

ÅRSAGER OG KONSEKVENSER AF FUGT I PLANE SOLFANGERE

Dato: Oktober 2019

Projekt Nr.: 07-2019



MANOTECH
DIVERGENT THINKING

Manotech ApS

Topstykket 3

DK-3460 Birkerød

Telefon: +45 5065 9090

www.manotech.com

FORORD

Årsager og konsekvenser af fugt i plane solfangere

Udarbejdet af Mads Nordvig Godt, Manotech ApS

I samarbejde med DTU Byg, Jægerspris Kraftvarme, Jelling Varmeværk, Silkeborg Forsyning, Grenaa Varmeværk samt Dansk Fjernvarme.

Rapporten er oversat fra den originale engelske version, "Causes & consequences of humidity in flat-plate solar thermal collectors". Vigtige afsnit, kilder og henvisninger er udeladt for at gøre rapporten let læselig.

Der rettes en særlig tak til følgende personer og organisationer der har bidraget til tilblivelsen af denne rapport.

Simon Furbo, DTU

Bengt Perers, DTU

Torben Frederiksen, Savosolar Oyj

Hans Christian Kjærgaard, Jægerspris Kraftvarme

Bjarne Nielsen, Jelling Varmeværk

Per Hvilshøj Christiansen, Silkeborg Forsyning

Søren Gertsen, Grenaa Varmeværk

Dansk Fjernvarme

Antal Sider: 40

Oktober 2019

BESKRIVELSE

Denne rapport bygger på undersøgelser der er udført med det formål at klarlægge hvorvidt den synlige kondens på indersiden af glasset, i mange plane solfangere, ophobes i isoleringsmaterialet, samt hvilke konsekvenser dette kan have på ydelsen og levetiden af solfangeren. Undersøgelserne blev foretaget ved at måle varmeledningsevnen af isoleringsmaterialet i en række forskellige plane solfangere, samt opsamle og analysere hvorledes variationer i den relative luftfugtighed og temperatur kan påvirke fugtbalancen i panelet.

Resultaterne af undersøgelsen bygger på kvantitative målinger fra fire forskellige solvarmeanlæg samt en række mindre laboratorieforsøg.

Resultaterne af undersøgelsen viste at fugt ikke ophobes i isoleringsmaterialet på trods af situationer med dugpunktstemperaturer inde i materialet. Målingerne viste desuden at isoleringsmaterialets generelle isoleringsevne forblev upåvirket trods kraftig kondens på indersiden af glasset. Det blev dog bekræftet at fugt i isoleringsmaterialet kan medføre en øget korrosion af absorberen og derved reducere levetiden af produktet.

Nøgleord: *Plane solfangere*, fugt, kondens, mineraluld, pH korrosion, ventilation, ydelse

INDHOLDSFORTEGNELSE

FORORD	III
BESKRIVELSE	IV
1 INTRODUKTION.....	7
1.1 General Introduktion.....	7
1.2 Problemformulering	8
2 TEORETISK BAGGRUND	11
2.1 Konstruktion af plane solfangere.....	11
2.2 Miljøstressorer	13
2.3 Naturlig ventilation	14
2.4 Indtrængende fugt	15
2.5 Degradering af materialet	16
3 UNDERSØGELSER.....	20
3.1 Solfanger typer og lokationer	20
3.2 Målemetode	22
3.2.1 Måling af isoleringsevne	22
3.2.2 Måling af fugtbalance	23
3.3 pH eksperiment.....	26
4 RESULTATER.....	27
4.1 Isoleringsevne.....	27
4.2 Fugtbalance	29
4.3 Beregninger af fugtindhold	31
4.4 pH eksperiment.....	32
5 DISKUSSION	33
5.1 Generelt resultat	33

5.2 Fremtidigt arbejde.....	37
REFERENCER	38
BILAGSOVERSIGT	I
BILAG I. Målepositioner på solfangere.	I
BILAG II. Fugtbalance	II
BILAG III. Isoleringsevne målinger.....	VIII
BILAG IV. Fugtindhold.....	XIII

1 INTRODUCTION

1.1 General Introduktion

Den Danske energiforsyning er i en omstilling mod et reduceret energiforbrug, en øget decentralisering af energiproduktionen og et øget forbrug af bæredygtig og vedvarende energi. Med udgangspunkt i det Danske energipolitiske mål for 2050 (Energistyrelsen) vedrørende en fuldstændig uafhængighed af kul, olie og gas, har potentialet for termisk solenergi aldrig været højere.

Gennem de sidste årtier har danske fjernvarmeverker kraftigt øget deres andel af termisk solenergi og det samlede areal af solfangere har i 2019 nået 1.581.716 m². I følge Energistyrelsen (2018), forventes forbruget af termisk solenergi og biogas at stige med 2-3% per år.

I tråd med det stigende antal af solvarmeanlæg er der rejst en tilsvarende bekymring for det store antal af solfangere der i lange perioder lider under kraftig kondens på indersiden af glasset, samt en delvis nedbrydning af isoleringsmaterialet og absorberoverfladen. En nylig undersøgelse foretaget af Dansk Fjernvarme (2018) blandt deres medlemmer med solvarmeanlæg, viste at 52% af respondenterne havde oplevet problemer med fugt, og ud af dem havde 39% oplevet skader på panelet, såsom korrosion af absorberen.

Årsager og konsekvenser af et højt fugtindhold i plane solfangere har længe været diskuteret blandt førende industriaktører, for at begrænse problemet og samtidig udvikle en økonomisk rentabel løsning. Det frygtes at en potentiel markedsreaktion vil være en generel usikkerhed overfor teknologien og derved en øget ubeslutsomhed blandt potentielle kunder og interessenter. Dette kan potentielt føre til et fald i nyopførte solvarmeanlæg og derved et tilbageslag for

hele solvarmebranchen. Derudover frygtes det at de eksisterende solvarmeværker med problemer vil få en øget tilbagebetalingstid og lavere afkast, enten som resultat af de øgede vedligeholdelsesomkostninger eller som en højere energipris grundet en lavere ydelse.

Det betragtes derfor som yderst relevant at undersøge årsagerne og konsekvenserne ved det høje fugtindhold i de plane solfangere som anvendes til storskala solvarmeanlæg, og om muligt at udvikle en økonomisk rentabel løsning til de eksisterende solvarmeanlæg. Derudover anses det som vigtigt at oparbejde viden omkring problemet, for på denne måde at kunne understøtte og forbedre den fremtidige udvikling af plane solfangere.

Det vurderes at to af de sensitive komponenter når det kommer til reduktion af ydelsen på en solfanger er absorberen og isoleringsmaterialet. På baggrund af dette er det derfor relevant at undersøge og forstå hvorledes fugt påvirker disse komponenter.

1.2 Problemformulering

Formålet med dette studie er at undersøge hvorvidt den observerede kondens på indersiden af panelerne, ophobes som fugt i isoleringsmaterialet og hvilke konsekvenser dette kan have for ydelsen og levetiden af produktet. Rationalet for denne undersøgelse er at en moderne solfanger er designet med en mere eller mindre effektiv fugtbarriere mellem det udvendige og indvendige miljø i form af selve indkapslingen. Denne fugtbarriere er således delvist placeret på den kolde side i forhold til isoleringsmaterialet, og vil derved tillade at varm og fugtig luft kan bevæge sig igennem isoleringsmaterialet og ud til den koldere indvendige bagside af solfangeren.

Det specifikke mål er således at måle og monitorere variationerne i den relative luftfugtighed (RH) samt temperaturen indvendigt i isoleringsmaterialet, og på denne måde forsøge at forstå hvorvidt disse variationer kan påvirke det generelle fugtindhold i solfangeren. Derudover var delmålet at undersøge hvorvidt fugt kan påvirke isoleringsmaterialets ydelse, og om disse påvirkninger kan registreres i allerede eksisterende solvarmeanlæg.

På baggrund af dette blev den følgende hypotese fremsat:

- Fugt ophobes i isoleringsmaterialet og derved reduceres ydelsen af solfangeren signifikant.

Det forudses at:

- Den observerede kondens i plane solfangere ophobes som fugt i isoleringsmaterialet, og derved signifikant nedsætter ydelsen af solfangeren.
- Variationer i temperatur og relativ luftfugtighed kan skabe et dugpunkt inde i isoleringsmaterialet, og derved forårsage kondensering.
- Fugt der ophobes i isoleringsmaterialet øger korrosionen af absorberen og andre metalliske dele.

Forudsigelserne blev efterprøvet gennem kvantitative målinger udført på fire solvarmeanlæg i Danmark, samt ved en række mindre laboratorieundersøgelser.

Projektet er gennemført med den forudsætning at de plane solfangere som udgangspunkt er i stand til at forhindre direkte vandindtrængning fra f.eks. regnvand eller sne. Derudover er denne rapport begrænset til kun at beskrive indtrængende fugt i form af vanddamp der transporteres ind og ud af panelet som et resultat af den termiske volumetriske ekspansion.

Det forventes at denne undersøgelse vil medvirke til en bedre forståelse af det indvendige mikroklima som eksisterer i plane solfangere, samt de potentielle påvirkninger dette kan have på ydelsen og levetiden af panelet.

2 TEORETISK BAGGRUND

2.1 Konstruktion af plane solfangere

Den generelle konstruktion af plane solfangere til storskala installationer, består som oftest af et antal rammeprofiler i enten bøjet galvaniseret stål eller ekstruderet aluminium. Top-, bund- og sideramme skæres i smig og forbindes ved svejsning eller ved hjælp af indvendige og udvendige beslag som fastgøres med popnitter. En anden sammenkobling består i at anvende en kombination af store fiberforstærkede plastikhjørner og en højtemperatur lim. Side og bundrammer er som oftest forsynet med en række ventilationshuller der dækkes med specielle ventilationspropper. Antallet og størrelsen af ventilationshullerne samt eventuelle yderligere drænhuller i bundrammen, varierer fra producent til producent.

En bagplade fremstillet af tyndt galvaniseret pladestål eller aluminium bliver fastgjort indvendigt på bund- og siderammerne ved hjælp af en højtemperatur lim eller popnitter. Bagpladen har både en funktion som klimaskærm samt som en del af den strukturelle og bærende del af konstruktionen. Metalprofiler er fastgjort mellem top- og bundramme for at øge den strukturelle stivhed i produktet, samt for at styrke og skjule samlingerne mellem de enkelte bagplader. Metalprofilerne anvendes desuden under transport og installation som et løftepunkt for taljer og kraner.

Hele indkapslingen er herefter isoleret ved hjælp af lag af mineraluld der som oftest er forsynet med et øvre lag af aluminiumsfolie eller sort glasfiber klæde. Dette lag anvendes primært for at forhindre støv og partikler fra mineraluldet i at bevæge sig om på forsiden af absorberen. Den mest udbredte type af mineraluld til solfanger i dag er glasuld.

Forsiden af solfangeren består af et stift transparent låg, som i de fleste tilfælde er fire til fem sektioner af jernfattigt og antirefleksbehandlet glas, kun adskilt af sprosser. Det transparente låg er fastgjort til rammerne ved hjælp af silikone eller Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) gummilister, eller ved at anvende en højtemperatur lim. Særlige typer af paneler er designet med et dobbelt transparent lag såsom et ekstra lag glas eller en kombination af et lag glas og et tyndt lag af polyethylene terephthalate (PEFE) eller fluorinated ethylene polymer (FEP) folie. Dette lag omtales ofte som "teflon folie".

Absorberen er placeret mellem isoleringsmaterialet og det transparente låg. En typisk kobber-absorber består som oftest af to manifold- eller fordelerrør som er forbundet parallelt med en række mindre rør kaldet absorber strips. Hver strip består af et 8-10 mm koberrør hvorpå der er fastgjort en 100-150 mm bred aluminiumsvinge. Hver aluminiumsvinge er belagt med en speciel mørk selektiv overflade med en meget høj absorption af solindstråling. Andre typer af absorbere består af metallurgisk forbundet aluminium og kobber eller ekstruderet aluminiumsprofiler (MPE - Multi-Port Extrusion). Ind- og udløb fra manifold- eller fordelingsrør kan som oftest findes i top- eller siderammer.

De fleste plane solfangere leveres desuden med en række beslag der sikrer installation på forskellige fundamentsystemer, såsom stål rammeprofiler, betonfundamenter eller tracking systemer.

2.2 Miljøstressorer

Anvendelsen af solvarmesystemer såsom plane solfangere, vil uundgåeligt medføre en interaktion med udemiljøet. Denne interaktion vil først og fremmest muliggøre produktion af solenergi, men vil samtidig introducere en lang række miljøpåvirkninger som kan have indvirkning på både ydelse og holdbarheden af solfangeren. Afhængig af produktet, applikationen og selve lokationen, vil stressorerne variere i både type og påvirkning.

De daglige og sæsonbestemte klimavariationer forårsager ikke blot udsving i temperatur og fugtighed, men også ændringer i vejrforhold såsom sol, vind, regn og sne. Disse ændringer kan alle påvirke det indvendige mikroklima, og derved også påvirke det samlede fugtindholdet i hele solfangeren. Andre påvirkninger der kan medføre ændringer af mikroklimaet kan komme fra driftsvariationer for solvarmeanlægget, såsom høje eller lave gennemløbstemperaturer, frostsikrings procedurer m.v. Derudover vil den specifikke konstruktion af panelet også forstørre eller reducere de miljømæssige påvirkningerne.

Som et eksempel vil en mindre vandtæt solfanger medvirke til et øget fugtindhold i forbindelse med regn, ved en ophobning af vand i isoleringsmaterialet. Denne ophobning kan derudover forstærkes hvis panelet ikke er leveret med drænhuller eller hvis disse er blokeret. Et mindre vandtæt panel kan skyldes brug af en elastomer (gummiliste) med en utilstrækkelig modstand overfor UV-stråling, temperaturer, oxidation eller grundet simple produktionsfejl såsom materialetolerancer eller slid på produktionsudstyret.

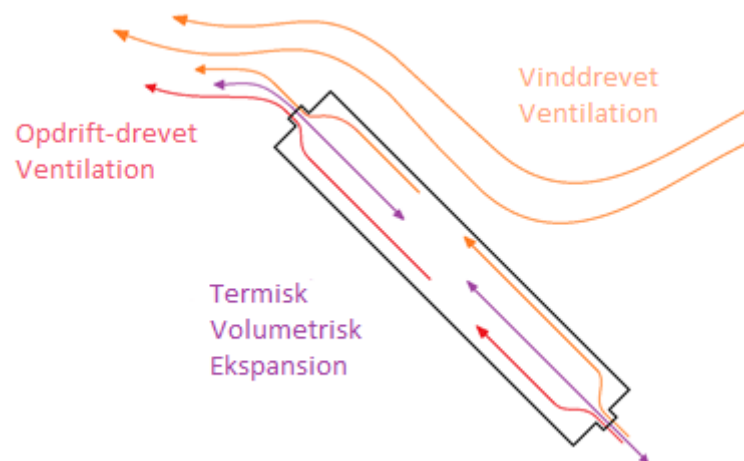
På baggrund af overstående ville den korrekte måleperiode for en undersøgelse af samtlige miljøstressorer skulle være minimum et år, for derved at kunne indeholde de sæsonbestemte klimavariationer. Måleperioden for denne undersøgelse er dog fastsat til ca. 80 dage grundet tidsbegrænsninger for det overordnede projekt.

