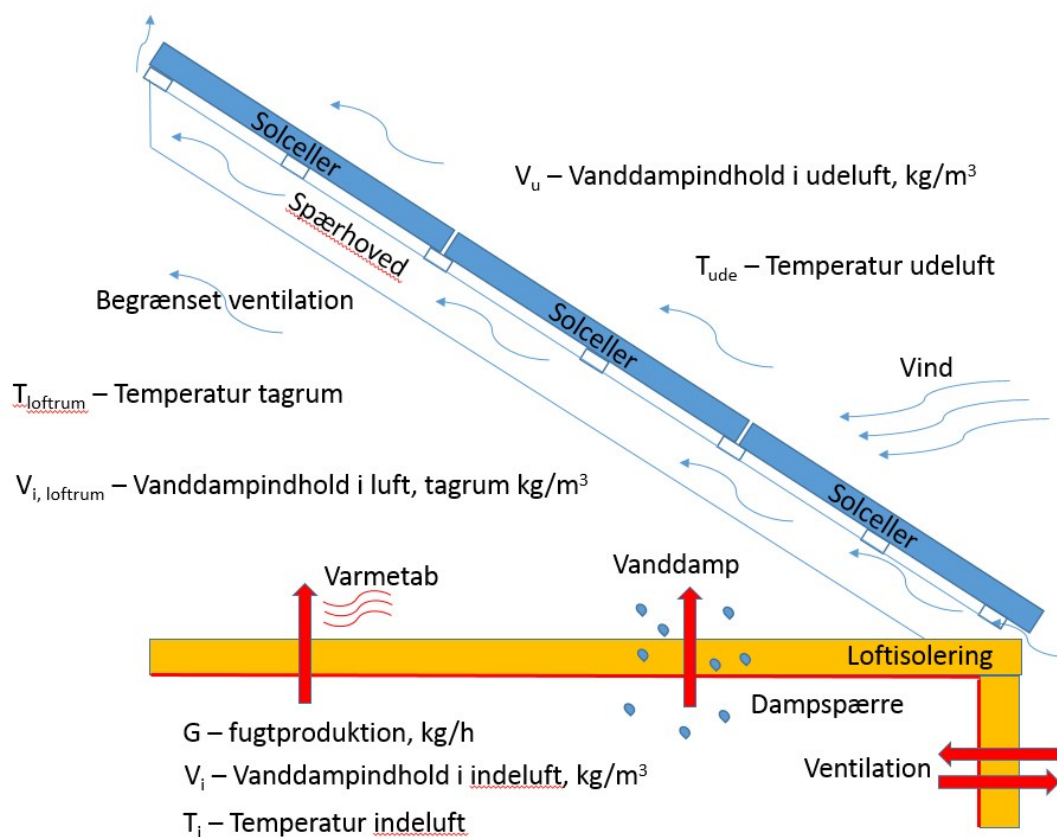


Solcelletag anvendt som regntæt klimaskærm



Kritiske parametre



AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

Aalborg Universitet København

Statens Byggeforskningsinstitut

A. C. Meyers Vænge 15

2450 København SV

Studenterrapport

Uddannelse: Master i Bygningsfysik

Semester: Afsluttende 4. semester

Titel på masterprojekt: Anvendelse af solcelletag som klimaskærm – kritiske parametre

Projektperiode: 01.02.2015 -01.06.2015

Hovedvejleder: Eva B. Møller

Vejleder: Kim B. Wittchen

Studerende: Bo Sørensen

ECTS-point: 15

Bo Sørensen

Antal normalsider: 55

Afleveringsdato: 28052015

Indhold

1.	Forord	5
2.	Abstract	6
3.	Indledning med problemformulering.....	7
3.1	Baggrundsinformation og præsentation af emne	7
3.2	Begrundelse for emnevalg og fagligt formål	7
3.3	Problemformuleringens spørgsmål	8
3.4	Afgrænsning.....	8
3.5	Valg af teoretisk grundlag og kilder	9
3.6	Metodevalg.....	9
3.7	Rapportens struktur og argumentation	9
4.	Hovedafsnit	10
4.1	Problemstilling - Kondensdannelse på bagside.....	10
4.2	Problemstilling – Byggetekniske konsekvenser	13
4.3	Problemstilling – Ventilation i tagrum.....	14
4.4	Varmeteori.....	15
4.5	Fugtteori	18
4.6	Forudsætninger for beregning af solcellernes temperatur og kondensrisiko..	22
4.7	Forventede resultater	23
4.8	Beregningsmodel.....	24
4.9	Beregninger	26
4.10	Resultater	29
4.11	Fejlkilder.....	32
4.12	Vurdering af teoretiske resultater	34
4.13	Vurdering af konvektionens indflydelse på kondensdannelse	36
4.14	Målinger i praksis	37
4.15	Måleplan	37
4.16	Måleudstyr.....	38
4.17	Prøvestand og placering af målere	39
4.18	Resultater	41
4.19	Vurdering af målinger og diskussion af lighed mellem teori og praksis.....	45

4.20	Løsningsforslag i forhold til kondens	48
4.21	Vurdering af byggetekniske konsekvenser	50
4.22	Vurdering af ventilation i tagrum	53
5.	Konklusion	54
5.1	Rapportens fokus	54
5.2	Delkonklusion, teoretiske beregninger	54
5.3	Delkonklusion, målinger	55
5.4	Delkonklusion, byggetekniske konsekvenser	55
5.5	Delkonklusion, ventilation i tagrum	56
5.6	Hovedkonklusion	56
6.	Kildeliste	57
7.	Figurliste	58
8.	Bilag	59
8.1	Bilag 1 – 2-sidet konvektion	59
8.2	Bilag 2 – 1-sidet konvektion	60
8.3	Bilag 3 – Ingen konvektion	61
8.4	Bilag 4 – Billeder af bebyggelsen	62

1. Forord

Denne rapport er udarbejdet som Masterspeciale på 4. semester på uddannelsen: Master i Bygningsfysik, på Aalborg Universitet i København. Specialet er den afsluttende opgave på uddannelsens sidste semester, og skal demonstrere både en bred bygningsfysisk viden, og evnen til at analysere og arbejde på højt fagligt niveau inden for et mere specifikt emne omkring bygningsfysikken.

Rapportens overordnede emne er anvendelse af bygningsintegrerede solceller, og rapporten er udarbejdet i forårssemesteret 2015 sideløbende med deltagelse i EUDP-projektet: Prisbilligt solcelletag som klimaskærm.

I forbindelse med udarbejdelse af rapporten har adskillige personer bidraget med viden, sparring og korrekturlæsning. Forfatteren vil hermed gerne sige tak til:

Eva B. Møller, SBI, Hovedvejleder

Kim B. Wittchen, SBI, Vejleder

Ivan Katic, Teknologisk Institut, Projektdeltager i: Prisbilligt Solcelletag som klimaskærm

Erik Bo Sørensen, Rådgivende Ingeniør

2. Abstract

Reducing energy consumption and CO₂ emission within the building industry is a very important step to take towards reducing the expected climate changes on earth.

Approximately 40 % of all energy used, is used in relation to the buildings we live and work inside. By reducing the energy consumption related to buildings, we will be able to make a significant reduction in global CO₂ emission. Today's energy production is mainly based on fossil fuels like oil and gas, which are limited in supply and not sustainable. For a small country like Denmark, though producing an amount of oil and gas ourselves, we are still depending on supply from other parts of the world. This sometimes creates a conflict of interest, because our political agenda very often is different compared to the big oil producing countries in the Middle East.

Implementing sustainable solutions in Denmark based on wind or sun is one way to both reduce CO₂ emissions and dependability of foreign countries. As a direct result of that, politicians have decided to promote the use of photovoltaic panels in Denmark. Normally these panels will be mounted on profiles fitted to the external side of the existing roof, and there for not be an integrated part of the climate envelope. By running the project "Low price photovoltaic roof as climate envelope" it is the goal to find a solution, where the panels can both produce sustainable energy and replace the normal roof cladding and thereby save money in the building process.

However, using products in new configurations can lead to other problems, if not investigated and analyzed before implementing. The focus of this Master thesis is to investigate and analyze the possible consequences of the new use of photovoltaic cells. Focus is on the risk for condensation on the backside of the panels. This problem is relevant, because not only is it a wish to reduce cost by replacing the roof cladding by photovoltaic cells, but also to leave out the sub roof. Without the sub roof there is no barrier to stop the condensation to drip to the constructions below. As the report will show, theoretically, there is a risk of condensation throughout the year, and therefore different solutions will be given in the last part of this report.

Secondary other issues related to the new use of photovoltaic cells and building physics will be described and commented on during the report. These issues include tightness for water, ventilation in the attic and thermal expansion.

3. Indledning med problemformulering

3.1 Baggrundsinformation og præsentation af emne

Historisk set er solceller blevet monteret oven på bygningers tagbeklædning ved hjælp af aluprofiler fastgjort med beslag til den underliggende konstruktion. Solcellerne udgør dermed ikke en integreret del af tagkonstruktionen, men er hævet ca. 10 cm over tagfladen med mulighed for ventilation af solcellernes underside, og har ud over produktion af strøm, ingen yderligere tiltænkte funktioner.

I det igangværende EUDP projekt: *Prisbilligt solcelletag som klimaskærm*, er det målet at udvikle en løsning, hvor solcellerne udover at producere strøm, også skal fungere som regnskærm. Intentionen er at udvikle en enkel løsning, hvor en udskiftning af eksisterende eternittage gøres økonomisk fordelagtig og mere bæredygtig ved at udelade både undertag og ny tagdækning, før montage af solceller. Dette stiller blandt andet krav til regntætte samlinger mellem panelerne indbyrdes, mellem paneler og afslutninger ved tagfod, vindskeder og kip.

Potentialet for denne opfindelse er ganske stort. Utallige boligblokke i Danmark og udlandet står foran omfattende tagrenoveringer og energiforbedringer, for at den overordnede strategi om reduktion af energiforbrug og udledning af CO₂ kan realiseres.

Emnet for denne rapport er ikke at udvikle den regntætte løsning til ovennævnte EUDP projekt, men at afdække og analysere andre kritiske parametre ved anvendelsen af solceller som komplet regnskærm på en konstruktion uden undertag.

3.2 Begrundelse for emnevalg og fagligt formål

I forbindelse med gennemførelse af udviklingsprojektet er der fra hovedparten af projektgruppen stor fokus på udvikling af profiler til montage og tætning mellem de enkelte solcellepaneler og på profiler som tilslutning ved tagfod eller ved kip. Naturligvis er det en forudsætning, at tagfladen bestående af solceller og sammenkoblingsprofiler, udgør en tæt regnskærm, men ud over denne primære forudsætning, foreligger en række problemstillinger, der bør afklares, inden fuldskalaforsøg gennemføres på de første boligejendomme. Den involverede boligforening, 3B afd. Måløv Park, må naturligvis have en forventning om, at den endelige valgte tagløsning inklusiv solceller, er en gennemprøvet og gennemtænkt løsning, hvor alle bygningsfysiske aspekter er gennemtænkt og analyseret, så en tiltænkt bæredygtig løsning virkelig bliver bæredygtig, og ikke udløser skader eller følgeomkostninger for boligforeningen og dermed beboerne.

Valget af emne for denne rapport er derfor begrundet i et ønske om at sikre en helhedsorienteret løsning på udviklingsopgaven.

Det faglige formål med rapporten er at opnå viden om denne påtænkte anvendelse af solceller og de potentielle bygningsfysiske problemer, som denne anvendelse kan medføre. Idet rapporten udarbejdes som speciale på uddannelsen Master i Bygningsfysik, har rapporten også til formål at demonstrere indgående kendskab til et fagelement på uddannelsen, og et bredere, tværfagligt kendskab til problemer relaterende til bygningsfysikken, som for eksempel varme, fugt og ventilation.

3.3 Problemformuleringens spørgsmål

Ved ny anvendelse af eksisterende byggekomponenter bør det altid undersøges, om anvendelsen vil medføre uhensigtsmæssigheder, der ikke umiddelbart kobles til produktets normale brug. Det kan være vanskeligt at gennemskue, hvordan en ny anvendelse af materialer kan få betydning for øvrige bygningsdele, deres levetid og deres funktion. Ofte er det ikke kun andre bygningsdele, der påvirkes, men også indeklimaet i den pågældende bygning. Med ovenstående som grundlag, opstilles herfor følgende hovedspørgsmål:

På hvilke måder vil de kritiske parametre, inden for bygningsfysikken, kunne påvirke en eksisterende etageejendom, hvis den eksisterende tagbeklædning udskiftes med solcellepaneler uden undertag?

Hovedspørgsmålet underopdeles i følgende underspørgsmål/emner, der alle relaterer til fagelementer inden for bygningsfysikken:

Fugt: Vil den manglende tilstedeværelse af et undertag medføre risiko for bygningsskader, som følge af kondensdannelse på undersiden af solcellepanelerne?

Byggeteknisk: Solceller, anvendt direkte som klimaskærm, medfører ændrede krav til samlinger og underliggende konstruktioner. Hvilke byggetekniske konsekvenser har dette?

Ventilation i tagrum: Vil anvendelsen af solceller uden almindelig tagbelægning medføre et ændret klima i tagrummet, og hvordan påvirkes dette af den naturlige ventilation?

3.4 Afgrænsning

Rapporten vil udelukkende omhandle det omtalte renoveringsprojekt, Boligforeningen 3B, Afd. Måløv Park, hvorfor eventuelle klimadata vil være baseret på området omkring København eller nærmest tilgængelige data.

Grundet en usikker tidsplan for selve udviklingsprojektet forventes det, at rapportens konklusion kun baserer sig på teoretisk analyse, og ikke indeholder deciderede målinger fra selve projektet. Hvis det inden for rapportens afleveringsfrist bliver muligt at måle på en renoveret bygning, vil en sammenligning mellem det teoretisk udledte og det praktisk målte kunne inddrages i rapporten.

Rapporten vil behandle de i problemformuleringen nævnte bygningsfysiske problemstillinger. Ud over de nævnte er der adskillige andre parametre, der bør undersøges, inden implementering i større skala. Det kunne for eksempel være: Brand, statik, levetider, vedligehold og totaløkonomi. Disse områder falder uden for denne rapports særlige fokusområde, og vil derfor ikke blive behandlet.

3.5 Valg af teoretisk grundlag og kilder

For at sikre et validt udgangspunkt for analyser, vil der som kilder og teoretisk grundlag, blive anvendt alment teknisk fælleseje, hvor det er muligt. Eksempler på dette kan være: Danske Standarder, SBI-anvisninger, SBI-rapporter eller BYG-Erfa-blade. Andre kilder vil være undervisningsmateriale fra studiet: Master i Bygningsfysik eller udleveret materiale fra vejledere. Faglitteratur vil også blive anvendt, i det omfang at det vurderes, at være relevant for anvendelsen af solceller som klimaskærm.

3.6 Metodevalg

I rapporten gennemgås de udvalgte bygningsfysiske problemstillinger efter følgende metodemodel:

- Beskrivelse af det potentielle problem
- Teoretisk grundlag for analyse
- Analyse af problemstillingen
- Måling i praksis
- Delkonklusion

Sekundær empiri, i form af rapporter fra fagrelevante personer, vil blive inddraget i det omfang det er relevant for denne rapport og hvor det kan understøtte den udledte teori. Dette materiale vil fremgå af kildelisten bagerst i rapporten.

3.7 Rapportens struktur og argumentation

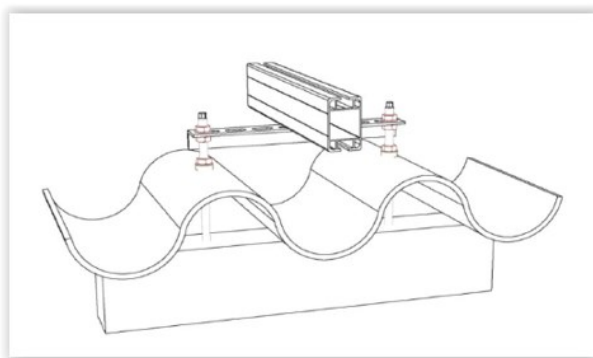
Rapportens opbygning vil være kendetegnet ved en tredeling. Første del indeholder abstract og indledning med problemformulering. Anden del indeholder rapportens hovedafsnit og konklusion, og tredje og sidste del indeholder kilde- og figurlister samt bilag.

Abstractet er tænkt som et kort overblik over rapportens emne, hovedpunkter og vigtigste konklusioner. Abstractet skrives på engelsk for at sikre en nemmere søgning på emnet fra international side.

4. Hovedafsnit

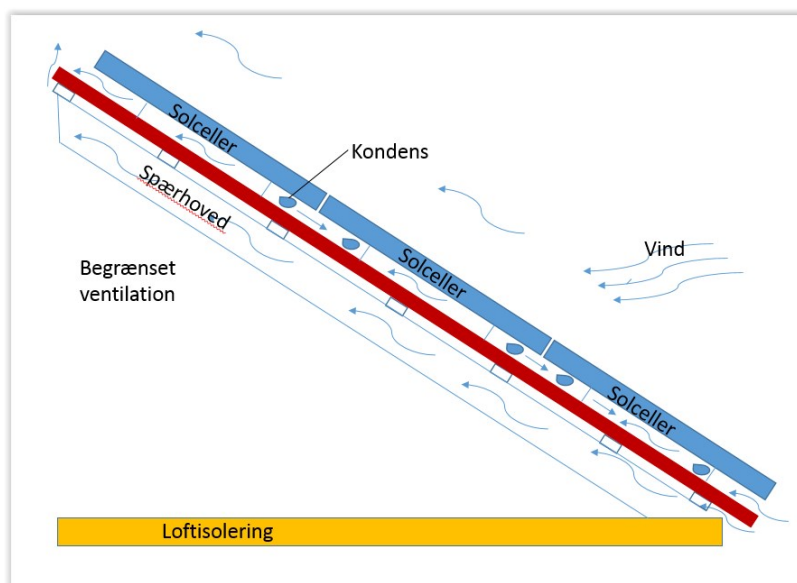
4.1 Problemstilling - Kondensdannelse på bagside

Solceller er i Danmark, historisk set, næsten udelukkende blevet monteret på beslag og skinner af aluminium, normalt hævet 5-10 cm over eksisterende eller ny tagbeklædning. Se figur 1 nedenfor.



