens oplysningsråd, 1994.
- [22] T. Bunch-Nielsen, TOR-anvisning 22: Projektering af tage med tagpap og tagfolie, Tagpapbranchens Oplysningsråd, 2001, 1. udgave.
- [23] T. Bunch-Nielsen, »TOR-anvisning 30: Fugt og tage,« Tagpapbranchens oplysningsråd, 2010.
- [24] T. Bunch-Nielsen, »TOR-anvisning 30: Tillæg til 1. udgave,« Tagpapbranchens oplysningsråd, 2010.
- [25] E. B. Møller, E. Brandt og E. Steen Pedersen, »SBI-anvisning 267: Småhuse - Klimaskærmen,« Statens Byggeforskningsinstitut, 2016.
- [26] T. Bunch-Nielsen og T. Preiss Østergaard, TOR-vejledning 8: Grønne tage, Tagpapbranchens Oplysningsråd, 2016.
- [27] Københavns kommune, »Notat om grønne tage,« 2010.
- [28] H. L. Aref og S. Ehsani, »Analys av fuktomlagring i välisolerade parallelltak,« KTH, 2013.
- [29] E. Brandt m.fl., SBI Anvisning 224 Fugt i bygninger, 2450 København SV: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, 2013.
- [30] F. Gottfredsen og A. Nielsen, Bygningsmaterialer: Grundlæggende egenskaber, Polyteknisk Forlag, 1997.
- [31] A. Nielsen og E. B. Møller, »Varmelære teori,« SBI, 2014.
- [32] H. Viitanen, J. Vinha, K. Salminen, T. Ojanen, R. Peuhkuri, L. Paajanen og K. Lähdesmäki, »Moisture and biodeterioration risk of building materials and structures,« 2010.
- [33] S. Gravesen, P. Nielsen og O. Valbjørn, »Forskningsprogrammet "Skimmelsvamp i bygninger",« SBI, Hørsholm, 2002.
- [34] SBI undervisningsmateriale Nybyggeri, uge 2, »Solstråling,« 2016.
- [35] J. A. Duffie og W. A. Beckman, »Solar Engineering of thermal processes, 2. edition,« John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [36] »Fornybar.no,« 17 04 2017. [Online]. Available: <http://www.fornybar.no/solenergi/ressursgrunnlag>.
- [37] Byg-Erfa, »Langtidsmåling af fugtforhold - i bygninger og bygningskonstruktioner,« BYG-ERFA blad (99) 14 10 05, 2014.
- [38] BMT Instruments, »Fugtlog,« 2016.
- [39] K. B. Wittchen, K. Johnsen, K. Grau og J. Rose, BSim Brugervejledning, 2013.

- [40] K. Lomas, H. Eppel, C. Martin, D. Bloomfield og M. Watson, »Empirical validation of thermal building simulation programs using test room data. IEA Annex 21/IEA SHC Task 12,« 1994.
- [41] S. O. Mundt-Petersen og L.-E. Harderup, »Validation of a One-Dimensional Transient Heat and Moisture Calculation Tool under Real Conditions,« *ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers)*, p. 12, 2013.
- [42] D. Zirkelbach og B. Schafaczek, »Ermittlung von Materialeigenschaften und effektiven Übergangsparmetern von Dachbegrünungen zur zuverlässigen Simulation der hygrothermischen Verhältnisse in und unter Gründächern bei beliebigen Nutzungen und unterschiedlichen Standorten,« *Forschungsinitiative Zukunft Bau*, Stuttgart, 2013.
- [43] S. Hägerstedt og L.-E. Harderup, »Importance of a Proper applied Airflow in the Facade Air Gap when Moisture and Temperature are Calculated in Wood Framed Walls,« 5. International Building Symposium, Lyngby, Denmark, 2010.
- [44] S. Mundt Petersen og L. E. Harderup, »Comparison of measured and calculated temperature and relative humidity with varied and constant air flow in the facade air gap,« 9th Nordic Symposium on Building Physics, Tampere, 2011.
- [45] K. Terpøger Andersen, P. Heiselberg og S. Aggerholm, »SBI-anvisning 202: Naturlig ventilaton i erhvervsbygninger,« Statens Byggeforskningsinstitut, 2002.
- [46] IBP, »WUFI brugervejledning 5.3,« IBP, 2013.
- [47] M. Kehrler og T. Schmidt, »Radiation Effects On Exterior Surfaces,« *Building Physics 2008 - 8th Nordic Symposium*, 2008.