2.3 Naturlig ventilation

Den naturlige ventilation i solfangeren spiller en afgørende rolle for det indvendige mikroklima, og herunder også for miljøstressorerers indflydelse. Den naturlige ventilation kan som udgangspunkt opdeles i to typer; vinddrevet ventilation, der skabes af en trykforskel mellem den indvendige del af solfangeren og det udvendige miljø; samt en opdrift-drevet ventilation som skyldes ændringer i densitet på grund af temperaturforskelle. Derudover indeholder den naturlige ventilation også en tredje komponent, den termiske volumetriske ekspansion- eller kompression, når luften opvarmes eller afkøles. (Figur 1)

Den kombinerede naturlige ventilationsrate afhænger af en række variabler, herunder temperaturen for: absorbereren, det transparente låg og den indvendige luft. Derudover afhænger den også af typen og størrelsen på solfangeren, de påtænkte og utilsigtede åbninger i konstruktionen samt trykforskellen mellem det ind- og udvendige miljø.

En højere ventilationsrate reducerer forskellen i temperatur og luftfugtighed mellem det indvendige mikroklima og det udvendige miljø, og reducerer derved risikoen for kondensering. Samtidig øger en høj ventilationsrate dog de termiske tab i solfangeren.



Figur 1. Skitse af vinddrevet og opdrift-drevet ventilation, samt termisk volumetrisk ekspansion af luften.

En tidligere undersøgelse foretaget af Köhl et al (2007) viste at en mindre solfanger under stagnation udskifter ca. 1120 liter luft over en 24-timers periode. Den positive ventilation (ud af solfangeren) i dagtimerne resulterede i et volumen på 700 liter luft, hvorimod den negative ventilation (ind i solfangeren) i løbet af natten, viste et volumen på 420 liter. Den anvendte solfanger havde et volumen svarende til ca. 0,16 m³. En typisk stor-skala solfanger har et volumen i intervallet 1,7 – 2,3 m³.

2.4 Indtrængende fugt

Når man oplister mulighederne for fugtindtrængning i en solfanger, kan disse opdeles i to kategorier; flydende vand såsom regn, (sne) og smeltevand, der trænger ind i solfangeren; eller indtrængning af vanddamp forårsaget af den naturlige ventilation. På grund af solfangerens konstruktion, installation og anvendelse, vil de gængse typer af fugtindtrængning i f.eks. bygningskonstruktioner såsom diffusion af vanddamp eller indvendig rumfugt, ikke gøre sig gældende for solfangere.

Typen af fugtindtrængning i denne undersøgelse er afgrænset til området omkring indtrængning af vanddamp, og mere specifikt den transport af vanddamp der sker på baggrund af den termiske volumetriske ekspansion eller kompression af luften inde i solfangeren.

Transport af vanddamp og derved også fugtindholdet i solfangeren, bestemmes af en kombination af den naturlige ventilation og balancen mellem fordampning og kondensering inde i solfangeren. I løbet af dagen når solfangeren er i drift, fordamper eventuel indvendige fugt i takt med at temperaturen stiger og tillader et højere vandindhold i luften. Den naturlige ventilation vil i dagtimerne give mulighed for at varm og fugtig luft i

solfangeren kan erstattes af koldere og tør luft fra det udvendige miljø. Om natten kan den naturlige ventilation derimod trække en varmere og mere fugtig luft fra det udvendige miljø ind i den nu koldere solfanger, som på grund af udstråling mod himmelrummet vil få luften til at kondensere på indersiden af glasset. Denne balance mellem transport af vanddamp er derfor afgørende for fugtindholdet i solfangeren.

2.5 Degradering af materialet

Forhøjede niveauer af temperatur og fugtighed er en almindelig årsag til en accelereret nedbrydning og ældning af materialer, og som derved kan medføre en reduktion af både ydelsen og levetiden på et produkt. Det primære fokusområde i denne undersøgelse var isoleringsmaterialet, herunder dets niveau af degradering og derved eventuelle påvirkning af ydelse.

Det har længe været kendt at fugt i isoleringsmaterialer påvirker isoleringsevnen. Viden på dette område er imidlertid sparsom og til tider modstridende. Dette skyldes det faktum at mange forskellige testmetoder er blevet anvendt, og resultaterne undertiden forkert fortolket. (Sandberg 1987)

Det grundlæggende princip for mineraluld er at minimere varmeoverførslen ved at udnytte et utal af små hulrum (åbne celler) mellem de sammenfiltrede mineralfibre. Disse hulrum begrænser konvektionen gennem materialet samt sænker temperaturforskellen mellem hvert hulrum, hvilket derved reducerer varmestrålingen. Yderligere reducerer materialets lave vægtfylde den generelle varmeledning igennem mineraluldet.

Den samlede varmeoverførsel gennem mineraluld sker ved varmeledning. Hvis mineraluldet indeholder fugt, kan varmeoverførslen påvirkes af yderligere to forhold: Fugtdrevet konvektion der forsages af fugtens bevægelse i materialet og som skyldes luftstrømme eller diffusion og varmeoverførsel ved hjælp af

fugtens faseændring, fordampning og kondensering. Disse forhold er ikke blot vanskelige at forstå, men gør det også yderst kompliceret at beregne og måle varmeledningsevnen af våd mineraluld, da dette vil afhænge af forekomsten og mængden af fugtoverførsel inde i materialet.

Tidligere forsøg på at fastsætte en sammenhæng mellem varmeledningsevnen og relativ luftfugtighed foretaget af Kristiansen & Rode (1999) viste at varmeledningsevnen i en Rockwool A-Batts ($29,3 \text{ kg/m}^3$) steg med 22,3 % (Reduktion af isoleringsevnen på 22,3%) ved en gennemsnitstemperatur på $12,5^\circ\text{C}$ og en relativ luftfugtighed på 80,4 %. Konklusionen på dette forsøg var at stigningen af varmeledningsevnen skyldes en faseændring af fugten inde i isoleringsmaterialet.

Fænomenet med en pludselig stigning af varmeledningsevnen i mineraluld med et øget fugtindhold, understøttes ligeledes i ældre undersøgelser foretaget af Jespersen (Citeret af Sandberg 1987), hvis resultater viste en tæt på 100 % stigning af varmeledningsevnen ved et fugtindhold på 1-2 % i forholdet til volumen af isoleringsmaterialet. Forsøget blev udført på mineraluld med høj densitet. (Rockwool 78 kg/m^3 og glasuld 62 kg/m^3). I dag anvendes der i plane solfangere typisk glasuld såsom Isover U Solar, som har en densitet mellem 15 og 35 kg/m^3 (Isover 2016).

De forhøjede niveauer af temperatur og fugtighed har ikke kun indflydelse på en kortvarig stigning af varmeledningsevnen, men påvirker også ældningen (nedbrydningen) af selve materialet. Fenol-urea-formaldehyd (PUF) er en termohærdende polymer, der bruges som bindemiddel under produktion af mineraluld, såsom glasuld og stenuld. (Isover 2017). En af bekymringerne ved at bruge PUF som bindemiddel er nedbrydningen af de mekaniske egenskaber på lang sigt. Nedbrydningen antages at være forårsaget af hydrolyse (Okhrimenko et al. 2018), hvilket er en kemisk nedbrydning af bindemidlet grundet en reaktion med vand, og som forstærkes ved øget fugtighed og

temperatur. Nedbrydningen menes at skyldes en ændring i den kemiske sammensætning på overfladen og som medføre at fibre frigøres fra hinanden.

Nedbrydningen af bindemidlet som et resultat af en forøget temperatur, er også nævnt af Isover (2017), idet det anføres, at isoleringsmaterialet vil nedbrydes og begynde udgasning i temperaturområdet 150-250 °C. Denne form for nedbrydning og udgasning bekræftes yderligere af Matthews & Westley (1987) hvis undersøgelse viste at CH₂O emissionerne (Formaldehyd) stiger 3-4 gange når mineraluldet udsættes for et miljø på blot 38° C og 68% relativ luftfugtighed i forhold til mineraluld i et miljø med 23 °C og 50% relativ luftfugtighed.

Nedbrydning af mineraluld er også tidligere blevet observeret af Low (1987) som fandt, at mineraluldsfibre udviste fysisk disintegration og morfologiske ændringer når de blev udsat for miljøer med overdreven fugtighed og høje temperaturer. Low udsatte mineraluldsprøver for vanddamp og varme ved temperaturer mellem 45–100°C i en periode på 40-50 dage og op til fire måneder. Udover resultaterne der viste nedbrydning af materialerne observerede Low også en ændring i pH-værdien af det destillerede vand som han anvendte under eksperimenterne: med et udgangspunkt nær naturlig pH (6,8) øgede vandopløsningen sin pH værdi til 10-12 (Basisk) efter at have været i kontakt med mineraluldsfibre. Alkaliseringen af vandopløsningen blev ikke påvirket af eksperimentets periode og temperatur.

Den langsigtede korrosion af aluminium i alkaliske medier som en funktion af pH alene, er relativt sparsomt undersøgt. Tabrizi et al. (1991) rapporterede, at korrosion af aluminium i alkaliske opløsninger stiger hurtigt over pH 10, og påviste, at ved pH 11 dannes små hulrum i overfladen, hvilket giver en lettere adgang til underlaget og derved øger korrosionshastighed. Disse hulrum udvikles yderligere ved pH 12 og bliver her områder med stærkt lokaliserede angreb. Det oplyses at den optimale pH værdi for det beskyttende oxidlag på

aluminium ligger mellem 4-9, og udsættelsen for miljøer uden for dette område vil resultere i voldsom korrosion i form af grubekorrosion. (Alumeco 2018).

3 UNDERSØGELSER

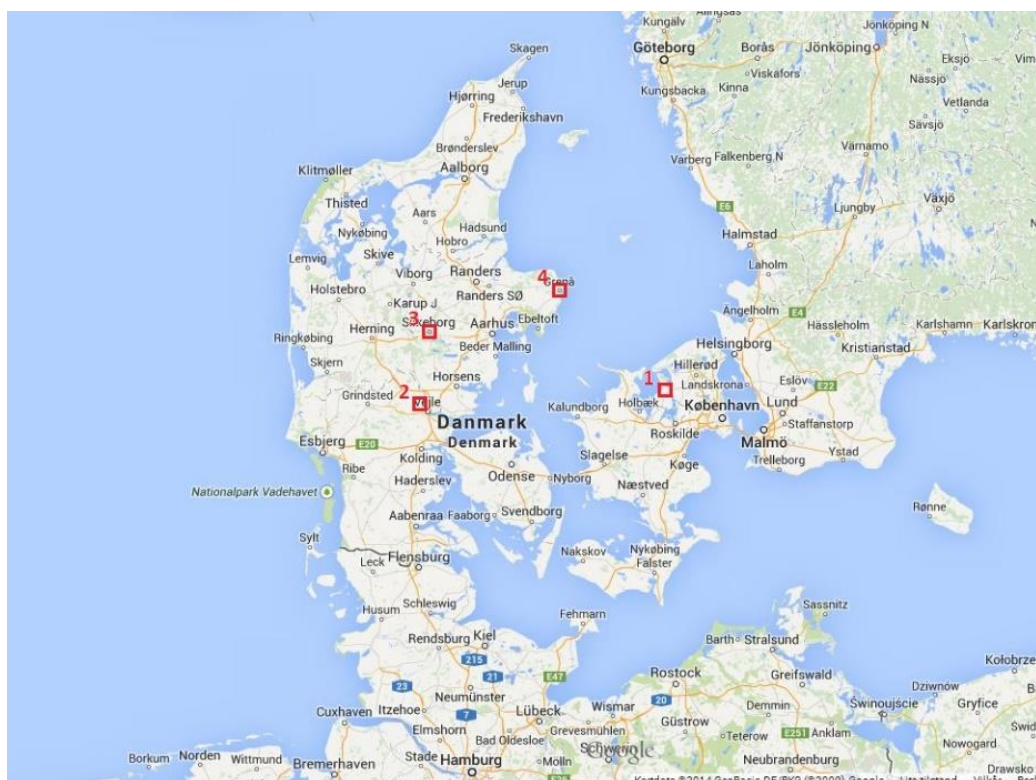
3.1 Solfanger typer og lokationer

Målingerne blev udført på forskellige typer af plane solfangere (Tabel 1) placeret ved forskellige solvarmeanlæg i Danmark (Figur 2). De enkelte solvarmeanlæg blev valgt med hensyn til en jævn fordeling af solfangertype og alder. De valgte solvarmeanlæg drives alle som en del af et fjernvarmeanlæg og indenfor driftstemperaturer på ca. 80-85°C. Det antages, at de klimamæssige forskelle mellem placeringerne er ubetydelige.

Tabel 1. Producent, produktionsår og produktspecifikation af de undersøgte solfangere.

Producent	Model	Prod. år	Størrelse	Vægt	Isoleringsmateriale
Sunmark A/S	GJ 140D	2010	6000 x 2500 x 164 mm (15 m ²)	347 kg	Mineral wool
Arcon Solar A/S	HT-A 35/10 + HT-SA 35/10	2013	5960 x 2270 x 140 mm (13,5 m ²)	251 kg	Mineral wool
Savosolar Oyj	SF500-15	2016	6158 x 2591 x 157 mm (15,9 m ²)	443 kg	Mineral wool
Arcon-Sunmark A/S	HT-A 35/10 + HT-SA 35/10	2016	5970 x 2270 x 140 mm (13,5 m ²)	250 kg	Mineral wool

Der blev foretaget to forskellige målinger; måling af varmeledningsevnen for isoleringsmaterialet (IP) og målinger relateret til fugtbalancen (HB), hvor den relative luftfugtighed og temperatur i solfangeren og det omgivende miljø blev målt. IP-målinger blev udført på alle lokationer, hvorimod HB-målinger kun blev udført hos Jelling Varmeværk og Silkeborg Forsyning.



Figur 2. Placering af de valgte solvarmeanlæg: 1. Jægerspris Kraftvarme, 2. Jelling Varmeværk, 3. Silkeborg Forsyning og 4. Grenaa Varmeværk.

Tabel 2. Placering af valgte solvarmeanlæg, byggeår, størrelse, solfangerproducent, målingstype samt dato for måling (IP: Isoleringsevne; HB: Fugtbalance).

	Jægerspris Kraftvarme A.m.b.a.	Jelling Varmeværk A.m.b.a.	Silkeborg Forsyning A/S	Grenaa Varmeværk A.m.b.a.
Lokation	Håndværkervej 9, 3630 Jægerspris	Nordkrogen 20B, 7300 Jelling	Kejlstrup Tværvej 14, 8600 Silkeborg	Energivej 6, 8500 Grenaa
Byggeår	2010, 2013	2016	2016	2014
Størrelse	13.405 m ²	15.290 m ²	156.694 m ²	12.096 m ²
Producent	Sunmark A/S	Savosolar Oyj	Arcon-Sunmark A/S	Arcon A/S
Måletype	IP	IP, HB	IP, HB	IP
Dato	11-12-2018 - IP 14-12-2018 - IP	06-11-2019 - HB 16-01-2019 - IP	07-11-2019 - HB 17-01-2019 - IP	18-01-2019 - IP

3.2 Målemetode

3.2.1 Måling af isoleringsevne

IP-målingerne blev udført fire forskellige steder og omfattede solfangere fra fire forskellige producenter. De undersøgte solfangere blev valgt vilkårligt (Uden hensyntagen til produktspecifikation, feltplacering, visuelt udseende m.v.). I alt blev seks forskellige modeller undersøgt, og resultaterne blev samlet fra 17 forskellige solfangere og på baggrund af 60 individuelle målinger foruden seks referencemålinger. Målingerne blev foretaget mellem den 11. december 2018 og den 18. januar 2019, og i dagtimerne mellem kl. 10 -17.

Før hver målesession, blev der på stedet foretaget en referencemåling på et nyt og tørt stykke mineraluld (ISOVER 37 Basic, 300 x 200 x 95 mm). Referenceprøven blev før målingen klimatiseret, og tildækket med en tynd plastikpose for at forhindre påvirkninger fra vind og regn. Den gennemsnitlige lambda-værdi, λ , for de seks referencemålinger var 0.0364 W/mK ved en gennemsnitstemperatur på 9.2°C.