Figur 1, Skinnemontage på eternittag, Kilde: Altec Solartechnik

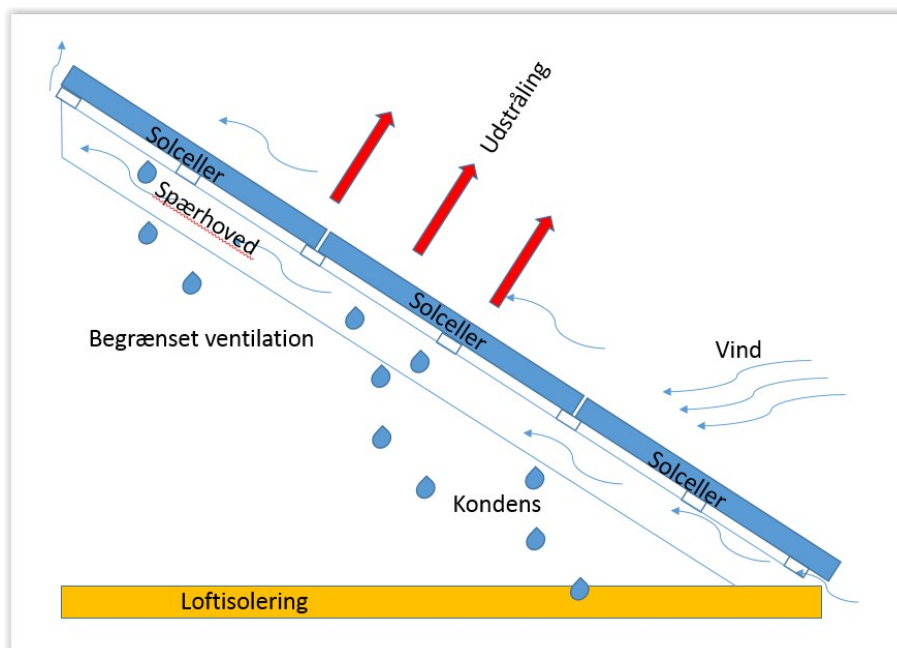
Denne montageform betyder, at solcellerne "svæver" over tagbeklædningen og ikke indgår som en integreret del heraf. Eventuel kondens på cellernes bagside vil kunne dryppe af og afledes som almindeligt regnvand, da tagbeklædningen er intakt og fungerer som klimaskærm hvad vand angår. Ligeledes vil den eksterne montage tillade luft at passere mellem cellerne og tagbeklædningen, hvilket vil reducere den dannede mængde kondens. Dette er illustreret på figur 2.



Figur 2, Bortledning af kondens mellem celle og tagbeklædning, Kilde: BoS

Kondens dannes ved en fortætning af luftens vandindhold, hvilket sker ved afkøling af varm fugtig luft til en relativ fugtighed på 100 %. Et godt eksempel på dette er varm og fugtig luft, der fortættes på den indvendige side af en kølig termorude og danner kondens langs bunden af ruden, hvor konvektionen er begrænset. I situationen angivet på figur 2 er det ikke en umiddelbar temperaturforskel på luften over og under cellen, der udløser kondensdannelsen, men derimod en udstråling mod himmelrummet, der resulterer i en underafkølet overflade, hvor luftens vandindhold derfor fortættes og kondenserer. Situationen er ikke gældende for dagperioder, hvor cellen producerer strøm og reelt opnår en driftstemperatur højere end den omgivende luft, men derimod om natten, hvor der ikke er strømproduktion over cellen og dermed ingen varme i panelet.

I EUDP projektet: *Prisbilligt solcelletag som klimaskærm* er det intentionen at fjerne en eksisterende tagbeklædning bestående af eternitplader, og derefter montere solceller direkte på et lægte- eller skinneresystem på spærreerne, uden at montere et traditionelt undertag. Dette betyder, at solcellerne skal fungere som klimaskærm for regn, men også at der ikke vil være en tæt overflade under cellerne til at bortlede dannet kondens. Dette vil kunne medføre opfugtning af den underliggende tagkonstruktion og isolering i tagrummet over øverste etagedæk og i værste fald bygningskader på konstruktionerne under isoleringen. I figur 3 er illustreret, hvorledes montagen er tiltænkt og hvordan kondens vil kunne dryppe frit på underliggende konstruktioner. Grundet indbygningen vil luftstrømmen under cellerne være meget begrænset i forhold til traditionel montage.



Figur 3, Dannelse af og dryp fra kondens grundet udstråling til himmelrummet, Kilde: BoS

I rapporten: *Utvendig kondens rapport* konkluderes følgende omkring dannelse af kondens på udvendig side af termoruder:

”Det antas at det ved større vindhastigheter ikke oppstår kondens. Målingene i Borås viste, at det omtrent ikke ble dannet utvendig kondens ved vindhastigheter over 4 m/s.” Kilde: (Glassbransjeforbundet i Norge, 1994)

Dermed må det formodes, at dannet kondens vanskeligt vil kunne ventileres væk fra bagsiden af solcellepanelerne, da konvektionen her er yderst begrænset set i forhold til konvektionen på udvendige traditionelt monterede solceller.

I de senere afsnit i rapporten vil det blive analyseret, om dannelsen af kondens vil være almindeligt forekommende og dermed problemfyldt, eller det kun under særlige forhold vil optræde, og dermed kunne antages for at være uden risiko for de underliggende konstruktioner.

4.2 Problemstilling – Byggetekniske konsekvenser

Nye og ikke testede montagemetoder kan indeholde uforudsete problemstillinger. Når forskellige materialer forbindes i samlinger, skal både materialer og samlinger kunne bevare deres funktioner og udseende i forhold til de påvirkninger, de vil blive udsat for i deres forventede levetid.

Et eksempel på, hvor dette kan gå galt er galvanisk tæring, hvor metallernes kemiske sammensætning resulterer i tæring. Ved samling af vinduesprofiler af aluminium i gerings-samlinger er det nødvendigt at påføre en forseglers på kontaktfladerne, da selv en lille spændingsforskel mellem to ellers ens materialetyper, kan medføre tæring og afskalning af overfladebehandling.

I projektet *Solcelletag anvendt som prisbillig klimaskærm* monteres solcellerne på skinner af anodiseret aluminium, der igen er monteret direkte på de eksisterende spær. I dette tilfælde er der ikke risiko for galvanisk tæring, men da de to materialer, aluminium og træ, har forskellige udvidelseskoefficienter, vil der kunne opstå utilsigtede spændinger i konstruktionen, for hvilke der skal tages hensyn ved projektering og udførelse af montagedelen.

Rundt om cellerne, ved tilslutning til tagrende, sterner, vindskeder og kip, skal der alle steder projekteres og udføres samlinger, der uanset temperatur, skal kunne fungere som en del af en regntæt klimaskærm og lede vand væk. Dette stiller krav til samlingernes kvalitet, uanset om de er udført som profiler med overlæg, drypnæse eller med eventuelle tætningsbånd.

Klimaskærmen er tænkt udført som en stor ubrudt flade. Dette vil forstærke virkningen af temperaturudvidelser, og det kan derfor i praksis være nødvendigt at indbygge en form for dilatationsfuge imellem solcellerne.

Nogle typer solceller er delvist transparente. Dette betyder at ultraviolet lys kan trænge igennem konstruktionen og påvirke underliggende materialer. Dette kendes fra tegltage med undertage, der ikke er UV-bestandige, og derfor nedbrydes over tid. En anden konsekvens kan være, at materialer afbleges af solens stråler og dermed fremstår anderledes.

En forøget temperatur i loftrummet vil ændre damptryksforskellen mellem loftrummet og den underliggende lejlighed. Ændringer i damptryksforskelle kan medføre ændrede fugtforhold i de involverede konstruktioner.

4.3 Problemstilling – Ventilation i tagrum

Montagen af solceller uden tagbeklædning og undertag vil også betyde anderledes klimatiske forhold i loftrummet og indvirke på solcellernes ydelse. I løbet af dagtimer med sol, vil solcellerne producere strøm og udvikle en betydelig mængde varme, der ikke ventileres bort på samme måde, som hvis cellerne var placeret med bagsiden eksponeret for udeluftens afkølende effekt. Solcellernes transparens vil også medføre direkte solstråling ind i tagrummet, hvilket vil øge temperaturen yderligere i dagtimerne. Den naturlig ventilation af tagrummet bliver hermed en afgørende parameter for at bortlede overskudsvarme.

Den forøgede dagtemperatur i loftrummet vil medføre et større totalt udsving i temperaturen i loftrummet set over det enkelte døgn, både sommer og vinter. Dette vil medføre en større udtørring af de omkringliggende konstruktioner, med risiko for revnedannelser ved samlinger. Højere temperaturer i tagrummet giver en lavere relativ fugtighed med mulighed for akkumulering af fugt fra omgivelserne, herunder også fra udeluften.

Solcellers ydelse er stærkt afhængig af deres egen temperatur. I henhold til: *PVTECH.org - Temperature coefficient playing key role in PV system performance* (Osborne, 2015), falder ydelsen til cirka 65 % ved lufttemperaturer over 25 grader, hvilket vil forekomme oftere med den lukkede indbygning. Indbygget i tagkonstruktionen, uden adgang for udeluften til at afkøle cellen, vil det kun være den naturlige ventilation af tagrummet, der kan trække varmen væk fra cellens bagside og dermed reducere temperaturen. Da den naturlige ventilation på ingen måde kan sidestilles med den udvendige konvektion, vil indbygningen medføre væsentlig mindre afkøling og dermed mindre ydelse fra cellerne.

4.4 Varmeteori

I forbindelse med vurdering af risikoen for kondensdannelse på solcellernes underside benyttes delvist metoder fra den traditionelle varmeteori: *Master i Bygningsfysik – Varmelære teori* (Nielsen & B. Møller, 2014) omkring varmeovergange, og delvist en forsøgsbaseret model fra *National Renewable Energy Laboratory* i USA.

Som nævnt i tidligere afsnit, *Problemstilling – Kondensdannelse på bagside*, dannes kondens ved afkøling af luft til en relativ fugtighed på 100 %. Når luften når mætningsdamptrykket kan luften ikke indeholde mere fugt, hvorfor kondensering sker.

For at beregne kondensrisikoen er det derfor nødvendigt at beregne forskellen mellem udeluftens temperatur og overfladetemperaturen på solcellernes underside, da netop forskellen vil svare til afkølingen af udeluften direkte på solcellens overflade:

$$\text{Formel 01: } \Delta T = \theta_{\text{luft}} - \theta_{\text{cel}}$$

θ_{cel} vil være afhængig af den variable θ_{luft} , og det er derfor nødvendigt at se på varmeovergangen mellem solcellens overflade og den omgivende luft, for at kunne beregne overfladetemperaturen θ_{cel} på solcellen.

Den samlede varmestrøm kan skrives som:

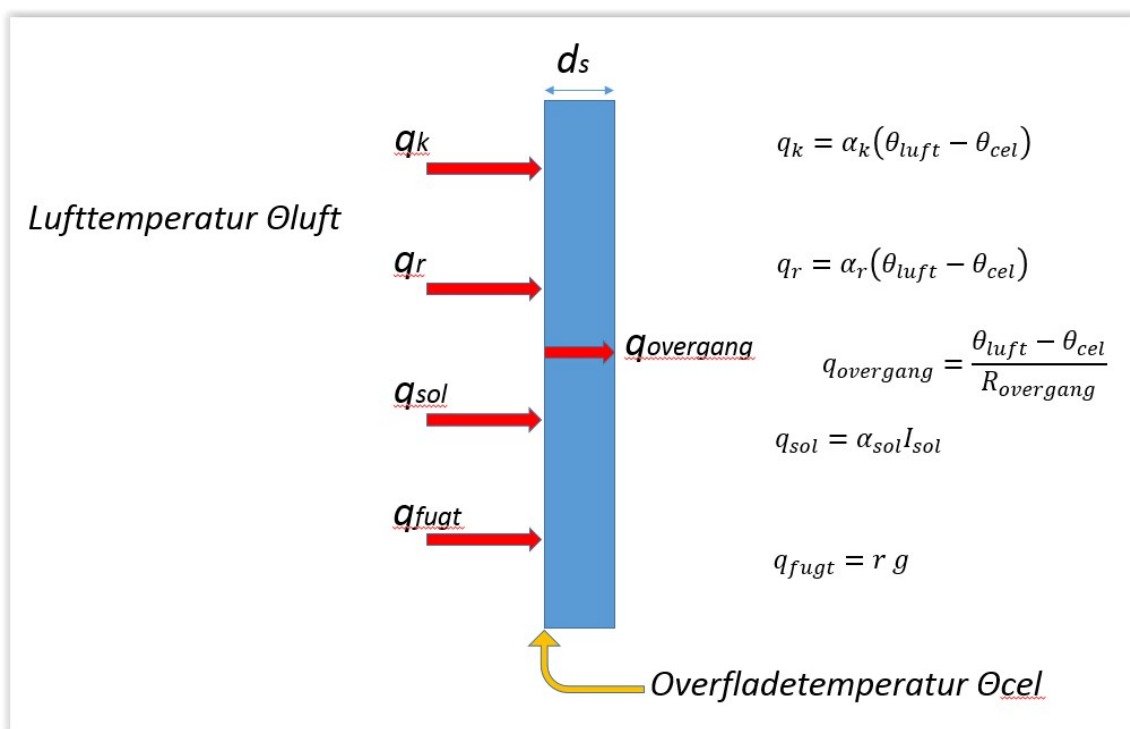
$$\text{Formel 02: } q_{\text{overgang}} = \frac{(\theta_{\text{luft}} - \theta_{\text{cel}})}{R_{\text{overgang}}},$$

Hvor R_{overgang} er overgangsisolansen mellem solcelle og luft.

Selve varmestrømmen er sammensat af bidrag fra forskellige delelementer, der kan variere over tid og er afhængige af flere parametre. Af figur 4 fremgår de mulige processer, der kan indgå i varmestrømmen, hvor q_k =konvektion, q_r =langbølget stråling, q_{sol} =kortbølget stråling fra solen og q_{fugt} =varmeudveksling ved kondensering.

$$\text{Formel 03: } q_{\text{overgang}} = q_k + q_r + q_{\text{sol}} + q_{\text{fugt}}$$

q_k , konvektionsbidraget, er et resultat af luftens bevægelser omkring overfladerne på solcellen. Der skelnes mellem tvungen konvektion, der forekommer ved udvendige flader og fri konvektion ved indvendige flader. Tvungen konvektion skyldes vindes bevægelser, mens fri konvektion stammer fra temperaturforskelle i det enkelte rum. Grundet solcellernes indbygning vil der på ydersiden være tale om tvungen vindafhængig konvektion, og på indersiden en kombination. Den naturlige ventilation af tagrummet vil være vind- og temperaturafhængig, og en varmestrøm fra den underliggende lejlighed kan skabe en temperaturforskel, der vil skabe fri konvektion og dermed luftbevægelse.



Figur 4, Processor i forbindelse med varmeovergang, Kilde: BoS

q_r , bidraget fra langbølget stråling, afhænger af temperaturerne på de flader, der vender imod solcellen. Det vil i dette tilfælde sige himmelhvælvingen udvendigt, og loftisoleringen indvendigt.

q_{sol} , bidraget fra kortbølget stråling, afhænger af direkte, diffus og reflekteret indstråling fra solen. Da solen vil opvarme solcellerne til en højere temperatur end den omgivende luft, og dermed modvirke en situation med underafkølet overflade og kondensdannelse, ses der bort fra dette bidrag. I praksis betyder det, at sandsynligheden for kondensdannelse er størst om natten.

q_{fugt} , bidraget fra kondensering/faseskift afhænger af mængden af kondens, og er derfor vanskelig at bestemme præcist. I denne rapport anvendes en empirisk bestemt formel til beregning af modulernes overfladetemperatur, hvor q_{fugt} ikke tages i regning. Dermed er den teoretiske beregning af cellernes overfladetemperatur kun valid indtil den temperatur, hvor kondensering starter.

Af figur 4 fremgår altså ved stationære forhold:

$$\text{Formel 04: } q_{overgang} = q_k + q_r + q_{sol} + q_{fugt}$$

Og dermed:

$$\text{Formel 05: } \frac{\theta_{luft} - \theta_{cel}}{R_{overgang}} = \alpha_k(\theta_{luft} - \theta_{cel}) + \alpha_r(\theta_{luft} - \theta_{cel}) + \alpha_{sol} I_{sol} + r_g,$$

Hvor α_x angiver varmeovergangstallet for den respektive proces.

I situationen med solcellerne kan den venstre side af ligningen sættes lig 0, da den samlede varmeudveksling med omgivelserne er 0. Som tidligere nævnt er indstrålingen fra solen, q_{sol} , også lig 0, da der vurderes på risikoen for kondens om natten.

Ifølge *Master i Bygningsfysik – Varmelære teori* (Nielsen & B. Møller, 2014), kan q_r også skrives som:

$$\text{Formel 06: } q_r = \varepsilon \sigma [(\theta_{ms} + 273)^4 - (\theta_{cel} + 273)^4]$$

Hvor

ε = overfladens emissivitet

$\sigma = 5,672 \cdot 10^{-8}$, Stefan Boltzmanns konstant (W/m²K⁴)

θ_{ms} = modstående overflades temperatur (°C)

Varmebalancen for solcellen kan nu opstilles som balanceligning, der skal gå i nul, med bidrag fra konvektion på udvendig og indvendig side, samt udstråling mod henholdsvis himmelhvælvingen og den indvendige isolering i loftsrummet og til sidst bidraget fra fugtovergangen.

$$\text{Formel 07: } 0 = q_{r,himmelhvælving} + q_{k,udvendig} + q_{k,indvendig} + q_{r,lofttrum} + q_{fugt}$$

I den senere anvendte beregningsmodel, hvor konvektionsbidraget er bestemt ud fra tidligere målinger, genkendes strålingsbidragene (Formel 06) fra himmelhvælving og tagrum.

4.5 Fugtteori

Al atmosfærisk luft indeholder vanddamp, der dog i mængde kan variere over tid, og er afhængig af blandt andet temperaturen. Den maksimale mængde vanddamp luften kan indeholde defineres *mætningsindholdet*, og det er ved dette indhold, at grænsen til kondens forekommer. Køles luften ved dette indhold af vanddamp i luften, så kondenserer den mængde af vanddamp, som luften ikke kan indeholde.