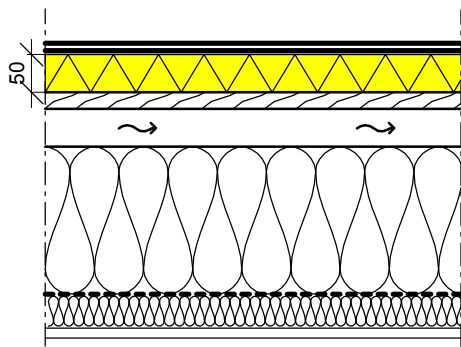
Referencemodeller

- 1.1.1.1 - Luftskifte 1h
- 2.1.1.1 - Luftskifte 10h
- 3.1.1.1 - Luftskifte 30h (udvalgt)
- 4.1.1.1 - Luftskifte 100h
- 5.1.1.1 - Dynamisk luftskifte (BSim)

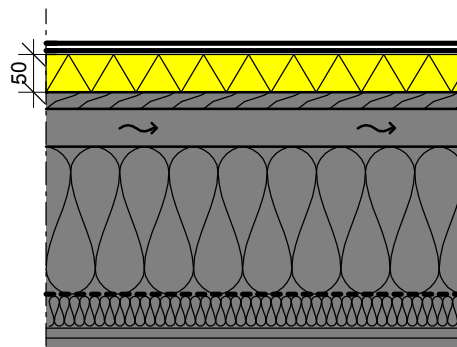


Skygge

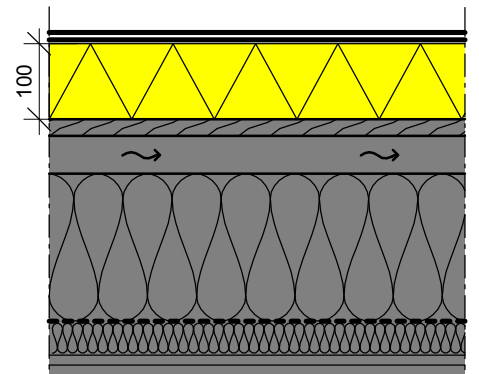
- 2.2.1.1 - Luftskifte 10h
- 3.2.1.1 - Luftskifte 30h
- 4.2.1.1 - Luftskifte 100h



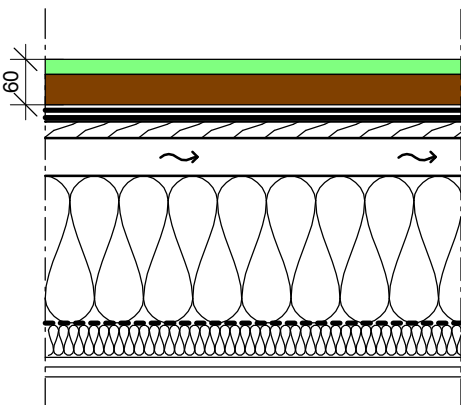
50 mm udvendig isolering
3.1.1.2 - 30h



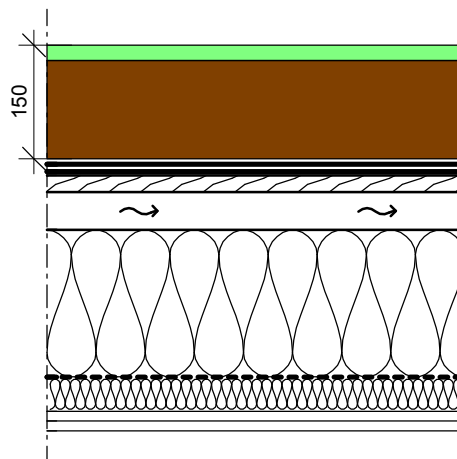
Skygge + 50 mm udvendig isolering
3.2.1.2 - 30h



Skygge + 100 mm udvendig isolering
3.2.1.3 - 30h

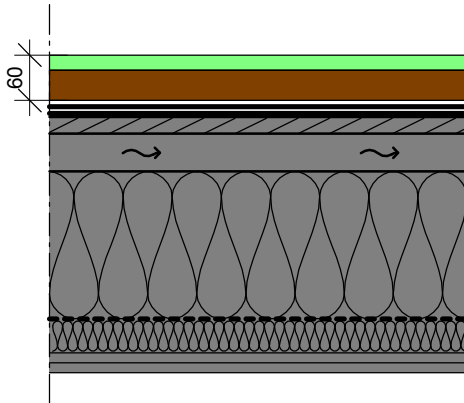


60 mm grønt tag
2.1.2.1 - Luftskifte 10h
3.1.2.1 - Luftskifte 30h
4.1.2.1 - Luftskifte 100h