Varmeledningsevnen betegnet λ (lambda) er definitionen på et materiales evne til at lede varme (Jensen & Krighaar 2015).

Varmeledning er resultatet af en direkte energioverførsel mellem molekyler, atomer og elektroner med højere energi til dem med lavere energi (Polezhaev 2019). En lav λ (lambda) indikerer gode isoleringsegenskaber, og mineraluld har typisk en λ -værdi på 0.037 W/mK (Rockwool 2005).

varmeledningsevnen eller λ -værdien af isoleringsmaterialet blev målt under anvendelse af en såkaldt varmeoverførselsanalysator (Applied Precision, ISOMET 2104) med en tilsluttet nålesonde. Målingerne blev foretaget gennem 3,5 mm huller, der blev boret i bagpladen på hver enkelt solfanger. Nålesonden blev indsat i en vandret vinkel og med en måledybde svarende til nåles fulde længde (Figur 3). Hvert hul blev boret kort forinden den specifikke måling og

med et minimum af kontakt med det underliggende isoleringsmateriale. Der blev foretaget målinger i følgende placeringer: Top, Bund, Bund 1-5, Center drænhul, Side drænhul og Indløb. Placeringerne af målingerne for hver type af solfanger kan ses i Bilag I. De første indledende målinger blev gentaget ved at justere den øst-vestlige vinkel på nålesonden, dog uden at dette viste nogen signifikant forskel mellem resultaterne. Alle målinger blev udført ved en gennemsnitlig omgivelsestemperatur på 12,4 °C.

Der blev i forbindelse med den efterfølgende dataanalyse, taget højde for temperaturforskellen mellem den målte varmeledningsevne og den anbefalede temperatur i henhold til DS/EN 13162:2012+A1:2015 (s. 18).



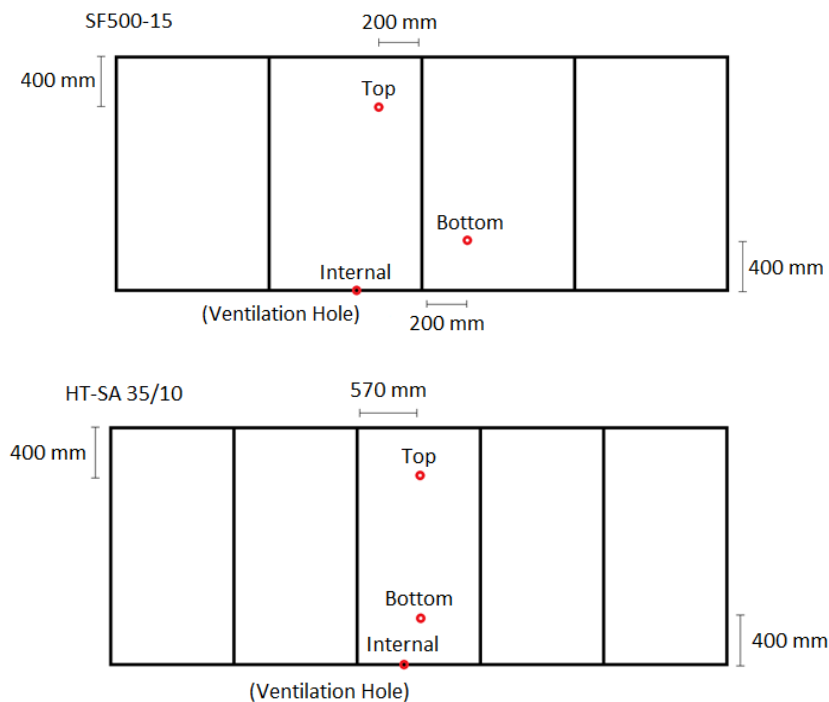
Figur 3. Isoleringsevne målt med nålesonde i en solfanger.

3.2.2 Måling af fugtbalance

De fugtbalance-relaterede målinger, der blev udført, bestod i en langvarig overvågning af temperaturen og den relative luftfugtighed både indvendigt i solfangeren og i det udvendige miljø. Disse målinger blev udført for at undersøge og analysere variationerne af mikroklimaet inde i solfangeren, såvel som for at indsamle data til beregning af fugtbalancen i solfangeren.

Overvågningen blev udført ved anvendelse af en vandtæt USB-temperatur og luftfugtighedsdatalogger (Elitech, RC-51H).

Der blev hos både Jelling Varmeværk og Silkeborg Forsyning udvalgt tre vilkårlige solfangere, hvori der i hver blev installeret tre individuelle dataloggere (totalt 18 dataloggere). Disse dataloggere målte temperaturen og den relative luftfugtighed forskellige steder i solfangeren (Figur 4). Derudover blev der på hver lokation, udvendigt og i umiddelbar nærhed af solfangerne, monteret to dataloggere der målte omgivelsestemperaturen og den udvendige relative luftfugtighed.



Figur 4. Position af dataloggere i solfangertype SF-500-15 og HT-SA-35/10.

HB-målingerne inde i isoleringsmaterialet blev foretaget gennem 24 mm huller boret i bagpladen, og med en måledyb på 35 mm. Selve dataloggeren blev fastgjort og forseglet med sanitær silikone. Derudover blev der anvendt en ekstra afdækning i form af et plastikkrus, for at forhindre interferens fra vind og regn. (Figur 5)



Figure 6. USB-datalogger monteret i isoleringsmaterialet for at måle temperatur og luftfugtighed.

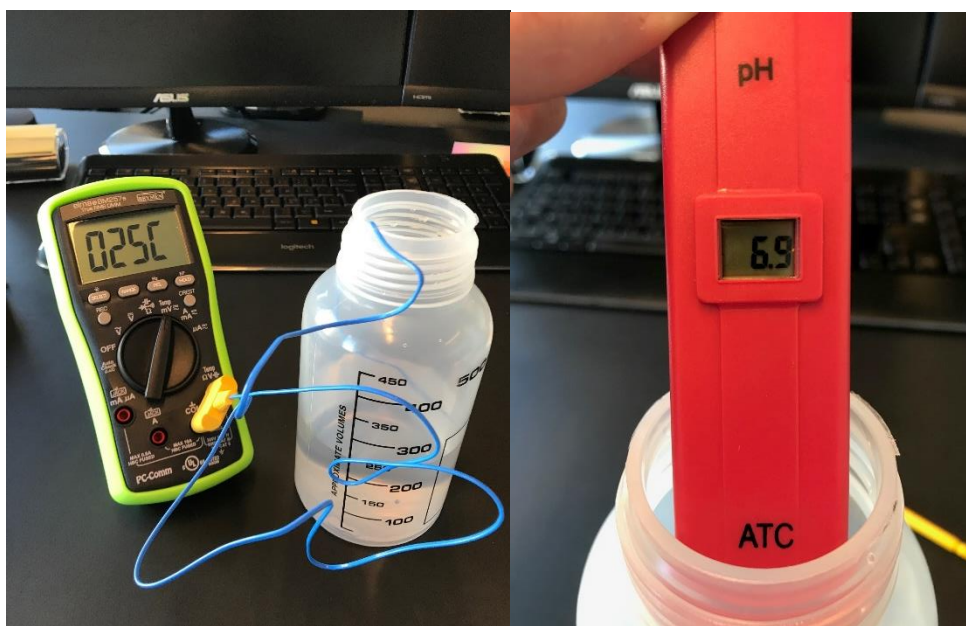
HB-målingerne af det indvendige hulrum mellem absorberen og det transparente låg blev udført gennem et 24 mm hul boret direkte i bundrammen eller i selve ventilationsproppen monteret i bundrammen. Dataloggeren blev indsat med en måledybde på 45 mm og med et målepunkt centreret mellem den øverste overflade på absorberen og den indvendige nedre overflade af glasset. (Figur 7). Dataloggeren blev ligeledes fastgjort og forseglet med sanitær silikone og med en ekstra afdækning i form af et plastikkrus, for at forhindre interferens fra vind og regn.



Figur 7. Datalogger monteret i hulrummet mellem absorber og glas.

3.3 pH eksperiment

Et pH eksperiment blev udført med et digital pH-meter (PH Tester, PH-107). Kalibreringen af pH-måleren blev gennemført med 250 ml demineraliseret vand, 2,5 g pH-pulver med en præcis pH på 6.86 ved 25 °C, og et Elma BM257s Multimeter med en termoelementtråd type-K (Figur 9). I forsøget blev 20 g mineraluld (ISOVER 37 Basic, 70 mm) skåret i små stykker og anbragt i en 500 ml plastik prøveflaske indeholdende 150 ml demineraliseret vand (pH 6,5) og forseglet med et plastiklåg. Prøven blev efterladt i 3 dage ved stuetemperatur (Ca. 23°C). Vandopløsningen blev derefter drænet fra flasken og over i en prøvekop, hvor pH-værdien blev målt under anvendelse af det kalibrerede pH-meter.



Figur 9. Kalibrering af pH-meter med pH-pulver ved en pH på 6,86

4 RESULTATER

4.1 Isoleringsevne

For at kunne fastslå en signifikant stigning af varmeledningsevne, blev der valgt en minimumsgrænse på 50% stigning ved sammenligning mellem den målte værdi og den specifikke referencemåling foretaget på lokationen. Dette svarer til ca. 0,055 W/mK sammenlignet med en reference på 0,037 W/mK. Begrundelsen for dette er antagelsen af, at 80-90% af varmetabet forsvinder ud gennem glasset, og mindre end 20% slipper ud gennem isoleringsmaterialet. Derfor skal forøgelsen af varmeledningsevnen være i denne størrelsesorden for at have en betydelig indflydelse på solfangerens samlede ydelse.

På den første lokation ved Jægerspris Kraftvarme blev der foretaget 28 målinger fra otte forskellige solfangere (Bilag III). Resultatet viste at 25 af målingerne ikke have nogen signifikant forøgelse af varmeledningsevnen, mens to af målingerne viste en signifikant stigning. Disse to målinger blev foretaget på positionerne: højre side drænhul og center drænhul, og indikerede et højt niveau af fugt og potentiel nedbrydning af isoleringsmaterialet. En enkelt måling viste en lavere, men stadig signifikant stigning af varmeledningsevnen på ca. 87% over referencemålingen. Denne måling blev foretaget i venstre side drænhul.

Den gennemsnitlige λ -værdi af de 25 målinger var 0,0384 W/mK og indenfor temperaturområdet 7,1 – 20,7°C. Gennemsnittet af de resterende tre målinger med signifikante forøgede værdier havde en λ -værdi på 0,118 W/mK, hvilket svarer til en stigning på 230% (forringelse af isoleringsevnen) sammenlignet med referencemålingen.

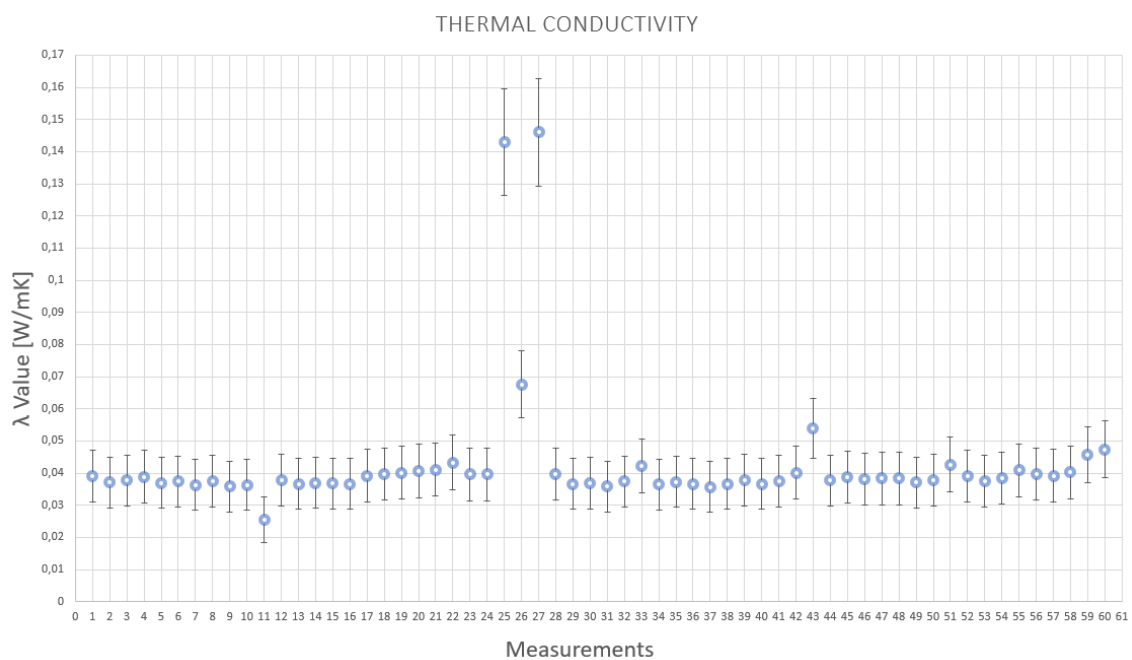
På den anden lokation ved Jelling Varmeværk blev der foretaget 11 målinger fra tre solfangere, hvor ingen viste nogen signifikant stigning af varmeoverføringsevnen. Den gennemsnitlige λ -værdi af målingerne var 0.0372 W/mK og med en referencemåling på 0.0375 W/mK. Målingerne ved Jelling Varmeværk blev udført indenfor temperaturområdet 11,7 – 14,6 °C, og med den højeste varmeledningsevne på 0,0423 W/mK, hvilket er ca. 13% højere end referencemålingen.

På den tredje lokation ved Silkeborg Forsyning blev der foretaget 13 målinger fra tre forskellige solfangere. 12 af målingerne viste ingen signifikant stigning af varmeledningsevnen; dog viste en af målingerne en stigning på 40% sammenlignet med referencemålingen. Den gennemsnitlige λ -værdi var 0,0397 W/mK, og med en referencemåling på 0,0384 W/mK. Målingerne ved Silkeborg Forsyning blev foretaget inden for temperaturområdet 11,7 – 14,6 °C og med den højeste målte varmeledningsevne på 0,0539 W/mK.

På den fjerde og sidste lokation ved Grenaa Varmeværk blev der foretaget otte målinger i tre forskellige solfangere. Ingen af dem viste nogen signifikant forøgelse af varmeledningsevnen, selvom der blev observeret et generelt højere gennemsnit i sammenligning med de andre placeringer. Den gennemsnitlige λ -værdi af målingerne var 0,0411 W/mK, og med en referencemåling på 0,0354 W/mK. Målingerne ved Grenaa Varmeværk blev udført indenfor temperaturområdet 14,9 – 26,9°C, og med den højeste målte varmeledningsevne på 0,0474 W/mK, hvilket er ca. 34% højere end referencemålingen.

Som et resultat af de 60 målinger var kun tre λ -værdier over den foruddefinerede minimumsgrænse for at blive betragtet som signifikant forøget. Hvis man sænker denne foruddefinerede minimumsgrænsen til en 25% stigning (Fremfor 50%) af varmeledningsevnen, kunne seks målinger eller 10% af de samlede målinger betragtes signifikant forøget. Placeringen af disse seks målinger blev alle taget indenfor en afstand på 100 mm fra bundrammen. Den

følgende graf (Figur 12) viser de 60 målinger og deres individuelle nøjagtighed i overensstemmelse med temperatur og λ -værdi. Ud fra grafen kan det ses at der ikke er fundet signifikant fugtakkumulering (over 50%) inden for 95% af målingerne, og kun 5% viser en betydelig stigning. Disse signifikante forøgede værdier blev alle målt direkte i drænhullet på én enkelt solfanger ved Jægerspris Kraftvarme.



Figur 12. Målingerne af den varmeledningsevne med angivet unøjagtighed. Måling nr. 25-27 fra Jægerspris Kraftvarme, med en signifikant forøgelse af λ -værdien.