Begrebet *relativ fugtighed RF* dækker over forholdet mellem den aktuelle mængde vanddamp i luften, og den maksimale mængde vanddamp, som luften kan indeholde ved den samme temperatur. I henhold til SBI 224 (Brandt, 2013):

$$\text{Formel 08: } RF = \frac{v_{\text{aktuel}}}{v_{\text{mæt}}}$$

Hvor

V_{aktuel} = Det aktuelle vanddampindhold

$V_{\text{mæt}}$ = Det maksimalt mulige vanddampindhold ved den pågældende temperatur.

Ved beregning anvendes ofte damptrykket i stedet for vanddampindholdet. Forholdet mellem vanddampindhold og damptryk kan skrives som:

$$\text{Formel 09: } p = v \cdot 0,4615 \cdot (\theta + 273,15)$$

Hvor tryk p er i Pa, temperatur θ i $^{\circ}\text{C}$ og vandindhold i g/m^3

Mætningsdamptrykket, hvorved kondensering vil indtræffe, kan omtrentlig beregnes ved hjælp af:

$$\text{Formel 10: } P_m = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}} \text{ for } \theta \geq 0^{\circ}\text{C}$$

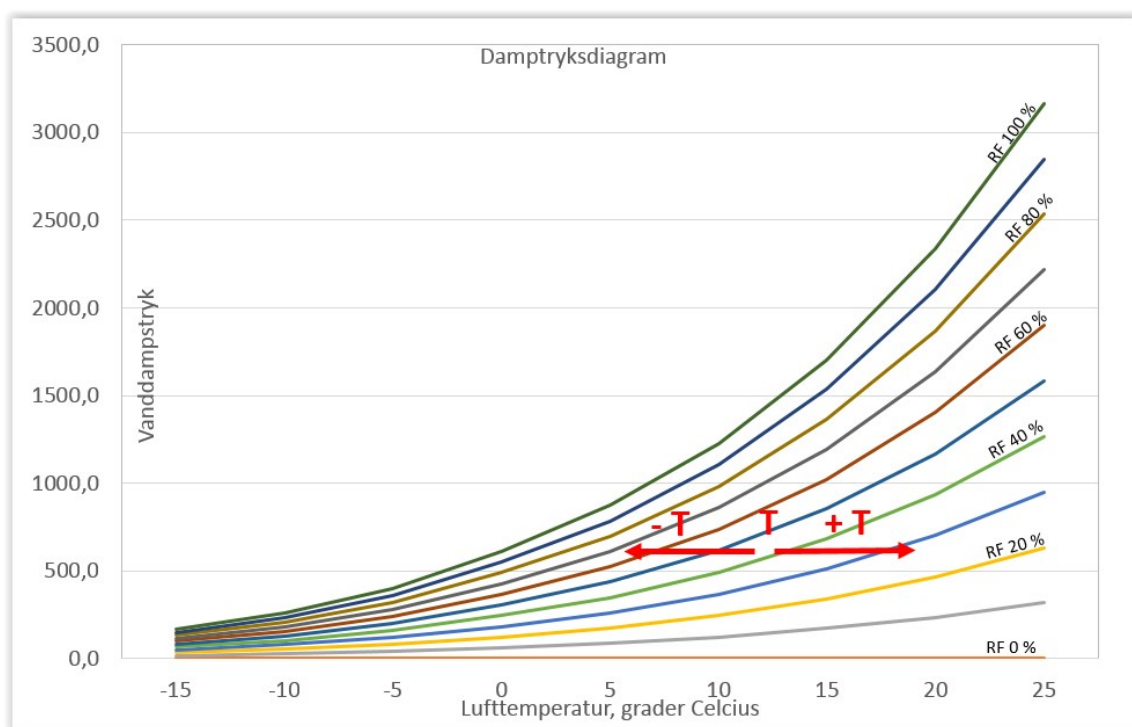
$$\text{Formel 11: } P_m = 610,5 \cdot e^{\frac{21,875 \cdot \theta}{265,5 + \theta}} \text{ for } \theta < 0^{\circ}\text{C}$$

Hvor

P_m = Vanddamps partialtryk ved mætning

θ = Temperaturen i $^{\circ}\text{C}$

Grafisk vises ovenstående formler som et damptryksdiagram (Se figur 5), hvor P_m svarer til en RF på 100%.



Figur 5, Damptryksdiagram, Pm = RF 100%, Kilde: BoS

Af diagrammet ses, at RF stiger ved faldende temperatur, og RF falder ved stigende temperatur. Med andre ord: Varm luft kan indeholde mere vanddamp, end kold luft.

Inde i bygninger bliver fugtigheden påvirket af udeluftens fugtighed gennem ventilation og en egentlig fugtproduktion, der kan stamme fra madlavning, bade, produktion og personaktivitet. Ud over helt specielle bygninger, som for eksempel svømmehaller og baderum, er det særligt beboelsesbygninger, der udsættes for en stor fugtproduktion. Dette stiller store krav til projektering og udførelse af klimaskærmen, da fugtig luft, der bliver afkølet i en ydervægskonstruktion, risikerer at kondensere og forårsage skimmelvækst i og omkring konstruktionen.

Forudsat at fugtproduktionen er konstant og ligevægt er indtruffet, kan vanddampindholdet inde i bygninger beregnes som vanddampindholdet i indeluften plus fugttilskuddet:

$$\text{Formel 12: } v_i = v_u + \frac{G}{n \cdot V}$$

Fugttilskuddet kan beregnes ved hjælp af fugtproduktionen G (kg/h), bygningens volumen V (m³) og luftskiftet n (h⁻¹). Sidstnævnte findes af:

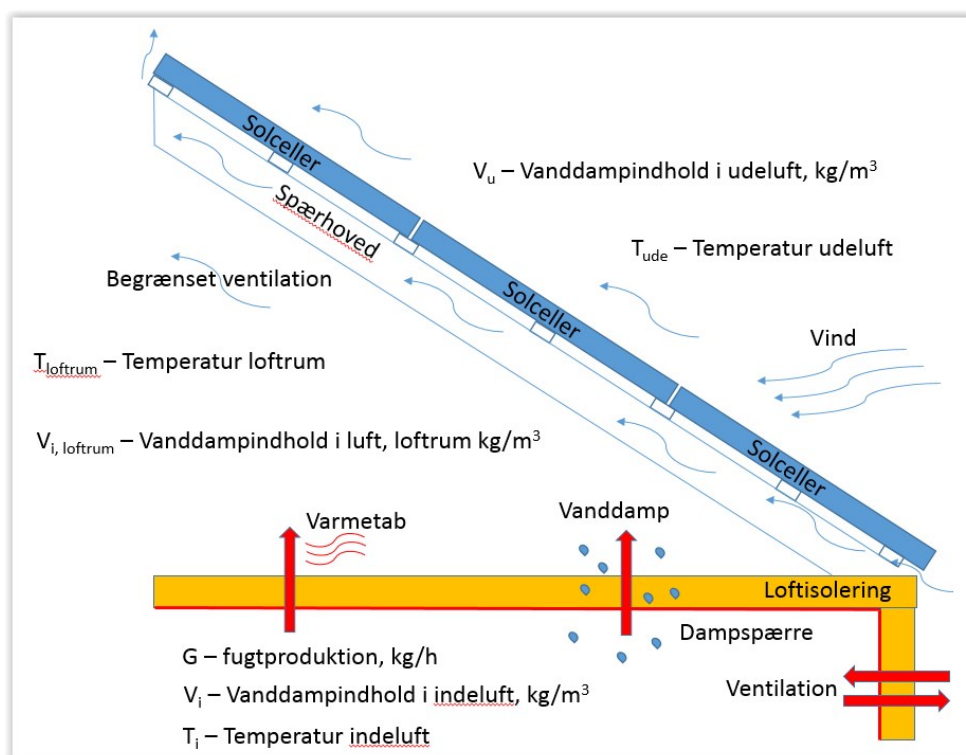
$$\text{Formel 13: } n = \frac{L}{V}$$

Hvor

$L =$ tilført mængde frisk luft (m^3/h)

Ud fra ovenstående ses det, at uanset luftskiftets størrelse, så vil det absolutte fugtindhold ikke kunne bringes længere ned, end udeluftens fugtindhold, hvilket også er logisk, da det jo netop er udeluft vi ventilerer vore bygninger med. Til gengæld vil den indvendige relative fugtighed kunne bringes ned ved at hæve temperaturen, som vist i figur 5, og samtidig give mulighed for akkumulering af mere fugt.

I denne rapport fokuseres på et tagrum, der udgør en overgang mellem beboelsesbygningens indvendige klima og udeklimaet. Betingelserne i tagrummet vil blive påvirket af udeluftens temperatur og fugtighed, ganske som alle andre rum, der ventileres direkte med udeluften. Men derudover vil varmetab fra den underliggende bolig kunne påvirke temperaturen i tagrummet, og et større damptryk i boligen, kombineret med en ikke 100 % tæt dampspærre, vil kunne påvirke fugtindholdet i tagrummet. Disse processer er illustreret i figur 6



Figur 6, Fugtproduktion og vanddampindhold, Kilde: BoS

I forbindelse med renovering af taget skal loftisolering opdateres til gældende krav i Bygningsreglementet kap. 7.4.2, da udskiftning af tagbeklædning gør efterisoleringen

rentabel i henhold til BR10 (Byggecentrum, 2014), bilag 6. Fremtidig isoleringsniveau skal dermed overholde en U-værdi på $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$. I samme proces kan tætheden af en eventuel dampspærre vurderes, og ny tæt dampspærre etableres hvis påkrævet. Montage af dampspærre vil reducere rentabiliteten, men det vurderes stadig at være rentabelt, da nuværende isoleringsniveau er meget begrænset. Disse ændringer vil betyde, at varmetabet til tagrummet vil blive kraftigt reduceret, og fugttilskuddet fra boligen til loftrummet vil blive væsentligt reduceret. En mindre varmestrøm vil påvirke kondensrisikoen i opadgående retning, mens en reduceret fugtvandring vil reducere risikoen.

4.6 Forudsætninger for beregning af solcellernes temperatur og kondensrisiko.

For teoretisk at beregne cellernes overfladetemperatur gøres følgende forudsætninger:

1. Dampspærren i etageadskillelsen regnes for 100 % tæt. Altså intet fugttilskud fra boligen under tagrummet. Hvis beregningen viser, at der alligevel dannes kondens, så vil det kun forstærke kondensdannelsen, hvis dampspærren er utæt.

2. Lufttemperaturen i tagrummet sættes lig temperaturen i udeluften. Dette svarer til at varmetabet fra bolig til tagrum er $0 \text{ W/m}^2\text{K}$, hvilket ikke er helt realistisk, på trods af et nyt og forbedret isoleringsniveau. På grund af den naturlige ventilation i tagrummet vurderes det dog, at temperaturstigning i tagrummet, grundet varmetab fra boligen, vil være meget begrænset. Isoleringsmængden efter renovering fastsættes til $U=0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$, svarende til 300 mm isolering i loft over øverste lejlighed.

3. Cellernes konstruktionsopbygning antages at være så tynd og varmeledende, at den beregnede overfladetemperatur er repræsentativ for både for- og bagside.

4. Beregningen vil blive gennemført med varierende konvektionsbidrag ved cellernes underside, svarende til:

1: Konvektion ved cellernes under- og overside (2 gange vind-bidrag)

2: Ingen konvektion ved cellernes underside. (1 gange vind-bidrag, kun overside)

3: Ingen konvektion, svarende til vindstille. (0 gange vind-bidrag)

Beregningen gennemføres med varierende konvektion, da konvektion både kan virke kølende og samtidig fjerne kondens, hvilket er to modsatrettede processer i forhold til vurdering af kondensrisiko. Ved at gennemføre beregningerne kan konvektionens betydning for kondensdannelse bedre vurderes.

5. Himmelhvælvingsens temperatur sættes til 235 grader Kelvin

6. Beregningen foretages om natten, svarende til ingen direkte sollys på cellen, da sollys og dermed strømproduktion vil opvarme cellen og dermed hindre kondensdannelse. Den værste situation optræder dermed om natten.

4.7 Forventede resultater

At anvende solceller som klimaskærm for regn har aldrig været integreret i udviklingen af standard solcellepaneler. Det betyder, at der ikke er indbyggede egenskaber til håndtering af kondensdannelse på panelerne. Det varmeledende materialevalg (hovedsageligt glas) gør ligeledes, at temperaturen på cellens overflader er meget ensartet. Disse ting gør, at cellerne groft kan sammenlignes med stålpladetage hvad angår risikoen for kondensdannelse. En simpel søgning på internettet omkring stålpladetage og kondens viser, at kondens er et meget udbredt problem i forbindelse med stålpladetage til haller, skure og carporte. Problemet er så udbredt, at leverandører tilbyder forskellige metoder til at forhindre kondensdannelsen. Typisk er der tale om absorberende maling eller en filtbeklædning af undersiden. Baseret på ovenstående må det forventes, at kondens også vil være et udbredt problem på solcellernes underside, hvilket beregninger derfor også forventes at vise.

4.8 Beregningsmodel

Til beregning af solcellemodulernes temperatur, i forhold til temperaturen i udeluften, anvendes en amerikansk beregningsmodel, der er fremkommet ved forsøgsopstillinger og målinger. Metoden er beskrevet nærmere i: *Measuring and Modeling Nominal Operating Cell Temperature* (Muller, 2010).

Anvendt formel er:

Formel 15:

$$\alpha_{ovfl} G_{ovfl} = \varepsilon_{glas} \sigma (T_{cel}^4 - T_{him}^4) + 2(1,2 \times V_{snit} + 4,8)(T_{cel} - T_{luft}) + \varepsilon_{glas,bag} \sigma (T_{cel}^4 - T_{iso}^4)$$

Hvor:

α_{ovfl} = 0,92 modulets absorberingsevne

G_{ovfl} = Total indstråling på modul

ε_{glas} = 0,84 (solcellens emissivitet mod himmelrummet)

$\varepsilon_{glas,bag}$ = 0,893 (solcellens emissivitet mod tagrum)

σ = $5,67 \times 10^{-8}$ Stefan-Boltzmann's konstant

T_{cel} = Overfladetemperatur på solcelle

T_{him} = Himmelhvælvningstemperatur

T_{luft} = Udelufttemperatur

T_{iso} = Overfladetemperatur på loftisolering

V_{snit} = Gennemsnitlig vindhastighed

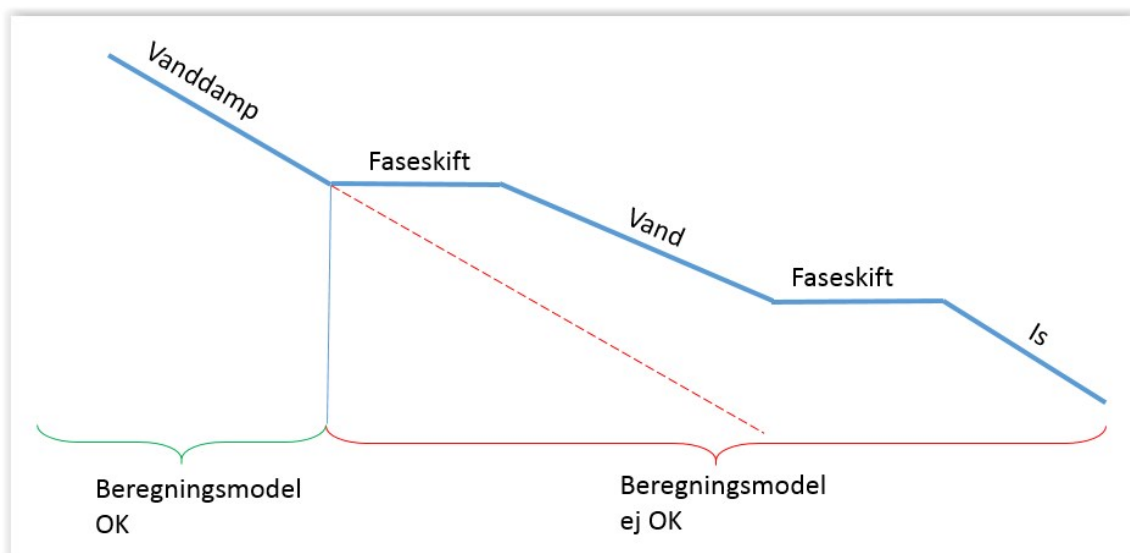
Det ses at formelen på højre side består af 3 dele. Første del er udstråling fra cellen mod himmelhvælvingen, den midterste del består af to konvektionsbidrag (under celle og over celle), og sidste del er udstråling fra cellen mod tagrummets isolering. Hvis varmebalancen for cellen skal gå i nul, svarende til Steady state og ingen produktion af strøm, så er:

$$\text{Formel 16: } Energi_{ind} = Energi_{ud}$$

Dette svarer til at venstre side af ligningen = 0. Herefter minder *formel 15* om *formel 07*, udledt i tidligere afsnit 4.4 *varmeteori*. Som angivet ligeledes i afsnit 4.4 *Varmeteori* indeholder den anvendte beregningsmodel ikke leddet q_{fugt} , der angiver varmetilskuddet fra faseskiftet fra damp til vand. Beregningsmodellen har hermed en begrænsning i sin

anvendelse, da resultaterne kun vil være valide, så længe fortætning/kondensering ikke er startet.

Grafisk kan dette vises som angivet på figur 7:



Figur 7, Beregningsmodellens begrænsninger, Kilde: BoS

Efter bestemmelse af cellernes temperatur, anvendes et af forfatteren udviklet regneark til beregning af kritisk relativ luftfugtighed i udeluften, afhængig af lufttemperaturen. Risikoen for kondensdannelse kan derefter vurderes ved en sammenligning af den beregnede kritiske relative luftfugtighed og klimadata for Danmark. Hvis den beregnede kritiske relative fugtighed overstiger den almindelige forekommende relative fugtighed om natten må det konkluderes, at anvendelsen af solceller som klimaskærm uden undertag kan resultere i fugtproblemer, uden yderligere tiltag.

4.9 Beregninger

Alle beregninger af risiko for kondensdannelse er foretaget i Excel og fremgår af bilag 1-3

Følgende princip og rækkefølge er gældende for beregningerne:

For hver af de tre forskellige konvektionsscenarier beregnes den kritisk relative fugtighed for temperaturer varierende fra -15 grader celsius til 25 grader celsius, med et spring på 5 grader celsius.

Step 1:

Overfladetemperatur (T_{iso}) af loftisolering bestemmes via glaser-beregning.

Overfladetemperaturen er afhængig af varmestrøm gennem loftisoleringen og udeluft-temperaturen. I figur 8 nedenfor er vist eksempel på beregning af overfladetemperatur ved en udeluft-temperatur på -15 grader celsius.