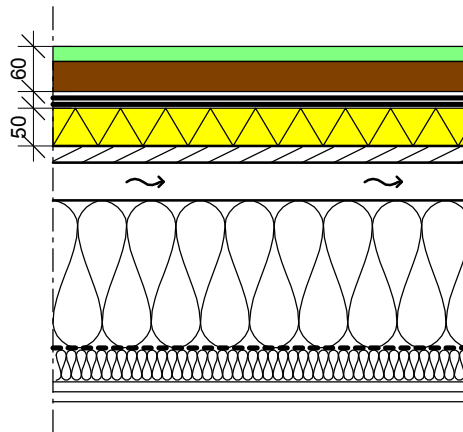


150 mm grønt tag
3.1.3.1 - 30h

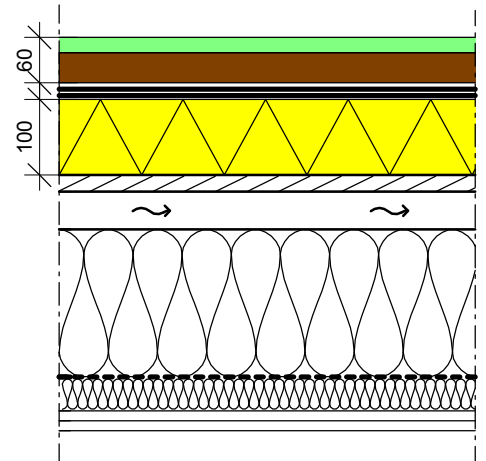
Sagsdata:	Fugtforhold i træunderlag for tagpap i ventilerede tage	Sagsnr.:	Sign.:	JOK
		-	Dato:	01-06-2017
Tegn.tekst:	Bilag 1 Princip-modeller af beregninger	Tegn.nr.:	Mål:	1 : 10
			Godk.:	-
		Side 1 af 2		



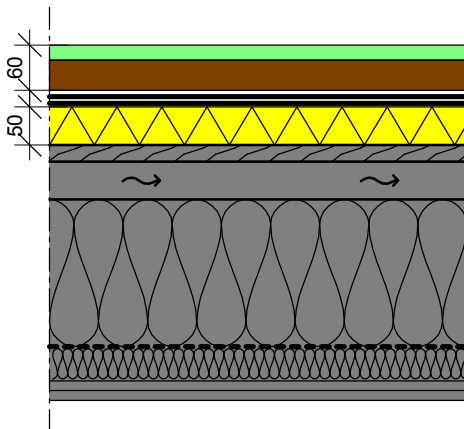
60 mm grønt tag + skygge
3.2.2.1 - Luftskifte 30h



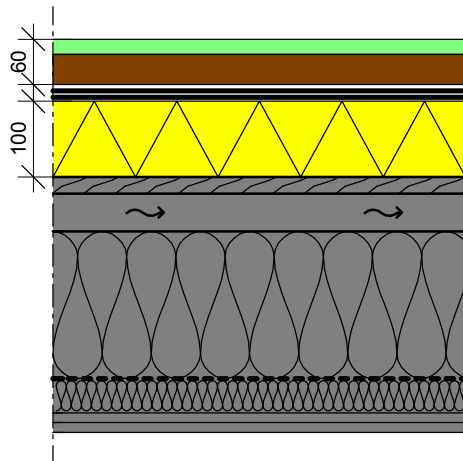
60 mm grønt tag
+ 50 mm udv. isolering
3.1.2.2 - Luftskifte 30h



