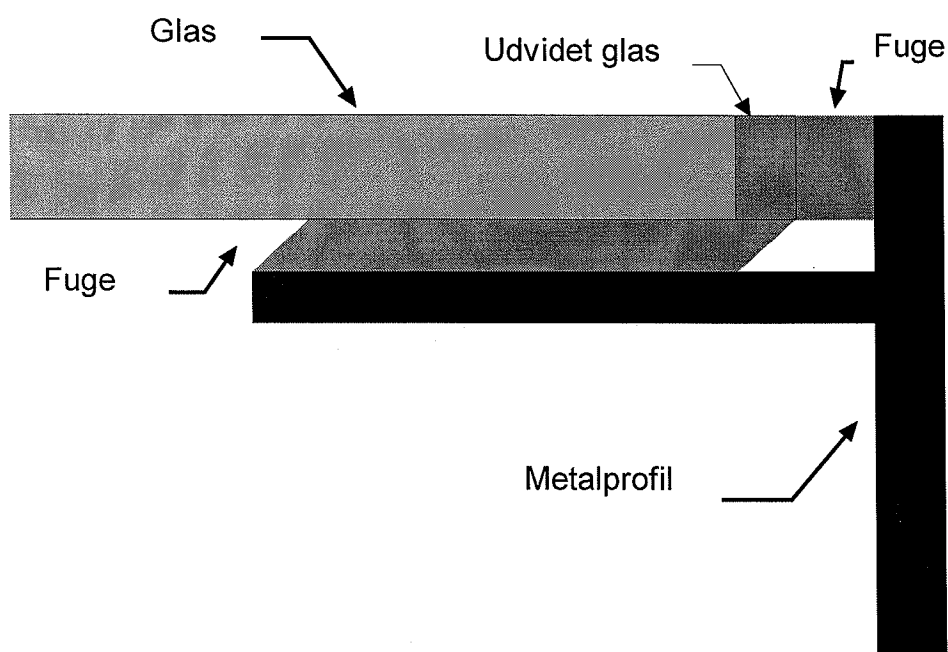


Deformationer i solfangere

Niels Garde
Lars Thomsen Nielsen
Ole Holck



RAPPORT
R-008

1996

ISSN 1396-4011
ISBN 87-7877-007-6

INSTITUT FOR BYGNINGER OG ENERGI
DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET





Indholdsfortegnelse

0. Resumé	1
1. Introduktion	2
2. Dæklag og solfangerkasse	3
2.1 Dæklag af glas	3
2.1.1 Slagskygger på dæklag af glas	3
2.1.2 Dæklagets temperaturforhold i solfanger med low-flow	5
2.1.3 Dæklagets tilstand under delvis stagnation	6
2.1.4 Sammenfatning af problemer med temperaturforskel i glasdæklag	7
2.2 Dæklagets tilslutning til rammen	7
2.2.1 Temperaturforhold ved dæklagets kant ved ét dæklag	8
2.2.2 Temperaturforhold ved dæklagets kant ved to dæklag	10
2.2.3 Sammenfatning af temperaturforhold ved dæklagets kanter	11
2.3 Fuger mellem dæklag og ramme	12
2.3.1 Termisk aspekt ved fugedimensionering	12
2.3.2 Fuger ved fastspændte rammeprofiler	12
2.3.3 Fuger ved frit bevægelige rammeprofiler	14
2.3.4 Dimensionering af lastbærende fuger	15
2.3.5 Sammenfatning af fuger mellem ramme og dæklag	16
2.4 Plastdæklag	17
2.4.1 Termisk udvidelse af plastdæklag	17
2.4.2 Udbøjning grundet temperaturredifferens mellem inderside og yderside af plastdæklag	18
2.4.3 Sammenfatning af termisk udvidelse i plastdæklag	19
2.5 Dæklagets bevægelser i forhold til absorber	19
2.5.1 Indre dæklag af plastfolie	19
2.5.2 Teflon-styring ved hjælp af fastgørelse (via afstandsklodser) til absorberen	21
2.5.3 Sammenfatning af indre dæklags bevægelser	23
3. Absorbere	24
3.1 Absorbere af typen strips	24
3.1.1 Parallelkoblede absorberstrips	24
3.1.2 Parallelkoblede absorberstrips i stagnation	24
3.1.3 Parallele absorberstrips i delvis stagnation	26
3.1.4 Serielkoblede absorberstrips	26
3.1.5 Udbøjninger grundet temperaturforskelle i strippen	27
3.1.6 Sammenfatning af problemer med absorberstrips	27
3.2 Absorber af typen kanal- /Ribbepladeabsorbere	27
3.3 Plastabsorbere	27
3.3.1 Ribbepladeabsorbere i plast	28
3.3.2 Rørabsorbere i plast	29
3.3.3 Termisk udvidelse af plastabsorbere	29
3.3.4 Sammenfatning af plastabsorbere	30
3.4 Manifoldrør med tilslutning til vandrette strips	30
3.4.1 Manifoldrør med tilslutning til vandrette strips i stagnation	30
3.4.2 Manifoldrør med vandrette strips i delvis stagnation	31
4. Absorbertilslutninger til hovedrør	32
4.1 Absorber direkte tilsluttet hovedrør	32
5. Bevægelser af dæklag på grund af mekaniske belastninger	33
5.1 Sammenfatning af mekaniske belastninger	34
6. Konklusion	35
7. Referenceliste	36
8. Bilag A - Beregning af udbøjning grundet termiske udvidelser	37
9. Bilag B - Resultater af afprøvningsforsøg af dæklagstyper udført på IBE	39



0. Resumé

Institut for Bygninger og Energi (IBE) har i samarbejde med Prøvestationen for Solenergi, DTI, stillet forslag om aktiviteter vedrørende solenergi. Denne rapport er et resultat af dette arbejde og et led i en 1996-aftale med Energistyrelsen om en rammebevilling, sagsnummer 51186/96-0004.

Rapporten beskriver problematikken vedrørende deformationer i solfangere. Der er primært lagt vægt på de termiske udvidelser, der kommer i solfangeres komponenter, når systemet udsættes for ekstreme temperaturer. Problemerne er klarlagt og analyseret, dels beregningsmæssigt, men også ved praktisk udførte forsøg. Endelig er der stillet forslag til, hvordan man kan afhjælpe disse problemer.

De enkelte dele i solfangeren er gennemgået analytisk, med vægt på indflydelsen fra termiske udvidelser. Der er givet retningslinier for delenes indbyrdes sammenføjninger og materialevalg.

Til gennemførelsen af analysen er der benyttet EDB-beregninger suppleret med målinger på solfangere, både i drift og stagnation.

Programmerne, der er benyttet, er Soleff og Heat2. Soleff er et program udviklet på instituttet til beregning af de termiske forhold i en solfanger. Programmet benyttes til bestemmelse af solfangerens temperaturforhold i hhv. stagnation og drift. Resultaterne fra Soleff benyttes som inddata til Heat2, som foretager detaljerede beregninger af to-dimensionale varmestrømme for et snit i solfangerkonstruktionen.

Situationer, hvor der kan forekomme store temperaturvariationer over dæklag af glas, er undersøgt og risikoen for brud af glas vurderet. Store temperaturvariationer kan forekomme, blandt andet ved at solfangeren er delvist i skygge, ved manglende cirkulation i dele af absorberen eller ved lavt væskeflow.

I rapporten er aspekter ved fugedimensionering gennemgået med retningslinier for dimensionering.

Udvidelser i dæklag af plast er undersøgt blandt andet med undersøgelser af udbøjninger af dæklaget. Betragtninger over konstruktioner med folier som andet dæklag er inkluderet, dette indebærer forhold omkring opspænding og fastgørelse samt foliens bevægelser i spalteåbninger.

Parallelkoblede og seriekoblede absorbere er undersøgt for stagnation og delvis stagnation. Ligeledes behandles absorbere af kanaltypen og plastabsorbere.

Der er kort behandlet tilslutninger til solfangeren, manifoldrør og tilslutning til hovedrør.

Endelig findes der et afsnit om mekaniske deformationer af solfangere, primært vindlast og udbøjninger som følge heraf.

Rapporten er inddelt i afsnit, der hver beskriver enkelte dele af solfangersystemet. Da nogle dele automatisk hænger sammen, er der, for at undgå gentagelser, steder hvor der henvises til tidligere afsnit.



1. Introduktion

Ved udvikling af solfangere bør man ikke kun tage hensyn til effektiviteten, men også til driftssikkerheden og holdbarheden. Til forskel fra andre bygningsdele udsættes solfangeren for relativt høje temperaturer og hyppige temperaturvariationer. Svarende til temperaturforholdene vil der forekomme relativt store udvidelser og mange differensbevægelser af de forskellige materialer i solfangeren. I nogle tilfælde vil der forekomme spændinger i stedet for udvidelser. Dette vil i visse tilfælde føre til svigt eller reduktion af driftssikkerhed og holdbarhed.

Et problem ved behandling af disse forhold i forbindelse med udvikling af solfangere er et mangelfuldt kendskab til temperaturforhold eller materialeegenskaber samt metoder til vurdering af effekten af termiske bevægelser. Det er formålet med denne rapport at afhjælpe nogle af disse problemer.

Der er lavet beregninger på edb-programmerne Soleff og Heat2, samt udført forsøg på solfangere på forsøgsarealet på DTU, Lyngby.

Lyngby, december 1996

Niels Garde, Lars Thomsen Nielsen & Ole Holck



2. Dæklag og solfangerkasse

I dette afsnit gennemgås de forskellige dele omkring dæklaget og tilslutningen til solfangerkassen. Der findes mange forskellige former for dæklag, men her er udelukkende behandlet almindelige plane dæklag af glas og plast.

Solfangerkassen består af en bund samt siderne. Bunden er typisk lavet af en aluminiumsplade, der hviler på underliggende lægter. Aluminiumspladen er isoleret, almindeligvis med 50 mm mineraluld op til selve absorberen. Siderne (rammen) er ligeledes typisk opbygget af aluminium, der yder god styrke samt bestandighed over for klimaet. Desuden skal rammen fastholde dæklaget, samt beskytte solfangeren mod vand og snavs. Endvidere skal den virke isolerende for at øge effektiviteten af solfangeren. Muligheden for at bruge plast som rammemateriale foreligger, men brugbarheden er nok mere tvivlsom, da styrken er mindre, holdbarheden ringere (UV-nedbrydning) og de termiske bevægelser forholdsvis store. Brug af glasfiber som solfangerkasse er ikke udbredt, et nærmere studie ville være interessant, men emnet er ikke yderligere behandlet i denne rapport.

2.1 Dæklag af glas

Glas er det mest benyttede materiale i det ydre dæklag, og derfor vil der i det følgende kort blive skrevet om glas. De fleste skader på glas opstår i kanten, hvor små revner, f.eks. fra tilskæringen, forstørres op på grund af spændinger til et decideret brud. Der regnes for almindeligt glas med en trækstyrke på 30 MPa, og 50 MPa¹ for hærdet glas. Det skal dog nævnes, at trækstyrken i glasset kan forringes af små revner i kanten. Spændingerne kan f.eks. opstå som følge af træk langs med kanten, som følge af termiske udvidelser i glassets centrale dele. /4/ angiver den termiske udvidelseskoefficient til $6-9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, hvilket i værste fald vil sige, at glasset udvider sig 0,9 mm pr. meter glas ved en opvarmning på 100 K. Ved termiske udvidelser er der i /4/ udregnet en grænseværdi på 47°C mellem glasmidten og glaskanten for almindeligt glas. Det vil sige, at der vil opstå revner i glasset, hvis temperaturforskellen mellem glasmidten og glaskanten kommer over 47 K. Ved benyttelse af samme fremgangsmåde fås en grænseværdi på 79 K for hærdet glas.

Det anbefales generelt af Glasindustriens Samarbejdsorganisation at benytte hærdet glas som dæklag, samtidig med at der opfordres til at beskytte kanterne under transport og montering.

2.1.1 Slagskygger på dæklag af glas

I selve glasset kan der forekomme kritisk store temperaturforskelle i tilstødende områder af glasset. Dette kan f.eks. ske ved slagskygger, hvorved der menes, at en del af glasset er i skygge, mens en anden del ikke er i skygge. Herved fås en kritisk zone ved overgangen fra lys til skygge. Slagskygger kan forekomme, ved at dele af solfangerkonstruktionen, eksempelvis rammen, skygger for en del af glasset, eller ved at bygningsdele tæt ved solfangeren, eksempelvis skorstenen, skygger for en del af glasset. Ved rækker af solfangere kan slagskygger også forekomme, ved at den foranstående solfangerrække delvist skygger for den næste solfangerrække.

I Soleff (program udviklet til beregning af solfangeres effektivitet - /6/) er udregnet, hvor stor temperaturforskellen er mellem to glasdele i hhv. sol og slagskygge (beregnet for almindeligt glas - ikke jernfrit). Det skal dog bemærkes, at der regnes på to ens solfangere, der bliver udsat for forskellige forhold, og der regnes ikke med, at der forekommer konvektion i luften under de to glasdele. Den ene solfanger udsættes for en solbestråling på 1000 W/m^2 , heraf 20% diffust. Udetemperaturen er sat til 20°C, og vindhastigheden til 0 m/s. Stagnationstemperaturen findes til

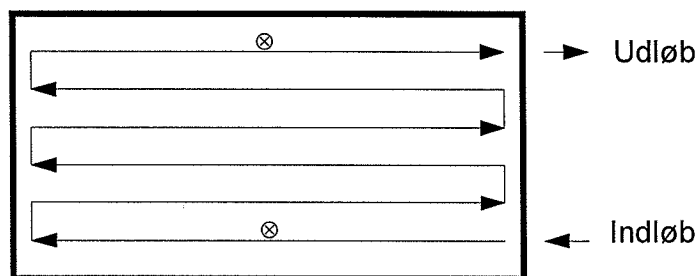
¹ Der benyttes sædvanligvis 30 MPa som trækstyrke i almindeligt glas og 50 MPa som trækstyrke i hærdet glas. Der findes ingen standarder i Danmark herom, men nogle lande har en sådan, og her er værdierne angivet til 30 MPa for almindeligt glas, og 50 MPa for hærdet glas. Efter samtale med Scanglas.



202°C, og glassets middeltemperatur findes til 80,6°C. Den anden solfanger udsættes for en solbestråling på 100 W/m², alt sammen diffust. Udetemperaturen og vindhastigheden er uændret. Her fås en stagnationstemperatur på 38,2°C, og en glasmiddeltemperatur på 19,4°Cⁱⁱ. Der fås altså en glastemperaturforskel på godt 61 K mellem de to glasdele. Dette er over grænseværdien for almindeligt glas, og under ovenstående forudsætninger vil almindeligt glas altså revne. Tilsvarende simulationer for jernfrit glas (der absorberer mindre solstråling) viser en glastemperaturforskel på godt 60 K mellem de to glasdele. Det ses altså, at det ikke har nogen betydning, om der er tale om almindeligt glas eller jernfrit glas, hvad angår slagskygger.