Anvendes til beregning af overfladetemperatur, output går til Kolonne C i Data for vanddampsdiagram						
Materiale	Tykkelse d i m	Σ tykkelse	Varmeledningsevne	Isolans	Temperaturændring	Temperatur
	d	d	λ	R=d/λ	ΔΘ	Θ
	m	m	W/mK	m ² K/W	°C	°C
Udvendig overgang		0		0,10	0,42	-15,00
Isolering	0,3	0,3	0,037	8,11	33,92	-14,58 OUTPUT HER
Beton	0,1	0,4	1,7	0,06	0,25	19,34
Indv. Overgang				0,10	0,42	19,58
			ΣR	8,37	θ inde-θ ude	20,00
			U	0,12		35
Dimensionerende indetemp:					20	
Dimensionerende udetemp: INPUT HER:					-15	
Beregning af temp:					OK	

Figur 8, Beregning af overfladetemperatur loftisolering, Kilde: BoS

Step 2:

De enkelte led på højre side i formel 15:

$$\alpha_{ovfl} G_{ovfl} = \varepsilon_{glas} \sigma (T_{cel}^4 - T_{him}^4) + 2(1,2 \times V_{snit} + 4,8)(T_{cel} - T_{luft}) + \varepsilon_{glas,bag} \sigma (T_{cel}^4 - T_{iso}^4),$$

(Højre 1)

(Højre 2)

(Højre 3)

kan nu beregnes og venstre side sættes lig 0. Beregningen/iterationen foretages ved at gætte på en modultemperatur og tjekke, at summen af de tre led giver 0. Ved difference gøres et nyt gæt på modultemperaturen, indtil summen giver 0.

Af figur 9 fremgår beregningen af modultemperatur for situationen med 2-sidet konvektion. De 3 led på højre side er markeret med **Højre 1, Højre 2 og Højre 3**. Disse tal

fremkommer ved at gætte på modultemperaturen T_M , og kontrollen sker i afstemningskolonnen for højre side.

Lufttemperatur T Luft, Celcius	Lufttemperatur T Luft, Kelvin	Højre 1 Udstråling himmel	Højre 2 Vindafkøling	Højre 3 Udstråling loft	Afstemning højre side	Modultemperatur TM Kelvin	Modultemperatur TM Celcius
-15	258	55,94	-44,04	-11,91	0,00	254,942	-18,1
-10	263	69,73	-54,72	-15,03	-0,02	259,2	-13,8
-5	268	84,14	-65,66	-18,50	-0,02	263,44	-9,6
0	273	99,20	-76,87	-22,35	-0,01	267,662	-5,3
5	278	114,93	-88,33	-26,61	-0,01	271,866	-1,1
10	283	131,33	-100,04	-31,29	0,01	276,053	3,1
15	288	148,43	-111,99	-36,42	0,02	280,223	7,2
20	293	166,22	-124,20	-42,04	-0,01	284,375	11,4
25	298	184,76	-136,60	-48,14	0,01	288,514	15,5
					Skal give 0	Input GÆT	

Figur 9, Beregning af modultemperatur ved 2-sidet konvektion, Kilde: BoS

Når summen af de tre led giver 0 kan modultemperaturen T_M herefter aflæses i grader celsius i yderste højre kolonne.

Step 3:

Når modultemperaturen er kendt, kan forskellen i temperatur mellem udeluft og overfladetemperatur bestemmes som modultemperaturen minus udeluft-temperaturen, i figur 10 angivet med Δ Temp.

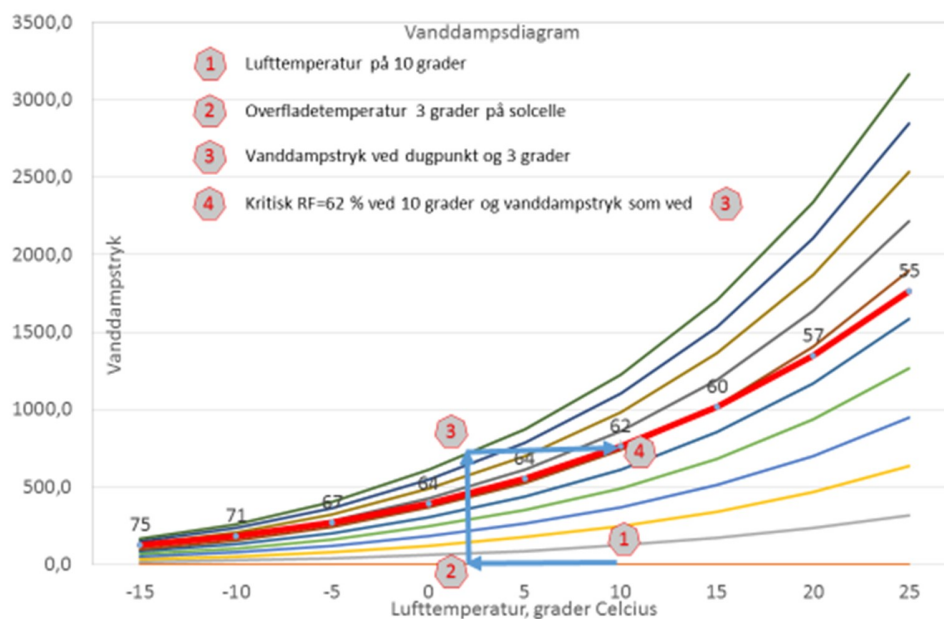
Lufttemperatur T Luft, Celcius	Lufttemperatur T Luft, Kelvin	Modultemperatur TM Kelvin	Modultemperatur TM Celcius	Δ Temp (Temperaturfald på celle)
-15	258	254,942	-18,1	3,1
-10	263	259,2	-13,8	3,8
-5	268	263,44	-9,6	4,6
0	273	267,662	-5,3	5,3
5	278	271,866	-1,1	6,1
10	283	276,053	3,1	6,9
15	288	280,223	7,2	7,8
20	293	284,375	11,4	8,6
25	298	288,514	15,5	9,5
		Input GÆT	Forskel mellem luft og celletemp HUSK det er DELTA! Celler er køligere end luften!	

Figur 10, Beregning af temperaturforskel mellem luft og modul, Kilde: BoS

Step 4:

Ved hjælp af udeluft-temperaturen T_{Luft} , Δ Temp og vanddampsdiagrammet er det nu muligt at beregne den kritiske relative fugtighed. Af figur 11 fremgår som eksempel princippet for dette. Med udgangspunkt i en udeluft-temperatur på 10 grader celsius bevæger man sig fra punktet 1 mod venstre i diagrammet svarende til Δ Temp (7 grader $^{\circ}\text{C}$). Punkt 2 angiver hermed modulets overfladetemperatur (3 grader $^{\circ}\text{C}$). For denne temperatur kan det maksimale vanddampstryk beregnes, svarende til punkt 3, hvor kondensation vil forekomme. Herfra bevæger man sig igen mod højre i diagrammet, svarende til Δ Temp (7 grader $^{\circ}\text{C}$). Punktet 4 definerer hermed den kritiske relative

luftfugtighed, hvorved der vil dannes kondens på den 7 grader koldere overflade på modulet.



Figur 11, Princip for beregning af kritisk RF, Kilde: BoS

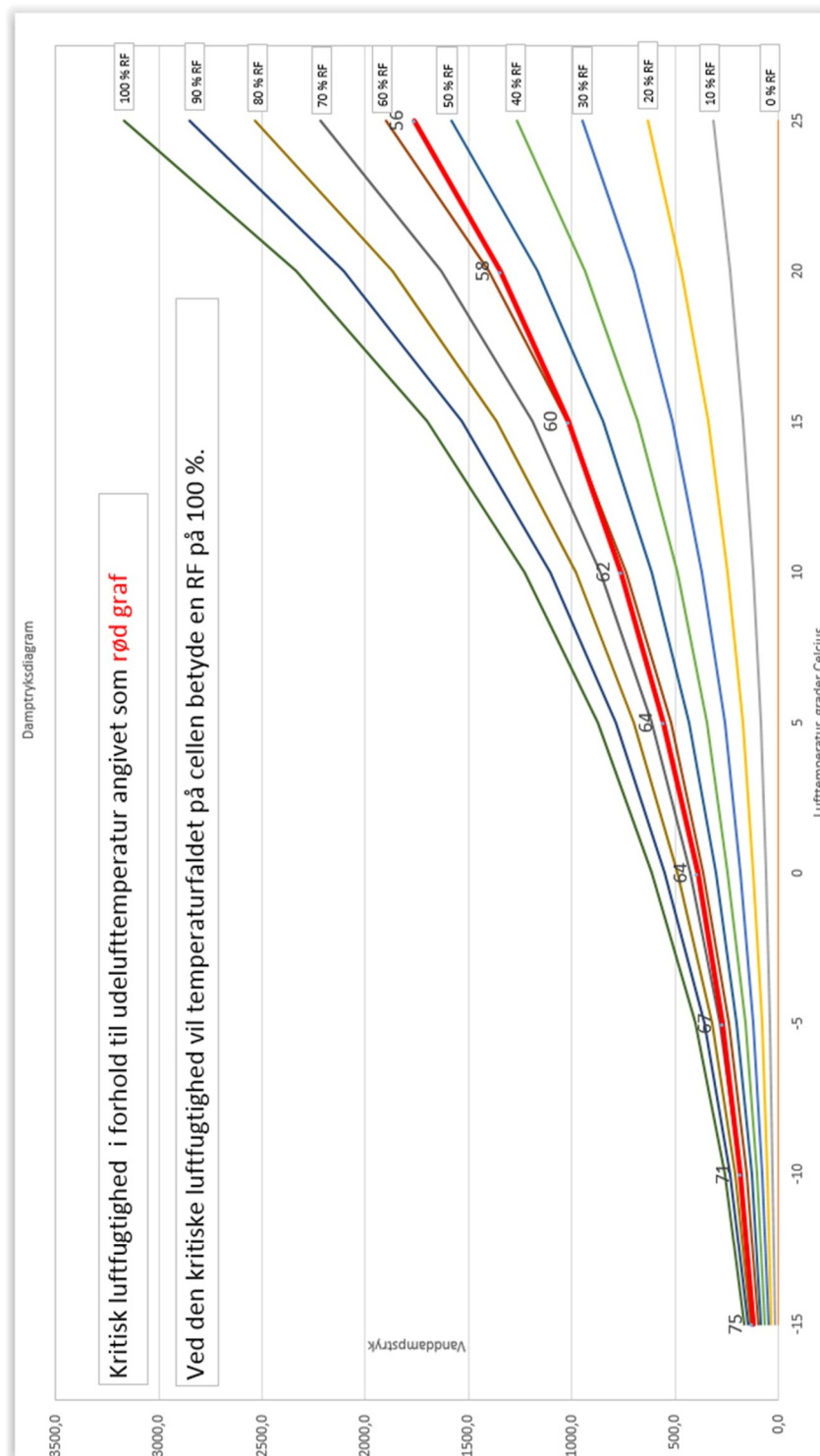
Step 5:

Ved at gentage disse beregninger for temperaturer fra -15 grader celsius til 25 grader celsius, for alle tre konvektionstilfælde, fremkommer for hvert tilfælde en kurve som angivet med kraftig rød på figur 11. Disse resultater fremgår af næste afsnit.

Bemærk: Beregninger er gennemført for hele temperaturintervallet -15 grader celsius til 25 grader celsius. Ved temperaturer under frysepunktet vil der ikke dannes kondens, men is, hvorfor yderligere et faseskift er sket. Graferne i intervallet under frysepunktet er hermed ikke valide. Se figur 7 for forklaring.

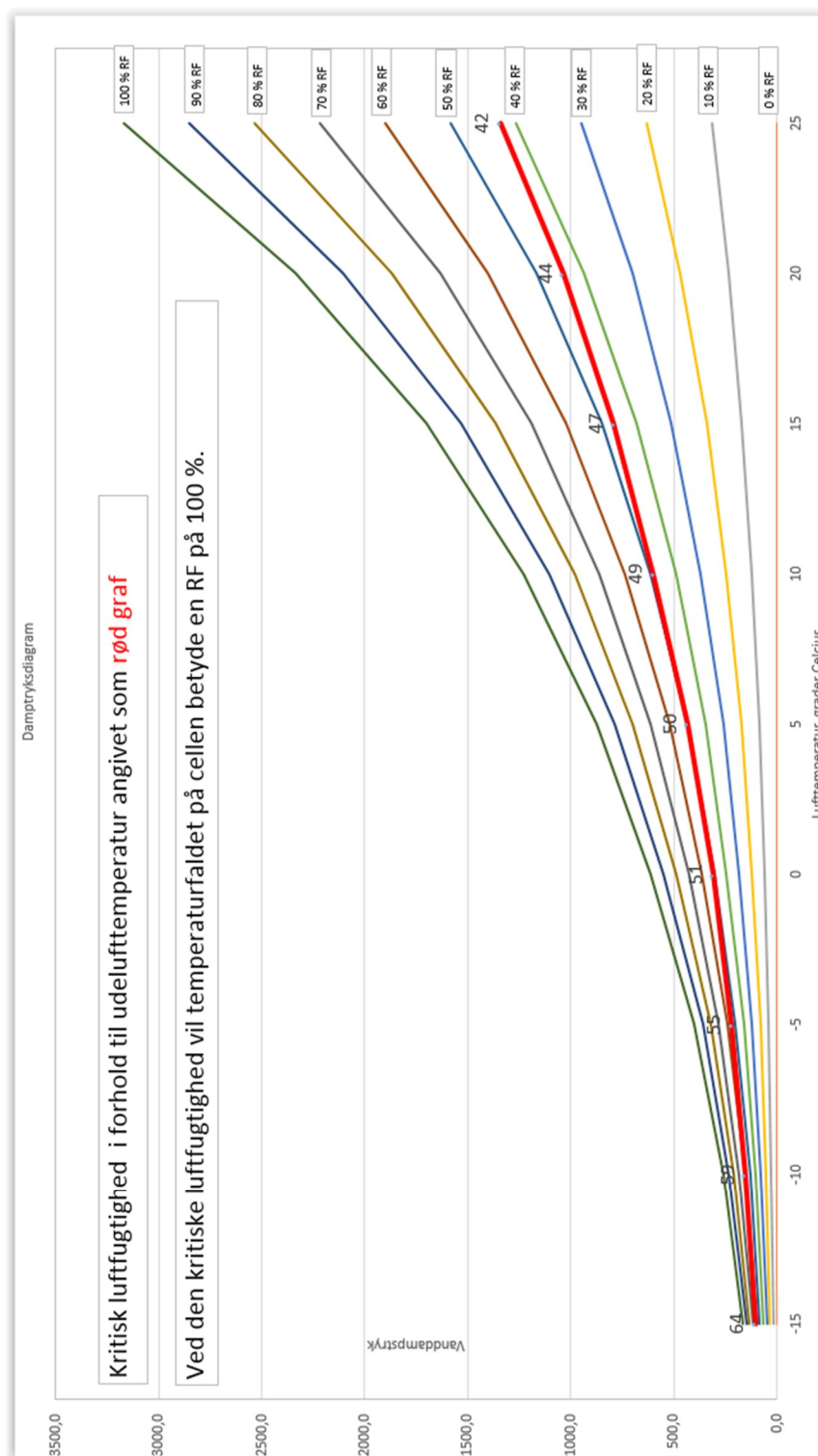
4.10 Resultater

Kritisk luftfugtighed ved 2-sidet konvektion, angivet med **rødt**. Grundlaget for grafen fremgår af bilag 1: 2-sidet konvektion.



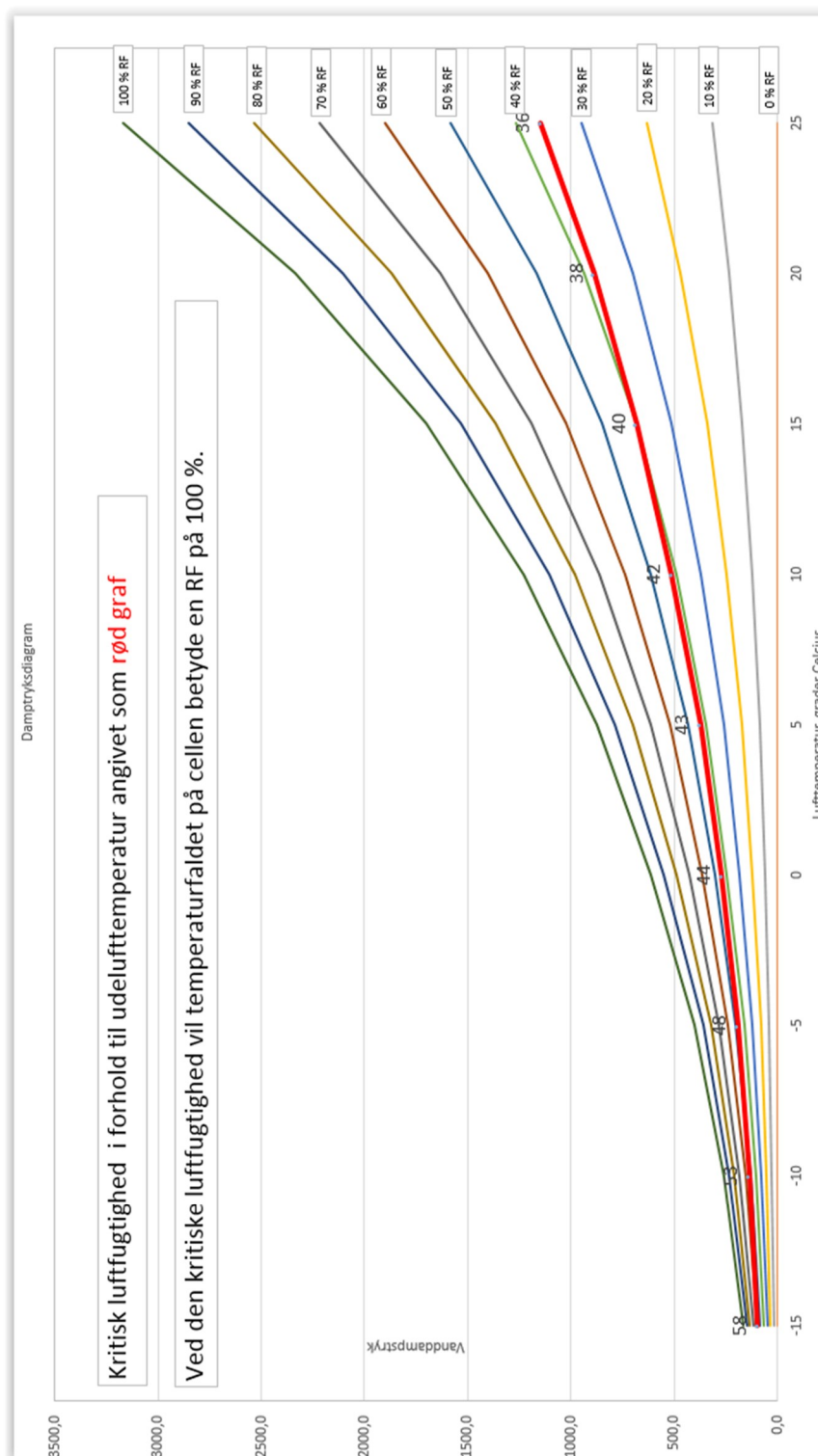
Figur 12, Kritisk RF ved 2-sidet konvektion, Kilde: BoS

Kritisk luftfugtighed ved 1-sidet konvektion, angivet med **rødt**. Grundlaget for grafen fremgår af bilag 2: 1-sidet konvektion.