4.2 Fugtbalance

På lokationerne Jelling Varmeværk og Silkeborg Forsyning blev der installeret 18 dataloggere for at måle temperaturen og den relative luftfugtighed i seks forskellige solfangere. Yderligere blev fire dataloggere, to ved hver lokation, installeret for at overvåge den udvendige temperatur og luftfugtighed. Overvågningsperioden blev sat til 80 dage. På lokationen Jelling Varmeværk mislykkedes målingerne fra to individuelle dataloggere placeret i hver sin solfanger grundet batteriproblemer.

Ud fra de indsamlede data var det muligt at aflæse hvor ofte der opstod fugtighedsmætningen (100% relativ luftfugtighed) i isoleringsmaterialet hos de enkelte solfanger. På lokationen ved Jelling Varmeværk viste den første solfanger ingen tegn på fugtighedsmætning under hele overvågningsperioden på 1920 timer. Den anden solfanger havde kun 1 time ($<0,1\%$) med mætning, mens den tredje solfanger havde i alt 88 timer (mindre end $<5\%$). Bilag II viser graferne over den målte relative luftfugtighed i en 21-dages periode samt den fulde 80-dages periode. Den omgivende relative luftfugtighed på den specifikke lokation er afbildet på graferne til sammenligning. Som det ses på grafen, kan den gennemsnitlige interne relative luftfugtighed i hele måleperiode betragtes som høj, og der er indikationer af en sammenhæng mellem det udvendige klima og det interne mikroklima.

På lokationen ved Silkeborg Forsyning blev der målt et højere niveau af relativ luftfugtighed i alle tre solfanger (Bilag II). Den første solfanger viste en fugtighedsmætning i 51 timer ($<3\%$) ud af en måleperiode på i alt 1898 timer. Den anden solfanger havde i alt otte timer (mindre end $<1\%$) mætning og den tredje solfanger i alt 64 timer (mindre end $<4\%$). Fra graferne kan det ses, at den gennemsnitlige relative luftfugtighed inden i solfanger er meget høj, og der er en meget klar sammenhæng mellem det udvendige klima og det interne mikroklima.

På grund af unøjagtigheden af de målte værdier, har det ikke været muligt præcist at fastslå, om solfangerne har opnået en 100% fugtighedsmætning og derved kondensering i isoleringsmaterialet. Ikke desto mindre vurderes dette som værende sandsynligt på baggrund af graferne.

4.3 Beregninger af fugtindhold

Ud fra de indsamlede data fra dataloggerne var det muligt at udvikle et beregningsværktøj til beregning af fugtindholdet i de enkelte solfangere. Det var således muligt at bestemme hvorvidt der foregik en forøgelse eller formindskelse af fugtindholdet i solfangeren i perioden for målingerne. Beregningsværktøjet er udelukkende baseret på luftudvekslingen forårsaget af den termiske volumetriske ekspansion -og kompression, og tager ikke højde for den øvrige luftstrøm forårsaget af den resterende naturlig ventilation. Desuden er solfangerne fra begyndelsen af målingerne beregningsmæssigt blevet betragtet som værende tørre dvs. med et fugtindhold på 0%. Det må derfor forventes, at variationerne såvel som det samlede fugtindhold i solfangerne er væsentligt højere end de beregnede resultater.

På lokationen ved Jelling Fjernvarme viste den første solfanger en sammenlagt beregnet forøgelse af fugt på 1,91 g som et resultat af den 80-dages måleperiode. Den anden solfanger forøgede sit fugtindhold med 0,91 g, mens den sidste solfanger mistede 0,65 g. Graferne for udvikling af fugtindholdet er vist i Bilag IV.

På lokationen ved Silkeborg Forsyning endte den første solfanger med et beregnet reduceret fugtindhold på 1,62 g, mens den anden solfanger mistede 0,74 g. Den sidste solfanger reducerede sit fugtindhold med 1,03 g (Bilag IV).

De positive og negative ændring i fugtindholdet skyldes sandsynligvis et generelt højere eller lavere fugtindhold fra starten af målingerne. Solfangere med en højere gennemsnitlig relativ luftfugtighed frigiver mere vanddamp i løbet af dagen.

Som det ses fra resultaterne, er mængden af fugt, der overføres ved den termiske volumetriske ekspansion -og kompression af luft, meget lille, og svarer ikke til mængden af den kondensering man ser på solfangerne i dag. Den

volumetriske ekspansion forårsages som udgangspunkt af de temperatursvingninger der opleves i panelet, og de daglige og sæsonbestemte temperaturvariationer spiller derfor en afgørende rolle. Det estimeres dog at den luftudveksling der skyldes den termiske volumetriske ekspansion tæller mindre end 10% af den samlede naturlige ventilation.

Resultaterne sandsynliggør desuden muligheden for at beregne sig til fugtindholdet i en solfanger på baggrund af udvekslingen af luftfugtighed. På grund af de manglende data omkring den totale luftstrøm forårsaget af den naturlige ventilation, samt en relativ kort måleperiode, har det ikke været muligt at beregne solfangernes totale fugtindhold.

4.4 pH eksperiment

Resultaterne fra pH eksperimentet viste, at pH-værdien for en opløsning af demineraliseret vand udsat for mineraluld nåede en pH på $9,3 \pm 0,2$.

Målingerne blev udført ved en temperatur på $23,2^{\circ} \text{C}$. Desuden udviste opløsningen en betydelig farveændring mod lysegul efter eksponeringen af mineraluld.

5 DISKUSSION

5.1 Generelt resultat

Formålet med denne undersøgelse var at teste hypotesen om, at fugtighed ophobes i isoleringsmaterialet og derved reducere produktets ydeevne markant. Resultaterne fra målingerne af den vameledningsevnen understøtter ikke forudsigelsen om, at fugt/vand er blevet akkumuleret i isoleringsmaterialet, og at λ -værdien er blevet signifikant forøget. Endvidere indikerede resultaterne ikke, at isoleringsmaterialet har været udsat for væsentlige mængder fugt og derved nedbrydning i dets driftstid. Forudsigelserne om, at variationen i temperatur og relativ luftfugtighed skaber et dugpunkt inde i isoleringsmaterialet og derved potentiel kondensering, kunne ikke bekræftes definitivt på grund af dataloggernes unøjagtighed; resultaterne indikerer dog en meget stor sandsynlighed for kondens. Når man sammenligner denne sandsynlighed for et dugpunkt og derved kondens, med resultaterne af målingerne af den termiske konduktivitet, indikeres det, at der ikke er foregået nogen akkumulering af fugt inden i isoleringsmaterialet, eller at denne fugt er fordampet indenfor en relativ kort periode.

Baseret på resultaterne fra den nylige undersøgelse foretaget af Dansk Fjernvarme (2018) er det tydeligt, at mange solfangere har problemer med fugt og at visse solfangere skades af dette. Når man sammenligner med resultaterne fra denne undersøgelse, syntes fugten dog at være begrænset til den indre overflade af det transparente låg (glasset) og små områder af isoleringsmaterialet (mindre end 100 mm fra bundrammen). Årsagen til dette vurderes at være en kombination af høj indvendig luftfugtighed og glassets afkøling på grund af udstråling mod himmelrummet. Denne konklusion understøttes af målingerne af temperaturen og den relative luftfugtighed inde i hulrummet mellem absorberen og den indvendige overflade af glasset.

Målinger fra denne specifikke position viste, at der på lokationen ved Silkeborg Forsyning, var en gennemsnitlige koldere lufttemperatur under glasset sammenlignet med den omgivende luft i cirka 31% af tiden og mere end 1° K lavere 10% af tiden. På lokationen ved Jelling Varmeværk indikerede de samme gennemsnitlige målinger, at den indvendige luft var koldere 28% af tiden, og 10% af tiden var mere end 1° K lavere end den udvendige luft. Ved sammenligning af disse tal med den omgivende luftfugtighed på begge lokationer viste det sig, at ved i 8 % af tiden var den omgivende luftfugtighed over 90 %, og på samme tid var temperaturen indvendigt i solfangeren mere end 1 K lavere end den udvendige temperatur. På disse specifikke øjeblikke er det sandsynligt, at udvekslingen af luft mellem det udvendige miljø og det indre mikroklima vil resultere i kondens på glasoverfladen. Derudover er det sandsynligt, at fugt fra det indvendige mikroklima vil bidrage til yderligere kondens på glasoverfladen.

Under målingerne i solfangerfelterne blev det observeret, at kondens på indersiden af glasset danner løbende dråber, hvilke sandsynligvis kan ende i bunden af solfangeren eller falde ned som dråber på absorberoverfladen. Dette fænomen kan forklare den forøgede varmeledningsevne af isoleringsmaterialet i bunden af solfangeren. Et eksempel på disse observationer er vist i figur 19.



Figur 19. Løbende dråber i solfangere.

Kondensering af fugt på det transparente låg (glasset) såvel som den potentielle transport af fugt til isoleringsmaterialet i bunden af solfangeren, henleder til den tredje forudsigelse omkring en forøget korrosion af absorberen og andre metalliske komponenter. Som en del af undersøgelsen blev kombinationen af demineraliseret vand og mineraluld undersøgt og resultatet viste en stigning i pH-værdi til 9,3. Blandingsforholdet mellem 20 gram mineraluld og 150 ml demineraliseret vand kan have fortyndet det faktiske resultat af pH-ændringen. Ikke desto mindre er vand/fugt med en pH-værdi på 9,3 bekymrende i forhold til grubetæring af aluminium (Alumeco 2018). Om isoleringsmaterialets sorte glasfiber klæde eller aluminiumsfolie kan forhindre den potentielle alkaliske fugt i at komme i kontakt med den ubehandlede underside af absorberen, er ikke undersøgt i dette studie. Derudover bør pH-værdien af kondensen på indersiden af glasset måles for at bestemme, om den selektive absorberende overflade ligeledes er i risiko for at komme i kontakt med et alkalisk medium.

For at kunne vurdere udviklingen solfangerens fugtindhold over tid, blev der udviklet et beregningsværktøj på baggrund de tilgængelige data fra dataloggerne. Resultatet blev udelukkende baseret på den termiske volumetriske ekspansion af luften, da der ikke var data tilgængelig over den samlede naturlige ventilation. Resultaterne viste, at det var muligt at beregne solfangerens ændring i fugtindhold baseret på udveksling af vanddamp, men det estimeres samtidig at den termiske volumetriske ekspansion af luften kun udgør mindre end 10% af den totale udveksling i solfangeren. Dette estimat stammer fra tidligere målingerne foretaget af Köhl et al. (2007), der viste en udveksling af luft på 1120 liter over en 24-timers periode i temperaturområdet -20 til 98 ° C (ΔT 118° K) i en solfanger med et volumen på 0,16 m³. Hvis man beregner den termiske volumetriske ekspansion af det samme volumen inden for det samme temperaturområde ved hjælp af Charles's Lov, ses en samlet luftudveksling på 75 liter eller 6,7% af de tidligere nævnte 1120 liter. I en stor solfanger antages volumenet at være mellem 1,7-2,3 m³, hvilket resulterer i en termisk volumetrisk ekspansion på op til 1072 liter med et ΔT på 118° K. Hvis

disse antagelser er korrekte, kan fugt der overføres på baggrund af den naturlig ventilation være årsagen til den høje mængde kondens på indersiden af glasset. Samtidig vil dette sætte spørgsmålstegn ved værdien af ventilation i en solfanger, da resultaterne viser at den uundgåelige termiske volumetriske ekspansion af luften ikke forøger fugtindholdet markant og samtidig kan håndteres af en lille ventil eller trykudligningshul.

I denne undersøgelse er indtrængning af flydende vand såsom regn, (sne) og smeltevand ikke blevet medregnet som en mulig årsag til fugtproblemerne. Årsagen hertil er det mere eller mindre bevidste valg, som fabrikanterne foretager under design og produktion af solfangerne. I årevis har konkurrencen hovedsagelig været drevet af energipriser, hvilket betyder, at produktkvaliteten for storskala solfanger i forfatterens øje har lidt enormt.

Ved at måle og beregne fugtindholdet udelukkende på baggrund af overførelse af vanddamp vil det være muligt at udelukke alle andre årsager end indtrængende regn, sne eller smeltevand. Disse beregninger kræver imidlertid, at den totale naturlige ventilation af en storskala solfanger måles.

5.2 Fremtidigt arbejde

Det fremtidige arbejde med dette emne involverer undersøgelsen af den totale naturlige ventilation i en storskala solfangere, parallelt med målinger af temperatur og luftfugtighed. Med disse data vil det være muligt at beregne solfangerens fugtindhold og derved bestemme årsagen til den synlige kondens på indersiden af det transparente låg. Udfordringen med at måle den naturlige ventilation består af antallet af tilsigtede og utilsigtede åbninger i solfangeren. Hvis dele af disse åbninger forsegles for udføre målinger, kan dette ændre den oprindelige luftudveksling. Et specialfremstillet anemometer med datalogger-funktion er i øjeblikket ved at blive udviklet og forventes at kunne testes i 2019. Desuden er en lille solenergidrevet ventilator blevet designet til at tvangstørre de eksisterende solfangere. En prototype af denne lille ventilator blev afprøvet I februar 2019 og forventes færdig i løbet af 2019. Ventilatorens styreenhed er programmeret til at måle forskellen mellem den interne og eksterne absolutte luftfugtighed og på baggrund af dette starte ventilationen ved en foruddefineret værdiforskel på $2 \text{ g} / \text{m}^3$. Ventilatoren kører herefter i en periode på 10 minutter, før den igen måler forskellen i luftfugtighed. Enhedens kostpris estimeres til 100-150 DKK.