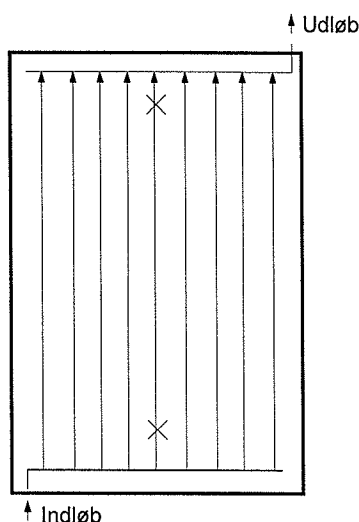
Der er udført målinger for at undersøge temperaturforholdene for solfangere i slagskygge. Forsøgene er udført ved at afskærme den nederste del af en solfanger i stagnation. Målingerne er udført ved brug af strålingstermometer. Forsøgene er udført ved en bestrålingsstyrke på 885 W/m², heraf 145 W/m² diffust, udetemperatur på 26°C og næsten ingen vind. I beregninger bruges 2 m/s.

Den første solfanger har et 4 mm tykt hærdet jernfrit glas som dæklag og en selektiv absorber (Sunstrip), med 25 mm luftmellemrum mellem glas og absorber. Solfangeren er 2,46 m bred og 1,25 m høj. Bagsideisoleringen er på 50 mm mineraluld. Grænsen mellem skygge og sol gik i en højde af 90 cm målt fra bunden af solfangeren. Målingerne viste en glastemperaturforskel mellem skygge og sol på 34°C. Målepunkterne er vist på Figur 2-1.



Figur 2-1. Solfanger med serielkoblede rør. Krydsene viser målepunkter.

Den anden solfanger har som dæklag et 4 mm tykt jernfrit glas, en selektiv absorber (Sunstrip) og 25 mm luftmellemrum mellem disse. Solfangeren er 2,07 m høj og 1,12 m bred. Bagsideisoleringen er 50 mm mineraluld. Grænsen mellem skygge og sol gik i en højde af 90 cm målt fra bunden af solfangeren. Målingerne viste en glastemperaturforskel mellem skygge og sol på 22 K. Målepunkterne er vist på Figur 2-2.



Figur 2-2. Solfanger med parallelkoblede rør. Krydsene viser målepunkter.

ⁱⁱ Det kan umiddelbart undre, at glastemperaturen ligger under lufttemperaturen, men det skyldes at glasset udsender stråling til himmelrummet, der er koldere end luften. Glasset modtager rent faktisk energi fra luften i form af konvektion.



Selve målingerne er udført med et strålingstermometer af typen KT16 fra Heimann GMBH. Usikkerheden på strålingstermometret er anført til 0,5 K.

Den relativt store temperaturdifferens i de to forsøg skyldes formentligt, at skyggegivenen for den høje solfanger var meget tæt på dæklaget og kan have virket som en konvektionshindring.

For bedre at kunne sammenligne de målte resultater med de beregnede resultater er der lavet yderligere beregninger, hvor solfangeren beregnes i forhold, der svarer til de målte forhold. Dvs. der i beregningerne benyttes en total bestrålingsstyrke på 885 W/m^2 og en vindstyrke på 2 m/s. Beregningerne viste en glastemperaturdifferens (for begge solfangere) på godt 27 K, hvilket ligger midt mellem de to målte differenser (på hhv. 22 K og 34 K). Det antages derfor at man kan benytte Soleff til udregning af de to glastemperaturer - den ene i skygge, og den anden i sol. De før udregnede resultater, der viste en glastemperaturforskel på omkring 60 K, er altså realistiske under de angivne forhold, og man bør enten benytte hærdet glas eller sørge for, at solfangeren ikke kommer i sådan en situation - hvilket f.eks. kan ske under montering. Monter evt. solfangeren med et stykke pap/plastik over glasset mens den sættes på taget, hvis monteringen udføres i solskinsvejr.

I solfangere med to dæklag af glas, opnås der betydeligt højere temperaturer i det inderste glaslag, hvorfor temperaturforskelle mellem to glasdele i sol hhv. skygge også undersøges. Der benyttes de samme bestrålingsstyrker og den samme udetemperatur som ved simulering med ét dæklag.

Da simuleringerne med ét dæklag viste, at der ikke var nogen praktisk temperaturforskel ved at benytte jernfrit glas frem for almindeligt glas, er der i disse simuleringer kun benyttet almindeligt glas. For den solbestrålede solfanger fås en stagnationstemperatur på $220,7^\circ\text{C}$ og det inderste glas får en middeltemperatur på 128°C , mens det yderste glas får en middeltemperatur på $76,4^\circ\text{C}$. For den ikke-solbestrålede solfanger fås en stagnationstemperatur på $41,0^\circ\text{C}$, og det inderste glas får en middeltemperatur på $26,8^\circ\text{C}$, mens det yderste glas får en middeltemperatur på $18,8^\circ\text{C}$ ⁱⁱⁱ. Under forudsætning af at der ikke foregår konvektion i luften under de to dæklag, haves altså en temperaturforskel i det inderste glas på godt 101 K og en temperaturforskel i det yderste glas på små 58 K, pga. hhv. skygge og sol.

Ved sammenligning med grænseværdierne for hærdet glas ses at selv ikke denne type glas er stærk nok til at klare disse forhold for det inderste glas, og man må derfor opgive at benytte glas som inderste dæklag i en to-dæklags solfanger. Man må i stedet benytte sig af et indre dæklag af f.eks. teflon, eller lave solfangeren mindre effektiv, således at den ikke kan komme op på disse temperaturer. Temperaturforskellen for det yderste glas ses også at ligge over grænseværdien for almindeligt glas, og det anbefales derfor at benytte hærdet glas som yderste glas i en solfanger med to dæklag.

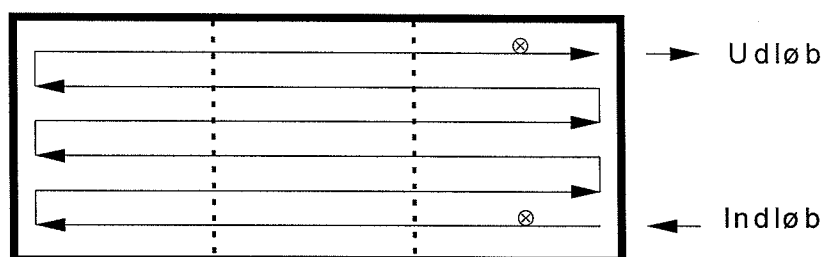
2.1.2 Dæklagets temperaturforhold i solfanger med low-flow

Ved benyttelse af low-flow i solfangerkredsen kan der også forekomme store temperaturforskelle i glasset. Ved low-flow (væskehastighed på $0,1 - 0,2 \text{ l/min/m}^2$) opnås der ikke en ensartet temperatur på langs i absorberen, sådan som det opnås ved normalt flow. Herved vil der være forskelle i den energi, der udsendes fra absorberen til glasset (enten som varmestråling eller som konvektion), da denne er stærkt afhængig af absorberens temperatur. Denne energiforskel vil dog blive delvist udlignet pga. konvektion i luften under den varme del af glasset og luften under den kolde del af glasset. For at belyse dette område er der lavet målinger på to low-flow anlæg.

ⁱⁱⁱ Igen ses den yderste glastemperatur at ligge under lufttemperaturen, hvilket stadig skyldes stråling til rummet.

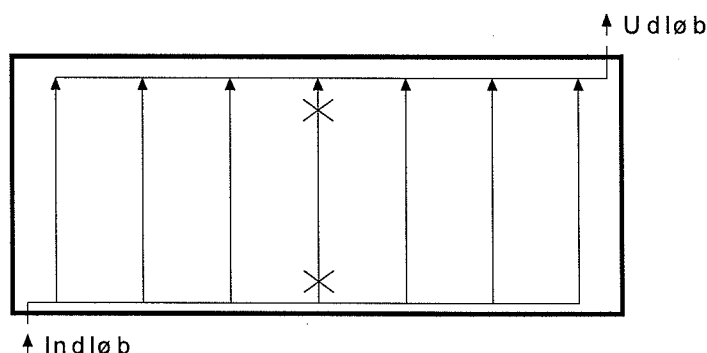


Anlæg 1 har $5,55 \text{ m}^2$ transparent areal fordelt på tre glasstykker, med vandretgående seriekobling af absorbererne. (Se Figur 2-3). Målingerne på dette anlæg er udført ved en bestrålingsstyrke på 877 W/m^2 og en udetemperatur på $18,8^\circ\text{C}$. Selve målingerne er udført med et strålingstermometer af typen KT16 fra Heimann GMBH. Usikkerheden på strålingstermometret er anført til $0,5 \text{ K}$. Ved en indløbstemperatur til solfangeren på $30,9^\circ\text{C}$ og en udløbstemperatur på $75,6^\circ\text{C}$ målt en glastemperaturforskel på 8 K mellem glasset over væskeindløb og glasset over væskeudløb.



Figur 2-3. Systemdiagram for anlæg 1. Væsken kommer ind til højre og løber via de seriekoblede rør også ud til højre. Krydsene markerer målepunkter.

Anlæg 2 har 3 m^2 transparent areal fordelt på ét glasstykke med lodretgående parallelkobling af absorbererne. (Se Figur 2-4). Målingerne på dette anlæg er udført ved en bestrålingsstyrke på 841 W/m^2 og en udetemperatur på $18,9^\circ\text{C}$. Ved en indløbstemperatur til solfangeren på $26,8^\circ\text{C}$ og en udløbstemperatur på $68,9^\circ\text{C}$, målt en glastemperaturforskel på 9 K mellem glasset over væskeindløb og glasset over væskeudløb.



Figur 2-4. Systemdiagram for anlæg 2. Væsken kommer ind fra neden og løber parallelt op gennem modulet og ud for oven. Krydsene markerer målepunkter.

Da temperaturforskellene ligger langt under 47 K , selv i denne situation med rimelig lav indløbstemperatur og høj bestrålingsstyrke, menes der ikke at være termiske spændingsproblemer ved at benytte sig af low-flow princippet hverken for almindeligt eller jernfrit glas.

2.1.3 Dæklagets tilstand under delvis stagnation

Følgende eksempel vedrører delvis stagnation i en solfanger med lodrette parallelkoblede rør. Dette kan forekomme hvis solfangeren installeres skævt, så alle rør ikke bliver udluftet totalt. Disse rør vil være delvist luftfyldte og absorberer kan opnå meget høje temperaturer, da varmen i absorberer ikke kan overføres til væsken. Over området med de høje absorbertemperaturer vil glasset ligeledes blive varmt, mens glasset vil være køligere over området med væskeflow gennem absorberer. Ved hjælp af simuleringer i Soleff^{iv} er der fundet en glastemperatur ved normaldrift (middelvæsket-

^{iv} Der er i simuleringerne benyttet en bestrålingsstyrke på 1000 W/m^2 , og udetemperaturen er sat til 20°C . Vindhastigheden er sat til 0 m/s , og væskehastigheden er sat til $1,2 \text{ l/min/m}^2$.



temperatur på 20°C) på 20,1°C, og ved stagnation (der er beregnet til at indtræffe ved en absorbertemperatur på 202°C) fås en glastemperatur på 80,6°C. Dette giver altså en temperaturforskel i glasset på små 61 K, hvilket er meget kritisk for almindeligt glas, men ikke for hærdet glas.

Det skal dog påpeges at temperaturforskellen kan blive delvist udlignet pga. konvektion i luften under glasset. Desuden vil temperaturforskellen blive udjævnet over et større område, da absorberdele i stagnation vil opvarme absorberdele i normal drift, hvis de er i termisk kontakt. Derved fås altså en blødere grænseovergang mellem meget varm absorberdel og normal absorberdel.

Forsøg med måling af glastemperaturer i solfangere i low-flow-drift viste en glastemperaturforskel (målt over væske ind- og udløb) på 8-9 K ved temperaturstigninger i væsken på 42-45 K. Dette giver et forhold mellem glastemperaturstigningen og væsketemperaturstigningen på ca. 0,2. Benyttes dette forhold også ved delvis stagnation, hvor temperaturforskellen i væsken antages at være lig med temperaturforskellen i absorberen, fås en temperaturstigning i glasset på $0,2 \cdot (202-20) = 36$ K. Derudover skal også korrigeres for bestrålingsstyrken. Det antages at glastemperaturen stiger lineært med bestrålingsstyrken. Middelbestrålingsstyrken i de to forsøg var 859 W/m^2 , hvorved fås en korrektionsfaktor på 1,2. Derved fås en glastemperaturforskel på 43 K. Dette viser altså en noget mindre temperaturstigning i glasset end det beregnede, men det kan dog stadig være kritisk for almindeligt glas, der ikke er skåret optimalt.

Problemet kan fx. løses ved at installere det øverste manifoldrør med en lille hældning i solfangerkredsen, så alle rør altid kan udluftes selvom solfangeren installeres lidt skævt. Hærdet glas kan klare betydelig højere temperaturspænd end almindeligt glas, og kan isættes i stedet for dette. Ved seriekobling af absorberør undgås problemet helt og aldeles, dog kan der muligvis opstå andre problemer pga. stagnation i hele solfangeren.

2.1.4 Sammenfatning af problemer med temperaturforskel i glasdækklag

I afsnit 2.1.1 er behandlet temperaturforskellene i glas med slagskygge med den konklusion, at der i ekstremer kunne opnås temperaturforskelle på op mod 60 K i en solfanger med et dækklag og op mod 100 K i det inderste glas i en solfanger med to dækklag. Det yderste lag glas i en solfanger med to lag glas blev beregnet til at opnå en temperaturforskel på op mod 60 K. Da almindeligt glas kun kan modstå temperaturforskelle op til 47 K, anbefales det at man benytter hærdet glas i solfangere, og at man i solfangere med to dækklag enten sænker temperaturniveauet (mindre effektivitet) eller anvender teflon som det inderste dækklag frem for glas.

I solfangere, der benytter sig af low-flow-princippet, er der målt meget små temperaturforskelle i glasset, selv ved stor bestrålingsstyrke og høj effektivitet. De målte temperaturforskelle lå under 10 K, og der menes derfor ikke at være problemer ved at benytte sig af almindeligt glas i driftssituationer.

I solfangere med parallelkoblede rør kan der opstå delvis stagnation i solfangeren. I afsnittet er beregnet en maksimal temperaturforskel i glasset på 61 K, mens der ved beregning ud fra resultaterne fra low-flow-målingerne blev udregnet en glastemperaturforskel på 43 K. Begge resultater viser at man ved høj bestrålingsstyrke opnår temperaturforskelle i glasset, der er kritiske for almindeligt glas, og det anbefales at man benytter hærdet glas for denne type solfanger.

2.2 Dækklagets tilslutning til rammen

Hvor glasset støder op til rammen, kan der opstå store temperaturforskelle, da rammen er koldere end glasset. Herved opstår en kritisk zone mht. differensbevægelser, der vil blive behandlet i det følgende.



Glassets varmebalance omfatter solstråling absorberet i glasset, varmestråling fra absorber (eventuelt også fra indre dæklag), konvektion fra luften under glasset, konvektion og varmestråling til omgivelserne, samt ledning i glasset. Derved opnår det en ligevægtstemperatur, der ligger over rammens temperatur, da den typisk er isoleret ind mod de varme dele af solfangeren. For at belyse temperaturvariationerne i området omkring glaskant og rammen er der udført simuleringer i Heat 2 (beregningsprogram til beregning af to-dimensionale varmestrømme - /7/). I Heat 2 regnes på et tværsnit i solfangerkanten. Snittet er foretaget i midten af kanten, således at der ikke tages hensyn til tredimensionale varmestrømme ved hjørnerne. Det antages at temperaturfordelingen er ensartet på langs med glasset (hen langs glassets kant). For at finde temperaturniveauet i solfangeren er der udført simuleringer med Soleff.