Figur 13, Kritisk RF ved en-sidet konvektion, Kilde: BoS

Kritisk luftfugtighed ved ingen konvektion, angivet med **rødt**. Grundlaget for grafen fremgår af bilag 3: Ingen konvektion.



Figur 14, Kritisk RF ved ingen konvektion, Kilde: BoS

4.11 Fejlkilder

Ovenstående beregninger og resultater er baseret på flere teoretiske forudsætninger og en empirisk beregningsmodel. Dette giver i forhold til det aktuelle udviklingsprojekt: *Prisbillig solcelletag som klimaskærm*, nogle potentielle fejlkilder, som her skal nævnes:

I beregningerne er tagrumstemperaturen angivet til at være ens med udelufttemperaturen. Mere realistisk er det, at antage, at temperaturen i tagrummet vil være højere end udeluften. Dette skyldes dels varmetabet fra den underliggende lejlighed, men også varmeakkumulering fra dagtimerne vil i et ukendt omfang bidrage til en højere temperatur i tagrummet.

Dampspærrens tæthed er sat til 100%, hvilket i beregningerne betyder, at den relative fugtighed i tagrummet ikke påvirkes af fugtproduktionen i underliggende lejligheder. I virkeligheden vil det være umuligt at etablere en 100% tæt dampspærre i et eksisterende tagrum, da samlinger om for eksempel spærfødder, spærtænger, lampesteder og aftrækskanaler vil være ganske vanskelige at udføre perfekte hver gang. Selv perfekt udførte samlinger vil over tid have en risiko for at miste tætheden, da klæbemiddel og bevægelser i materialerne kan henholdsvis miste sin effekt og betyde revnedannelse. I forhold til resultaterne kan det dog siges, at hvis der optræder kondens på solcellerne ved 100 % tæt dampspærre, så vil kondensdannelsen forøges ved en mindre tæt dampspærre, da fugtproduktionen i lejlighederne hermed vil påvirke den relative luftfugtighed i tagrummet i opadgående retning.

Gennem hele rapporten er der fokuseret på solcellernes temperatur på bagsiden af cellen, hvor materialet består af glas. Selve cellerne er omkranset af aluminiumsprofiler, der muliggør montage i skinnesystemer. Aluminium er et mere varmeledende materiale end glas, så de gennemgående aluminiumsprofiler kan på siden ind mod tagrummet tænkes at have endnu lavere temperaturer, end glasset. Dette vil kunne medføre kondens ved selv højere lufttemperaturer, end beregnet.

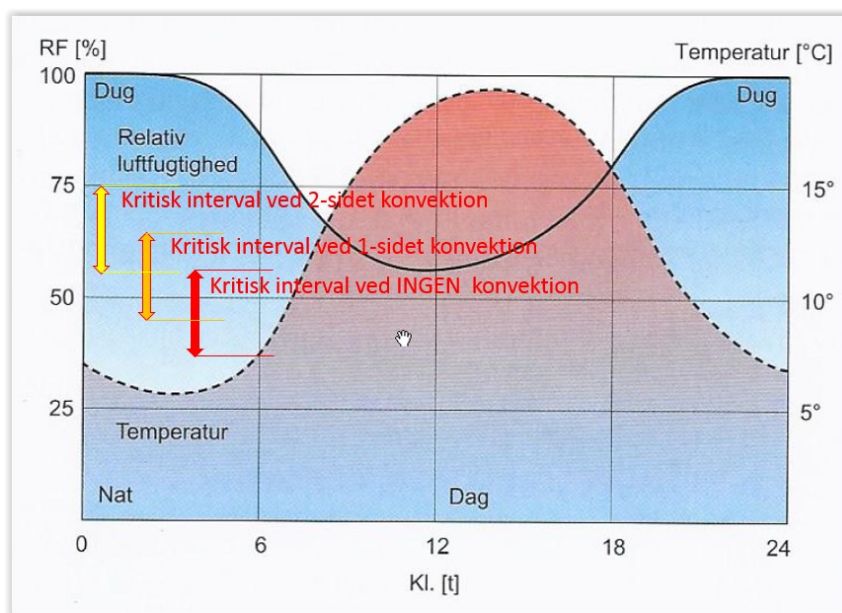
I beregningerne antages det, at temperaturen på solcellemodulet er ensartet gennem konstruktionens opbygning. Selvom der reelt kun er tale om et stykke glas og selve cellen, så vil der grundet forskellige overgangsisolanser være en mindre afvigelse i temperaturen set over hele tværsnittet. Det vurderes dog, at den temperaturforskel ikke er så stor, at rapportens konklusion bør ændres.

Himmelhvælvningstemperaturen er i rapporten fastsat til 235 grader kelvin. Da udstrålingen til himmelrummet er en vigtig faktor i beregningerne, vil selv en mindre afvigelse her betyde store ændringer i resultaterne. Temperaturen vurderes dog at være repræsentativ og dermed valid for opgaven.

Beregningsmodellen er grundet sin begrænsning også en fejkilde i forhold til det at vurdere risikoen for kondens nøjagtigt. Som angivet i Figur 7 tager modellen ikke højde for den varmeenergi der frigøres ved kondensering. Dette betyder, at kondensering reelt sker i et lavere tempo, da varmeenergien vil hæve temperaturen og modvirke kondensation på bagsiden af cellerne. Resultatmæssigt betyder denne fejkilde, at differensen mellem udelufttemperatur og overfladetemperatur mindskes, celledtemperaturen bliver højere, det maksimale absolutte vandindhold i luften øges, hvorfor risikoen for kondensdannelse mindskes. Grafisk betyder dette, at de røde resultatkurver på figur 12, figur 13 og figur 14 reelt ligger højere end angivet.

4.12 Vurdering af teoretiske resultater

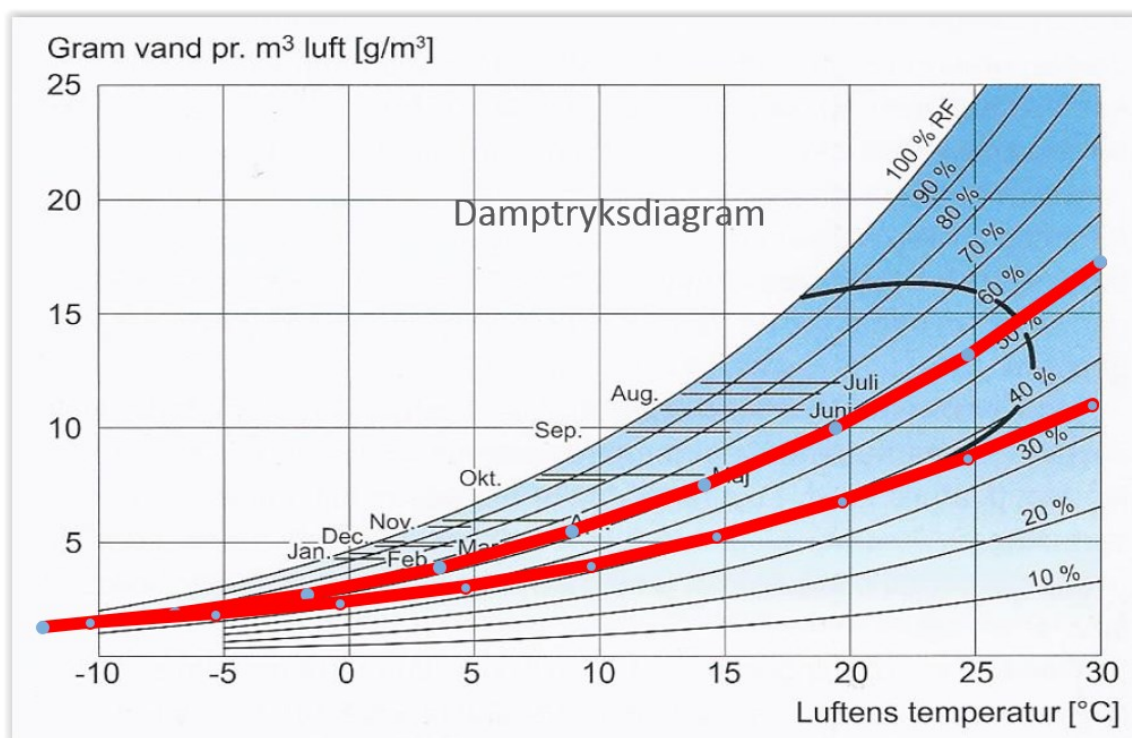
For at vurdere de beregnede resultater i afsnit 4.10, er det nødvendigt at sammenholde disse med vejrdata for Danmark. En relativ simpel måde at gøre dette på, er at indføre de kritiske RF-intervaller i et diagram, der viser det relative fugtighedsniveau set over et sommerdøgn. I figur 155, baseret på figur 27 fra SBI 224 er indtegnet de tre kritiske intervaller for relativ luftfugtighed, der er angivet som resultat i afsnit 4.10.



Figur 15, Relativ fugtighed i løbet af et sommerdøgn, Kilde: SBI 224

De tre kritiske intervaller er indtegnet i tidsrummet kl 00.00 til 06.00, da en af beregningsforudsætningerne er, at det er nat og cellerne ikke producerer strøm. Af diagrammet ses det, at uanset konvektionsforholdene, så vil der med stor sandsynlighed optræde kondens i løbet af en normal sommernat. Mængden af kondens kan ikke bestemmes ud fra dette diagram, men da kondens ifølge beregningerne vil opstå allerede ved relativ lav relativ fugtighed på en skyfri vindstille nat, så vurderes det, at det ikke er ubetydelige mængder kondens, der vil kunne dannes.

Hvis de fundne kritiske relative fugtighedskurver indtegnes i figur 26 fra SBI224, så ses det, at det normalt forekommende relative fugtighedsniveau generelt ligger over disse kurver. Dette indikerer, at kondensen ikke blot opstår i sommerperioder, men over hele året. I denne rapport's figur 166 er dette illustreret. Af illustrative årsager er kun indtegnet kurver for 2-sidet konvektion (øverste røde graf) og ingen konvektion (nederste røde graf)



Figur 16, Relativ fugtighed over et år, sammenholdt med kritisk niveau, Kilde: SBI 224

Af ovenstående resultater og sammenligning med normalt forekommende klimaforhold for Danmark ses det, at kondensdannelse vil være ofte forekommende på undersiden af solcellepanelerne. Selv med korrigerede kurver for varmeenergien afgivet ved fortætning anses det for sandsynligt, at kondens vil forekomme hyppigt. Det vil derfor være nødvendigt at overveje forskellige løsningsforslag for at sikre, at kondensdannelsen ikke resulterer i bygningsskader.

4.13 Vurdering af konvektionens indflydelse på kondensdannelse

Som angivet i afsnit 4.6 stk. 4, vil konvektionen omkring solcellerne både kunne medvirke til at danne kondens grundet konvektionens afkølende effekt og fjerne kondens grundet konvektionens ventilerende effekt.

Baseret på resultaterne i afsnit 4.10 er det muligt at vurdere på konvektionens samlede effekt, og dermed afgøre, hvilken af de to effekter, kølende eller ventilerende, der er den dominerende.

Ved at sammenligne beregningsresultaterne for henholdsvis 2-sidet konvektion, 1-sidet konvektion og ingen konvektion ses det, at det kritiske niveau for relativ luftfugtighed forstærkes, desto mindre konvektion der er til stede. Dette betyder, at hvis der ikke er konvektion til stede, så vil kondens opstå ved lavere relativ luftfugtighed. Konvektion bidrager altså positivt til mindre dannelse af kondens. Dette kan virke underligt, da vi normalt opfatter vind som kraftigt kølende. Dette nævnes for eksempel ofte i forbindelse med vejrudsigter i tv, hvor der omtales en wind-chill faktor. I dette tilfælde vil der dog sammenlignet med den store udstråling til himmelrummet være tale om en "opvarmende" effekt, selvom konvektionen omkring cellerne reelt består af kold luft.

4.14 Målinger i praksis

Dersom tidsplanen for udviklingsprojektet *Prisbilligt solcelletag som klimaskærm* tillader fysiske målinger på prøvestand eller forsøgsoptillinger, vil nedenstående afsnit blive anvendt til registrering, udførelse af måling, analyse og vurdering af resultaterne. Målinger i praksis vil kunne sammenholdes med den udledte teori, de gennemførte beregninger og eventuelle simuleringer, og vil naturlig kunne give et visuelt billede af kondensrisikoen på solcellernes bagside.

Tilføjlet: I slutningen af april måned blev det afgjort, at målinger kan gennemføres i starten af maj måned.

4.15 Måleplan

Nedenfor viste måleplan, figur 17, anvendes til registrering af tidspunkt for måling, skydække, lufttemperatur, celledtemperatur på under- og overside, eventuel kondensdannelse og lokale vindforhold. Målingerne planlægges gennemført over to på hinanden følgende nætter. Hvis anvendelige resultater opnås første nat, kan anden nat annulleres, da den kun er tænkt som backup i tilfælde af fejl på måleudstyr eller andre situationer, der kræver nye målinger.

Dato: XX.XX.XXXX

Tidspunkt	Skydække Visuelt	Temp. Luft C°	Tcelle u. side Grader C°	Tcelle o. side Grader C°	Kondens Visuelt	Vindforhold m/s
23:00						
00:00						
01:00						
02:00						
03:00						
04:00						
05:00						

Figur 17, Måleplan

Ud over de i figur 17 viste målinger, der aflæses manuelt, logges der samtidig data på den relative fugtighed i udeluften, den relative fugtighed umiddelbart under cellerne, udelufttemperatur og lufttemperaturen umiddelbart under cellerne. Dataene opsamles på udstyr, der gennemgås i næste afsnit. Dette udstyr er programmeret før målingerne til at starte 06052015 kl 23.00 og slutte 07052015 kl 05.00. Tidsrummet er valgt, da det normalt vil dække de koldeste timer på døgnet.

4.16 Måleudstyr

Følgende måleudstyr, figur 18, anvendes til registrering af de forskellige parametre:

Parameter	Metode	Mærke	Model	Kalibreres	Foto
Skydække	Visuelt/foto, alternativt beskrives det aktuelle skydække med ord	Nikon	D70	Nej	
Temp. luft	Datalogger	Tinytag	ULTRA 2	OK	
Temp. celle	Direkte overflademåling	Testo	174-T4	OK	
RF %	Datalogger	Tinytag	ULTRA 2	OK	
Kondens	Visuelt/foto	Nikon	D70	Nej	
Vindforhold	Direkte måling	Brannan	Anemometer	OK	
Databehandl. Tinytag	Overførsel til pc vha. software	Tinytag	Explorer	Nej	
Databehandl. Testo	Overførsel til pc vha. software	Testo	ComSoft Basic SP5	Nej	

Figur 18, Måleudstyr

4.17 Prøvestand og placering af målere

Prøvestanden er opstillet hos et El-installatørfirma i Birkerød på adressen Topstykket 27. Udformningen er vist på figur 19, og består af en trækonstruktion, der simulerer den endelige tagkonstruktion, og 12 solceller monteret med de forventede endelige profiler til tætning mellem cellerne.



Figur 19, Forsøgsopstilling med solceller på lægter

Følgende målerplaceringer er valgt for Tinytags: (RF% og lufttemperatur)



Figur 20, Tinytag placering for måling under celler



Figur 21, Tinytag placering for måling i udeluften

Følgende målerplaceringer er valgt for overfladetemperaturfølere:



Figur 22, Placering af overfladetemperaturføler på overside celle

Figur 23, Placering af overfladetemperaturføler på underside celle

For at simulere de endelige forhold bedst muligt under målingerne, lukkes gavlene i prøvestanden med presseninger, se figur 24.