REFERENCER

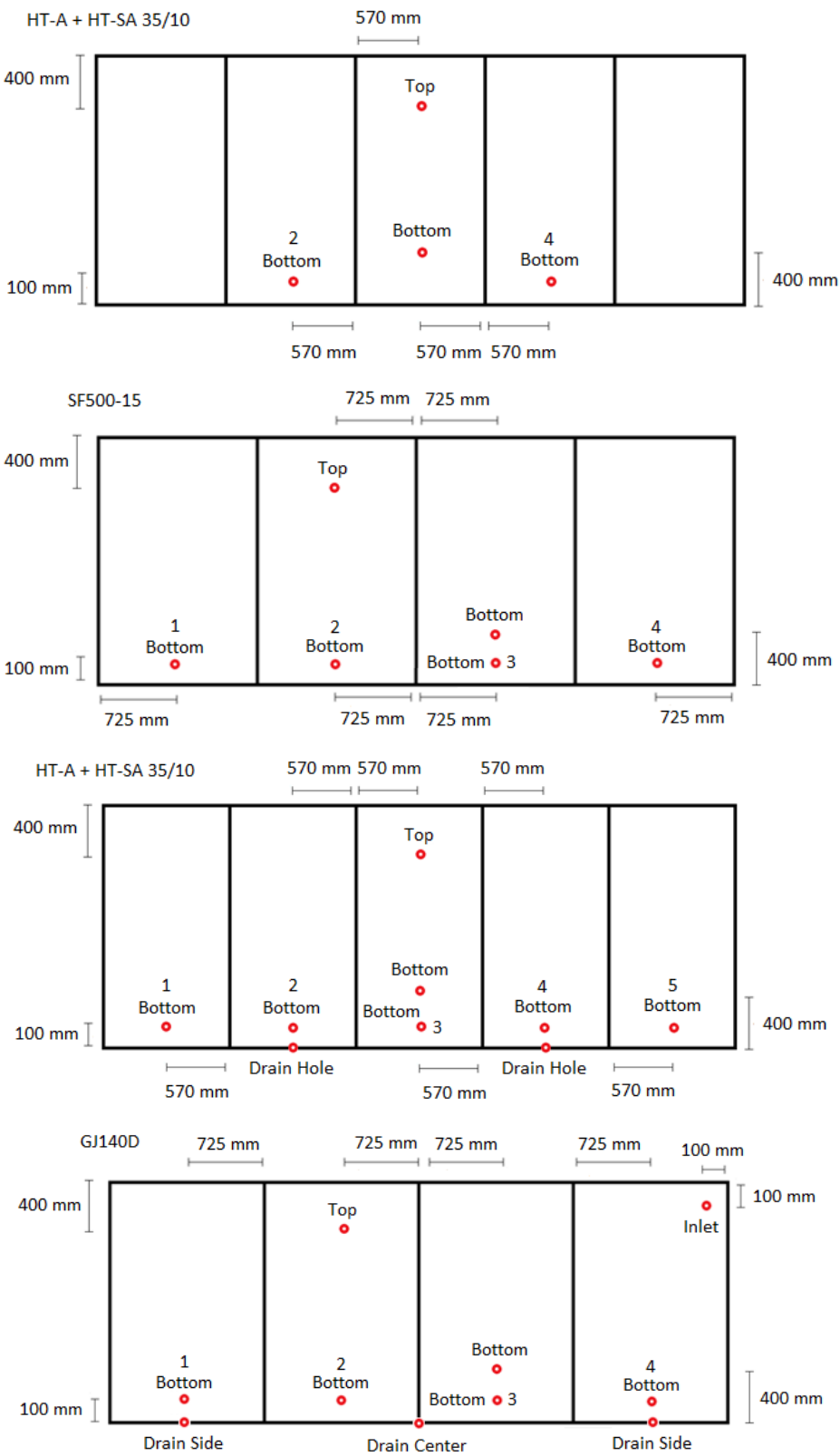
- Alumeco. 2018. Corrosion of aluminium surfaces. [Online]. Available at: <https://www.alumeco.com/knowledge-technique/general/corrosion-of-aluminium-surfaces> (Accessed 30 March 2019).
- Danish District Heating Association. 2018. Spørgeskemaundersøgelse: erfaringer med drift af solvarmeanlæg-vidensdeling og inputs mhp. Erfa-træf 20.09.2018. Notat 24 September 2018.
- Danish Energy Agency. 2018. Denmark's Energy and Climate Outlook 2018: Baseline Scenario Projection Towards 2030 With Existing Measures (Frozen Policy). Copenhagen, Danish Energy Agency.
- Danish Energy Agency. N.d. THE DANISH ENERGY MODEL. Innovative, Efficient and Sustainable. [Online]. Available at: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/contents/material/file/the_danish_energy_model.pdf (Accessed 28 March 2019).
- DMI. 2019. Vejrarkiv. [Online]. Available at: <https://www.dmi.dk/vejrarkiv/> (Accessed 23 February 2019).
- Elitech Technology. 2018. Calibration Certificate. No. Instrument: EL1711300572. Calibration date: 22 January 2018. Nanjing Test Technology Co., Ltd.
- Engineering ToolBox. 2004. Humidity Ratio of Air. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/humidity-ratio-air-d_686.html (Accessed 01 April 2019).
- Engineering ToolBox. 2004. Universal and Individual Gas Constants. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/individual-universal-gas-constant-d_588.html (Accessed 01 April 2019).
- Engineering ToolBox. 2004. Water Vapor and Saturation Pressure in Humid Air. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/water-vapor-saturation-pressure-air-d_689.html (Accessed 01 April 2019).
- Isover. 2016. Insulation Solutions for Thermal Solar Collectors. Isover Saint-Gobain. [Online]. Available at: https://www.isover-technical-insulation.com/sites/isover-ti.com/files/assets/documents/2016-06_-_isover_solutions_for_solar.pdf (Accessed 26 March 2019).

- Isover. 2017. Leverandørbrugsanvisning for ISOVER ULTIMATE.
<https://www.isover.dk/sites/isover.dk/files/assets/documents/leverandørbrugsanvisning-isover-ultimate.pdf>. Isover Saint-Gobain. [Online]. Available at:
<https://www.isover.dk/sites/isover.dk/files/assets/documents/leverandørbrugsanvisning-isover-ultimate.pdf> (Accessed 26 March 2019).
- Jensen, F. & Krigshaar, M. Varmebehov og varmemeforbrug. In: Varme Ståbi. 2015. Lauritsen, A.B (ed.). Odense, Praxis.
- Köhl, M. & Heck, M. Environmental Stress Conditions. 2004. In Performance and Durability Assessment: Optical Materials for Solar Thermal Systems. Eds. Köhl, M., Carlsson, B., Jorgensen, G. & Czanderna, A.W. Amsterdam, Elsevier B.V.
- Köhls, M., Kübler, V. & Heck, M. 2007. Optimisation of the micro-climate in solar collectors. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 91 (2007) 721-726.
- Kristiansen, F. & Rode, C. 1990. Varmeledningsevne ved forskellige fugtforhold. Del af Varme- og fugttekniske undersøgelser af alternative isoleringsmaterialer. Sagsrapport SR-0004. ISSN 1396-402x. Institut for Bygninger og Energi. Danmarks Tekniske Universitet.
- Mander, P. 2012. How to convert relative humidity to absolute humidity. Carnotcycle. The classical blog on thermodynamics. [Online]. Available at: <https://carnotcycle.wordpress.com/2012/08/04/how-to-convert-relative-humidity-to-absolute-humidity/> (Accessed 30 March 2019).
- Matthews, T.G. & Westley, R.R. Formaldehyde Emissions from Selected Fibrous Glass Insulation Products. In: *Thermal Insulation: Materials and Systems*, ASTM STP 922. Powell, F.J. & Matthews, S.L. (Eds.). 1987, pp. 223-237. American Society for Testing Materials, Philadelphia.
- Polezhaev, Y.V. 2019. Thermal conductivity. DOI: 10.1615/AtoZ.t.thermal_conductivity. [Online]. Available at: <http://www.thermopedia.com/content/1186/> (Accessed 01 April 2019).
- Rockwool. 2005. Den lille lune – for byggefagfolk. Hedehusene, Rockwool A/S.
- Sandberg, P. I. 1987. Thermal Resistance of a Wet Mineral Fiber Insulation. In: *Thermal Insulation: Materials and Systems*, ASTM STP 922. Powell, F.J. & Matthews, S.L. (Eds.). 1987, pp. 394-404. American Society for Testing Materials, Philadelphia.

Tabrizi, M.R., Lyon, S.B., Thompson, G.E. & Ferguson, J.M. 1991. The long-term corrosion of aluminium in alkaline media. *Corrosion Science*. Volume 32, Issue 7, 1991, Pages 733-742.

BILAGSOVERSIGT

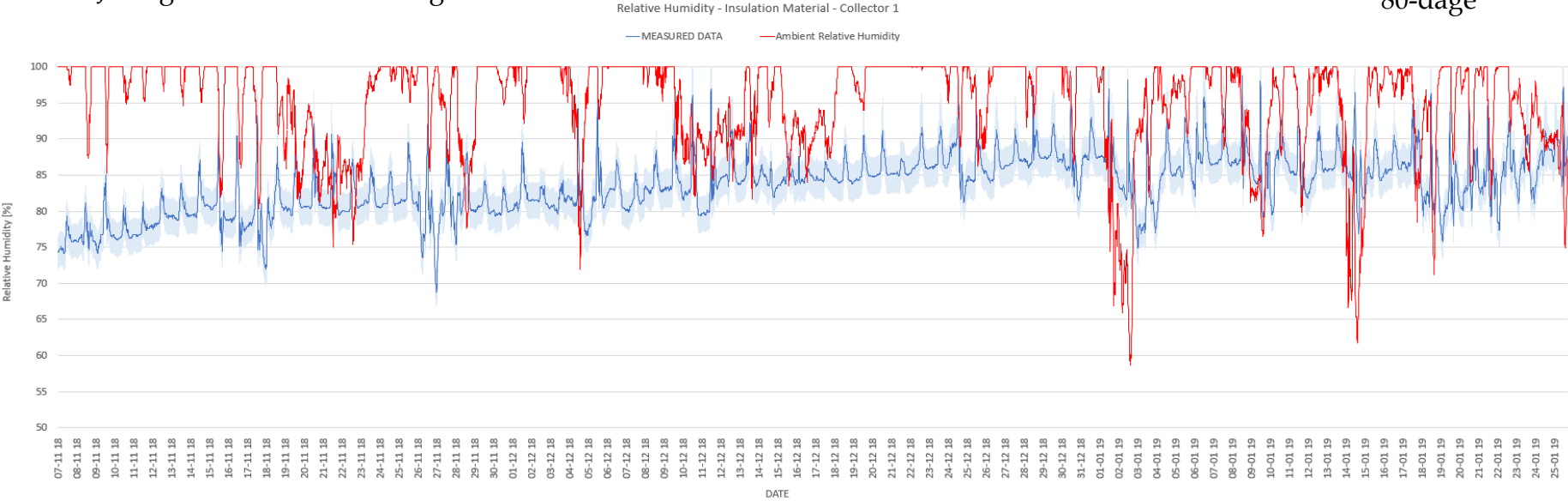
BILAG I. Målepositioner på solfangere.