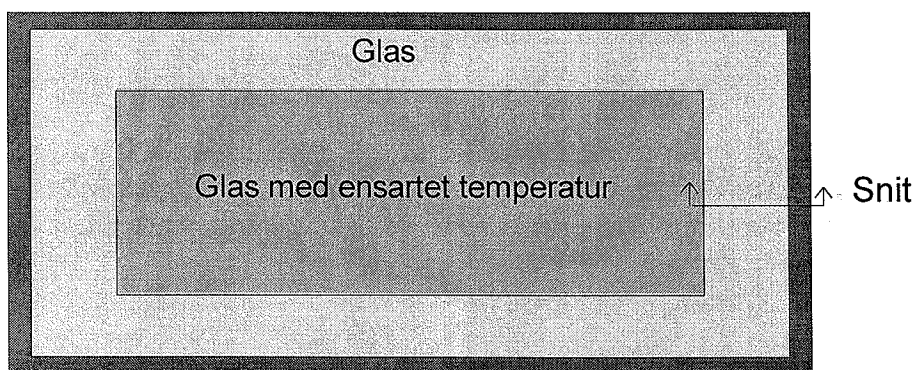
2.2.1 Temperaturforhold ved dæklagets kant ved ét dæklag

Almindeligt glas: I Soleff er stagnationstemperaturen for absorberen fundet til 202°C ved en udelufttemperatur på 20°C og en solbestrålingsstyrke på 1000 W/m^2 . Lufthastigheden er sat til 0 m/s , idet man her får værst tænkelige forhold hvad angår termiske spændinger. I stagnation haves en glasundersidetemperatur på $82,1^{\circ}\text{C}$ og en glasydersidetemperatur på $79,1^{\circ}\text{C}$.

Jernfrit glas: I Soleff er stagnationstemperaturen for absorberen fundet til $207,9^{\circ}\text{C}$, med en glasundersidetemperatur på $81,1^{\circ}\text{C}$ og en glasydersidetemperatur på $78,1^{\circ}\text{C}$.

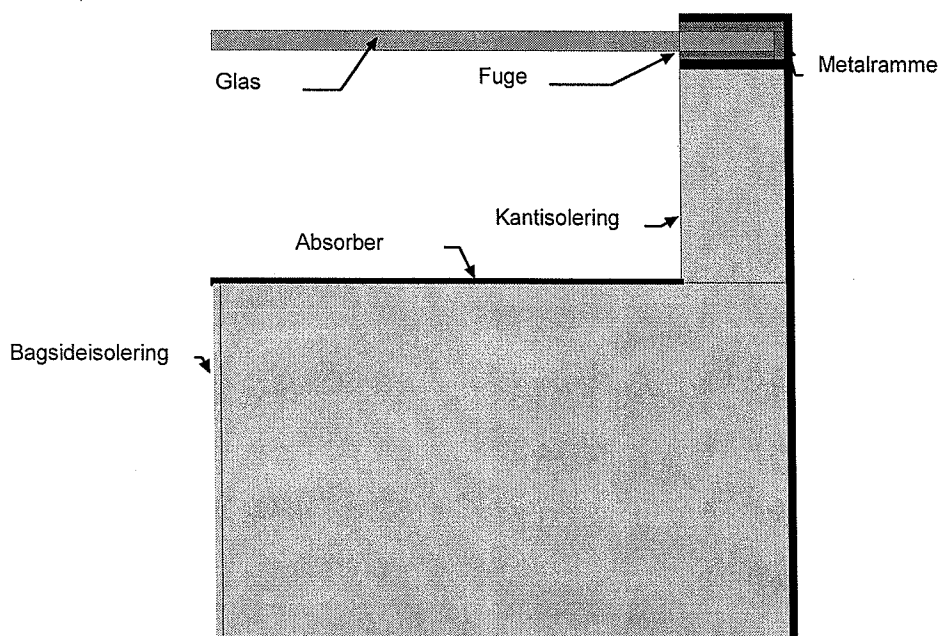
Det ses at ændringen ved at benytte den ene type glas frem for den anden er meget lille, og de efterfølgende beregninger vil derfor kun dreje sig om almindeligt glas.

Ud fra ovenstående resultater er der udført beregninger i Heat 2, hvor der er undersøgt hvorledes temperaturerne fordeler sig omkring glaskanten. I beregningerne udregnes temperaturerne omkring glaskanten og rammen i solfangeren. Hele solfangeren er ikke medtaget i beregningerne, idet det antages at temperaturen i glasset er ens i midten af glasset. (Se Figur 2-5). Der ses altså kun på den del af solfangeren der ikke er i "midttemperatur".



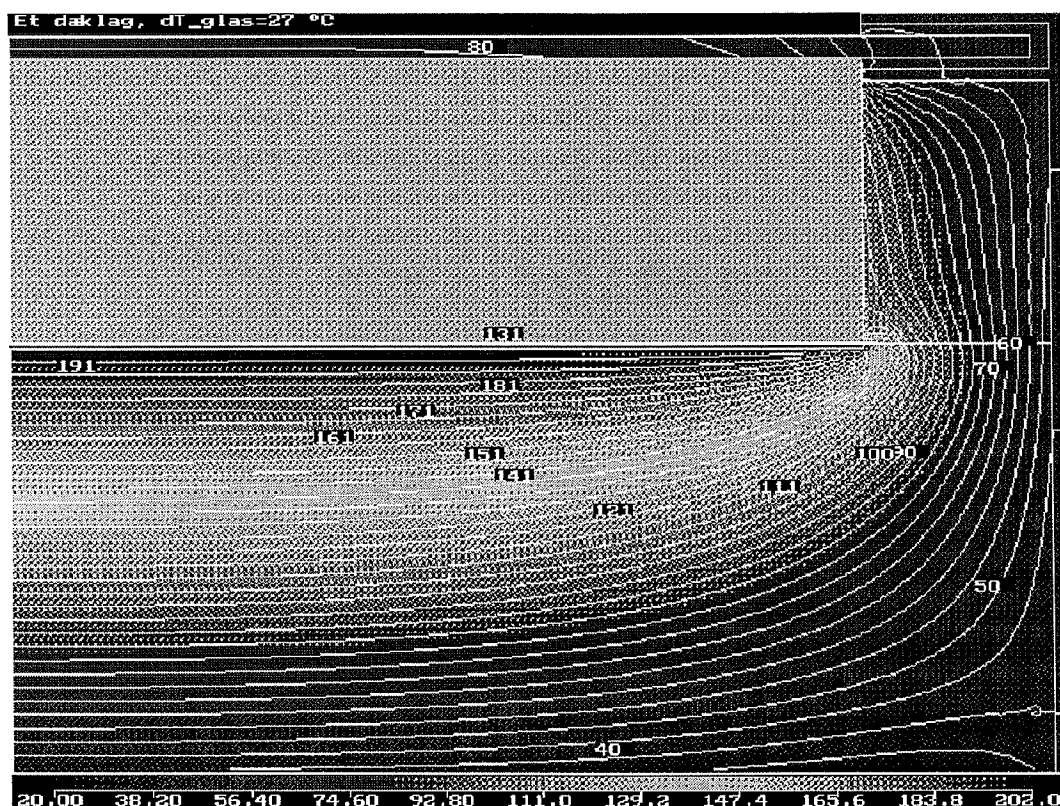
Figur 2-5. Solfanger set ovenfra. (Ikke i mål). I Heat 2 - beregningerne regnes der på et lodret snit som det til højre. Det yderste skraverede område markerer solfangerrammen.

Kantkonstruktionen, der regnes på i Heat 2, er skitseret på Figur 2-6. Rammen består af et metalprofil med understøtning til glasset. Over glasset er anbragt en glasinddækning. Mellem glas og metal er der fuget.



Figur 2-6. Skitsering af solfanger med ét dæklag.

På figur 2-7 ses resultatet efter simulationen med jernfrit glas. De hvide linier er isotermer.



Figur 2-7. Billede fra simulering af solfanger i Heat 2. Billedet viser et lodret snit gennem solfangeren ude ved kanten. Det simulerede område er 12,4 cm bredt og 13,4 cm højt, svarende til Figur 2-6.

I stagnationstilfældet er der ikke stor forskel på temperaturen i jernfrit glas og almindeligt glas, hvorfor det antages, at de termiske påvirkninger fra rammen vil være ens i de to tilfælde. Temperaturspændet mellem glasmidten og glaskanten er via Heat 2 fundet til ca. 27 K, hvilket ikke skulle give problemer for almindeligt glas, og slet ikke for hærdet glas.



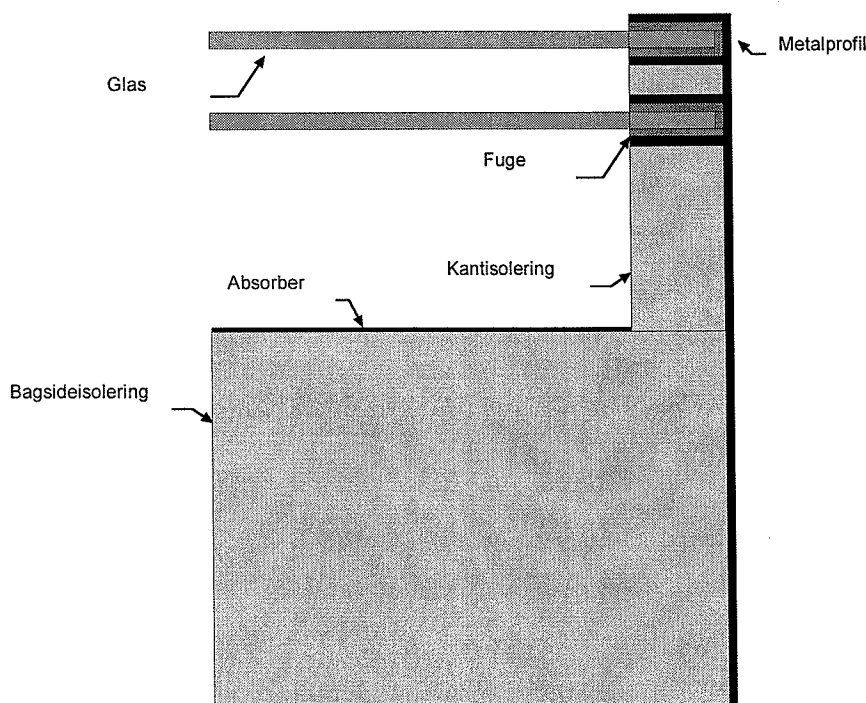
Der findes solfangerkonstruktioner uden glasinddækning foroven. For disse vil temperaturen i glaskanten falde nogle grader. Simulationer har vist, at det ikke drejer sig om mere end 1-2 K, og der gælder derfor det samme, hvad enten der benyttes glasinddækning eller ej.

2.2.2 Temperaturforhold ved dæklagets kant ved to dæklag

For en solfanger med to dæklag kan de termiske spændinger være større end ved ét dæklag, da der opnås et højere temperaturniveau med to dæklag. I Soleff er stagnationstemperaturen i en solfanger med to lag glas fundet til 221°C under samme forhold som solfangeren med ét lag glas.

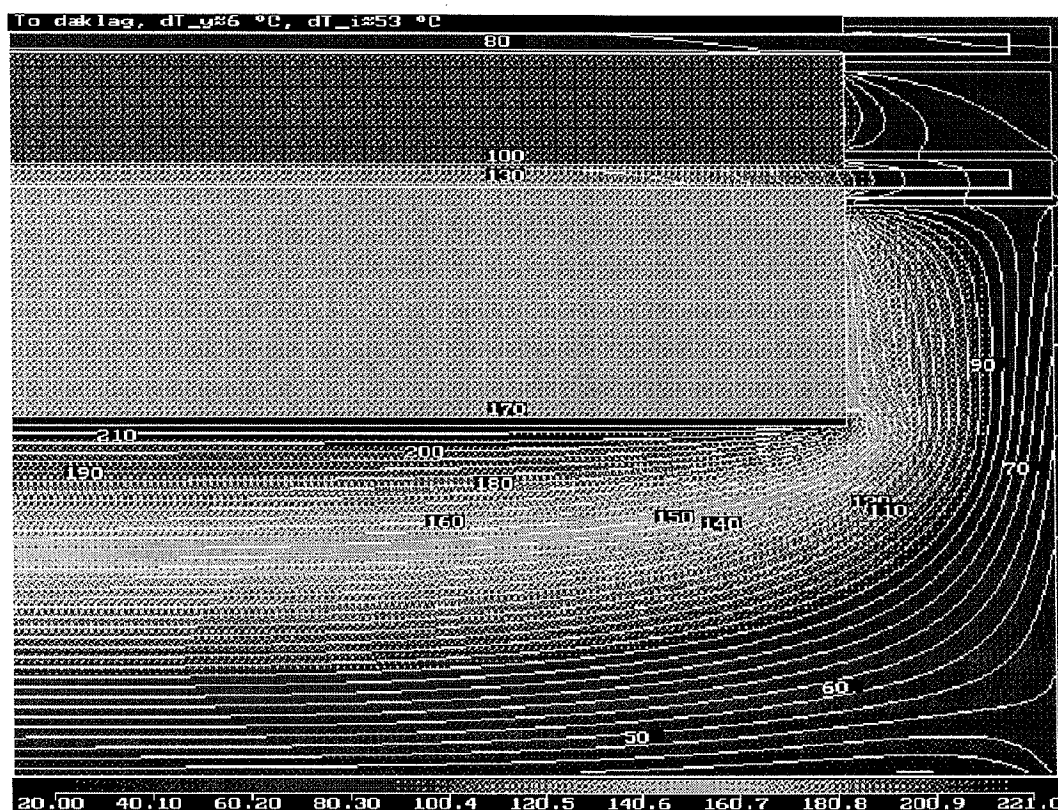
Temperaturen af det inderste glas er fundet til 129,2°C på indersiden og 128,8°C på ydersiden.

Temperaturen af det yderste lag glas er fundet til 77,7°C på indersiden og 75,0°C på ydersiden. Det kritiske område er kanten på det inderste lag glas, der er meget varmt, mens rammen er noget mindre varm. På Figur 2-8 er kantkonstruktionen skitseret. Det er en udvidelse af ét-dæklags konstruktionen, i og med at det forestilles, at det indre glas får den samme type indramning som det ydre glas. Det vil sige, at det indre glas også ligger på en understøtning og har inddækning over sig. Som før er der fuget mellem metal og glas.



Figur 2-8. Skitsering af kantkonstruktion i solfanger med to dæklag.

På Figur 2-9 ses resultatet efter simulationen. De hvide linier er isotermer.



Figur 2-9. Billede fra simulering af solfanger i Heat2. Billedet viser isotermer i det lodrette snit svarende til Figur 2-8.

Temperaturspændet mellem glasmidten og glaskanten er via Heat 2 fundet til ca. 6 K for yderglassets vedkommende og ca. 53 K for inderglassets vedkommende. Dette er over grænsen for, hvad almindeligt glas kan tåle, og man er nødt til at have en anden løsning, med mindre man benytter hærdet glas. I konstruktioner uden den indre glasinddækning vil temperaturspændet mellem glasmidten og glaskanten være en anelse lavere, men slet ikke nok til at man kan benytte almindeligt glas.