Figur 24, Lukning af gavle under målinger

4.18 Resultater

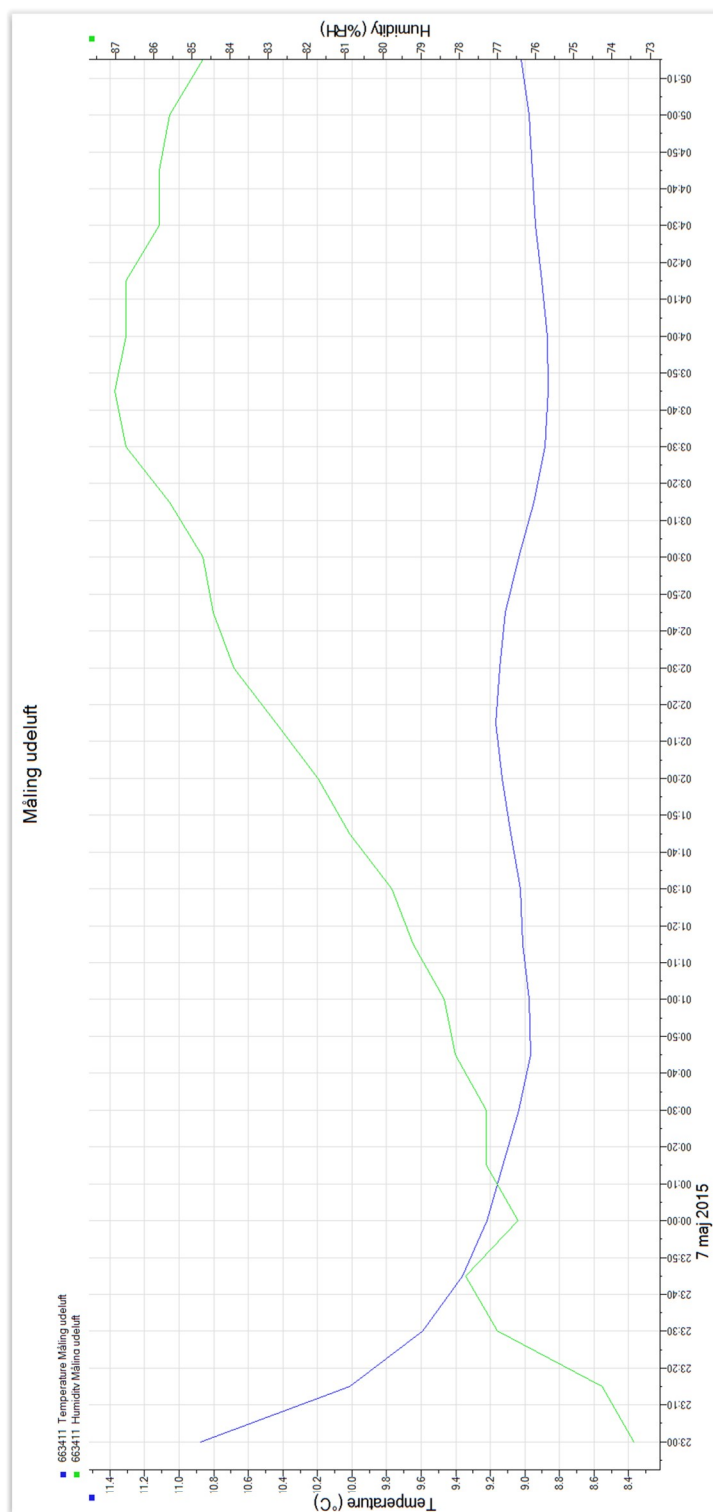
Dataopsamling: Figur 26, manuelle aflæsninger og observationer.

Dato: Natten mellem d. 06052015 og 07052015

Tidspunkt	Skydække Visuelt	Temp. Luft C°	Tcelle u. side Grader C°	Tcelle o. side Grader C°	Kondens Visuelt	Vindforhold m/s
23:00	Opklaring, lige regnet	14,7	8,4	7,0	Nej	0,0
00:00	Skyfrit	12,7	7,4	6,1	Nej	0,0
01:00	Skyfrit	12,8	7,6	6,2	Nej	0,2
02:00	Let skydække	12,0	7,9	6,8	Nej	0,4
03:00	Skyfrit	12,0	7,8	6,7	Føles klam mod huden	0,4
04:00	Skyfrit	11,0	8,0	7,1	Føles klam mod huden	0,3
05:00	Let skydække	11,1	8,1	7,1	Føles klam mod huden	0,6

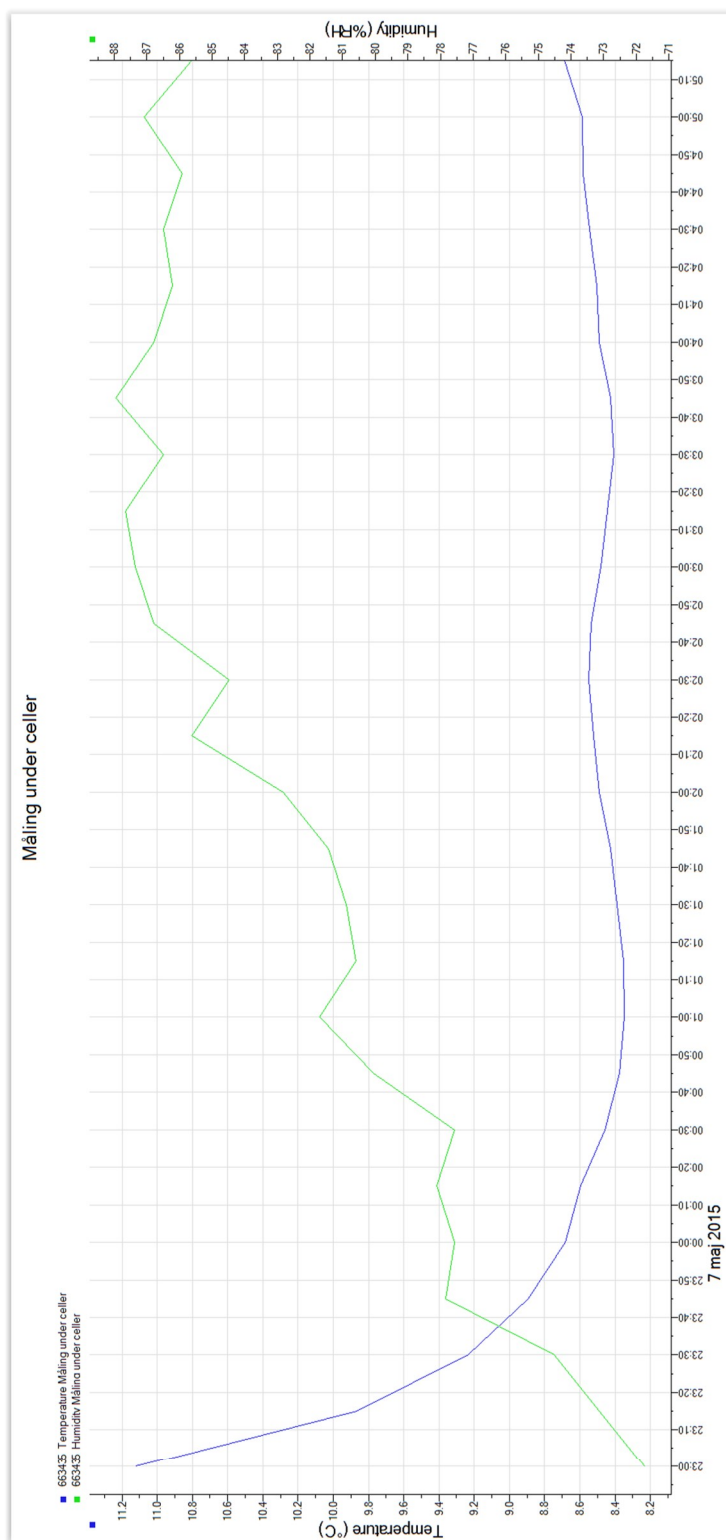
Figur 25, Manuelle aflæsninger og observationer

Dataopsamling: Figur 26, Tinytag placeret ved paller til registrering af udeluften. **Grøn kurve** RF i %, **Blå kurve** Temperatur i grader Celsius.



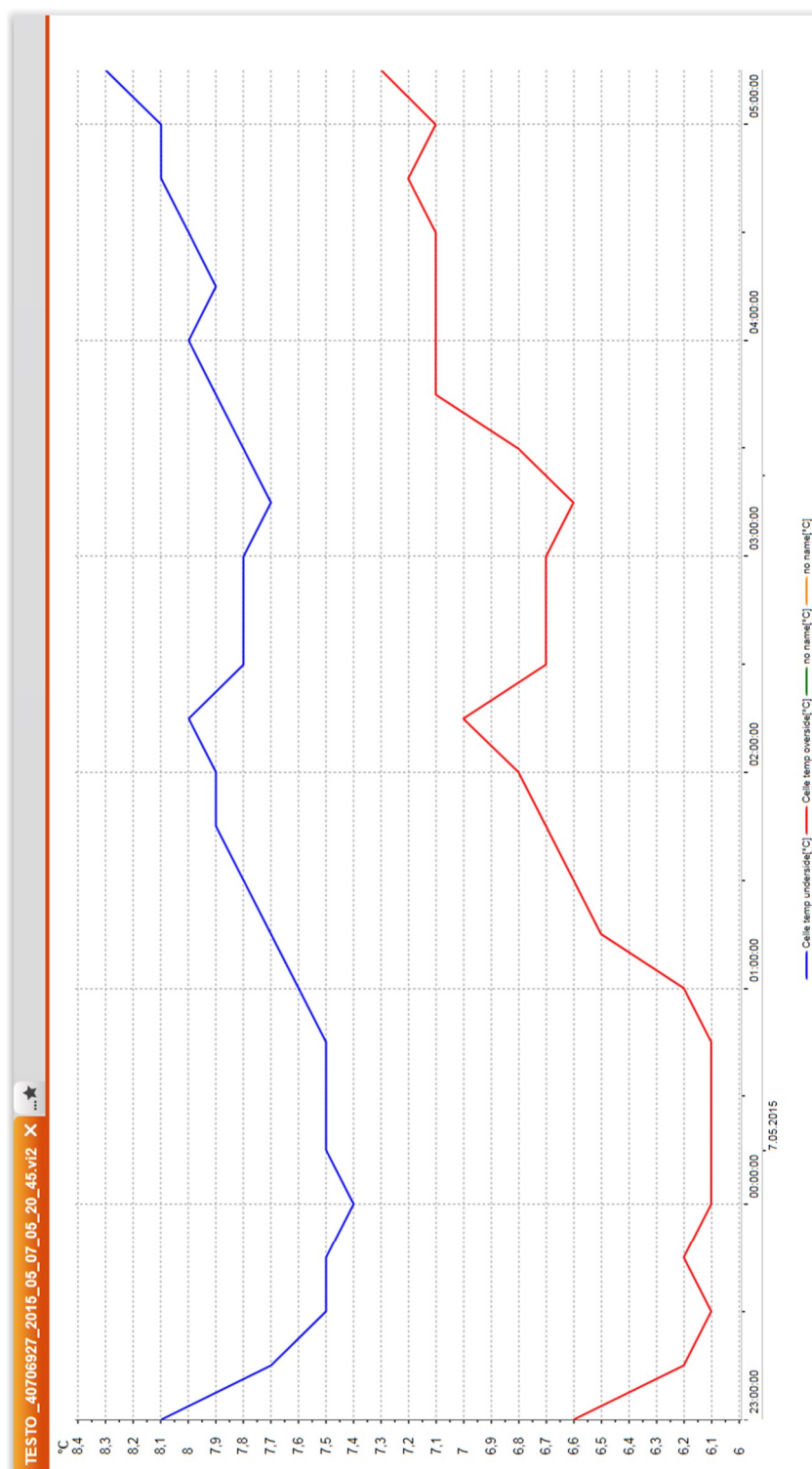
Figur 26, Tinytag udeluft

Dataopsamling: Figur 27, Tinytag placeret under celler, til registrering af luften "indenfor".
Grøn kurve RF i %, Blå kurve Temperatur i grader Celsius.



Figur 27, Tinytag måling under celler

Dataopsamling: Figur 28, Temperaturfølere placeret over og under celler, til registrering overfladetemperaturer. **Blå** kurve er underside celle, **Rød** kurve er overside celle.



Figur 28, Overfladetemperaturer under- og overside celle

4.19 Vurdering af målinger og diskussion af lighed mellem teori og praksis

I forhold til figur 25, manuelle aflæsninger og observationer, vurderes det, at de klimatiske forhold omkring målingerne har været rimelig gode med hovedsageligt skyfrit og stille, eller ingen vind.

Temperaturerne målt på henholdsvis under- og overside af cellerne ligger tæt (maksimal spredning 1,4 grader), dog hele tiden med en lidt varmere overflade på undersiden. Antagelsen i den teoretiske del om en ensartet temperatur i cellens tværsnit holder dermed ikke helt. Den specifikke celle, hvorpå målingerne blev udført, er en monokrystallisk celle med en ikke transparent sort underside. Dette kan sammen med forskellige overgangsisolanser have påvirket temperaturen.

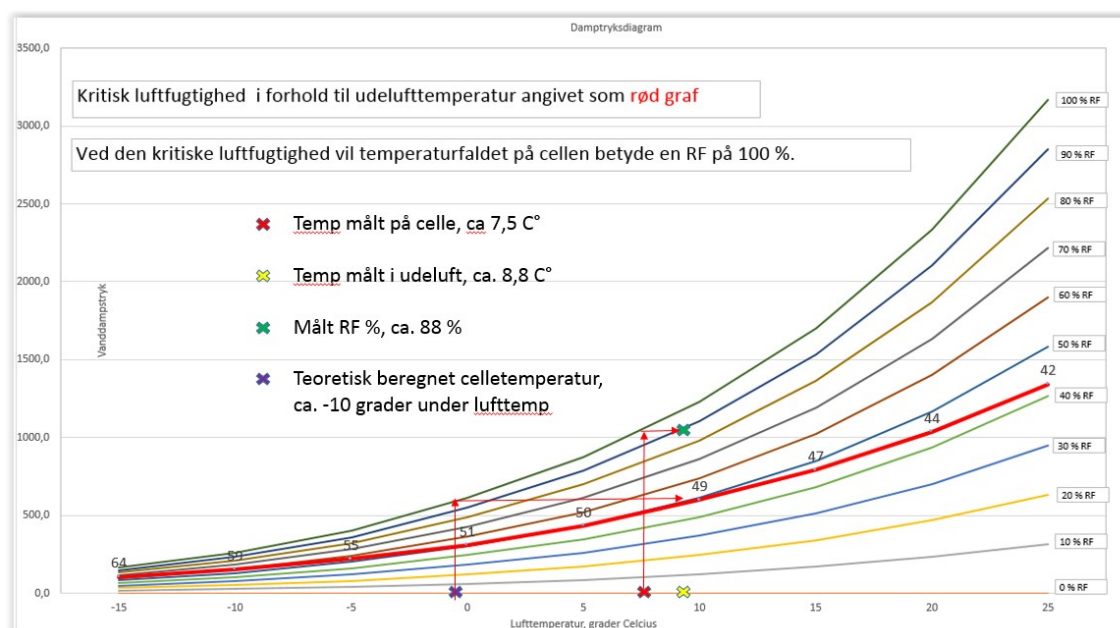
Der kunne ikke konstateres kondens i form af dråber på noget tidspunkt, men fra kl 0300-0500 fornemmedes en klamhed på cellernes underside, uden at det dog var muligt at fotodokumentere dette.

Sammenholdes de målte lufttemperaturer fra Tinytag dataloggerne ses det, at de stabiliserer sig efter ca. 1 times målinger. Loggeren placeret udvendig ligger omkring 9 grader celsius, mens loggeren placeret under cellerne ligger omkring 8,5 grader celsius. Disse to resultater stemmer ikke godt overens med de manuelt målte temperaturer foretaget med anemometeret, der generelt ligger højere (svingende fra 14,7 til 11,1 graders celsius). Holdt op imod DMI's vejrudsigter bør der ses bort fra anemometeret, og da det samtidig blev placeret i en bil mellem de enkelte målinger, kan det tænkes, at målingerne er foretaget med anemometeret, inden dette har nået at stabilisere sig hver gang det er fjernet fra det lidt varmere miljø i bilen.

Den relative fugtighed, målt med de to Tinytag dataloggere, er stigende fra målingens start (73% RF), frem til kl ca. 03.45 (88% RF), hvorefter den relative fugtighed langsomt aftager igen.

Relevant er det at kigge nærmere på tidspunktet kl 03.45, hvor den højeste relative fugtighed er blevet målt og udelufttemperaturen er i sit laveste niveau. Hvis man sammenligner de målte værdier med de tidligere beregnede resultater, vil det se ud som vist i figur 29

Det ses at den beregnede værdi for cellens overfladetemperatur (markeret med lilla kryds) er væsentlig lavere, end den målte (markeret med rødt kryds), under de aktuelle forhold. Dette betyder, at den teoretisk beregnede kritiske relative fugtighed også er væsentlig lavere, end den relative fugtighed under de målte forhold, uden at kondens er dannet. Udbredt kondens kan altså forventes baseret på teorien alene, men i virkeligheden nærmer vi os kun lige disse forhold.



Figur 29, Sammenligning mellem teoretiske og praktiske resultater

Den store forskel mellem de teoretiske beregninger og den målte virkelighed kan have mange forklaringer. I afsnit 4.11 forklares nogle af de fejlkilder, der relaterer til den teoretiske model. Også den udførte måling kan have fejlkilder. Her skal blandt andet nævnes:

Prøvestandens celler har en vestvendt orientering, og står umiddelbart foran en høj gavl, se figur 30. Dette reducerer udstrålingen til verdensrummet og giver dermed en for høj overfladetemperatur på cellerne, og dermed mindre risiko for kondens.



Figur 30, Hindret udstråling grundet gavl

Underlaget prøvestanden står på er asfalteret, og kan derfor ikke med sikkerhed siges at have de samme temperaturer, som overfladen på en loftisolering. Asfalten kan have akkumuleret varme gennem dagtimerne, der afgives som varmestråling gennem natten.

Selv om gavlene i prøvestanden var lukkede under målingerne, så er der på prøvestanden meget store ventilationsspalter ved tagfod og kip, hvilket kan have skabt et større luftskifte, og dermed reduceret risiko for kondens.

Undersiden af den målte celle er behandlet med en form for sort maling. Dette kan ændre på temperaturen i forhold til de beregnede forhold, og måske endda have en absorberende effekt på begyndende kondensdannelse.

Teoretisk set kan de to Tinytag loggere være kalibreret forkert, og anemometeret måle mere korrekt. Hvis det var tilfældet, ville teori og praksis nærme sig hinanden. Men da anemometeret har været opbevaret i en bil mellem målingerne er de mere realistisk, at fejlen skal findes på dette måleinstrument.

4.20 Løsningsforslag i forhold til kondens

Konvektion vil som det fremgår af resultaterne kunne nedbringe risikoen for kondens og dermed reducere mængden af dannet kondens, set over en længere periode. En mulighed kunne derfor være at sikre bedst mulig naturlig ventilation i tagrummet. Dette vil dog stadig ikke sikre mod kondens på vindstille dage, hvor netop risikoen er størst. Kunstig skabt konvektion i form af mekanisk ventilation på vindstille dage vil kunne opveje dette, men samtidig gøre den samlede løsning mindre rentabel, da mekanisk ventilation vil kræve et strømforbrug. Konvektion, naturlig eller kunstig skabt, vil som tidligere nævnt kunne fjerne et eventuelt fugttilskud fra boligen under tagrummet, men aldrig bringe fugtniveauet længere ned, end den tilførte udelufts fugtindhold.

Et alternativ til øget konvektion kunne være at hæve temperaturen i loftrummet ved hjælp af opvarmning. Dette har tidligere været forsøgt i Sverige på byggesager, hvor en forøget isoleringsmængde har resulteret i dannelse af skimmelvækst i tagrummet grundet formindsket tilførsel af varme fra den underliggende bolig. En højere temperatur vil sænke den relative luftfugtighed i loftrummet, og dermed reducere risikoen for, og dannelse af kondens. Denne løsning vurderes dog at være mere teoretisk, end praktisk fornuftig, da det vil være en energimæssig dyr løsning at opvarme et rum uden for den varmeisolerende klimaskærm.