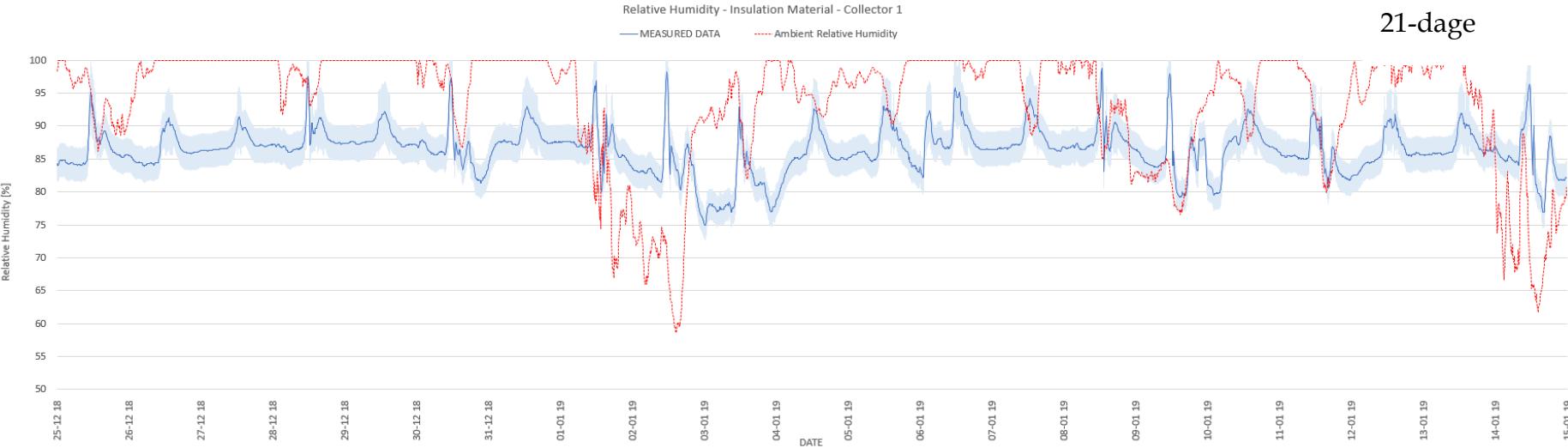
BILAG II. Fugtbalance

Lokation: Jelling Varmeværk – Solfanger 1

80-dage

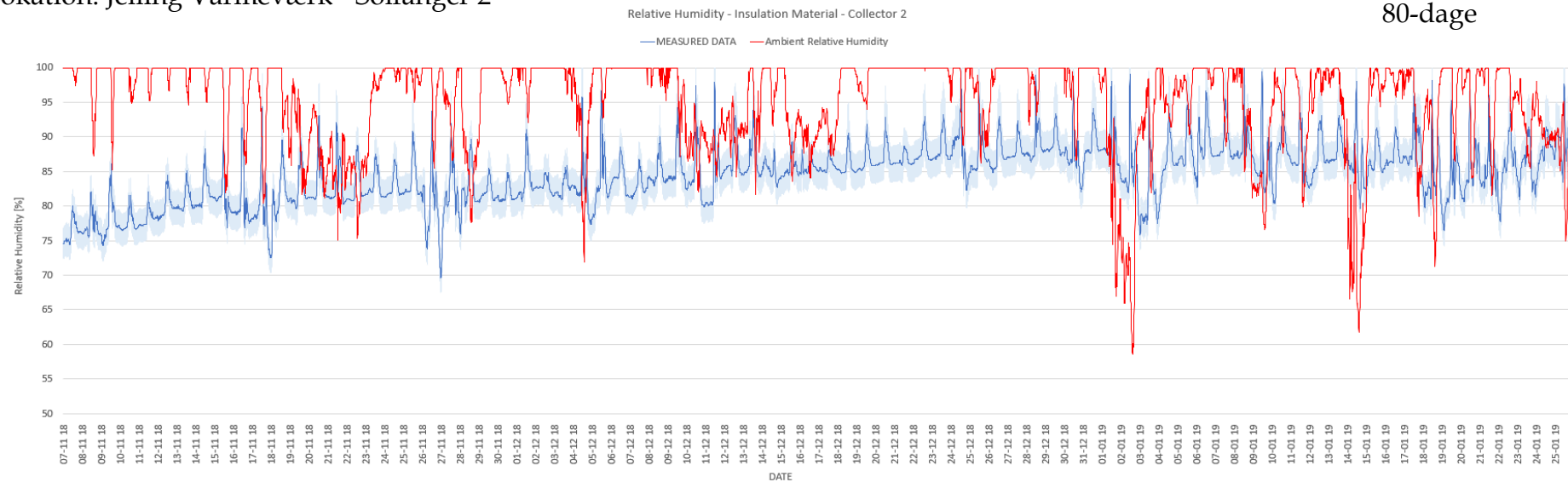


21-dage

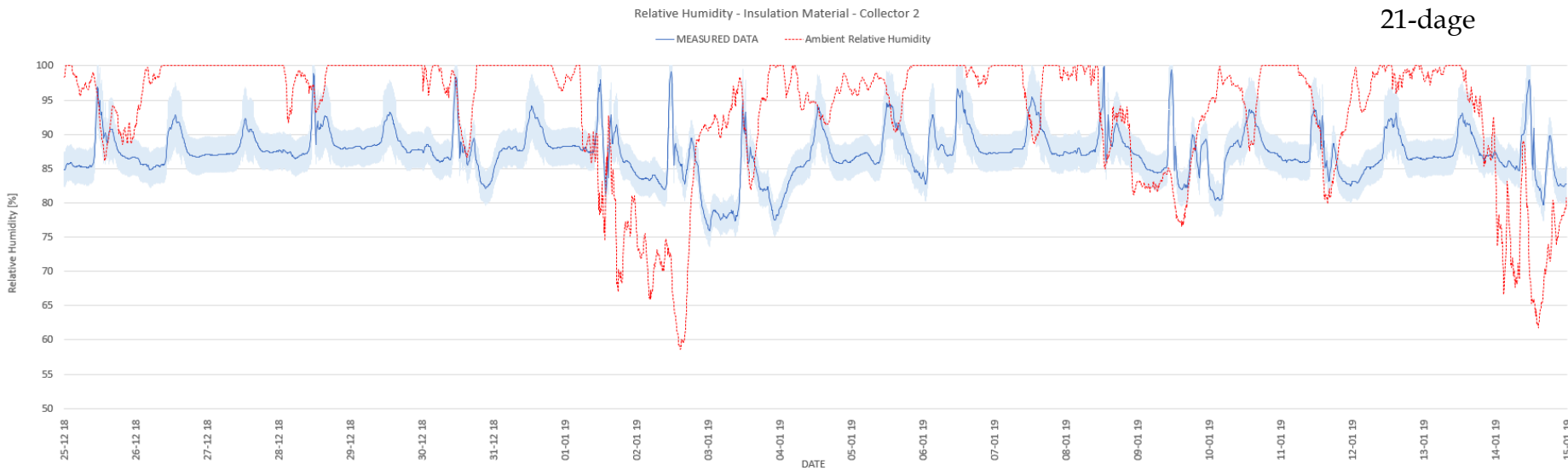


Lokation: Jelling Varmeværk - Solfanger 2

80-dage

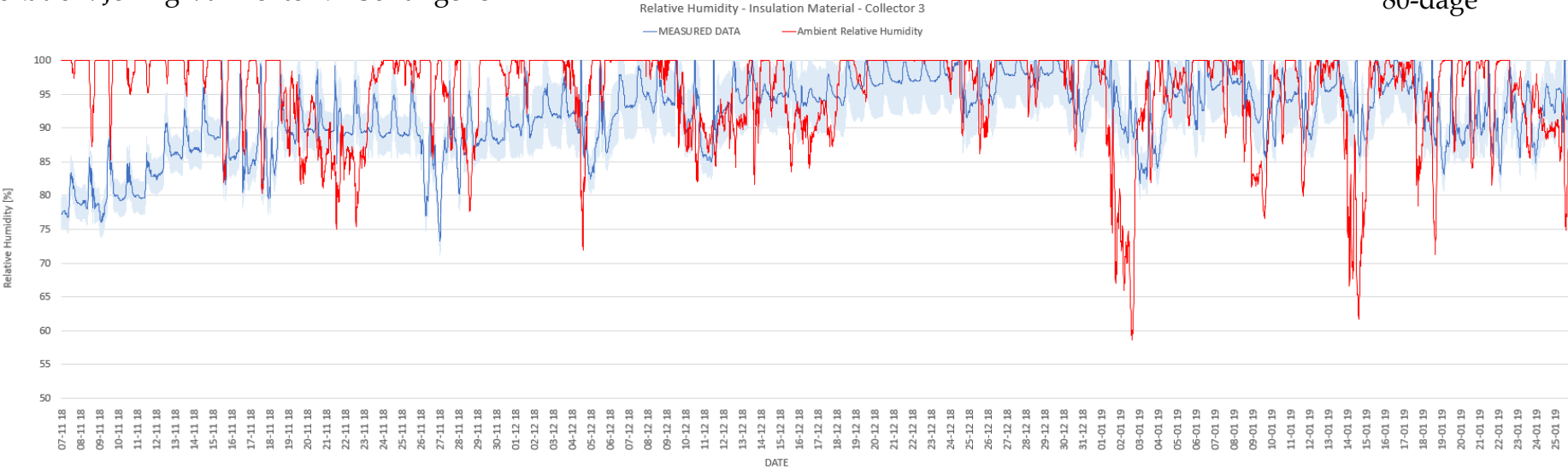


21-dage

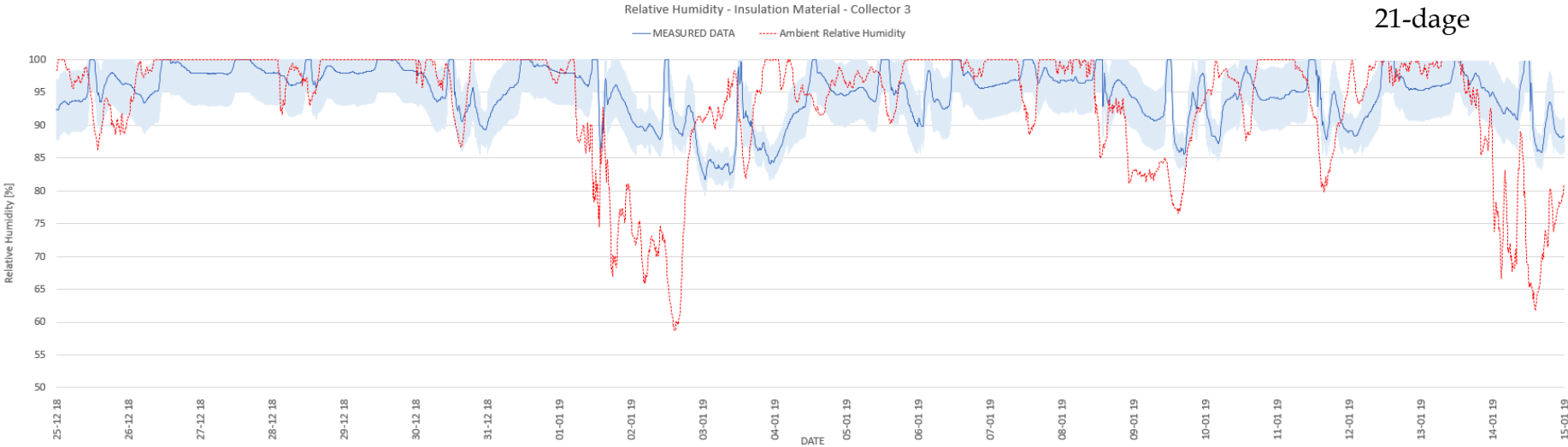


Lokation: Jelling Varmeværk – Solfanger 3

80-dage

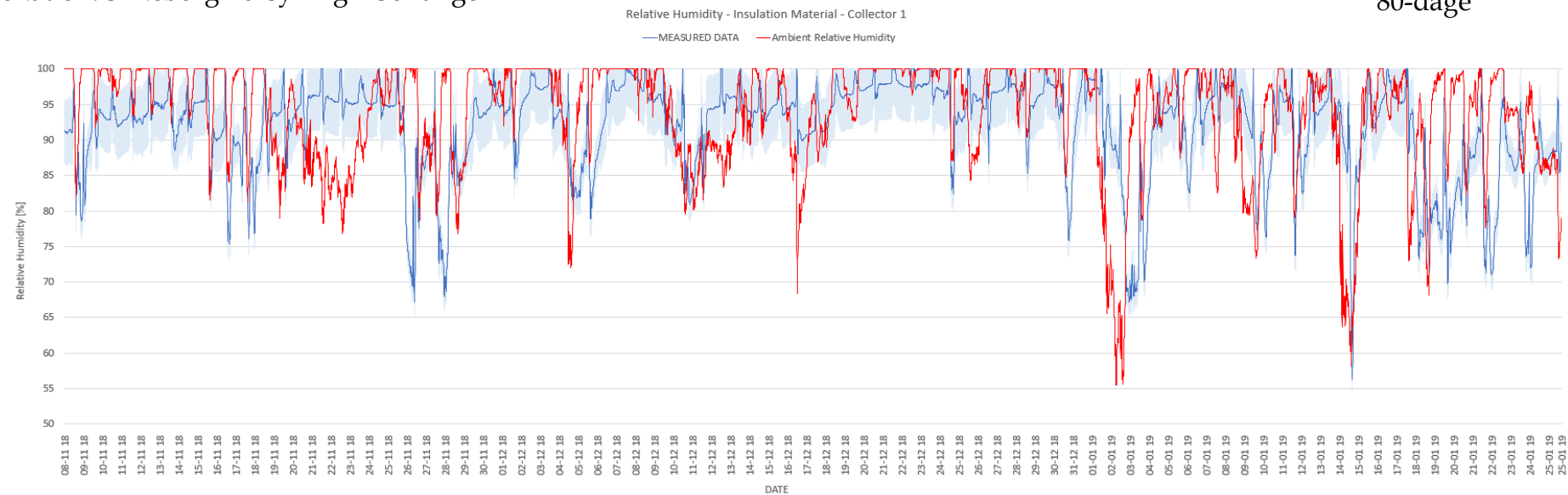


21-dage



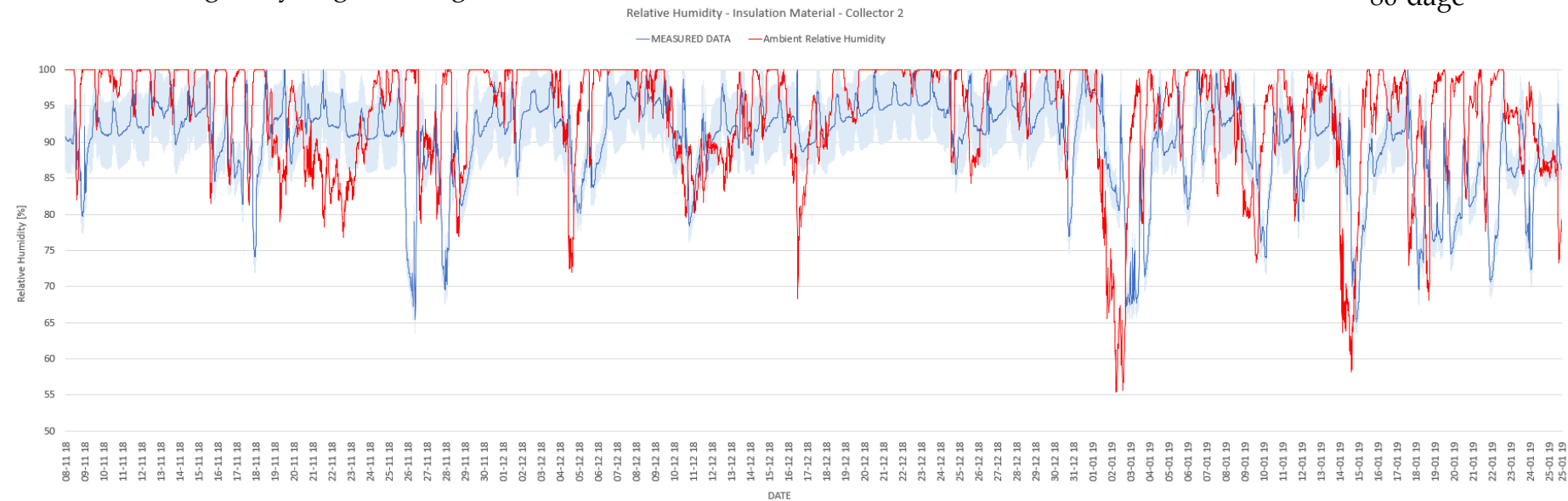
Lokation: Silkeborg Forsyning – Solfanger 1