Da temperaturspændet i det indre glas er kritisk, kan det anbefales, at man udskifter det med teflonfolie, der ikke har de samme termiske kantproblemer. (Det har i stedet andre termiske problemer. Se afsnit 2.5.1). I Soleff er stagnationstemperaturen fundet til 223°C, næsten som i solfangeren med to lag glas. Teflonfoliens temperatur bliver således 127°C på begge sider, mens glassets indertemperatur bliver 78,7°C og ydertemperatur bliver 76,0°C. Der er således ikke sket noget væsentligt med yderglassets temperatur ved at man skifter inderglasset ud med teflonfolie. Det antages her at rammetemperaturerne bliver de samme i de to dæklagsystemer.

Man kan også som en anden løsning forsøge at lave rammen varmere. Herved menes, at man kan forsøge at isolere rammen på ydersiden, hvorved temperaturniveauet vil stige. Dette vil også få solfangerens effektivitet til at stige, men må dog betegnes som en noget besværlig løsning, idet man skal lægge isolering uden på solfangerkassen. Denne isolering skal nødvendigvis også holdes på plads og beskyttes af en yderligere solfangerkasse.

2.2.3 Sammenfatning af temperaturforhold ved dæklagets kanter

Vha. beregninger er fundet at den maksimale temperaturforskel mellem glasmidten og glaskanten i solfangere med et dæklag (af glas) er omkring 27 K. Det skulle ikke give nogle problemer hverken for almindeligt glas, eller for hærdet glas. For solfangere med to dæklag (af glas) er den maksimale temperaturforskel mellem glaskanten og glasmidten fundet til omkring 5 K for det yderste dæklag, og omkring 53 K for det inderste dæklag. Dette er absolut kritisk for det inderste dæklag, hvor man er nødt til at benytte hærdet glas.



2.3 Fuger mellem dæklag og ramme

Rammen i solfangeren består typisk af enten aluminium eller rustfrit stål. For disse materialer benyttes nedenstående data. (Fra /2/).

Materiale	Varmeudvidelseskoefficient α
Aluminium	$24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Rustfrit stål	$12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Skema 2-1. Varmeudvidelseskoefficient for aluminium og rustfrit stål.

De mest benyttede fugematerialer i solfangerkonstruktioner er Butyl og Silikone. Derudover kan der benyttes fugebånd af EPDM. Fugematerialer inddeles efter deres evne til at optage bevægelser. Således inddeles fugemasser inden for fem kategorier, afhængigt af hvor meget bevægelse fugen maksimalt kan optage i% af den minimale fugebredde, hvor silikone ligger i den øverste klasse med en evne til at optage bevægelser på 25% af fugebredden. Butyl ligger i 12,5% klassen, dvs. Butyl har en evne til at optage bevægelser på 12,5% af fugebredden. Der findes dog så mange forskellige fugematerialer, at det vil føre for vidt at klassificere dem yderligere. Det anbefales at man benytter sig af forhandlernes datablade.

2.3.1 Termisk aspekt ved fagedimensionering

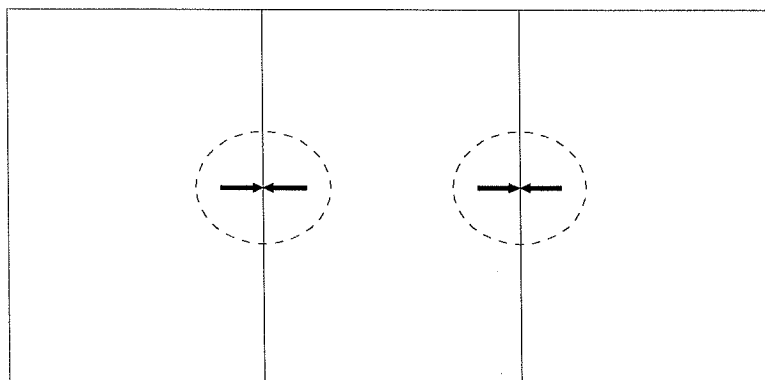
Udvidelser (eller sammenpresninger) på tværs af fugens længderetning kan forekomme i rammeprofiler, der er fastspændte. Dette kan man f.eks. have i solfangere med flere glasstykker og et rammeprofil mellem glasstykkerne.

Udvidelser på langs med fugens længderetning kan forekomme i rammeprofiler, der er frit bevægelige. Dette vil i det følgende blive kaldt fugeforskydning, da problemet opstår, ved at de to materialer over og under fugen vil udvide sig uens, med en forskydning i fugen til følge. Det har man almindeligvis i alle solfangere, medmindre solfangerkassen ikke kan få lov til at udvide sig.

Der er lavet undersøgelser af temperaturerne af fuger i solfangeren i /8/. Disse angiver at man bør regne med en minimumtemperatur for fugerne på -35°C , og en maksimumtemperatur for fugerne på 105°C . Regnes der med en monteringsstemperatur på 20°C fås altså en maksimal temperaturforskelle på 85 K.

2.3.2 Fuger ved fastspændte rammeprofiler

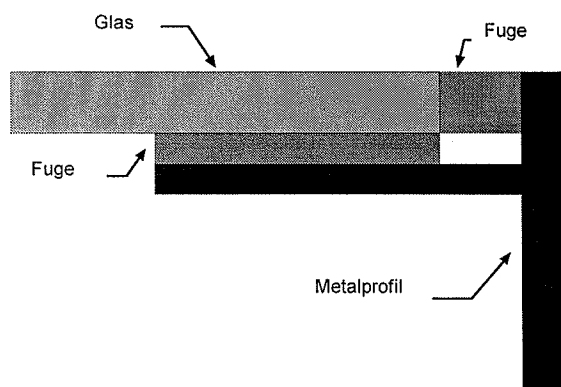
Ved fastspændte ramme-/understøtningsprofiler kan disse selvsagt ikke flytte sig når glasset presser på, hvilket det gør ved opvarmning. Dette kan f.eks. ske i en solfanger med flere glasmoduler og et understøtningsprofil imellem. Glassene vil da skubbe til profilet fra hver sin side, og det (profilet) har da ingen mulighed for fri bevægelse til en af siderne. Ved tagintegrerede solfangere kan man eventuelt have fastspændte rammer, hvis tagkonstruktionen ikke tillader solfangeren at udvide sig.



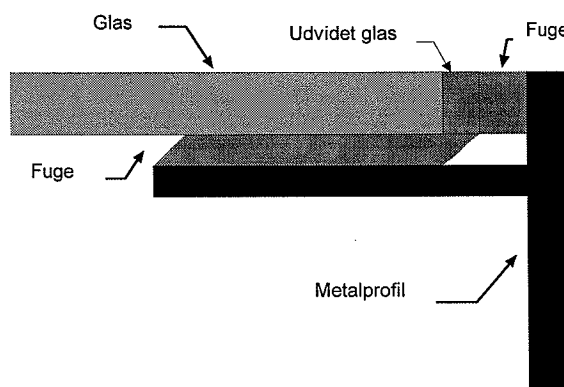
Figur 2-10. Solfanger bestående af tre stykker glas med understøtningsprofil imellem. Problemerne er vist i ringene, idet de to glas presser på profilet fra hver sin side, således at det ikke kan give efter for nogen af dem.

For at sikre at glasset frit kan udvide sig, må glassets udvidelse optages i fugen, hvorfor fugebredden termisk skal dimensioneres til at kunne optage halvdelen af udvidelsen. (Idet det antages at glasset udvider sig lige meget i begge retninger, bliver udvidelsen fordelt på to fuger).

Efterfølgende Figur 2-11 og Figur 2-12 viser hvordan fugen presses sammen af glasset når dette udvides. Fugen mellem glasset og den lodrette del af profilet bliver presset sammen i stagnationstilstanden. Fugen mellem glasset og den vandrette del af profilet forskydes i stagnationstilstanden.



Figur 2-11. Tværsnit gennem glas, fuge og profil ved monteringsstemperatur. Tegning ikke i mål.



Figur 2-12. Tværsnit gennem glas, fuge og profil ved stagnationstemperatur. Tegning ikke i mål.

Skema 2-2 viser, hvilken elasticitet fugemassen minimum skal have for at kunne optage glassets udvidelse. Der er varieret mellem forskellige glaslængder og fugebredder. Resultaterne er udregnet som i følgende eksempel: For glas haves en termisk udvidelseskoefficient på $9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Ved en glaslængde på f.eks. 2 meter og en opvarmning til 105°C fra en monteringsstemperatur på 20°C haves en udvidelse på 1,53 mm. Denne udvidelse optages af to fuger á f.eks. 3 mm bredde, hvorfor fugens minimumselasticitet bliver $\frac{1}{2} \cdot 1,53 \text{ mm} / 3 \text{ mm} = 26\%$. Resultaterne rundes op, således at man er på den sikre side.



Glaslængde \ Fugebredde	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
1,5 m (1,15 mm)	29%	20%	15%	12%	10%
2,0 m (1,53 mm)	39%	26%	20%	16%	13%
2,5 m (1,91 mm)	48%	32%	24%	20%	16%
3,0 m (2,30 mm)	58%	39%	29%	24%	20%

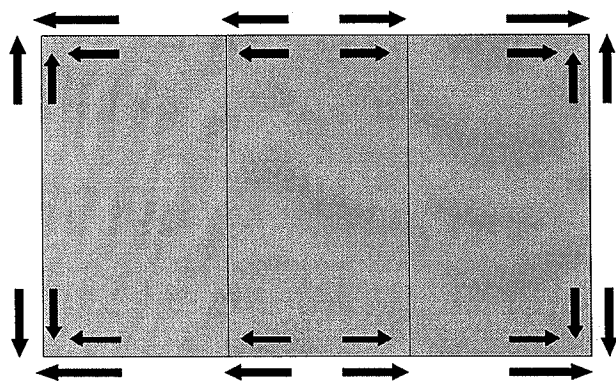
Skema 2-2. Sammenhæng mellem glaslængde, fugebredde og fugemassens minimumselasticitet for understøtningsprofiler. (Tallene i parentes efter glaslængden angiver glasudvidelsen i mm). Grå felter angiver, at fugen ikke er bred nok (gælder for silikone, der er meget elastisk).

Som det kan ses af skemaet, er det ikke tilrådeligt at benytte fugebredder på under 4 mm, og ved lange profiler bør man benytte en fugebredde på minimum 5 mm.

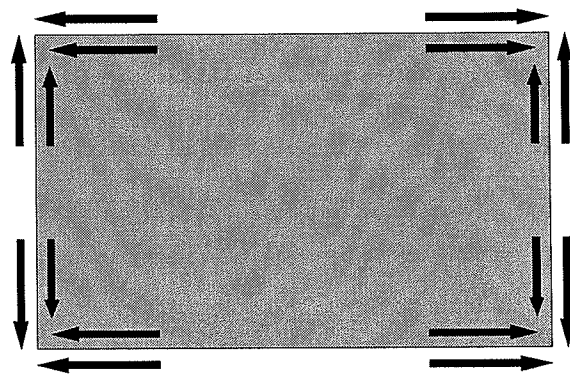
2.3.3 Fuger ved frit bevægelige rammeprofiler

Ved fritbevægelige profiler menes at de har fri mulighed for at udvide sig termisk. Det kan f.eks. være i en solfangerramme, der ikke er fastspændt hele vejen rundt til underlaget. Det vil være det mest almindelige for solfangere.

Her er det glassets længde, der er dimensionerende. Ved store solfangere (med flere glasstykker) er det længden af det enkelte glasstykke, der er dimensionerende, idet forskydningen vil blive delt op på flere glasstykker.



Figur 2-14. Solfanger med flere glasstykker. Pilene inden for rammen markerer glassets bevægelse, mens pilene uden for markerer rammeprofilets bevægelse.

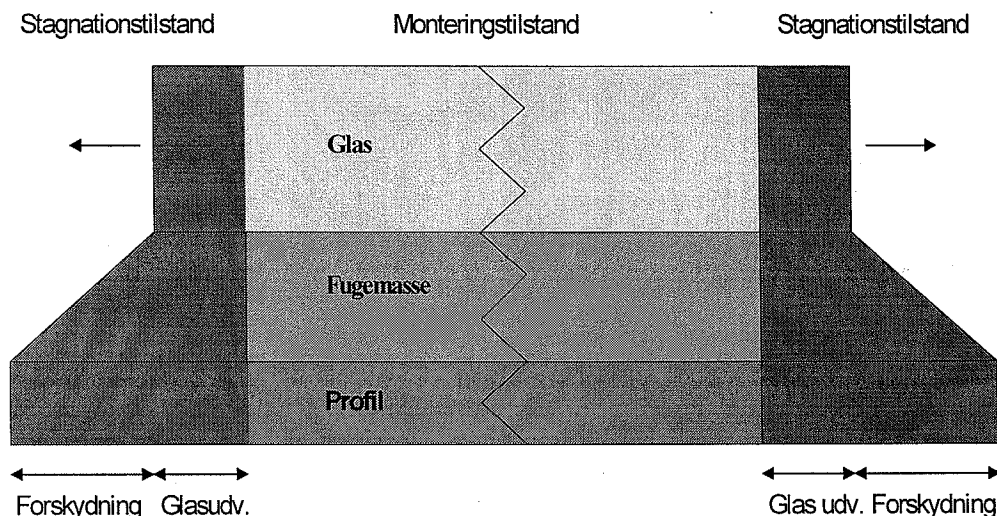


Figur 2-13. Solfanger med ét glasstykke. Pilene inden for rammen markerer glassets bevægelse, mens pilene uden for markerer rammeprofilets bevægelse.

Ved frit bevægelige rammeprofiler vil de bevægelser, der skal optages af fugen, være forskellen mellem glassets og profilets bevægelse, svarende til deres termiske udvidelse. På Figur 2-15 ses et eksempel på, hvordan fugen forskydes på grund af forskellig udvidelse i materialerne omkring fugen.

Ved en opvarmning fra 20°C til 105°C vil aluminium udvide sig 2,04 mm pr. meter. Glasset vil dog kun udvide sig 0,77 mm pr. meter. Der vil derfor opstå en forskydning i fugen svarende til en deformation på $2,04 - 0,77 = 1,27$ mm pr. meter glas.

Ved en opvarmning fra 20°C til 105°C vil rustfrit stål udvide sig 1,02 mm pr. meter. Glasset vil stadig udvide sig 0,77 mm pr. meter. Forskydningen vil derfor være på 0,25 mm pr. meter glas.



Figur 2-15. Forskydning i fuge ved frit bevægeligt profil. Tegningen viser et vandret snit på langs gennem de to ender af et profil med tilstødende glas og fugemasse. Tegningen er ikke i mål. Ved opvarmning af glas og profil udvider de sig til de stiplede linier, hvorved fugen forskydes som vist. Pilene markerer forskydningsretningen.

Det nævnes i /2/ at fugemassens minimumselasticitet ved forskydninger på langs med fugen udregnes som minimumselasticiteten ved forskydninger vinkelret på fugen (træk/tryk på fugen). Som før haves altså at minimumselasticiteten udregnes som forholdet mellem forskydningen og fugebredden. Derved kan følgende Skema 2-3 opstilles, hvori er udregnet minimumselasticiteten som funktion af fugebredden og profil-/glaslængden.