I beregningerne er der ikke taget hensyn til varmeakkumulering i de omkringliggende konstruktioner. I løbet af dagtimerne vil hele bygningen blive opvarmet, delvist af solen, og delvist af opvarmningskilderne i huset, og en del af denne varme vil lagres i tagkonstruktionen. Dette vil forsinke tidspunktet, hvor de forskellige temperaturer og den relative luftfugtighed resulterer i kondensdannelse. Konstruktionsdelene i taget, der alle ligger uden for den isolerende klimaskærm, består dog alle af relativ lette materialer, hvorfor effekten må antages at være ganske begrænset set i forhold til, at de koldeste temperaturer i udeluften optræder sent på natten, hvor den akkumulerede varme for længst er afgivet til luften i loftrummet.

En yderligere mulighed vil være at beklæde undersiden af solcellerne med en reel isolering, der kan sikre mod kondensdannelse på cellernes underside. Denne løsning kendes også fra eksempelvis tagpaptage mod nord, hvor underlaget ikke i nødvendig grad opvarmes af solen gennem dagtimerne.

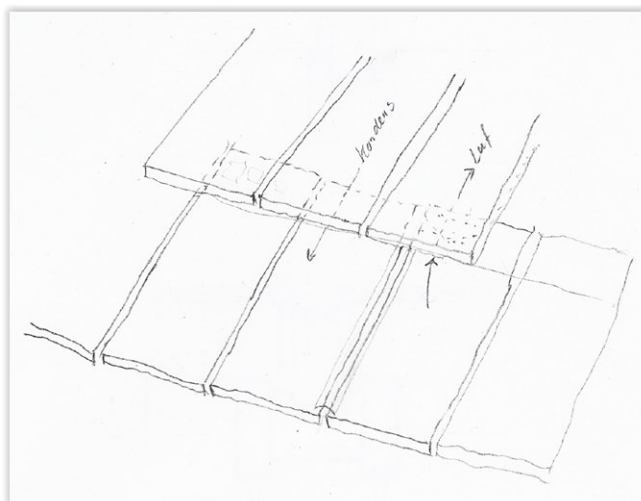
Ud over løsninger, der begrænser dannelsen af kondens, kan man også overveje løsninger, der håndterer den dannede kondens på en måde, så skader ikke opstår.

Producenter af stålpladetage kan levere deres produkter med enten en absorberende maling på undersiden eller en decideret filt, der kan akkumulere en vis mængde kondens på tidspunkter, hvor kondens dannes, og derefter afgive fugten tilbage til luften, på

tidspunkter, hvor den relative luftfugtighed er lav. Disse løsninger har en dokumenteret effekt, dog med en naturlig grænse for akkumuleringsevnen. Løsningerne, der skal akkumulere den dannede kondens vil være en fordyrende proces i forhold til anvendelse af standard solcellepaneler, men vil i mange tilfælde kunne udgøre netop den buffer, der sikrer mod skader på den underliggende bygning.

Andre løsningsmodeller, der bør overvejes, kunne være konstruktive løsninger, hvor den dannede kondens ledes væk og ud i tagrenden. I projektgruppen har en løsning med et rende/kanalsystem, monteret i forbindelse med montagen af cellerne på taget, været diskuteret. Denne løsning vil være afhængig af taghældningen, da den forudsætter, at vandet kan rende på undersiden af cellerne og først dryppe af i renden ved underkanten af den enkelte celle. Hvis taghældningen er så lav, at vandet ikke af sig selv render ned i renden, men drypper af tilfældigt, så vil et rendesystem ikke kunne fange disse dråber. Også denne løsning vil være forbundet med ekstra omkostninger til etablering af rendesystemet, og det bør overvejes, om ikke et undertag vil være den løsning, der ud over at give sikkerhed mod fugt skader, også er den mest rentable på lang sigt.

En sidste konstruktiv løsning kunne være en model, hvor cellerne placeres som et gammeldags skifertag, se figur 31, hvor kun den lodrette samling skal være vandtæt, og den vandrette samling sikres ved hjælp af overlæg. Denne løsning åbner ligeledes mulighed for, at kondens på undersiden af cellerne kan løbe ud på oversiden af den underliggende celle og dermed ledes væk. Løsningen vil dog kræve, at den øverste del af hver enkelt solcelle ikke er beklædt med serieforbundne celler, da disse ville ligge i skygge af det overliggende panel, og dermed miste en meget stor del af effekten. Yderligere vil denne løsning give et visuel helt andet udtryk, da overfladen ikke vil blive plan som tiltænkt.



Figur 31, Celler placeret som skifertag, Kilde: BoS

4.21 Vurdering af byggetekniske konsekvenser

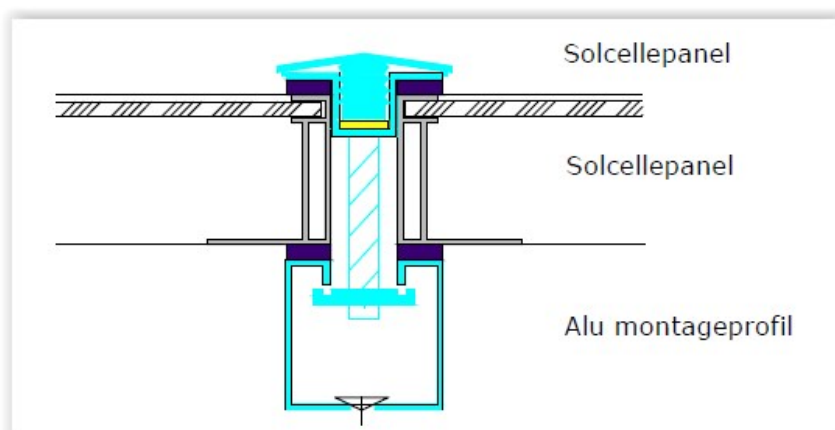
Som det fremgår af figur 1 i denne rapport, så fastgøres solceller normalt til den eksisterende tagkonstruktion ved hjælp af et skinneresystem i aluminium og lange bolte, der går gennem tagbelægningen og forankres i spærreerne. Boltens længde i sig selv giver en vis fleksibilitet i forhold til temperaturafhængige bevægelser i konstruktionen, hvilket dog forudsætter, at gennemføringen i tagbeklædningen tillader dette. Primært tænkes bevægelserne dog optaget i ovale montagehuller og i skinneresystemer udviklet af leverandøren. I den tænkte montage, direkte på spær, vil det stadig være muligt at anvende ovale montagehuller og skinner til at optage bevægelserne, men cellernes egen individuelle bevægelser skal kunne optages i samlingerne mellem cellerne, samtidig med at de skal bibeholde deres evne som regnskærm for hele den underliggende konstruktion, da undertaget ikke vil være til stede.

I forbindelse med montage vil det være nødvendigt at forholde sig til den aktuelle temperatur, og de forventede fremtidige bevægelser. Hvis montagen for eksempel foregår på en meget kold dag kræves det, at de anvendte montagehuller tillader bevægelser svarende til det modsatte ekstremum, altså en varm sommerdag. Konsekvenserne vil ellers være en sammenpresning af profilerne på varme dage, eller en overklipping/udtrækning af bolte på kolde dage.

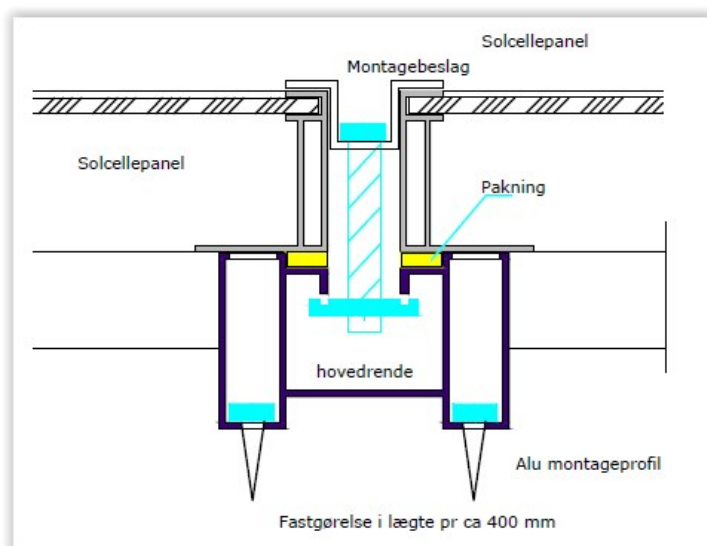


Figur 32, Montageskinne med mulighed for bevægelse, Kilde: PV-PRO.dk

Samlinger mellem cellerne skal som ovenfor nævnt både være vandtætte og samtidig kunne optage cellernes bevægelser grundet temperaturforskelle. De potentielle bevægelser medfører et krav om en hvis fugebredde mellem de enkelte celler, hvilket vil gøre, at cellerne om sommeren kan udvide sig, uden at klemme mod hinanden. Samlingen mellem cellerne kan gøres vandtæt på forskellige måder. Fugen kan dækkes med et profil, der ligger hen over cellerne, hvor tætheden så opnås ved hjælp af et tætningsbånd, mellem profilet og oversiden af cellerne. Et alternativ er at lade vandet passere ned mellem cellerne og så lede vandet væk via det underliggende aluminiumsprofil, altså en form for rende-løsning. Her vil det også være nødvendigt med et tætningsbånd mellem cellerne og selve aluminiumsprofilet for at sikre tætheden. Nedenfor viste skitser i figur 33 og figur 34 illustrerer de to metoder.



Figur 33, Samling mellem celler, overliggende tætningsliste, Kilde: Solarplan



Figur 34, Samling mellem celler, rendeløsning, Kilde: Solarplan

Ovenstående skitser angiver kun i to dimensioner, hvordan tætheden kan opnås. Det kritiske punkt vil opstå ved krydssamlinger, hvor ikke både det vandrette og "lodrette" tætningsprofil vil kunne være gennemgående. Det vil derfor være en nødvendighed med en kombination af de to løsninger, for at kunne sikre tilstrækkelig tæthed mod vandgennemtrængning. I projektet *"Solcelletag som prisbillig klimaskærm"* opføres først en mock-up med i alt 12 solcellepaneler, hvor tæthedstest vil blive gennemført på simpel måde med brug af vandslange og observation af panelernes underside, hvorefter et udsnit af panelerne overføres til egentlige testfaciliteter hos VELUX i Østbirk, hvor alle samlinger vil blive udsat for en kombination af vind og vand. Det er projektgruppens hensigt, at de endelige valgte løsninger skal kunne klare en såkaldt "standardtest" hos VELUX, hvilket anses for en rimelig sikkerhed i forhold til at placere solcelleløsningen på i alt 29 boligblokke i Måløv.

Under gennemførelse af de tidligere nævnte målinger på prøvestanden er nedenstående billeder taget, figur 35 og figur 36. De viser tydeligt udfordringen i krydssamlingen, hvor det foreløbig må konstateres, at der ikke er opnået tæthed. Krydssamlingen er efterfølgende forsøgt fuget tæt, men det kan ikke siges at være en kvalitetsmæssig langtidsholdbar løsning, da store bevægelser grundet temperaturer må forventes.



Figur 35, Krydssamling set fra underside celler, utæt og fuget

Figur 36, Krydssamling set fra underside celler

Cellernes transparens (for monokrystalliske celler) vil medføre, at sollys vil trænge gennem cellerne og ramme konstruktionerne i loftrummet. Ud over at lyse rummet op i dagtimerne, hvilket må siges at være en fordel, så vil Uv-stråling over tid også kunne påvirke materialerne. Det vurderes dog umiddelbart ikke at være et problem. Hovedsageligt består materialerne i loftrummet af træ og mineraluld, der måske vil ændre farve, men ikke nedbrydes og ændre funktion som følge af strålingen.

Som tidligere nævnt vil opbygningen uden traditionel tagbeklædning medføre et forhøjet temperaturniveau i løbet af dagtimerne. Højere temperatur betyder et højere damptryk,

hvilket kan medføre en for bygningen større indadgående fugtstrøm. I dette tilfælde består loftet i øverste lejlighed af et betondæk, der samtidig udgør dampspærren mellem det indvendige og udvendige miljø. Det ligger uden for dette speciales hovedfokus at analysere dette emne fyldestgørende, men der foreligger en risiko for kondensdannelse og skimmelvækst oven på betondækket som følge af det forøgede damptryk. I konstruktionen indgår der hovedsageligt kun beton og isolering, men spærflødderne er også placeret i dette område, så organisk materiale, ud over støv, er til stede. Temperaturerne vurderes at være gunstige for skimmelvækst, og betonens evne til at optage og afgive den indadrettede fugt, vil være ganske begrænset grundet betonens træghed mod netop at lade fugt passere. Hvis loftkonstruktionen bestod af loftbrædder sømmet på undersiden af spærflødderne, kunne en teoretisk mulighed være at montere en hygrodioder, der i perioder med høje temperaturer og damptryk i tagrummet, ville tillade en nedadrettet fugtstrøm at passere. Anvendelsen af hygrodioder er dog stærkt problematisk og kræver indgående kendskab til de aktuelle forhold. En montage af hygrodioder bør kun foretages, hvis passende simuleringer har fundet sted, og disse ikke påviser problematiske forhold.

4.22 Vurdering af ventilation i tagrum

Ventilation af tagrummet under solcellerne, og tagrum i al almindelighed, er en nødvendighed for at sikre bortventilering af fugt. Ud over fjernelse af den almindeligt forekommende fugt i et tagrum, så vil ventilation i dette tilfælde også have andre vigtige funktioner.

Som angivet i afsnit 4.13, vil øget ventilation have en positiv effekt på reduktion af kondensdannelse om natten, uden dog at kunne fjerne det helt, da konvektionen ikke kan bringe den fugtindholdet i luften længere ned, end i udeluften. Konvektionen i tagrummet får hermed en opvarmende effekt set i forhold til afkølingen af solcellerne grundet udstrålingen til verdensrummet. Modsat forholder det sig i dagtimerne, hvor konvektionen får en kølende effekt i forhold til det varmetilskud, der dannes grundet strømproduktion og solstråling gennem cellerne. En yderligere køling vil kunne opnås, hvis solcellerne kombineres med solvarmepaneler, der vil kunne trække yderligere varme væk fra solcellerne, og dermed sikre en højere strømproduktion.

Den ekstra varme i tagrummet, skabt af cellernes produktion og solindstråling kan dog også have et positivt tilskud til reduktion af kondensrisikoen. Hvis der lagres varme i tagkonstruktionen, vil det medvirke til en højere temperatur i tagrummet i de tidlige nattetimer, og dermed udskyde starttidspunktet for kondensdannelse. I de laveste temperaturer optræder sidst på natten, og tagkonstruktionen består af materialer med lav varmekapacitet, så vurderes denne effekt dog at være minimal.

Til yderligere analyse af indeklimaet i tagrummet vil programmer som WUFI og BSim være anvendelige. Dette ligger dog uden for denne rapports primære fokusområde.

5. Konklusion

5.1 Rapportens fokus

I Danmark udgør fugtskader en meget stor andel af de samlede byggeskader. Fugtskaderne har mange forskellige årsager, herunder fejlprojektering, dårlig eller mangelfuld udførelse eller forkert anvendelse af et produkt. I denne rapport er det hovedformålet at dokumentere risikoen for kondensdannelse på bagsiden af solceller anvendt som regnskærm uden undertag. Dannes der kondens i store mængder, så vil det medføre afdryp fra undersiden af cellerne og dermed en utilsigtet fugttilførsel til de underliggende konstruktioner. Ud over at analysere risikoen for kondens, er der ligeledes gjort overvejelser omkring byggetekniske konsekvenser og ventilationsforholdene i tagrummet. Rapportens overordnede problemformulering lyder:

På hvilke måder vil de kritiske parametre, inden for bygningsfysikken, kunne påvirke en eksisterende etageejendom, hvis den eksisterende tagbeklædning udskiftes med solcellepaneler uden undertag?

Hovedspørgsmålet er herefter opdelt i følgende specifikke underspørgsmål:

Fugt: Vil den manglende tilstedeværelse af et undertag medføre risiko for bygningsskader, som følge af kondensdannelse på undersiden af solcellepanelerne?

Byggeteknisk: Solceller, anvendt direkte som klimaskærm, medfører ændrede krav til samlinger og underliggende konstruktioner. Hvilke byggetekniske konsekvenser har dette?

Ventilation i tagrum: Vil anvendelsen af solceller uden almindelig tagbelægning medføre et ændret klima i tagrummet, og hvordan påvirkes dette af den naturlige ventilation?

5.2 Delkonklusion, teoretiske beregninger

Rapportens teoretiske beregninger baserer sig på en empirisk model oprindeligt anvendt i USA. For at sikre en rimelig grad af anvendelighed, gennemgås i rapportens første halvdel den i Danmark almindelige anvendte teori for varmeovergange og overfladetemperaturer. Det ses at de enkelte bidrag til den endelige beregnede temperatur er tilnærmelsesvis enslydende i den empiriske model og den grundlæggende teori. Dog indgår fugtbidraget q_{fugt} ikke i beregningsmodellen, hvorfor resultaterne forskydes, grundet den manglende afgivelse af varme under fortætning.

Resultaterne visualiseres i figur 12, figur 13 og figur 14 for henholdsvis 2-sidet, 1-sidet og ingen konvektion. Den med rødt optrukne kurve viser sammenhængen mellem udeluftens temperatur og den tilhørende kritiske relative luftfugtighed, hvorved kondens vil opstå, som følge af solcellens underafkølede overflade.

Ved at sammenholde de fremkomne resultater med klimadata for Danmark i figur 15 og figur 16 ses det, at kondens kan forventes at være hyppigt forekommende. Baseret på de teoretiske beregninger alene, kan det dermed konkluderes, at kondens vil forekomme, og det i mængder, der vil gøre det problematisk at anvende solcellerne som regnskærm, uden yderligere tiltag.

5.3 Delkonklusion, målinger

Målingerne blev gennemført natten mellem den 6. og 7. maj 2015 på adressen Topstykket 27 i Birkerød. Ved ankomst til pladsen klarede vejret op, og der var hovedsageligt skyfrit i løbet af natten. Der blev registreret ingen til meget let vind i måleperioden.