80-dage

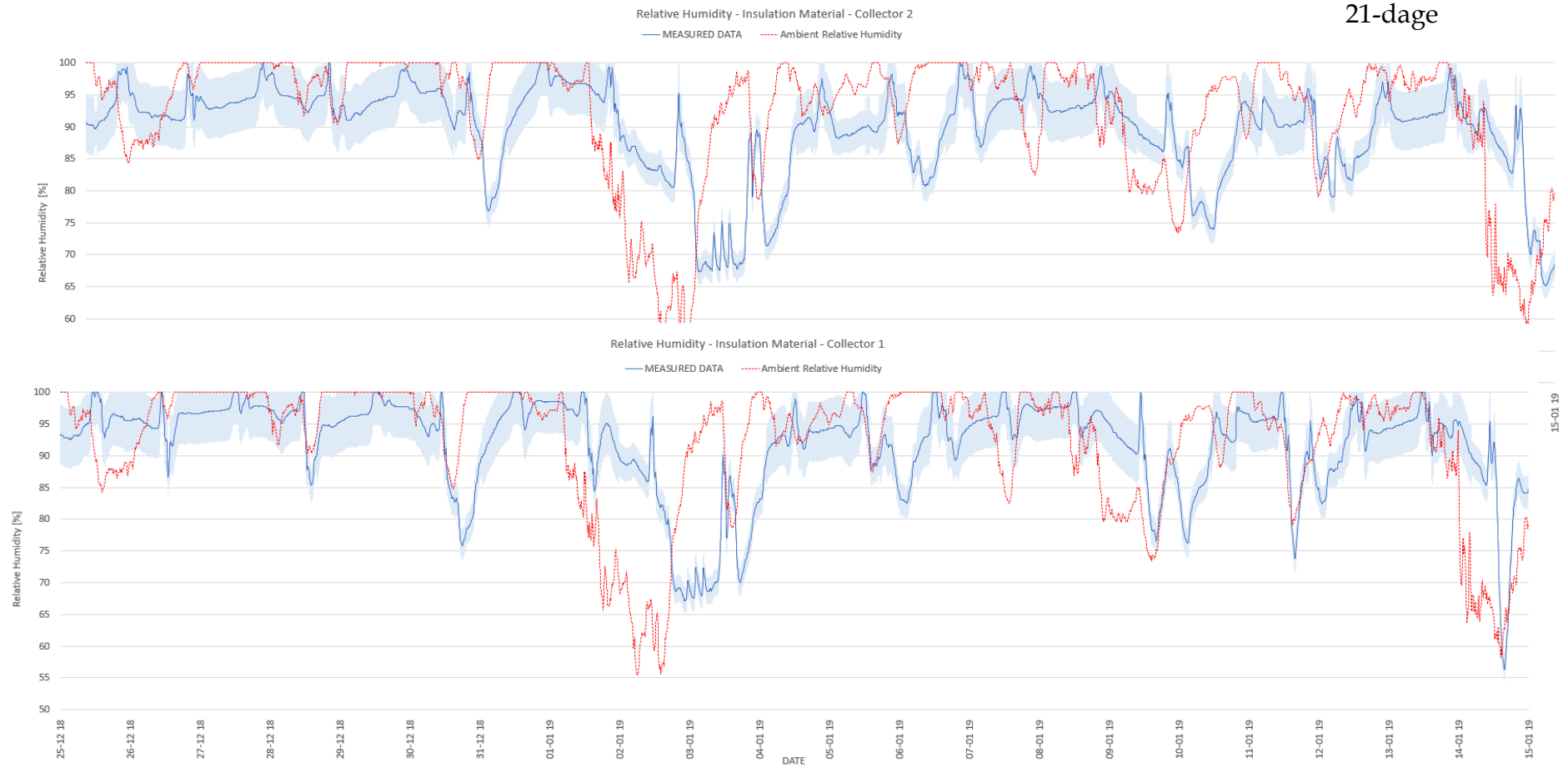


Lokation: Silkeborg Forsyning – Solfanger 2

80-dage

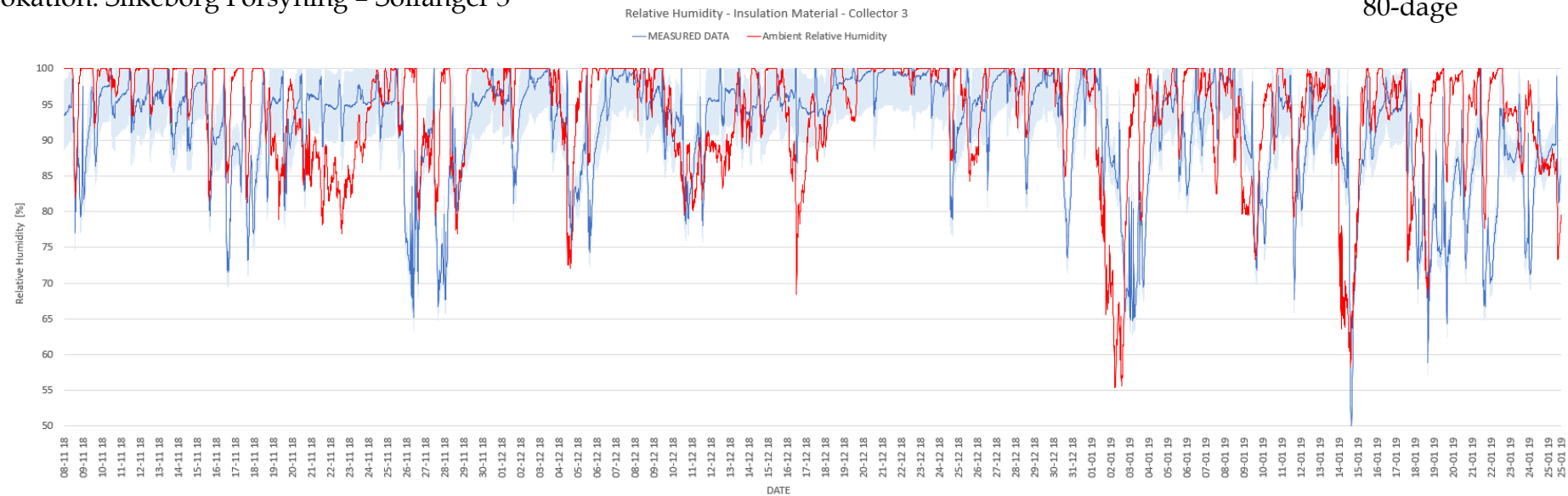


21-dage

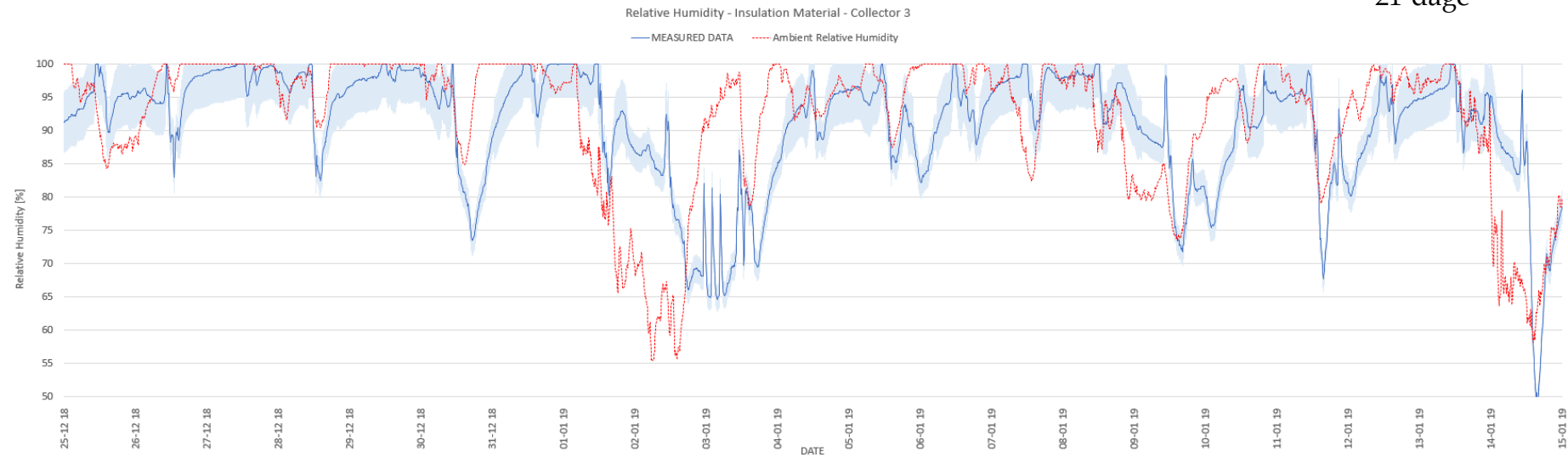


Lokation: Silkeborg Forsyning – Solfanger 3

80-dage



21-dage



BILAG III. Isoleringsevne målinger

Lokation: Jægerspris Kraftvarme

Thermal													
Project Name	No.	Collector No.	Conductivity	Test Temp	Out. Temp	Out. RH	Time	Location	Type	Row/Panel	Manufacturer	Testing Date	Deviation
			[W/mK]	[°C]	[°C]	[%]							[%]
Weather:		Clear Sky & Sun											
REFERENCE		N/A	0,0349	8,27	3,6	83,3	10:42	N/A	Isover 0,037	N/A	Isover	12-12-2018	
Jægerspris Kraftvarme	1	1568.5	0,0391	11,76	3,6	83,3	11:06	Bottom	GJ 140D	1/4	Sunmark A/S	12-12-2018	12,03%
Jægerspris Kraftvarme	2	1568.5	0,0371	13,53	3,6	83,3	11:23	Bottom	GJ 140D	1/4	Sunmark A/S	12-12-2018	6,30%
Jægerspris Kraftvarme	3	1568.5	0,0377	18,60	3,6	83,3	11:55	Top	GJ 140D	1/4	Sunmark A/S	12-12-2018	8,02%
Jægerspris Kraftvarme	4	1568.5	0,0389	18,41	3,6	83,3	12:22	Top	GJ 140D	1/4	Sunmark A/S	12-12-2018	11,46%
Jægerspris Kraftvarme	5	772.5	0,0370	14,60	3,6	83,3	12:56	Bottom	GJ 140D	1/6	Sunmark A/S	12-12-2018	6,02%
Jægerspris Kraftvarme	6	772.5	0,0374	15,38	3,6	83,3	13:16	Bottom	GJ 140D	1/6	Sunmark A/S	12-12-2018	7,16%
Jægerspris Kraftvarme	7	772.5	0,0363	20,07	3,6	83,3	13:38	Top	GJ 140D	1/6	Sunmark A/S	12-12-2018	4,01%
Jægerspris Kraftvarme	8	772.5	0,0376	19,00	3,6	83,3	14:03	Top	GJ 140D	1/6	Sunmark A/S	12-12-2018	7,74%
Jægerspris Kraftvarme	9	1136.5	0,0359	13,83	3,6	83,3	14:33	Bottom	GJ 140D	8/1	Sunmark A/S	12-12-2018	2,87%
Jægerspris Kraftvarme	10	1136.5	0,0363	14,09	3,6	83,3	14:51	Bottom	GJ 140D	8/1	Sunmark A/S	12-12-2018	4,01%
Jægerspris Kraftvarme	11	1136.5	0,0256	10,35	3,6	83,3	15:10	Top	GJ 140D	8/1	Sunmark A/S	12-12-2018	-26,65%
Jægerspris Kraftvarme	12	1136.5	0,0379	12,83	3,6	83,3	15:28	Top	GJ 140D	8/1	Sunmark A/S	12-12-2018	8,60%
Weather:		Cloudy & Dark											
Jægerspris Kraftvarme	13	1351.5	0,0367	8,37	3,6	83,3	15:59	Bottom	GJ 140D	38/1	Sunmark A/S	12-12-2018	5,16%
Jægerspris Kraftvarme	14	1351.5	0,0370	7,94	3,6	83,3	16:08	Top	GJ 140D	38/1	Sunmark A/S	12-12-2018	6,02%
Jægerspris Kraftvarme	15	1395.5	0,0368	7,38	3,6	83,3	16:47	Bottom	GJ 140D	38/13	Sunmark A/S	12-12-2018	5,44%
Jægerspris Kraftvarme	16	1395.5	0,0366	7,62	3,6	83,3	17:07	Top	GJ 140D	38/13	Sunmark A/S	12-12-2018	4,87%

Lokation: Jægerspris Kraftvarme

Project Name	No.	Collector No.	Thermal Conductivity [W/mK]	Test Temp [°C]	Out. Temp [°C]	Out. RH [%]	Time	Location	Type	Row/Panel	Manufacturer	Testing Date	Deviation [%]
Weather: Cloudy & Snow													
REFERENCE		N/A	0,0360	10,29	2,1	87,2	10:02	N/A	Isover 0,037	N/A	Isover	14-12-2018	
Jægerspris Kraftvarme	17	1602.5	0,0392	7,15	2,1	87,2	10:26	Bottom 1	GJ 140D	4/10	Sunmark A/S	14-12-2018	8,89%
Jægerspris Kraftvarme	18	1602.5	0,0397	7,59	2,1	87,2	10:45	Bottom 1	GJ 140D	4/10	Sunmark A/S	14-12-2018	10,28%
Jægerspris Kraftvarme	19	1602.5	0,0401	8,08	2,1	87,2	11:10	Bottom 2	GJ 140D	4/10	Sunmark A/S	14-12-2018	11,39%
Jægerspris Kraftvarme	20	1602.5	0,0407	8,02	2,1	87,2	11:35	Bottom 2	GJ 140D	4/10	Sunmark A/S	14-12-2018	13,06%
Jægerspris Kraftvarme	21	1602.5	0,0411	8,40	2,1	87,2	12:01	Bottom 3	GJ 140D	4/10	Sunmark A/S	14-12-2018	14,17%
Jægerspris Kraftvarme	22	1602.5	0,0433	9,07	2,1	87,2	12:21	Bottom 3	GJ 140D	4/10	Sunmark A/S	14-12-2018	20,28%
Jægerspris Kraftvarme	23	1602.5	0,0396	8,03	2,1	87,2	12:49	Bottom 4	GJ140D	4/10	Sunmark A/S	14-12-2018	10,00%
Jægerspris Kraftvarme	24	1602.5	0,0396	8,92	2,1	87,2	13:08	Bottom 4	GJ 140D	4/10	Sunmark A/S	14-12-2018	10,00%
Jægerspris Kraftvarme	25	1604.5	0,1430	7,10	2,1	87,2	13:31	Drain Side	GJ140D	3/9	Sunmark A/S	14-12-2018	297,22%
Jægerspris Kraftvarme	26	1604.5	0,0676	6,33	2,1	87,2	13:49	Drain Side	GJ140D	3/9	Sunmark A/S	14-12-2018	87,78%
Jægerspris Kraftvarme	27	1604.5	0,1460	8,59	2,1	87,2	14:09	Drain Center	GJ140D	3/9	Sunmark A/S	14-12-2018	305,56%
Jægerspris Kraftvarme	28	1601.5	0,0397	10,83	2,1	87,2	14:40	Inlet/Outlet	GJ140D	4/8	Sunmark A/S	14-12-2018	10,28%

Lokation: Jelling Varmeværk

Thermal									Deviation				
Project Name	No.	Collector No.	Conductivity [W/mK]	Test Temp [°C]	Out. Temp [°C]	Out. RH [%]	Time	Location	Type	Row/Panel	Manufacturer	Testing Date	[%]
Weather:		Cloudy & Windy + Rain											
REFERENCE		N/A	0,0400	12,08	6,7	89,6	10:50	N/A	Isover 0,037	N/A	Isover	16-01-2019	-6,25%
REFERENCE		N/A	0,0375	11,93	6,7	89,6	11:10	N/A	Isover 0,037	N/A	Isover	16-01-2019	
Jelling Varmeværk	29	1275	0,0367	13,37	6,7	89,6	11:42	Top	SF500-15	041/07	Savosolar Oyj	16-01-2019	-2,13%
Jelling Varmeværk	30	1275	0,0369	14,23	6,7	89,6	12:07	Bottom	SF500-15	041/07	Savosolar Oyj	16-01-2019	-1,60%
Jelling Varmeværk	31	1275	0,0358	13,26	6,7	89,6	13:36	Bottom 1	SF500-15	041/07	Savosolar Oyj	16-01-2019	-4,53%
Jelling Varmeværk	32	1275	0,0374	13,02	6,7	89,6	13:17	Bottom 2	SF500-15	041/07	Savosolar Oyj	16-01-2019	-0,27%
Jelling Varmeværk	33	1275	0,0423	14,58	6,7	89,6	12:29	Bottom 3	SF500-15	041/07	Savosolar Oyj	16-01-2019	12,80%
Jelling Varmeværk	34	1275	0,0365	13,45	6,7	89,6	12:52	Bottom 4	SF500-15	041/07	Savosolar Oyj	16-01-2019	-2,67%
Jelling Varmeværk	35	1257	0,0373	14,47	6,7	89,6	14:02	Top	SF500-15	041/05	Savosolar Oyj	16-01-2019	-0,53%
Jelling Varmeværk	36	1257	0,0367	13,96	6,7	89,6	14:23	Bottom	SF500-15	041/05	Savosolar Oyj	16-01-2019	-2,13%
Jelling Varmeværk	37	1061	0,0357	14,42	6,7	89,6	14:58	Top	SF500-15	008/05	Savosolar Oyj	16-01-2019	-4,80%
Jelling Varmeværk	38	1061	0,0366	14,39	6,7	89,6	15:19	Bottom	SF500-15	008/05	Savosolar Oyj	16-01-2019	-2,40%
Jelling Varmeværk	39	1061	0,0378	11,71	6,7	89,6	15:41	Bottom 1	SF500-15	008/05	Savosolar Oyj	16-01-2019	0,80%

Lokation: Silkeborg Forsyning

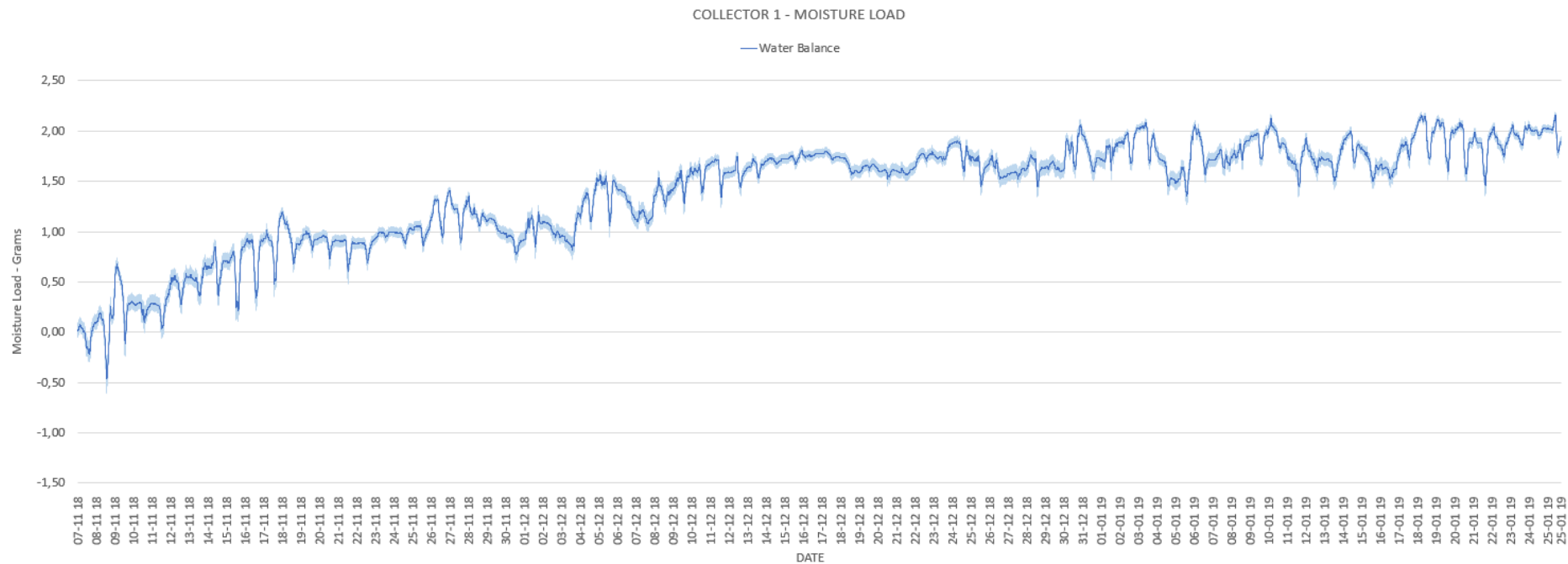
Project Name	No.	Collector No.	Thermal Conductivity [W/mK]	Test Temp [°C]	Out. Temp [°C]	Out. RH [%]	Time	Location	Type	Row/Panel	Manufacturer	Testing Date	Deviation [%]
Weather:		Cloudy & Snow											
REFERENCE		N/A	0,0384	9,41	2,6	95,4	10:52	N/A	Isover 0,037	N/A	Isover	17-01-2019	
Silkeborg Forsyning	40	65412	0,0366	9,91	2,6	95,4	11:11	Top	HT-SA 35/10	M31/05	Arcon-Sunmark	17-01-2019	-4,69%
Silkeborg Forsyning	41	65412	0,0375	10,12	2,6	95,4	11:39	Bottom	HT-SA 35/10	M31/05	Arcon-Sunmark	17-01-2019	-2,34%
Silkeborg Forsyning	42	65412	0,0401	7,08	2,6	95,4	12:25	Bottom 1	HT-SA 35/10	M31/05	Arcon-Sunmark	17-01-2019	4,43%
Silkeborg Forsyning	43	65412	0,0539	8,39	2,6	95,4	12:46	Bottom 2	HT-SA 35/10	M31/05	Arcon-Sunmark	17-01-2019	40,36%
Silkeborg Forsyning	44	65412	0,0377	8,42	2,6	95,4	13:01	Bottom 3	HT-SA 35/10	M31/05	Arcon-Sunmark	17-01-2019	-1,82%
Silkeborg Forsyning	45	65412	0,0388	13,34	2,6	95,4	13:20	Bottom 4	HT-SA 35/10	M31/05	Arcon-Sunmark	17-01-2019	1,04%
Silkeborg Forsyning	46	65412	0,0381	10,01	2,6	95,4	13:45	Bottom 5	HT-SA 35/10	M31/05	Arcon-Sunmark	17-01-2019	-0,78%
Silkeborg Forsyning	47	68081	0,0383	10,69	2,6	95,4	14:16	Bottom 1	HT-A 35/10	J43/01	Arcon-Sunmark	17-01-2019	-0,26%
Silkeborg Forsyning	48	68081	0,0383	8,21	2,6	95,4	14:39	Bottom 2	HT-A 35/10	J43/01	Arcon-Sunmark	17-01-2019	-0,26%
Silkeborg Forsyning	49	68085	0,0371	6,85	2,6	95,4	15:00	Bottom 1	HT-A 35/10	J43/02	Arcon-Sunmark	17-01-2019	-3,39%
Silkeborg Forsyning	50	68085	0,0379	7,17	2,6	95,4	15:22	Bottom 2	HT-A 35/10	J43/02	Arcon-Sunmark	17-01-2019	-1,30%
Silkeborg Forsyning	51	68085	0,0427	5,07	2,6	95,4	15:40	Drain Hole	HT-A 35/10	J43/02	Arcon-Sunmark	17-01-2019	11,20%
Silkeborg Forsyning	52	68085	0,0390	5,58	2,6	95,4	16:00	Drain Hole	HT-A 35/10	J43/02	Arcon-Sunmark	17-01-2019	1,56%