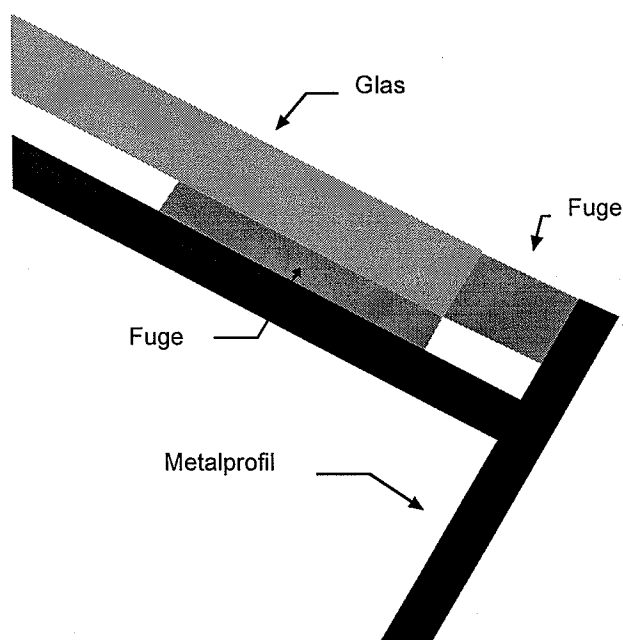
Længde \ Bredde	Aluminium (1,27mm/m)							Rustfrit stål (0,25mm/m)		
	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	2 mm	3 mm	4 mm
1,5 m	48%	32%	24%	20%	16%	14%	12%	10%	7%	5%
2,0 m	64%	43%	32%	26%	22%	19%	16%	13%	9%	7%
2,5 m	80%	53%	40%	32%	27%	23%	20%	16%	11%	8%
3,0 m	96%	64%	48%	38%	32%	28%	24%	19%	13%	10%

Skema 2-3. Minimumselasticitet af fugemateriale i profiler som funktion af profil-/glaslængde og fugebredde. Tallene i parentes efter profilmaterialet angiver forskydningen i fugen [mm/m profil]. Grå felter angiver, at fugen ikke er bred nok, dvs. minimum elasticitet over 25% (gælder for silikone, der er meget elastisk).

Som det ses af skemaet, kan der opstå problemer ved aluminiumprofiler, da fugebredden skal være relativt bred, medmindre man benytter et meget elastisk materiale. Ved stålprofiler er problemet meget mindre, da rustfrit ståls termiske udvidelseskoefficient er meget tæt på den termiske udvidelseskoefficient for glas.

2.3.4 Dimensionering af lastbærende fuger

Den lastbærende del af fugen er den del af fugen, der ligger mellem glasset og glasunderstøtningen. Bredden af denne fuge er afgørende for, hvor meget glasset kan udvide sig, uden at rammen tager skade, idet udvidelsen ønskes optaget i fugen.



Figur 2-16. Tværsnit gennem glas, fuge og profil ved monteringsstemperatur. Tegning ikke i mål.

/3/ angiver en metode til udregning af den største tilladte forskydning for den lastbærende fugemasse. Resultatet giver, at den minimale fugebredde skal være 2,4 gange større end fugedeformationen.

Ved fastspændte profiler haves (fra Skema 2-1) glasudvidelsen. Ud fra denne kan følgende skema opstilles. Det viser sammenhængen mellem glaslængden og den minimale fugebredde.

Glaslængde	1,5 meter	2,0 meter	2,5 meter	3,0 meter
Minimal fugebredde	2 mm	2 mm	3 mm	3 mm

Skema 2-4. Minimal fugebredde for lastbærende fugemasse i en solfanger med fastspændte profiler. Der benyttes halve værdier, da glasset har to ender.

Af Skema 2-4 ses, at den beregnede minimale fugebredde er relativt lille. /3/ anfører at man dog altid bør have en mindste fugebredde for lastbærende fuger på 6 mm.

Ved fritbevægelige profiler haves en fugeforskydning på 1,27 mm/m for aluminium og 0,25 mm/m for rustfrit stål. Ud fra dette kan den minimale fugebredde udregnes som i nedenstående skema.

Min. fugebredde/glaslængde	1,5 meter	2,0 meter	2,5 meter	3,0 meter
Aluminium	3 mm	4 mm	4 mm	5 mm
Rustfrit stål	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm

Skema 2-5. Minimal fugebredde for lastbærende fugemasse i en solfanger med fritbevægelige profiler. Der benyttes "halve" værdier, da glasset har to ender.

Af skemaet ses, at den beregnede minimale fugebredde stadig er under 6 mm, der er den anbefalede mindste fugebredde i /3/. For lastbærende fuger anbefales det derfor at benytte en fugebredde på 6 mm.

2.3.5 Sammenfatning af fuger mellem ramme og dæklag

For ikke-lastbærende fuger er opstillet Skema 2-2 til dimensionering af fugebredden i solfangerkonstruktioner med fastspændte profiler. Tilsvarende er opstillet Skema 2-3 til



dimensionering af fugebredden i solfangerkonstruktioner med frit bevægelige profiler. I skemaerne findes kravene til fugemassens evne til at optage bevægelser, afhængigt af fugebredden og profil længden og profilmaterialet.

For lastbærende fuger (fugemasse under glas) er opstillet Skema 2-4 til dimensionering af fugebredden i solfangerkonstruktioner med fastspændte profiler. Tilsvarende er opstillet Skema 2-5 til dimensionering af fugebredden i solfangerkonstruktioner med frit bevægelige profiler. I skemaerne beregnes den minimale fugebredde til under 6 mm, der anbefales som mindste fugebredde, og det anbefales derfor at benytte en fugebredde på 6 mm for de lastbærende fuger.

2.4 Plastdæklag

Som dæklag i solfangere kan benyttes visse former for plast-materialer. De mest almindelige er Akryl (også kendt som plexiglas), og PolyCarbonat (forkortet PC). Ved opvarmning af plast-materialerne udvider disse sig kraftigt. I tilfælde af manglende plads til udvidelse vil plastdæklaget, for at undgå indre spændinger i materialet, forsøge at bøje ud. Herved kan afstanden til absorberen blive mindre, og dermed også det isolerende luftlag. I stagnationstilfælde kan udbøjningen blive så kraftig, at dæklaget rammer ned i absorberen og eventuelt bliver beskadiget. Udvidelsen af materialer er afhængig af temperaturen og af den termiske udvidelseskoefficient for materialet. Akryl og PC har følgende udvidelseskoefficienter.

	Akryl	PC
Termisk udvidelseskoefficient (α)	$75 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$65 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Skema 2-6. Termisk udvidelseskoefficient for almindelige plastdæklagsmaterialer.

Når dæklaget bliver varmere, bliver rammen også varmere. Det antages, at rammen er lavet af aluminium eller rustfrit stål. For disse findes følgende termiske udvidelseskoefficienter.

	Aluminium	Rustfrit stål
Termisk udvidelseskoefficient (α)	$24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Skema 2-7. Termisk udvidelseskoefficient for nogle almindelige rammematerialer.

I det følgende antages det, at rammen er lavet af rustfrit stål, idet denne har den laveste termiske udvidelseskoefficient. Det betyder at man, ved at regne med rustfrit stål og PC, udregner den maksimale bevægelse mellem dæklag og ramme. Benytter man sig af aluminiumsrammer er man således stadig på den sikre side, hvis de kommende afsnits resultater bruges.

2.4.1 Termisk udvidelse af plastdæklag

I det følgende regnes der med dæklagets middeltemperatur. Regnes der med temperaturdifferenser mellem montering og stagnation på 85 K (som i afsnit 2.3), vil dæklaget hermed blive udvidet 6,4 mm/m ved Akryl, og mellem 5,1 og 6,0 mm/m ved PC. Den nederste (koldeste) kant af stålrammen antages at opnå temperaturer på mindst 50°C. Derved udvider stålrammen sig 0,4 mm/m. Dvs. akryldæklagets relative udvidelse bliver 6,0 mm/m, mens PC-dæklagets udvidelse bliver 5,6 mm/m.

Ud fra disse tal kan følgende Skema 2-8 opstilles, hvor dæklagsudvidelsen, i forhold til rammen, er fundet afhængig af materiale og dæklagslængde.



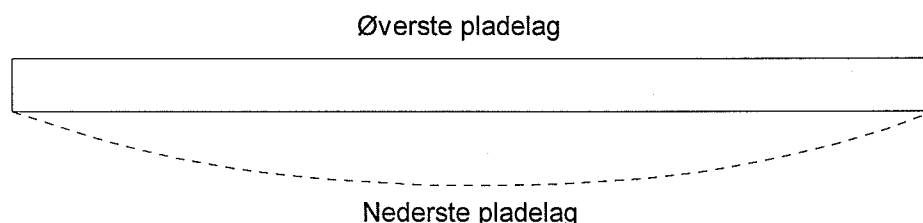
materiale\længde	2 m	4 m	6 m	8 m
Akryl	12 mm	24 mm	36 mm	48 mm
PC	11 mm	22 mm	34 mm	45 mm

Skema 2-8. Termiske udvidelser af plastmaterialer ved en temperaturforskel på 85 K. Der benyttes de højeste koefficienter, således at man ved dimensionering er på den sikre side.

Det ses, at ved lange plader er der tale om udvidelser på op mod 50 mm, og kan pladerne ikke umiddelbart udvide sig frit, vil de udbøje. Denne udbøjning er meget kraftig, og det anbefales at man lader dæklaget udvide sig frit.

2.4.2 Udbøjning grundet temperaturdifferens mellem inderside og yderside af plastdæklag

I dette afsnit regnes ikke længere med en middeltemperatur for hele pladen. Ved varmere inderside (end yderside) vil plasten bule ned mod absorberen for at forblive i sin spændingsløse tilstand. Det skyldes, at yder- og inderside har samme længde ved monteringsstilstand og derfor bliver fastlåst i samme forhold ved indspændingen af dæklaget. På Figur 2-17 ses hvorledes den beregningsmæssige situation ser ud. I virkeligheden vil det øverste pladelag også bøje ned og følge det nederste pladelag. Dette vil medføre en mindre udbuling end det beregnede, men i dimensioneringsøjemed menes denne metode at være god nok.



Figur 2-17. Ribbepladens udbuling som følge af temperaturforskel mellem inderside og yderside. Den stiplede linie markerer dæklagets inderside hvis der er stor temperaturforskel. Der ses på én ribbe, der her er vist i papirets plan.

Materialeudvidelsen og den maksimale udbøjning som følge af en opvarmning på 40 K^v ses i nedenstående skema. Den maksimale udbøjning af ribbepladen fås som den maksimale udbøjning af den korteste side af pladen. Det skyldes at selv om der sker en større materialeudvidelse i retningen parallelt med den længste side, er der ikke materiale nok parallelt med den korteste side til at kunne udbøje mere. Derved vil pladen altså ligne en overskåret cylinder. Det "overskydende" materiale i retningen parallelt med den længste side, vil i stedet medføre små bølger i den udbøjede plade. Den maksimale udbøjning udregnes som hvis materialet hænger slapt ned, og altså antager en cirkelbueform. I bilag A, er vist hvordan udbøjningen kan udregnes.

	Akryl	PC
Længdeudvidelse	3,0 mm/m	2,8 mm/m
Maksimal udbøjning	34 mm/m	32 mm/m

Skema 2-9. Udvidelse af nederste pladelag i ribbeplade (i forhold til øverste pladelag) ved en temperaturforskel mellem nederste og øverste pladelag på 40 K.

^v Udregnet i Heat 2, hvor en 10 mm ribbeplade er simuleret i stagnation.



Nu kan følgende skema opstilles, og det viser den nødvendige afstand mellem dæklagets understøtninger som funktion af dæklagets afstand til absorberen.

Mat. / afstand	25 mm	30 mm	35 mm	40 mm	50 mm
Akryl	73 cm	88 cm	102 cm	117 cm	147 cm
PC	78 cm	93 cm	109 cm	125 cm	156 cm

Skema 2-10. Maksimal afstand mellem rammeprofiler som funktion af afstanden mellem dæklag og absorber. Der er regnet med en temperaturforskel mellem øverste og nederste pladelag på 40 K.

Vha. ovenstående skema kan man dimensionere afstanden mellem understøtningerne/ afstandsklodserne til dæklaget som funktion af afstanden mellem dæklaget og absorberen.

2.4.3 Sammenfatning af termisk udvidelse i plastdæklag

I afsnittet er udregnet, hvor meget plastdæklagsmaterialer udvider sig ved en opvarmning til 105°C. Derudover er udregnet hvor meget en ribbeplade af plast maksimalt udbuler ved en temperaturforskel mellem øverste pladelag og nederste pladelag på 40°C. I Skema 2-10 er udregnet, hvor stor afstanden maksimalt må være mellem dæklagets understøtninger for at undgå at dæklaget buler ned i absorberen. Disse afstande er fundet som funktion af afstanden mellem dæklaget og absorberen.

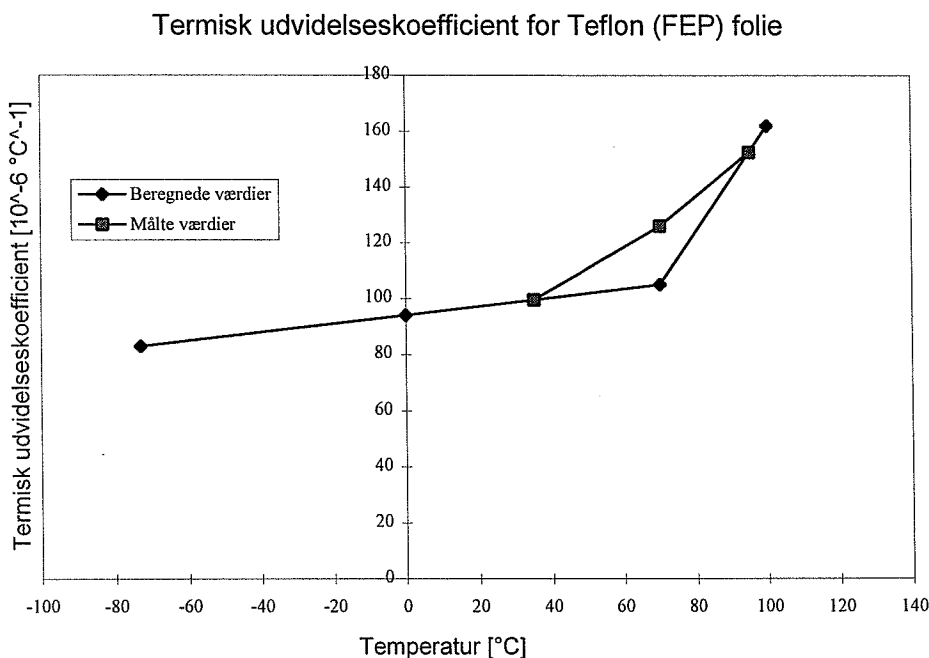
2.5 Dæklagets bevægelser i forhold til absorber

I dette afsnit beskrives problemerne omkring dæklagets bevægelse i forhold til absorberen. I afsnittet kommer ind på udvidelsen af plastdæklaget, således at dæklaget rammer absorberen og eventuelt ødelægger den selektive belægning, eller selv bliver ødelagt. Der opstilles modeller til løsning af problemet.