I forbindelse med gennemførelse af målinger på prøvestanden blev der ikke konstateret kondens. I en kortere periode registreres en klamhed på undersiden af solcellerne, hvilket indikerer begyndende kondensdannelse.

Ud fra resultaterne af målingerne alene, kan man umiddelbart konkludere, at risikoen for kondensdannelse er meget lille. Dog er der faktorer på pladsen, som har påvirket resultatet mod mindre kondensdannelse, hvorfor konklusionen ikke kan stå alene. Særligt prøvestandens placering kan have haft stor betydning, da udstrålingen mod himmelrummet var delvist blokeret, og dermed er modstrålingstemperaturen ikke sammenlignelig med en skyfri himmelhvælving.

5.4 Delkonklusion, byggetekniske konsekvenser

Som et sekundært emne beskriver rapporten nogle af de bygningsfysiske konsekvenser, der skal tages i regning ved planlægning og udførelse af en klimaskærm bestående af solcellepaneler. Temperaturafhængige bevægelser vil stille store krav til både montage og udformning af samlinger. På nuværende tidspunkt er der ikke udført de nødvendige tæthedstest på prøvestanden, og der kan dermed ikke konkluderes endeligt på de foreløbige løsninger. Ud fra en visuel inspektion, se figur 35 og figur 36, konkluderes det dog foreløbigt, at tæthed endnu ikke er opnået i forhold til kraftig regn og vind.

Som en konsekvens af cellernes transparens og strømproduktion må der forventes betydelig højere dagtemperaturer i loftrummet, men kombineret med effektiv ventilerung af tagrummet forventes dette ikke at skabe egentlige problemer. Dog foreligger et latent problem omkring forhøjet damptryk i loftrummet grundet de høje dagtemperaturer. En egentlig simulering bør foretages inden implementering for at synliggøre eventuel fugtophobning på betonloftets overside.

5.5 Delkonklusion, ventilation i tagrum

Rapporten bearbejder relativt kort emnet: Ventilation i tagrum. Emnet er relevant, da ventilationsraten kan have meget stor indflydelse på det øjeblikkelige fugtniveau i tagrummet. Analysen viser, at et stort luftskifte vil have en gavnlig effekt på klimaet i luftrummet både om dagen og om natten. Ventilationen vil sænke dagtemperaturerne under cellerne, og ventilationen vil fjerne en andel af den fugt, der føres til tagrummet fra underliggende lejligheder. Klimamæssigt vil der være tale om højere dagtemperaturer, der dog hurtigt bringes ned på normalt niveau ved den naturlige ventilation, når klimaskærmen ikke længere er udsat for sol. I forhold til den potentielle fugtphobning, nævnt i foregående afsnit, spiller ventilationen en stor rolle i at nedbringe temperatur og damptryk, så fugtventileres bort i stedet for at blive presset ind i konstruktionerne.

5.6 Hovedkonklusion

Gennem rapportens teoretiske og praktiske del er der fremkommet to modsatrettede konklusioner. Den teoretiske del peger på en stor sandsynlighed for kondensdannelse, som man nødvendigvis må forholde sig til. Den praktiske måling på en prøvestand trækker det samlede billede i en anden retning, hvor risikoen for kondensdannelse er væsentlig mindre.

Tages de forskellige fejlkilder i regning, og kompenseres der for disse, vil man kunne forvente, at de teoretiske resultater og de praktiske målinger vil nærme sig hinanden. Det er forfatterens overbevisning, at havde prøvestanden været placeret på en mere åben plads med frit udsyn til himmelhvelvingen, ville der med stor sandsynlighed være dannet kondens på forsøgsnatten.

Selvom kondens vil dannes under visse klimatiske forhold, er det ikke givet, at det vil være i problemskabende mængder. Ikke desto mindre vil det være rettidig omhu at sikre sin bygning mod skader som følge af kondens på undersiden af solcellerne. Anvendelsen af solceller som regntæt klimaskærm er ganske ny, og dermed er der ingen reel praktisk erfaring, der kan danne grundlag for en beslutning om sikring mod kondens.

Baseret på ovenstående er det forfatterens anbefaling, at der implementeres en teknisk løsning, der kan bortlede eller absorbere en dannet kondens. Merprisen for denne løsning vurderes at være begrænset i forhold til den sikkerhed mod bygningsskader, som man kan opnå.

6. Kildeliste

- Brandt, E. (2013). *SBI-anvisning 224, Fugt i bygninger*. SBI Statens Byggeforskningsinstitut. Byggecentrum. (2014). *Bygningsreglement 2010*. Herlev: Byggecentrum 2014.
- Glassbransjeforbundet i Norge. (1994). *Sintef.no*. (Nordan) Hentet 17. 01 2014 fra Sintef.no: <https://www.sintef.no/globalassets/upload/utvendig-kondens-rapport.pdf>
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2013). *pveducation.org*. Hentet 17. 01 2015 fra PV Education: <http://pveducation.org/>
- Muller, M. (2010). *Measuring and Modeling Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)*. Albuquerque, NM: NREL - National Renewable Energy Laboratory - US Department of Energy.
- Nielsen, A., & B. Møller, E. (2014). *Master i Bygningsfysik - Varmelære teori*. Undervisningsmateriale, SBI, København.
- Osborne, M. (19.. Januar 2015). *PVTECH*. Hentet fra pv-tech.org: http://www.pv-tech.org/news/temperature_coefficient_playing_key_role_in_pv_system_performance_ia_repor?utm_source=pvtech-feeds&utm_medium=rss&utm_campaign=news-rss-feed
- Pedersen, P. V. (2002). *Solenergi og Byøkologi*. København: Ingeniøren Bøger.

7. Figurliste

FIGUR 1, SKINNEMONTAGE PÅ ETERNITTAG, KILDE: ALTEC SOLARTECHNIK	10
FIGUR 2, BORTLEDNING AF KONDENS MELLEM CELLE OG TAGBEKLÆDNING, KILDE: BoS	10
FIGUR 3, DANNELSE AF OG DRYP FRA KONDENS GRUNDET UDSTRÅLING TIL HIMMELRUMMET, KILDE: BoS.....	11
FIGUR 4, PROCESSOR I FORBINDELSE MED VARMEOVERGANG, KILDE: BoS	16
FIGUR 5, DAMPTRYKSDIAGRAM, PM = RF 100%, KILDE: BoS	19
FIGUR 6, FUGTPRODUKTION OG VANDDAMPINDHOLD, KILDE: BoS	20
FIGUR 7, BEREGNINGSMODELLENS BEGRÆNSNINGER, KILDE: BoS	25
FIGUR 8, BEREGNING AF OVERFLADETEMPERATUR LOFTISOLERING, KILDE: BoS	26
FIGUR 9, BEREGNING AF MODULTEMPERATUR VED 2-SIDET KONVEKTION, KILDE: BoS	27
FIGUR 10, BEREGNING AF TEMPERATURFORSKEL MELLEM LUFT OG MODUL, KILDE: BoS.....	27
FIGUR 11, PRINCIP FOR BEREGNING AF KRITISK RF, KILDE: BoS.....	28
FIGUR 12, KRITISK RF VED 2-SIDET KONVEKTION, KILDE: BoS	29
FIGUR 13, KRITISK RF VED EN-SIDET KONVEKTION, KILDE: BoS	30
FIGUR 14, KRITISK RF VED INGEN KONVEKTION, KILDE: BoS	31
FIGUR 15, RELATIV FUGTIGHED I LØBET AF ET SOMMERDØGN, KILDE: SBI 224.....	34
FIGUR 16, RELATIV FUGTIGHED OVER ET ÅR, SAMMENHOLDT MED KRITISK NIVEAU, KILDE: SBI 224.....	35
FIGUR 17, MÅLEPLAN	37
FIGUR 18, MÅLEUDSTYR	38
FIGUR 19, FORSØGSOPSTILLING MED SOLCELLER PÅ LÆGTER	39
FIGUR 20, TINYTAG PLACERING FOR MÅLING UNDER CELLER	39
FIGUR 21, TINYTAG PLACERING FOR MÅLING I UDELUFTEN	39
FIGUR 22, PLACERING AF OVERFLADETEMPERATURFØLER PÅ OVERSIDE CELLE	40
FIGUR 23, PLACERING AF OVERFLADETEMPERATURFØLER PÅ UNDERSIDE CELLE	40
FIGUR 24, LUKNING AF GAVLE UNDER MÅLINGER.....	40
FIGUR 25, MANUELLE AFLÆSNINGER OG OBSERVATIONER	41
FIGUR 26, TINYTAG UDELUFT	42
FIGUR 27, TINYTAG MÅLING UNDER CELLER	43
FIGUR 28, OVERFLADETEMPERATURER UNDER- OG OVERSIDE CELLE	44
FIGUR 29, SAMMENLIGNING MELLEM TEORETISKE OG PRAKTISKE RESULTATER	46
FIGUR 30, HINDRET UDSTRÅLING GRUNDET GAVL	46
FIGUR 31, CELLER PLACERET SOM SKIFERTAG, KILDE: BoS	49
FIGUR 32, MONTAGESKINNE MED MULIGHED FOR BEVÆGELSE, KILDE: PV-PRO.DK.....	50
FIGUR 33, SAMLING MELLEM CELLER, OVERLIGGENDE TÆTNINGSLISTE, KILDE: SOLARPLAN.....	51
FIGUR 34, SAMLING MELLEM CELLER, RENDELØSNING, KILDE: SOLARPLAN.....	51
FIGUR 35, KRYDSSAMLING SET FRA UNDERSIDE CELLER, UTÆT OG FUGET	52
FIGUR 36, KRYDSSAMLING SET FRA UNDERSIDE CELLER	52

8. Bilag

8.1 Bilag 1 – 2-sidet konvektion

Model for temperature calculation of solar collector in tomgang

Alfa 0.92
G 0 W/m2
Eps_glas 0.84
Eps_bag 0.893
Sigma 5.67E-08
Vind (Snit) 2 m/s

Basic NOCT Heat Transfer Model

Assumptions for a standard glass heat pipe back absorber (PV module):

1. The heat transfer coefficient between the absorber plate and the fluid is high enough to assume that the plate and fluid temperatures are equal.
2. The heat transfer coefficient between the absorber plate and the back glass is high enough to assume that the plate and back glass temperatures are equal.
3. The heat transfer coefficient between the back glass and the ambient air is high enough to assume that the back glass and ambient air temperatures are equal.

Når modultemperaturen er lavere end lufttemperaturen, er der risiko for kondens

Se hvor høj den relative luftfugtighed må være for kondensation sker ved et givet temperaturfald

Lufttemperatur		Lufttemperatur		Himmeltemperatur		Overfladetemperatur		Luftsøjling		Højre 1		Højre 2		Højre 3		Afstemning højre side		Modultemperatur		Temperaturfald på celle	
T Luft, Celsius	T Luft, Kelvin	T Luft, Kelvin	T Sky, Kelvin	T Luft, Kelvin	T Sky, Kelvin	Ustråling	Himmel	Vindskoling	Ustråling	Ustråling	Ustråling	Ustråling	Ustråling	Ustråling	Ustråling	Ustråling	Ustråling	Ustråling	Ustråling	Ustråling	Ustråling
-15	258	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263	263
-10	263	268	268	268	268	268	268	268	268	268	268	268	268	268	268	268	268	268	268	268	268
-5	268	273	273	273	273	273	273	273	273	273	273	273	273	273	273	273	273	273	273	273	273
0	273	278	278	278	278	278	278	278	278	278	278	278	278	278	278	278	278	278	278	278	278
5	278	283	283	283	283	283	283	283	283	283	283	283	283	283	283	283	283	283	283	283	283
10	283	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288
15	288	293	293	293	293	293	293	293	293	293	293	293	293	293	293	293	293	293	293	293	293
20	293	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298	298
25	298																				

Skal give 0

Input G&ET

Forskil mellem luft og celletemp

HUSK det er DELTA! Celler er køligere end luften!

8.2 Bilag 2 – 1-sidet konvektion

Model for temperaturberegning af solcelle i tomgang

Alfa 0,92
G 0 W/m2
Eps_glas 0,84
Eps_bag 0,893
Sigma 5,67E-08
Vind (Variabel) 2 m/s

Basic NOCT Heat Transfer Model

$$q_{conv} = \epsilon_p \rho (T_{cell} - T_{amb}) + \epsilon_b \rho (T_{back} - T_{amb}) + \epsilon_p \rho (T_{cell} - T_{g})$$
 Approximation for a NOCT panel from data: $q_{conv} = 0,0001 \cdot T_{cell}^2 + 0,0001 \cdot T_{back}^2 + 0,0001 \cdot T_{g}^2$
 Approximation for a NOCT panel from data: $q_{conv} = 0,0001 \cdot T_{cell}^2 + 0,0001 \cdot T_{back}^2 + 0,0001 \cdot T_{g}^2$

Når modultemperaturen er lavere end lufttemperaturen, er der risiko for kondens
Se hvor høj den relative luftfugtighed må være før kondensation sker ved et givet temperaturfald

Lufttemperatur T Luft, Celsius	Lufttemperatur T Luft, Kelvin	Himmeltemperatur T Sky, Kelvin	Overfladetemperatur T Loft, Kelvin	Udstråling himmel	Højre 2 Vindafkøling	Højre 3 Udstråling loft	Atstemning højre side	Modultemperatur TM	Modultemperatur TM Celsius	Δ Temp (Temperaturfald på celle)
-15	258	235	258,42	50,90	-33,62	-17,27	0,01	253,33	-19,7	4,7
-10	263	235	263,36	63,31	-41,45	-21,85	0,00	257,243	-15,8	5,8
-5	268	235	268,30	76,25	-49,36	-26,89	0,01	261,145	-11,9	6,9
0	273	235	273,24	89,75	-57,35	-32,40	0,00	265,035	-8,0	8,0
5	278	235	278,18	103,82	-65,40	-38,41	0,01	268,917	-4,1	9,1
10	283	235	283,12	118,48	-73,53	-44,95	0,00	272,788	-0,2	10,2
15	288	235	288,06	133,74	-81,71	-52,04	-0,01	276,651	3,7	11,3
20	293	235	293,00	149,63	-89,94	-59,68	0,01	280,509	7,5	12,5
25	298	235	297,94	166,15	-98,22	-67,93	0,00	284,358	11,4	13,6

Skal give 0

Input G&ET

Forskjel mellem luft- og celletemp
HUSK det er DELTA! Celler er køligere end luften!

8.3 Bilag 3 – Ingen konvektion

Model for temperaturberegning af solcelle i tomgang

Alfa 0.92
G 0 W/m2
Eps_glas 0.84
Eps_bag 0.893
Sigma 5.67E-08
Vind (Variabel) 0 m/s

Basic NOCT Heat Transfer Model

$$q_{conv} = h_{conv} (T_{cell} - T_{amb})$$

$$q_{rad} = \epsilon_{cell} \sigma (T_{cell}^4 - T_{amb}^4)$$

$$q_{cond} = \frac{k_{glass}}{L_{glass}} (T_{cell} - T_{back}) + \frac{k_{back}}{L_{back}} (T_{cell} - T_{amb})$$

$$q_{conv} + q_{rad} + q_{cond} = 0$$

$$T_{cell} = \frac{h_{conv} T_{amb} + \epsilon_{cell} \sigma T_{amb}^4 + \frac{k_{glass}}{L_{glass}} T_{back} + \frac{k_{back}}{L_{back}} T_{amb}}{h_{conv} + \epsilon_{cell} \sigma + \frac{k_{glass}}{L_{glass}} + \frac{k_{back}}{L_{back}}}$$

$$T_{cell} = \frac{h_{conv} T_{amb} + \epsilon_{cell} \sigma T_{amb}^4 + \frac{k_{glass}}{L_{glass}} T_{back} + \frac{k_{back}}{L_{back}} T_{amb}}{h_{conv} + \epsilon_{cell} \sigma + \frac{k_{glass}}{L_{glass}} + \frac{k_{back}}{L_{back}}}$$

$$T_{cell} = \frac{h_{conv} T_{amb} + \epsilon_{cell} \sigma T_{amb}^4 + \frac{k_{glass}}{L_{glass}} T_{back} + \frac{k_{back}}{L_{back}} T_{amb}}{h_{conv} + \epsilon_{cell} \sigma + \frac{k_{glass}}{L_{glass}} + \frac{k_{back}}{L_{back}}}$$

Når modultemperaturen er lavere end lufttemperaturen, er der risiko for kondens

Se hvor høj den relative luftfugtighed må være før kondensations sker ved et givet temperaturfald

Lufttemperatur		Himmeltemperatur		Overfladetemperatur		Højre 1		Højre 2		Højre 3		Afstemning højre side		Modultemperatur		Modultemperatur -mp (Temperaturfald på celle)	
T Luft, Celsius	T Luft, Kelvin	T Luft, Kelvin	T Sky, Kelvin	T Loft, Kelvin	T Loft, Kelvin	Udstråling	himmel	Konvektion/fugt	Udstråling	loft	Udstråling	loft	TM	TM	TM	TM	
-15	258	258	235	258	258	47,81	59,42	-27,24	-20,56	0,01	252,3	-20,7	252,3	-20,7	5,7		
-10	263	263	235	263	263	59,42	71,54	-33,43	-25,99	0,00	256,0	-17,0	256,0	-17,0	7,0		
-5	268	268	235	268	268	71,54	84,18	-39,63	-31,90	0,01	259,7	-13,3	259,7	-13,3	8,3		
0	273	273	235	273	273	84,18	97,35	-45,84	-38,33	0,01	263,5	-9,6	263,5	-9,6	9,6		
5	278	278	235	278	278	97,35	111,09	-52,07	-45,29	0,01	267,2	-5,8	267,2	-5,8	10,8		
10	283	283	235	283	283	111,09	125,40	-58,28	-52,80	0,01	270,9	-2,1	270,9	-2,1	12,1		
15	288	288	235	288	288	125,40	140,31	-64,51	-60,90	0,01	274,6	1,6	274,6	1,6	13,4		
20	293	293	235	293	293	140,31	155,83	-70,72	-69,58	0,01	278,3	5,3	278,3	5,3	14,7		
25	298	298	235	298	298	155,83		-76,93	-78,90	-0,01	282,0	9,0	282,0	9,0	16,0		

Skal give 0 Input GÆT Forskel mellem luft og celletemp HUSK det er DELTA! Celler er køligere end luften!

8.4 Bilag 4 – Billeder af bebyggelsen



This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.