60 mm grønt tag
+ 100 mm udv. isolering
3.1.2.3 - Luftskifte 30h



60 mm grønt tag + skygge +
50 mm udv.isolering
3.2.2.2 - Luftskifte 30h

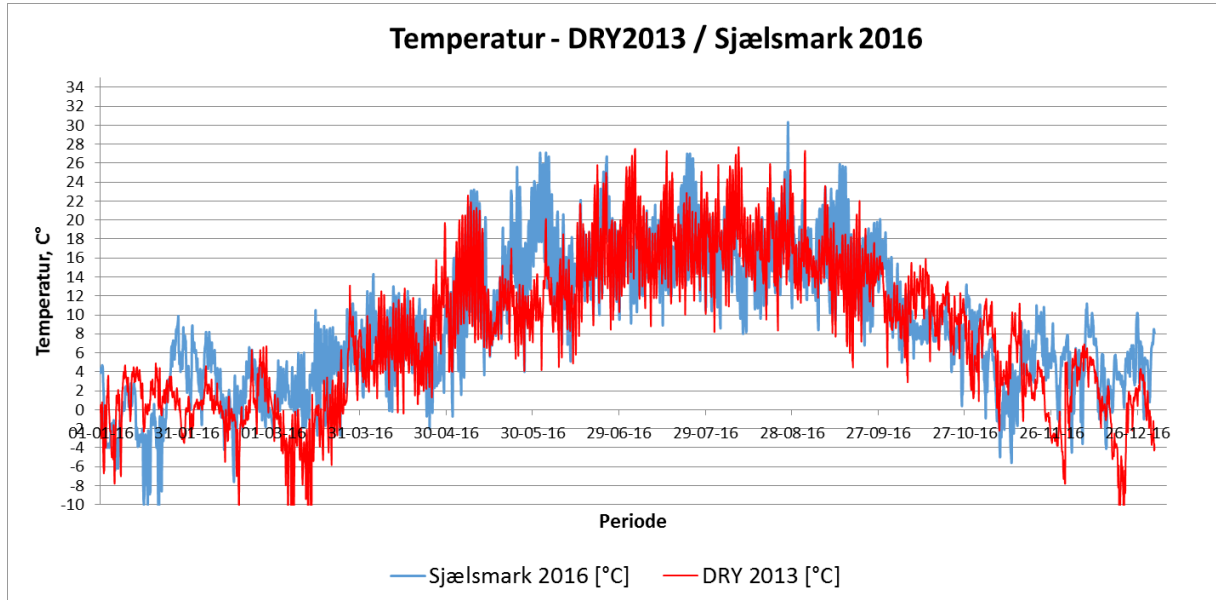


60 mm grønt tag + skygge +
100 mm udvendig isolering
3.2.2.3 - Luftskifte 30h

Sagsdata:	Fugtforhold i træunderlag for tagpap i ventilerede tage	Sagsnr.:	Sign.:	JOK
		-	Dato:	01-06-2017
Tegn.tekst:	Bilag 1 Princip-modeller af beregninger	Mål:	1 : 10	
		Godk.:	-	
		Tegn.nr.:	Side 2 af 2	

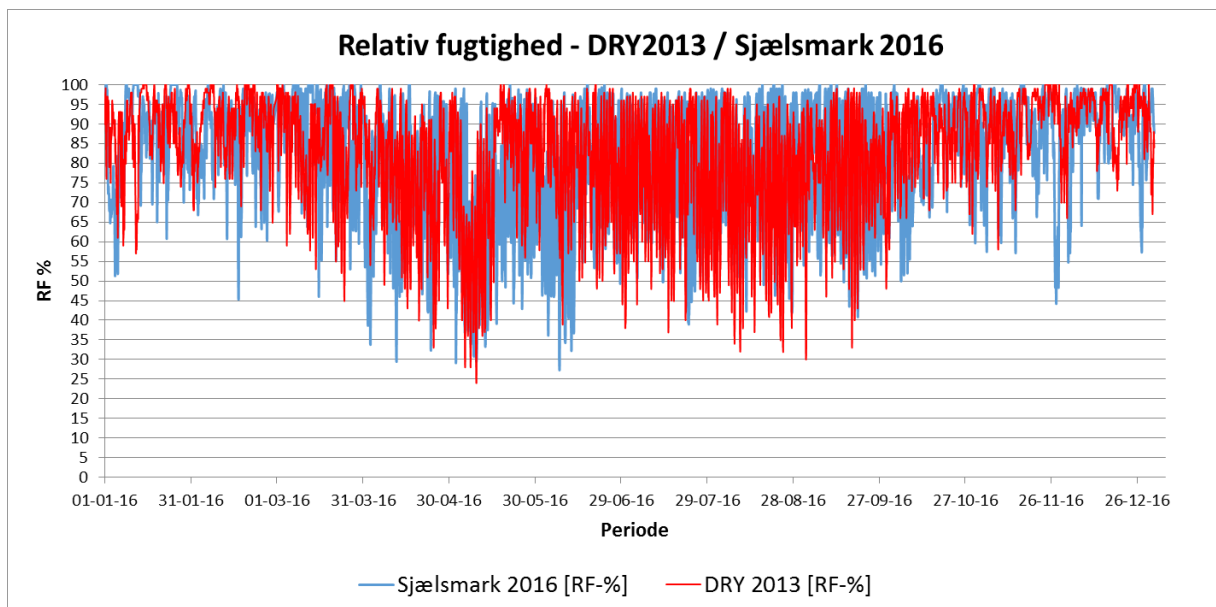
Udeklimadata – DRY2013 vs. Sjælsmark 2016