2.5.1 Indre dæklag af plastfolie

Indre dæklag i solfangere kan enten være glas eller et tyndt lag folie. Almindeligt benyttet folie er teflonfolie, der har en termisk udvidelseskoefficient på $105 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ målt ved en temperatur omkring 70°C, og $162 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ målt ved en temperatur på 100°C. Tallene er fra [9]. Fra [10] haves en termisk udvidelseskoefficient i området -30°C til +30°C på $94 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

For at finde en middelværdi for den termiske udvidelseskoefficient antages det, at denne stiger lineært mellem de kendte punkter. I solfangere med to dæklag kan stagnationstemperaturen for det indre dæklag nå op på 120°C (se afsnit 2.2.2), hvorfor der benyttes en termisk udvidelseskoefficient ved 70°C. Da udvidelseskoefficienten ikke stiger ens mellem 20°C og 70°C samt mellem 70°C og 120°C, fås den reelle middelværdi som middelværdien mellem middelværdierne i de to intervaller. Dette kan ses på Figur 2-18. Middelværdien fås på denne måde til $126 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

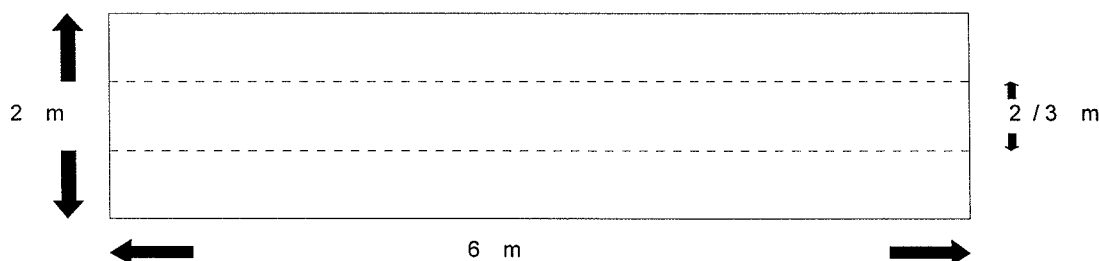


Figur 2-18. Termisk udvidelseskoefficient som funktion af temperatur for teflon (FEP) folien.

Ved opvarmningen fra 20°C til 120°C fås altså en længdeudvidelse på 1,26 cm pr. meter teflonfolie. Omregnes dette (se evt. Bilag A) fås en udbøjning på 6,9 cm pr. meter.

Dette er en meget kraftig udbøjning, der er meget svær at forhindre. Skal det helt undgås, må man dimensionere sit luftlag mellem absorberen og teflonfolien i samspil med afstanden mellem understøtningerne stort nok til at teflonfolien ikke rammer ned i absorberen.

Da folien er indspændt i kanterne, er det den korte side, der er bestemmende for, hvor stor udbøjningen bliver. (Se evt. afsnit 2.4). Derfor er det en god idé at understøtte teflonfolien på langs med solfangerens lange side. Se Figur 2-19.



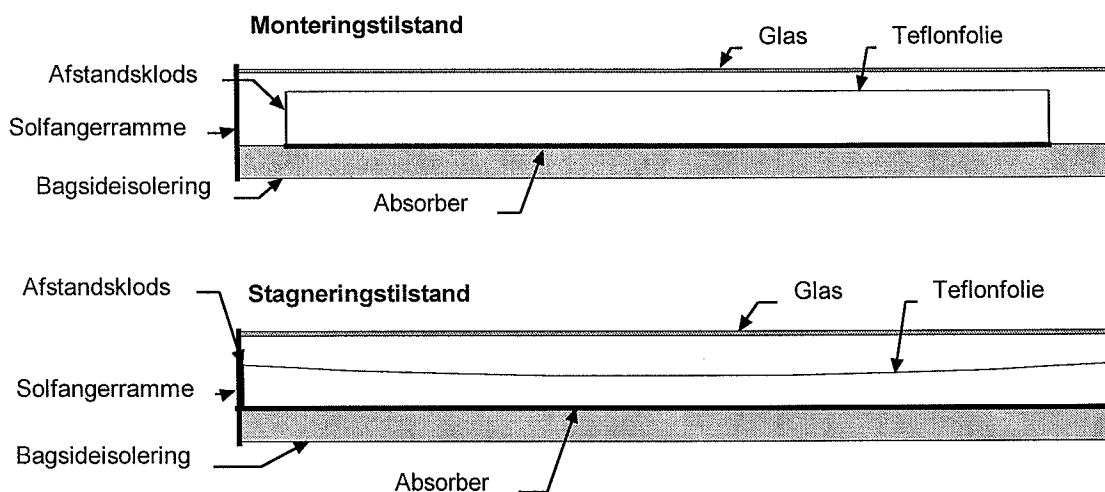
Figur 2-19. Solfanger med teflonopspændinger på langs med solfanger. Opspændingerne er de stiplede linier. De viste mål er vilkårlige.

Ved at placere sine opspændinger på denne måde får man meget hurtigt en kort afstand mellem opspændingerne, og udbøjningerne bliver meget mindre. Denne form har også andre fordele frem for opspændinger på den anden led, idet der ved hver opspænding laves to kuldebroer. Desuden skal der for at lave opspændinger hver 2/3 meter bruges 8 * 2 meter tråd for opdeling af den lange led, mens der kun skal bruges 2 * 6 meter for opdeling af den korte led. Der skal dog mindes om at man skal benytte sig af et materiale, der udvider sig lidt mindre, end det materiale, solfangerrammen er lavet af, da tråden ellers vil udbøje.

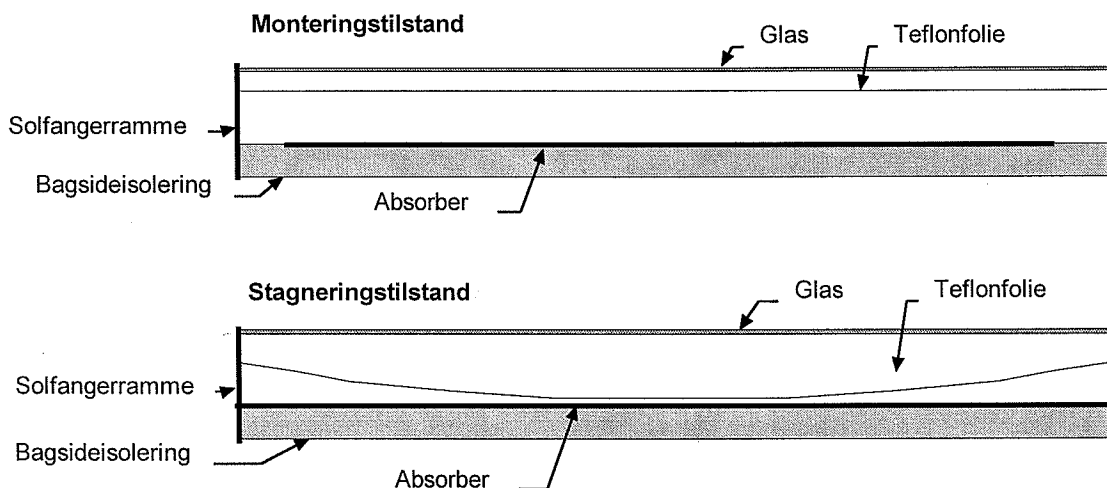


2.5.2 Teflon-styring ved hjælp af fastgørelse (via afstandsklodser) til absorberen

Man kan styre teflonfolien (hvide i den) ved at lade den fastgøre til absorberen. Når absorberen udvider sig, vil afstandsklodserne følge med og derved hvide i teflonfolien. Ved at gøre dette får man en mindre udbøjning af teflonfolien. På efterfølgende figurer er skitseret absorberen og teflonfolien i monteringsstilstand og i stagnation. På Figur 2-20 er vist med afstandsklodser (hvor teflonfolien er fastgjort til absorberen), og på Figur 2-21 er vist uden afstandsklodser (hvor teflonfolien er fastgjort til solfangerrammen).



Figur 2-20. Solfanger med teflonfoliens korte side fastspændt til absorber via afstandsklods. Øverst i monteringsstilstand, nederst i stagnation. Solfangerrammens udvidelse er negligeret.



Figur 2-21. Solfanger med teflonfoliens korte side fastspændt til solfangerrammen. Øverst i monteringsstilstand, nederst i stagnation. Solfangerrammens udvidelse er negligeret.

Ved en stagnationstemperatur på 220°C fås en udvidelse af absorberen (regnet som aluminium) på 5,3 mm/m. Tilsvarende bliver udvidelsen af teflonfolien (ved en opvarmning til 120°C) på 12,6 mm/m. Den relative udvidelse af teflonfolien i forhold til afstandsklodserne (der følger med absorberen) bliver derved på 7,3 mm/m, svarende til en udbøjning på 54 mm/m.

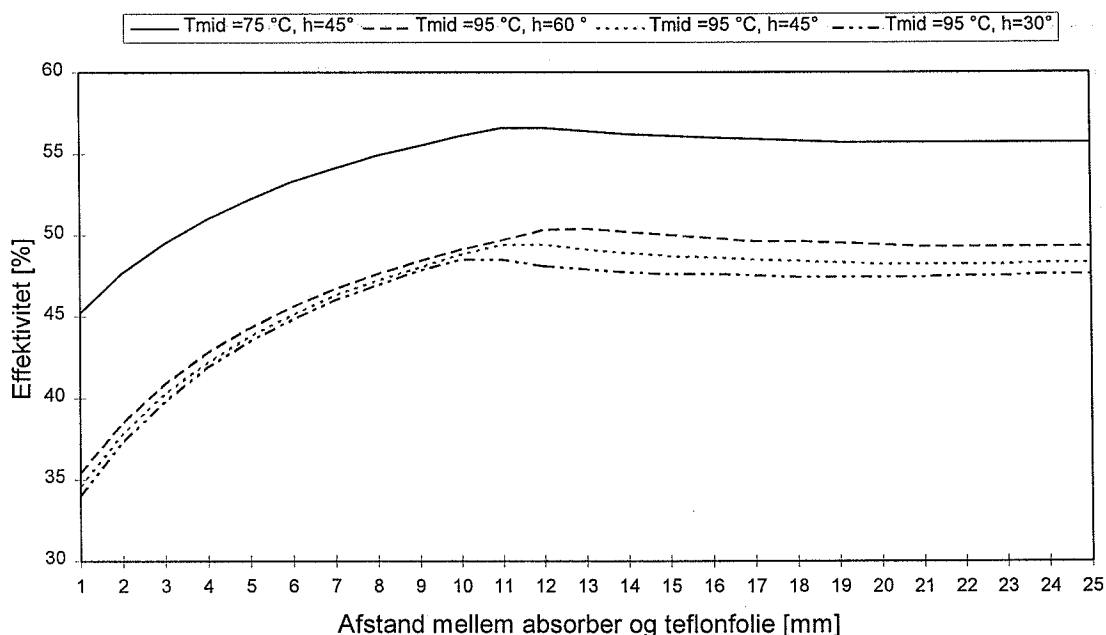
Det skal dog påpeges, at hvis man benytter sig af fastspænding til afstandsklodser, bliver det den længste side af teflonfolien, der bliver bestemmende for udbøjningen. Det skyldes, at teflonfolien ikke længere er fastspændt i de længste sider og derfor kan bøje frit ned. Ved en solfangerlængde på



6 meter får man altså en udbøjning på over 30 cm i stagnation, hvis man vel at mærke ikke understøtter teflonfolien.

For så vidt der ikke er noget der ødelægges ved at teflonfolien rammer ned i absorberen, kan man godt dimensionere efter lavere temperaturer. Et afgørende punkt bliver nu, hvor stor en udbøjning man vil tillade, med hensyn til at effektiviteten af solfangeren forringes ved for lille afstand mellem absorber og dæklag. Da solfangervæskecirkulationen typisk standses ved en udløbstemperatur fra solfangeren på lidt under 100°C , benyttes i de følgende udregninger en middelvæsketemperatur i solfangeren på 95°C . På efterfølgende Figur 2-22 er vist effektiviteten i en solfanger med to dæklag, det inderste af teflonfolie, for varierende afstand mellem absorber og teflonfolie. Effektiviteten er udregnet i Soleff, hvor der er regnet med en bestrålingsstyrke på 1000 W/m^2 , en udetemperatur på 20°C og ingen vind.

Effektivitet for solfangere med to dæklag. Det inderste af teflonfolie.



Figur 2-22. Effektivitet af solfangere med dæklag af teflonfolie for varierende afstand mellem teflonfolie og absorber. T_{mid} er middelvæsketemperaturen og h er hældningen på solfangeren.

Som man kan se, bør man ikke have en afstand mellem absorberen og folien på mindre end 10 mm, og til 12 mm afhængigt af solfangerhældningen. På Figur 2-22 er også vist resultatet fra simuleringer med en middeltemperatur på 75°C , og det viser sig, at selvom effektiviteten ligger højere, er den minimale afstand uændret i forhold til en middeltemperatur på 95°C .

Ved samme forhold som før udregnes at teflonfoliens temperatur bliver $63,9^{\circ}\text{C}$ ved en afstand mellem absorber og dæklag på 25 mm. Kaldes denne temperatur for den maksimale benyttelsestemperatur, haves en forskel mellem monteringstemperaturen og den maksimale monteringsstemperatur på under 45°C . Som før udregnes en middeludvidelseskoefficient, der fås til $101 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Derved fås en udvidelse af teflonfolien på 4,5 mm pr. meter. Regnes kantens temperatur at være minimum 40°C , fås en udvidelse af denne på 0,2 mm pr. meter (ved benyttelse af rustfrit stål). Herved fås altså en relativ udvidelse af teflonfolien på 4,3 mm pr. meter. Dette giver en udbøjning på 4,0 cm pr. meter. Ved et luftmellemrum på 25 mm skal opspændingerne altså dimensioneres til en maksimal udbøjning på $25 - 12 = 13 \text{ mm}$ (minimal afstand mellem folie og absorber). Derved skal der være opspænding pr. 32 cm. Ved luftmellemrum på 50 mm, skal opspændingerne dimensioneres til en maksimal udbøjning på 38 mm, hvorved der skal være opspænding hver 95 cm.



Ved sammenligning ses det, at kravet til opspænding i stagnation er større end ved hensigtsmæssig drift, hvorfor man, hvis en eventuel selektiv belægning ikke bliver ødelagt, kan nøjes med at dimensionere efter den hensigtsmæssige drift.

2.5.3 Sammenfatning af indre dæklags bevægelser

Teflonfolie som indre dæklag i en solfanger udvider sig op til 12,6 mm pr. meter, svarende til en udbøjning på 6,9 cm pr. meter.

Ved at fastspænde teflonfolien i dens lange side kan man undgå store udbøjninger af teflonfolien, idet det bliver den korteste side, der bestemmer udbøjningens størrelse.

Ved at fastspænde teflonfoliens korte side til absorberen (via afstandsklodser) kan man mindske udbøjningen i forhold til kun at fastspænde den korte side af teflonfolien til solfangerrammen. Udbøjningen bliver herved 5,4 cm pr. meter.

Ved ikke at dimensionere folien efter forholdene i stagnation, men ved en middelvæsketemperatur lige under 100°C, behøves kun understøtninger/afstandsklodser svarende til udbøjninger på 4,0 cm pr. meter mod før 6,9 cm pr. meter.