Lokation: Grenaa Varmeværk

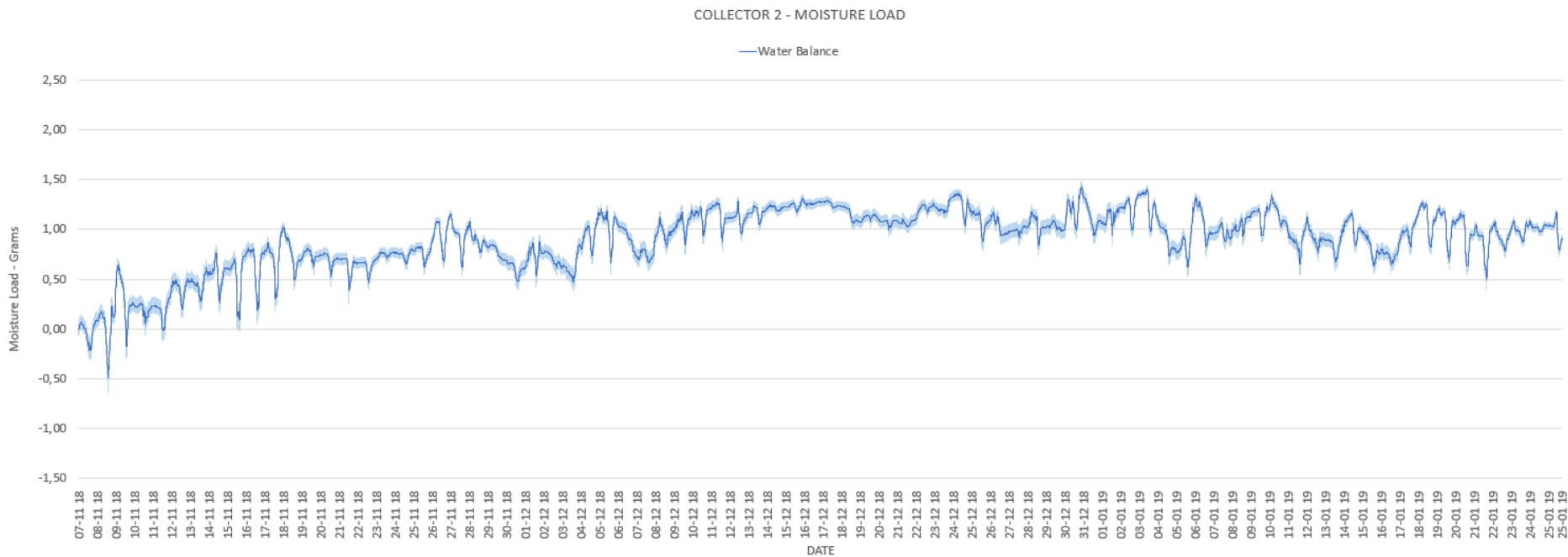
Thermal									Deviation				
Project Name	No.	Collector No.	Conductivity [W/mK]	Test Temp [°C]	Out. Temp [°C]	Out. RH [%]	Time	Location	Type	Row/Panel	Manufacturer	Testing Date	[%]
Weather: Sunny													
REFERENCE		N/A	0,0354	6,22	1,5	73	12:30	N/A	Isover 0,037	N/A	Isover	18-01-2019	
Grenaa Varmeværk	53	19402	0,0375	33,11	1,5	73	12:56	Top	HT-A 35/10	01/01	Arcon Solar	18-01-2019	5,93%
Grenaa Varmeværk	54	19402	0,0384	24,49	1,5	73	13:19	Bottom	HT-A 35/10	01/01	Arcon Solar	18-01-2019	8,47%
Grenaa Varmeværk	55	19402	0,0409	16,46	1,5	73	13:40	Bottom 2	HT-A 35/10	01/01	Arcon Solar	18-01-2019	15,54%
Grenaa Varmeværk	56	19402	0,0397	14,93	1,5	73	14:02	Bottom 4	HT-A 35/10	01/01	Arcon Solar	18-01-2019	12,15%
Grenaa Varmeværk	57	16257	0,0392	26,90	1,5	73	14:59	Bottom 2	HT-A 35/10	01/09	Arcon Solar	18-01-2019	10,73%
Grenaa Varmeværk	58	16257	0,0402	20,10	1,5	73	14:33	Bottom 4	HT-A 35/10	01/09	Arcon Solar	18-01-2019	13,56%
Grenaa Varmeværk	59	16911	0,0456	17,24	1,5	73	15:53	Bottom 2	HT-SA 35/10	01/11	Arcon Solar	18-01-2019	28,81%
Grenaa Varmeværk	60	16911	0,0474	18,60	1,5	73	15:26	Bottom 4	HT-SA 35/10	01/11	Arcon Solar	18-01-2019	33,90%

BILAG IV. Fugtindhold

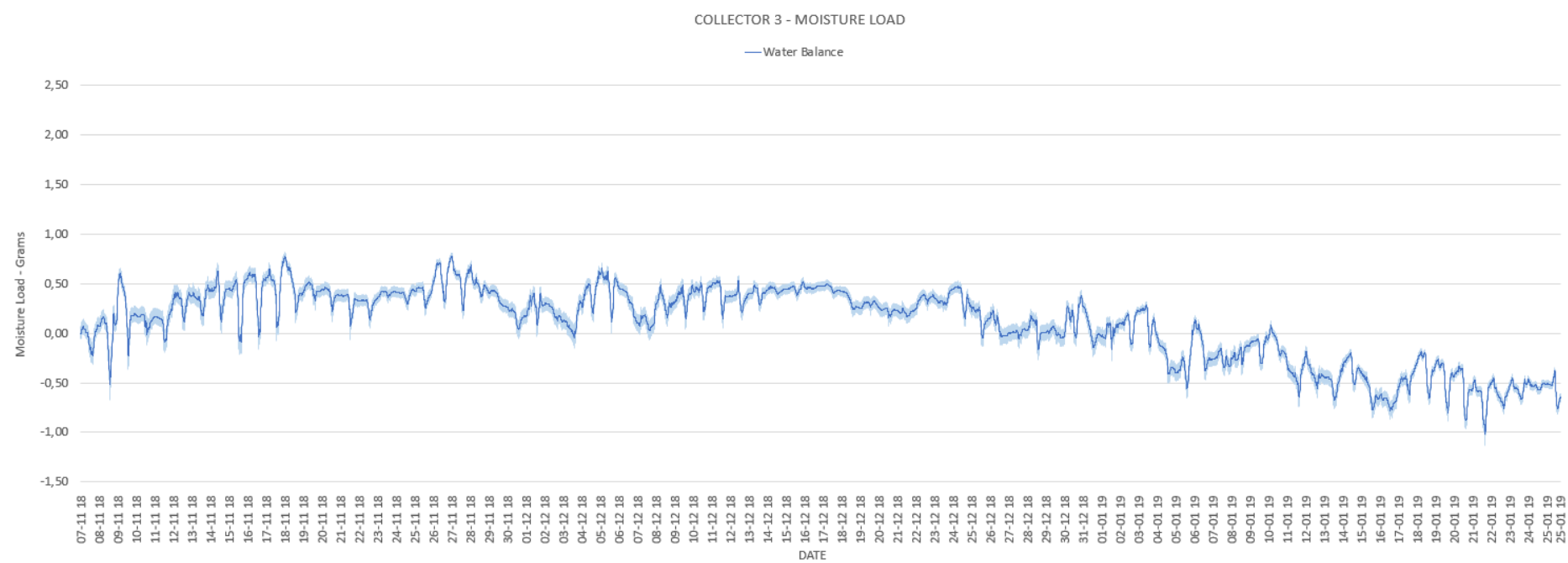
Lokation: Jelling Varmeværk – Solfanger 1



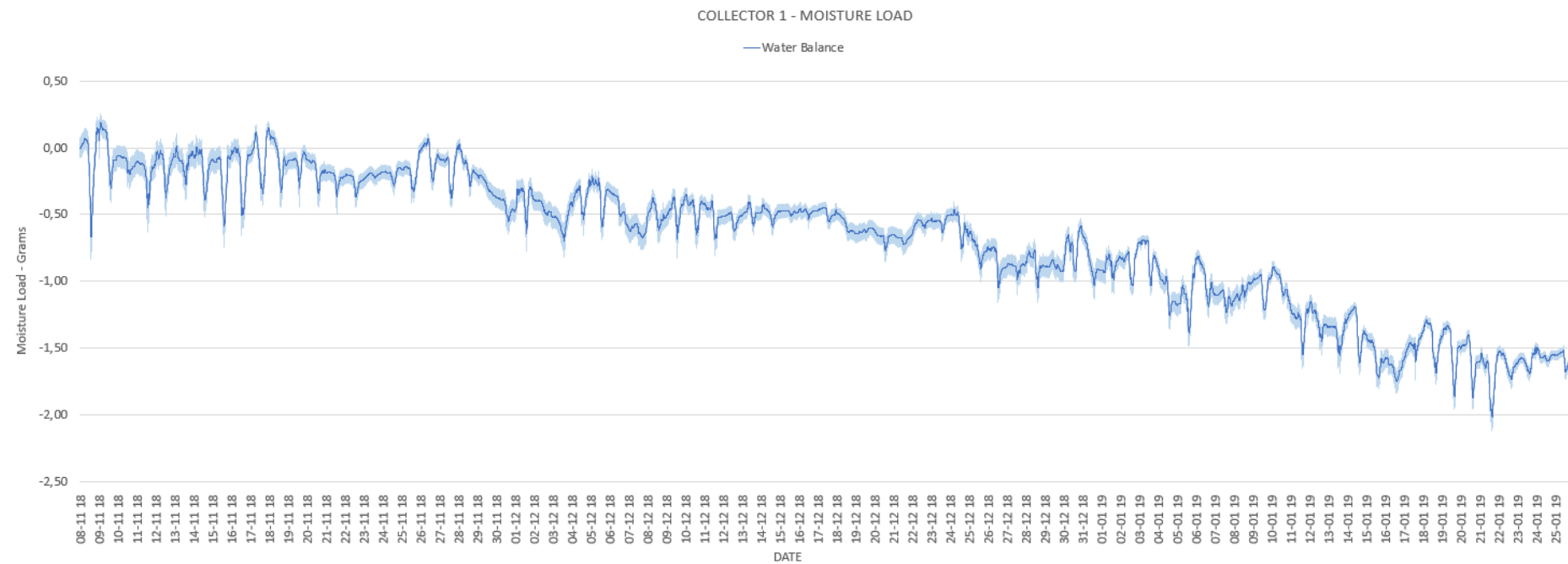
Lokation: Jelling Varmeværk – Solfanger 2



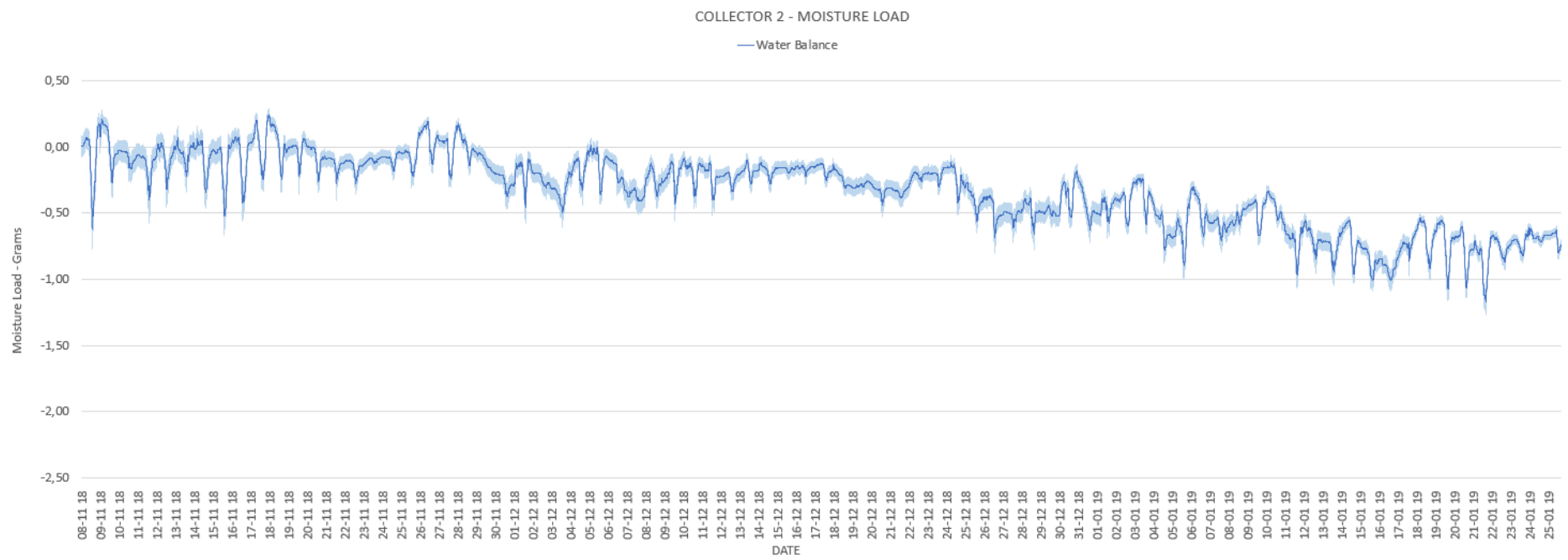
Lokation: Jelling Varmeværk – Solfanger 3



Lokation: Silkeborg Forsyning – Solfanger 1



Lokation: Silkeborg Forsyning – Solfanger 2



Lokation: Silkeborg Forsyning – Solfanger 3