1. Temperatur



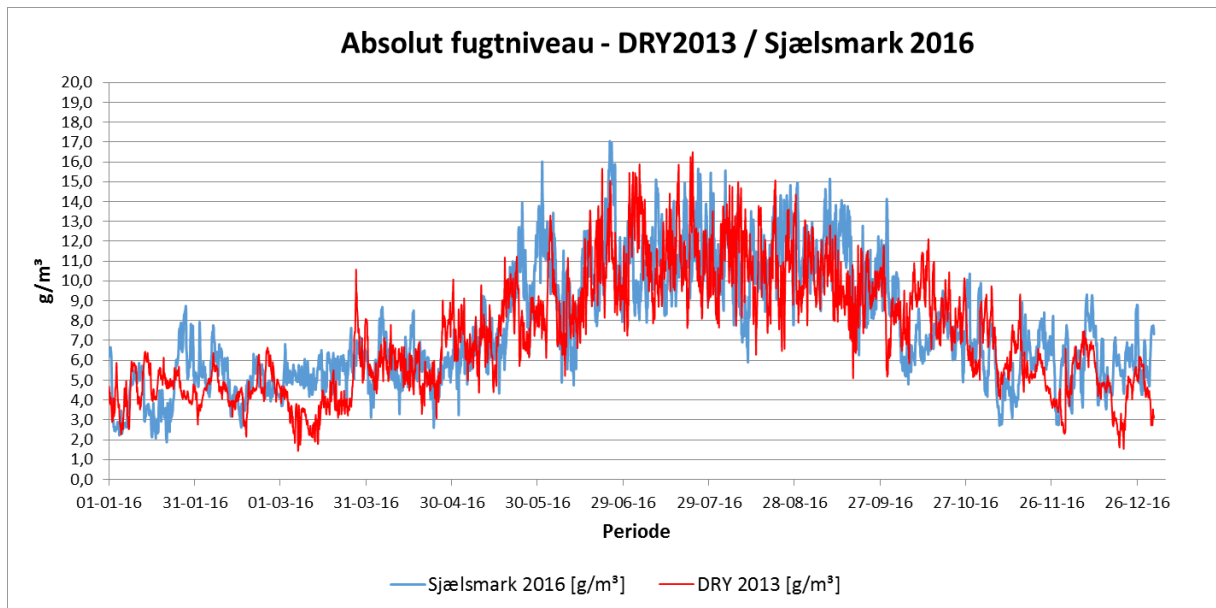
Figur 1: Temperaturer på timebasis for Sjælsmark 2016 og DRY 2013.