3. Absorbere

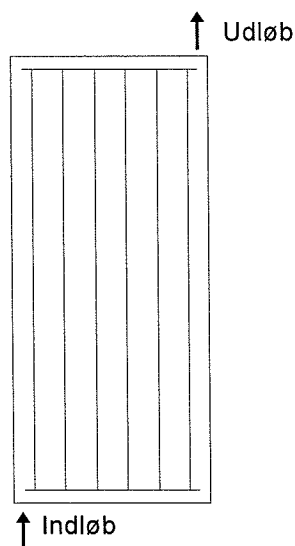
I dette afsnit beskrives problemerne omkring de forskellige typer absorbere. Absorbere kan produceres af flere typer materialer. De mest almindelige materialer er kobber, aluminium og rustfrit stål, men plastabsorbere findes også. Materialerne er meget temperaturfølsomme mht. udvidelse, og der kommer i det følgende ind på problemerne ved disse temperaturudvidelser.

3.1 Absorbere af typen strips

Den mest benyttede strip på det danske marked er Sunstrip, der består af aluminiumfiner og kobberrør. En ny type kaldet Custrip af rent kobber har dog også vundet markedsandele den seneste tid. Da der i det følgende skal omtales termisk udvidelse behandles kun Sunstrip da denne indeholder aluminium, der udvider sig mere end kobber ved temperaturstigninger. Aluminium har en termisk udvidelseskoefficient på $24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, mens kobber har en termisk udvidelseskoefficient på $17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. I det følgende regnes der med, at de indre spændinger (mellem Al og Cu) ikke kommer til udtryk i nogen begrænsning af aluminiumets udvidelse. Dvs. der regnes med, at hele strippen har en termisk udvidelseskoefficient på $24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

3.1.1 Parallelkoblede absorberstrips

I det følgende antages det, at stripsene er parallelkoblede til manifoldrøret, som vist på Figur 3-1.



Figur 3-1. Solfanger med parallelkoblede absorberstrips.

3.1.2 Parallelkoblede absorberstrips i stagnation

For ét dæklag er der i afsnit 2.2.1 fundet stagnationstemperaturer på 196°C . I mindre effektive solfangere kan have en noget lavere stagnationstemperatur. For to dæklag blev der i afsnit 2.2.2 fundet en stagnationstemperatur på 217°C . I dette afsnit vil der derfor blive dimensioneret for forskellige stagnationstemperaturer. Udvidelsen af absorberstripsene er udregnet i nedenstående skema for forskellige stagnationstemperaturer.

Stagnationstemperatur	140°C	160°C	180°C	200°C	220°C
Udvidelse [mm/m]	2,9	3,4	3,8	4,3	4,8

Skema 3-1. Udvidelse af absorberstrip som funktion af stagnationstemperatur. Der er regnet med en monteringsstemperatur på 20°C .



Antages manifoldrøret at følge med solfangerkassen, flyttes den 1,0 mm pr. meter ved en opvarmning til 105°C (fra afsnit 2.3) og 0,4 mm pr. meter ved en opvarmning til 50°C. Denne temperatur antages at være den koldeste temperatur, der opnås i kanten. Det kunne f.eks. være i den nederste kant ved solfangere med vandrette strips. Derved fås (ved en stagnationstemperatur på 220°C) en udvidelse af absorberstripsene på 3,8 mm/m i forhold til manifoldrøret (4,8 mm/m ved varm kant – 1,0 mm/m ved kold kant).

Lader man i stedet absorberen bevæge sig i forhold til solfangerkassen, skal den så dimensioneres til at absorberen kan udvide sig 2,2 mm pr. meter (ved en stagnationstemperatur på 220°C) i hver ende. Derved er man altså nødt til at lade manifoldrøret bevæge sig i forhold til solfangerkassen. I nedenstående skema er vist hvor meget manifoldrøret er nødt til at kunne bevæge sig i forhold til solfangerkassen ved varierende stagnationstemperaturer.

Stagnationstemperatur	140°C	160°C	180°C	200°C	220°C
Nødvendig bevægelse af manifoldrør	1,3 mm/m	1,5 mm/m	1,7 mm/m	2,0 mm/m	2,2 mm/m

Skema 3-2. Nødvendig bevægelse af manifoldrør som funktion af stagnationstemperatur.

Er det ikke muligt at lade absorberen udvide sig, vil man få en udbøjning af absorberen. I efterfølgende skema er vist den maksimale udbøjning (ved den kolde kant) som funktion af stagnationstemperaturen. Der er alle steder regnet med en maksimal kanttemperatur på 50°C.

Stagnationstemperatur	140°C	160°C	180°C	200°C	220°C
Udbøjning	31 mm/m	34 mm/m	36 mm/m	38 mm/m	41 mm/m

Skema 3-3. Maksimal udbøjning af absorberstrip som funktion af stagnationstemperatur.

Som det kan ses af skemaet, kan det blive et problem ved lange strips, hvis udvidelsen kommer til udtryk som en udbøjning af strippen, idet absorberen kan bule op i dæklaget.

En løsning er at fastspænde absorberstripsene^{vi}. Derved fås en mindre udbøjning, der stadig kan udregnes som 4,1 cm pr. meter (for stagnationstemperatur på 220°C), men hvor afstanden nu kan forkortes til afstanden mellem fastspændingerne. I nedenstående skema er vist den maksimale udbøjning for varierende stagnationstemperaturer og fastspændingsafstande.

Stagnationstemperatur/ fastspændingsafstand	140°C	160°C	180°C	200°C	220°C
3/4 meter	23 mm/m	26 mm/m	27 mm/m	29 mm/m	31 mm/m
1 meter	31 mm/m	34 mm/m	36 mm/m	38 mm/m	41 mm/m
1 1/4 meter	39 mm/m	43 mm/m	45 mm/m	48 mm/m	51 mm/m
1 1/2 meter	47 mm/m	51 mm/m	54 mm/m	57 mm/m	62 mm/m

Skema 3-4. Maksimal udbøjning for varierende stagnationstemperaturer og fastspændingsafstande.

Som det kan aflæses i skemaet vil en fastspændingsafstand på 1,5 meter være for stor i de fleste tilfælde, hvis man regner med et luftmellemrum på 50 mm, og man er derfor nødt til at mindske fastspændingsafstanden.

^{vi} F.eks. ved at spænde tråde hen over dem.



3.1.3 Parallele absorberstrips i delvis stagnation

Ved delvis stagnation regnes i det følgende med at nogle strips er i stagnation, mens andre er i drift. Derved kan der opnås store temperaturforskelle mellem stripsene, og de kan begynde at bevæge sig i forhold til hinanden. En ekstrem situation ville være, hvis de "varme" absorberstrips opnåede en temperatur på 220°C og de "kolde" en temperatur på 20°C. Herved fås altså en temperaturforskel for de to strips på 200°C, hvilket vil medføre en udvidelsesforskel på 4,8 mm pr. meter. Denne udvidelsesforskel vil betyde at trykket på manifoldrøret ikke er ens over hele dets længde. Det værste tilfælde fås ved at de kolde strips holder i manifoldrøret, således at de varme strips bøjer op mod dæklaget. Hermed fås en udbøjning på 4,2 cm pr. meter strip. I skemaet nedenfor er vist udbøjningen af de varme strips for forskellige stagnationstemperaturer. Temperaturen af de kolde strips regnes i alle tilfælde som 20°C.

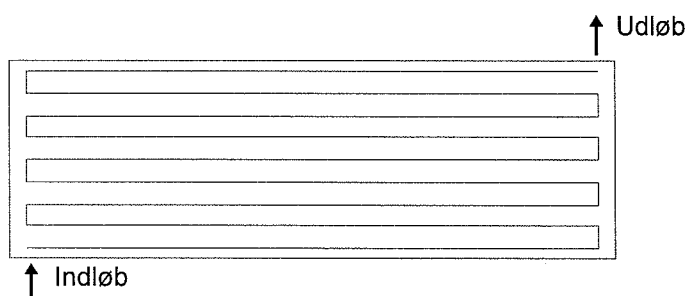
Stagnationstemperatur	140°C	160°C	180°C	200°C	220°C
Udbøjning [cm/m]	3,3	3,6	3,8	4,0	4,2

Skema 3-5. Maksimal udbøjning af de varme absorberstrips i en solfanger i delvis stagnation som funktion af stagnationstemperatur.

Udbøjningen ses at være ret kraftig, og der er den mulighed at fastspænde absorberstripsene eller at benytte sig af serielkobling af absorberstripsene, hvorved problemet med manifoldrøret ikke forekommer.

3.1.4 Serielkoblede absorberstrips

I det følgende antages det at stripsene er serielkoblede. Dvs. absorberstripsene er koblet til hinanden som vist på Figur 3-2.



Figur 3-2. Solfanger med serielkoblede absorberstrips.

Serielkoblede strips er ikke forbundet til noget manifoldrør, men kun til en tilslutning i hver ende af serielkoblingen. Derved haves en noget mindre risikofyldt situation, idet der nemmere kan laves plads til at absorbereren kan udvide sig (frem for parallelkoblede strips hvor manifoldrøret holder på absorberstripsene). Udvidelsen af den samlede absorber vil fordele sig over de forskellige bukninger (sammenkoblinger af strips), hvorved den samlede udvidelse af absorbereren vil svare til udvidelsen ved parallelkoblede strips. Problemet bliver dog noget mindre idet de serielkoblede strips ikke er fastgjort i hver ende af strippen. Dvs. de frit kan udvide sig ud mod rammen. Den skal så dimensioneres til, at stripsene kan udvide sig på langs.

I og med at den nederste og øverste strip^{vii} kan være koblet til en tilslutning i hver side, bør man lave plads til den fulde absorberudvidelse i hver side.

^{vii} Dette er ved vandrette strips. Ved lodrette strips er det den venstre og højre strip. Problemstillingen er dog den samme.



3.1.5 Udbøjninger grundet temperaturforskelle i strippen

I selve strippen vil der fremkomme temperaturforskelle ved almindelig drift, i og med solfangervæsken køler absorberet af. Der er i /13/, kap. 6 opstillet ligninger til udregning af temperaturen et vilkårligt sted på absorberpladen. Ud fra disse ligninger fås at ved en middelvæsketemperatur på 95°C og en bestrålingsstyrke på 1000 W/m^2 opnår absorberpladen en temperatur på omkring 130°C , mens selve absorbermiddelttemperaturen er omkring 105°C . Der haves altså en temperaturforskel på 25 K. Det giver anledning til en udvidelsesforskel af aluminium på 0,6 mm/m. Kommer denne udvidelse til udtryk i en samlet udbøjning, vil den blive på 1,5 cm pr. meter. Det menes dog ikke at være tilfældet, i og med at udbøjningen af absorberpladen vil søge at løfte absorberet med sig op. Dermed vil udbøjningen blive mindsket betydeligt, her anslået til halvdelen. Altså haves en udbøjning af absorberstrippen pga. temperaturforskelle i strippen på 7,5 mm pr. meter. Dette vil kun give problemer ved lange strips, der derfor på en eller anden måde må holdes nede, afhængigt af afstanden mellem absorberen og dæklaget.

3.1.6 Sammenfatning af problemer med absorberstrips

I afsnittet er behandlet absorberstrips udbøjninger. Disse kan fremkomme som følge af stagnation (hel eller delvis) i absorberen, eller som følge af temperaturforskelle i strippen. Ved parallelkoblede strips i stagnation kunne man få udbøjninger op til 4,1 cm/m. Vil man undgå udbøjningerne, kan man lade manifoldrøret bevæge sig 2,2 mm/m i hver ende. Ved delvis stagnation i parallelkoblede rør kan forekomme udbøjninger op til 4,2 cm/m. Ved serielkoblede rør i stagnation fås de samme forhold som ved parallelkoblede rør i stagnation. Udbøjninger som følge af temperaturforskelle i absorberstrippen kan give udbøjninger på 7,5 mm/m, hvilket kun giver problemer ved meget lange absorberstrips.

3.2 Absorber af typen kanal- /ribbepladeabsorbere

Kanal- og ribbepladeabsorbere er absorbere hvor væsken løber i hele absorberen. Der haves altså ikke nogen direkte finner, og et meget større varmeoverføringsareal, end ved absorbere af strips. I dette afsnit behandles kun kanalabsorbere af metal, mens ribbeplader af plast er behandlet under afsnittet plastabsorbere (afsnit 3.3).

Temperaturforskellen mellem den øvre og nedre plade bevirker en udbøjning af den varme plade. Den største temperaturforskel mellem den øverste og den nederste plade fås ved en dårlig varmeoverføring mellem pladerne og væsken. En mindre god varmeoverføring kan fås ved at benytte laminar strømning frem for turbulent strømning. Ved at benytte meget lav væskehastighed ($0,03 \text{ l/min/m}^2$) i beregningerne er der altså sikret, at der regnes på laminar strømning. I beregningerne er bestrålingsstyrken sat til 1000 W/m^2 og udetemperaturen til 20°C . Ved en middelvæsketemperatur på 20°C fås en øverste pladetemperatur på $24,4^{\circ}\text{C}$. I det følgende benyttes derfor en maksimal temperaturforskel mellem væske og pladetemperatur på 5 K. Det antages at den nederste plade får samme temperatur som væsken, og temperaturforskellen mellem øverste og nederste plade bliver altså maksimum 5 K. Dette svarer til en udvidelse af den øverste plade i forhold til den nederste plade på 0,1 mm/m. Det vil ikke give anledning til nogen udbøjning, idet udvidelsen vil kunne optages i sammensvejsningerne af pladerne, der virker afstivende.

3.3 Plastabsorbere

Plastabsorbere er stadigvæk i udviklingsfasen, men de første erfaringer er gjort. Der findes flere forskellige slags plastabsorbere. Det mest anvendte plastmateriale til absorbere er polypropylen (PP), med en termisk udvidelseskoefficient på $80 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (/11/). De typisk anvendte plastmaterialer udvider sig generelt typisk 3-8 gange så meget som de typisk anvendte metaller.



Det store problem med plastabsorbere er de udvidelser, der kommer som følge af de høje temperaturbelastning er de til tider udsættes for. I stagnation kan temperaturen på oversiden af absorberpladen komme op omkring 140°C , hvilket giver anledning til en betragtelig udvidelse. Dette resulterer i en generel udvidelse af hele absorberpladen, men også i en udbuling grundet temperaturforskellen mellem over- og underside på absorberpladen. Udbulingen hindres til dels, ved at ribberne mellem de to plastflader afstiver pladen. Desuden kan man ved at fastgøre absorberpladens underside til solfangerkassens bagside hindre udbøjningen, men til gengæld vil der komme spændinger i pladen.

Hvorfor så bruge plastabsorbere? Forklaringen skal findes i prisen og den nemme tilpasning. Almindelig plast skal dog have påført en selektiv belægning på oversiden for at øge effektiviteten. Denne belægning kan enten dampes direkte på plasten, påføres til plasten med en tynd film eller males på. Den simpleste metode er dog at benytte en sort ribbeplade, men denne har så ikke selektiv belægning. Til gengæld kan der ses visse fordele i en mindre effektiv solfanger, blandt andet lavere stagnationstemperaturer.

I stedet for selektiv belægning på plasten er der også lavet forsøg med sort væske i kanalerne. Dette har dog ikke vist overbevisende resultater, men der er ikke forsket ret meget på dette område.

NB: Det skal bemærkes at plastabsorbere kan have problemer med at kunne modstå store tryk kombineret med høje temperaturer. Det kan derfor blive nødvendigt at udforme anlægget som et trykløst system.