2. Relativ fugtighed



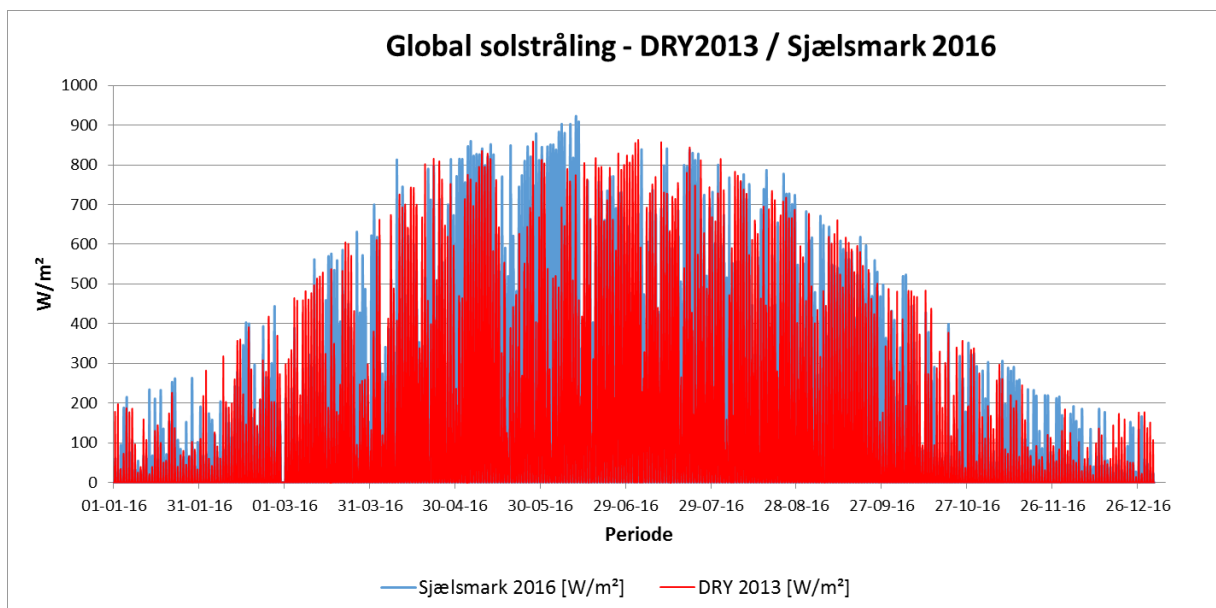
Figur 2: Relativ fugtniveau på timebasis for Sjælsmark 2016 og DRY 2013.

3. Absolut fugtniveau



Figur 3: Beregnet absolut fugtniveau på timebasis for Sjælsmark 2016 og DRY 2013.

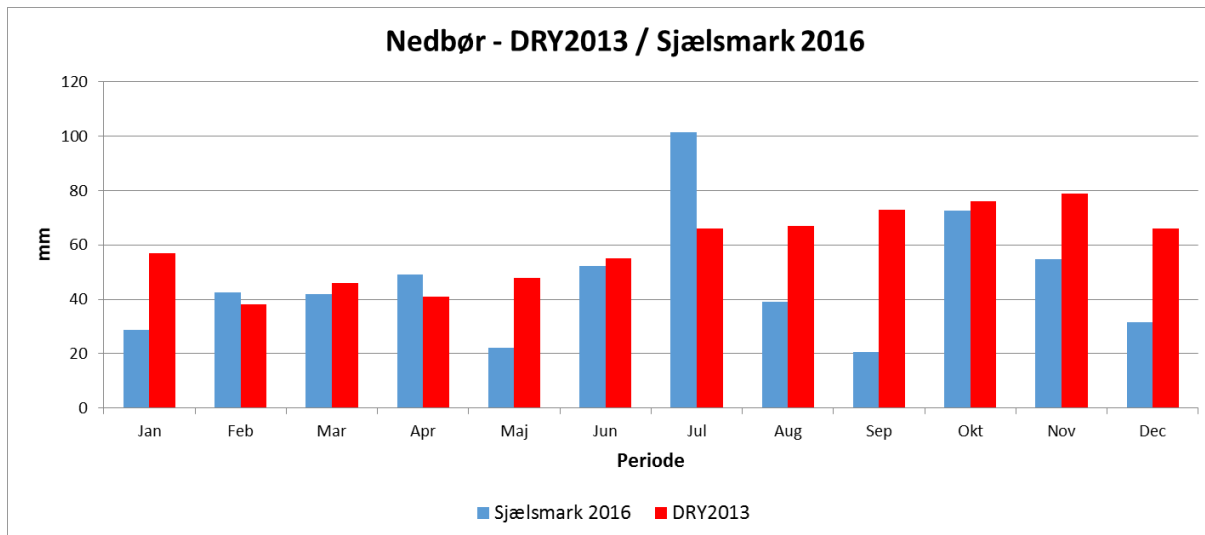
4. Global solstråling



Figur 4: Global solstråling på timebasis for Sjælsmark 2016 og DRY 2013.

5. Nedbør

Sjælsmark 2016, årsnedbør = 556 mm
DRY2013 (1961-1990), årsnedbør = 712 mm



Figur 5: Nedbør på månedsbasis for Sjælsmark 2016 og DRY 2013 (årsnormal 1961-1990 iht. DMI)