3.3.1 Ribbepladeabsorbere i plast

Ved benyttelse af ribbeplader som absorber kan der ske en opbuling på midten i tilfælde af, at den er fastspændt i enderne, f.eks. ved at manifoldrør er ført ud ad huller i kassen. Denne opbuling kan maksimalt svare til udbøjningen af en bjælke med en længde svarende til den lange side af ribbepladen. Maksimal anvendelsestemperatur for PP er 140°C , jvf. /12/, og derfor kan denne temperatur benyttes som den maksimale temperatur i absorberen. Derved haves en udvidelse af PP på $9,6 \text{ mm/m}$. Rammen vil tilsvarende udvide sig, dog opnår den en lavere maksimumstemperatur. Det antages, som i afsnit 2.4, at der er mindst 50°C . Derved fås en udvidelse af stålet på $0,4 \text{ mm/m}$. Dæklaget vil derfor udvide sig $9,2 \text{ mm/m}$ i forhold til rammen. Hvis denne udvidelse kommer til udtryk i en udbøjning af pladen^{viii}, vil det svare til en udbøjning på 59 mm/m plade.

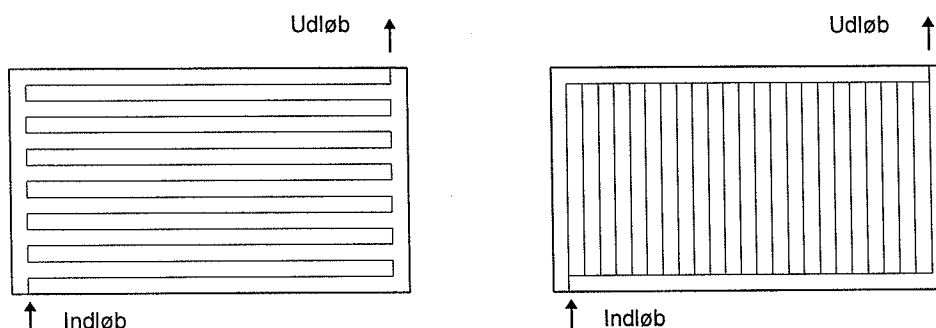
Dette er absolut ikke tilrådeligt, idet absorberen så vil bule op i dæklaget. Dette kan forhindres ved enten at spænde absorberpladen fast, så den ikke kan bøje ud, eller at undgå fastgørelse i kanterne. I tilfælde af at absorberen ikke fastspændes i kanten, skal der være plads til, at den kan udvide sig. Denne udvidelse er ovenfor beregnet til $9,2 \text{ mm/m}$ plade, hvilket der altså skal tages hensyn til. Det kan f.eks. være i form af at absorber-ribbepladen dimensioneres 10 mm/m mindre end indvendigt mål af solfangerkassen.

^{viii} Beregnet ud fra formler i Bilag A - Beregning af udbøjning grundet termiske udvidelser



3.3.2 Rørabsorbere i plast

Ved rørabsorbere forstås en plade hvorpå der er fastspændt mange parallelle rør/slanger. Figur 3-3 viser to forskellige måder at lægge disse rør på.



Figur 3-3. To forskellige typer rørabsorbere. Længst til venstre er vist en serieforbunden, mens den til højre er parallelforbundet.

Disse rør i absorberen kan være meget lange, eksempelvis 75 m for typen med serieforbundne rør. Ved en maksimal temperaturstigning på 120°C havs en udvidelse på 9,6 mm/m, hvilket vil give en udvidelse af 75-meter-slangen på 72 cm. Antages det, at slangen ikke har mulighed for at bevæge sig i enderne, pga. tilslutningsforholdene, må udvidelsen altså fordeles anderledes. Det kan foregå ved udbuling af slangen, eller ved at udvidelsen fordeles mellem slangestykkerne mellem hver bukning.

Udbuling af slangen sker mellem fastgørelsespunkterne. Sammenhængen mellem fastgørelsesafstande og udbuling fremgår af nedenstående skema.

Afstand mellem fastgørelsespunkter	0,20 m	0,40 m	0,60 m	0,80 m	1,00 m
Udvidelse	1,9 mm	3,8 mm	5,8 mm	7,7 mm	9,6 mm
Udbuling	12 mm	24 mm	36 mm	48 mm	59 mm

Skema 3-6. Udbuling som funktion af afstand mellem fastgøringspunkter for rørabsorbere af polypropylen ved en temperaturstigning på 120°C.

3.3.3 Termisk udvidelse af plastabsorbere

Varmeudvidelsen for plastabsorberpladen kan være ganske betragtelig i en sommerperiode, hvor systemet endog kan udsættes for stagnationstemperaturer. Nedenstående beregninger viser, hvor meget absorberen kan udvide sig som følge af de høje temperaturer.

	Termisk udvidelseskoefficient	Max. Temperatur	Montage-temperatur	Temperatur-forskel	Udvidelse
	α [K^{-1}]	Tmax [$^{\circ}C$]	Tmontage [$^{\circ}C$]	ΔT_{max} [K]	ϵ [mm/m]
Akryl	$75 \cdot 10^{-6}$	220	20	200	15
PC	$65 \cdot 10^{-6}$	220	20	200	13
PP	$80 \cdot 10^{-6}$	220	20	200	16

Skema 3-7. Plastabsorberes forhold under stagnation.

$$\text{Udvidelse } \epsilon = \alpha \cdot \Delta T_{max}$$



Det vigtige er, at solfangerkassen skal kunne rumme muligheden for udvidelse. Eventuelt kan absorberen fastgøres med jævne mellemrum til underlaget. Derved kan store udbøjninger undgås.

3.3.4 Sammenfatning af plastabsorbere

Der skal tages hensyn til de store udvidelser, der fremkommer, når plastabsorberen udsættes for stagnationstemperaturer. Afhængigt af absorberens bredde skal afstanden op til dæklaget bestemmes, idet temperaturforskellen mellem absorberens over- og underside bevirker, at absorberpladen bøjer op. Dog kan man fastholde absorberens underside til bagsiden af solfangeren, hvis denne er stiv nok. Dette sætter dog krav til solfangerrammens styrke og dermed materialekrav, hvilket uden tvivl fordyrer anlægsomkostningerne.

3.4 Manifoldrør med tilslutning til vandrette strips

Manifoldrøret, der forbinder til- og frakobling til absorberpladen, skal overholde visse krav. Det er vigtigt, at manifoldrøret har omtrent den samme termiske udvidelseskoefficient som selve absorberpladen, da der ellers vil opstå problemer med tilkoblingen, der sandsynligvis vil blive utæt. Desuden må manifoldrøret i længderetningen ikke kunne udvide sig mere, end solfangerkassens dimensioner tillader. Rammen vil oftest ikke opnå samme høje temperatur som manifoldrøret under drift, og specielt ikke i stagnationstilfælde.

3.4.1 Manifoldrør med tilslutning til vandrette strips i stagnation

Grundet temperaturforskelle kan der opstå spændinger i manifoldens tilslutning til absorber, afhængigt af hvilke materialer der sammensættes. Under stagnation kan absorberen opnå temperaturer omkring 220°C. Skulle manifoldrøret og absorberen have opnået denne ekstreme temperatur, vil det for nogle materialevalg være yderst kritisk. Det kan ses af nedenstående Skema 3-8.

Materiale	Kobber	Aluminium	PC	Akryl	PP
Rustfrit stål	0,005	0,012	0,053	0,063	0,068
Kobber		0,007	0,048	0,058	0,063
Aluminium			0,041	0,051	0,056
PC				0,010	0,015
Akryl					0,005

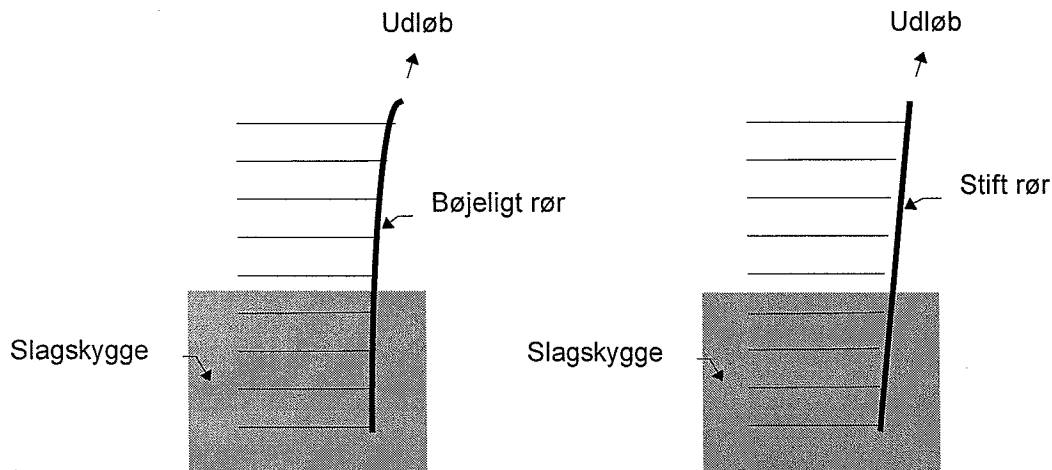
Skema 3-8. Ekstraudvidelse mellem to materialer som følge af forskelle i termiske udvidelseskoefficienter [$\text{mm/m} \cdot \text{K}$].

Det ses af skemaet, at under normal drift vil der ikke være de store udvidelser, maksimalt 0,6 mm mellem rustfrit stål og akryl pr. meter. Rustfrit stål/aluminium vil under stagnation have en forskel på 2,4 mm/m i forhold til montagetemperaturen, mens eksempelvis rustfrit stål/akryl har en forskel på 12,6 mm/m. En deformation af denne størrelse vil plasten ikke kunne klare, og det må derfor anbefales at finde en anden sammensætning. I det hele taget vil det være uklogt at bruge et metalrør som manifoldrør sammen med plastmaterialer, for som det kan beregnes af tabellen, vil mindste udvidelse (aluminium/PC) være på 8,2 mm/m i ekstrem situationen.



3.4.2 Manifoldrør med vandrette strips i delvis stagnation

Under delvis stagnation dukker et andet problem op. Antages det, at nederste del af absorberen ligger i slagskygge, kan øverste del blive meget varmere end den nederste. Absorberen vil øverst udvide sig mere end nederst. Dette vil være et problem for absorberens tilslutning til manifoldrøret.



Figur 3-4 Manifoldrør ved delvis stagnation. Manifoldrøret kan følge udvidelsen eller, hvis røret er stift nok, følge det yderste af absorberen, hvilket kan medføre at der kan opstå brud mellem de "kolde" strips og manifoldrøret.

Antages manifoldrøret stift, vil absorberen øverst presse manifoldrøret udad, samtidigt med at det fastholdes nederst. Det betyder, at koblingerne i overgangen fra varm til kold absorber vil have store spændinger i tilslutningen til manifoldrøret. Dette vil være et problem, uanset hvilket metal der bruges som manifoldrør, mens det ved brug af "blødere" plasttyper kan optages i bøjningen af manifoldrøret.

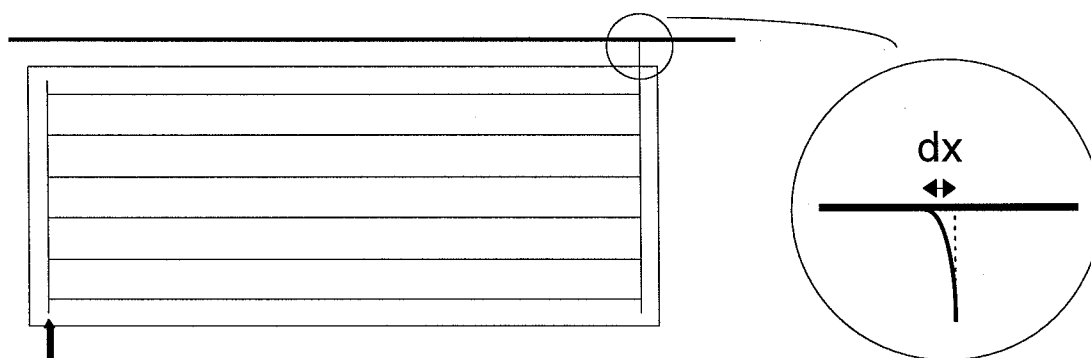


4. Absorbertilslutninger til hovedrør

Tilslutningen fra absorber til hovedrør kan være forbundet med visse problemer. Tidligere i denne rapport (afsnit 3.4) er problematikken omkring bl.a. manifoldrørs tilslutning behandlet. Der henvises til dette afsnit for uddybende oplysninger.

4.1 Absorber direkte tilsluttet hovedrør

Solfangeren er fastmonteret på taget og forventes ikke at flytte sig andet end de naturlige udvidelser der kommer grundet ændringer i temperatur. Problemet er derfor absorbertilslutningens beliggenhed i forhold til hovedrøret.



Figur 4-1. Tilslutningen fra solfanger med parallelkoblede absorberstrips til hovedrør.

- Af Figur 4-1 ses problemet, hvor absorberen har udvidet sig mere end hovedrøret. Dette betyder, at der fremkommer spændinger i tilslutningen. Dette kan løses ved at man på hovedrøret indsætter lyrer for at afhjælpe disse spændinger.

- Tilslutningen fra solfanger til hovedrør sker gennem dertil beregnede koblinger, der tager højde for eventuelle udvidelsesproblemer i forbindelse med materialeskift.



5. Bevægelser af dæklag på grund af mekaniske belastninger

Ved mekaniske påvirkninger af solfangere forstås de belastninger, som påføres solfangeren enten på grund af vejret eller personer der arbejder med opsætning eller vedligeholdelse. De væsentligste mekaniske påvirkninger er nævnt nedenfor.

- snelast, der tynger på dæklaget ned mod absorberen
- vind, der presser dæklaget ind mod absorberen
- vindsug, der trækker dæklaget udad med fare for løsning fra rammen
- personlast, hvor en person træder på enten dæklag eller ramme

Under projekteringen bør der være taget hensyn til de belastninger, som de tre første vejrafhængige faktorer kan udsætte solfangeren for. For yderligere oplysninger angående lastkombinationer fra vejrliget henvises til /16/.

Personlast på solfangeren skal så vidt muligt undgås. Der kan afhængigt af solfangertype tillades personlast på rammen. Ved mange solfangere ved siden af hinanden bør der i projekteringen være tænkt over, hvordan håndværkere skal kunne opsætte systemet og ligeledes, hvordan eventuelle reparationer i et solfangerelement skal kunne laves.

De mekaniske belastninger vil medføre at dæklaget udbøjer. Hvor stor udbøjningen vil være afhænger af, hvordan dæklaget er fastgjort i rammen, dimensionen af dæklaget samt materialet og tykkelsen af dæklaget.

På Institut for Bygninger og Energi (IBE) på DTU er der i mange år udført afprøvninger af diverse solfangere. Disse test er dokumenteret på datablade og vedlagt prøvningsrapporten til de enkelte solfangere. Solfangerne gennemgår så vidt muligt fire forskellige test: stagnationsprøve, regntæthedsprøve, ventilationsprøve og mekanisk prøve. Ofte er det dog ikke alle fire test, der bliver lavet, og der er kun enkelte resultater ved de mekaniske test. Disse resultater, der er fundet i disse datablade, er sammensat i bilag B, mens en mere overordnet behandling af dæklagstyperne er beskrevet i det følgende.

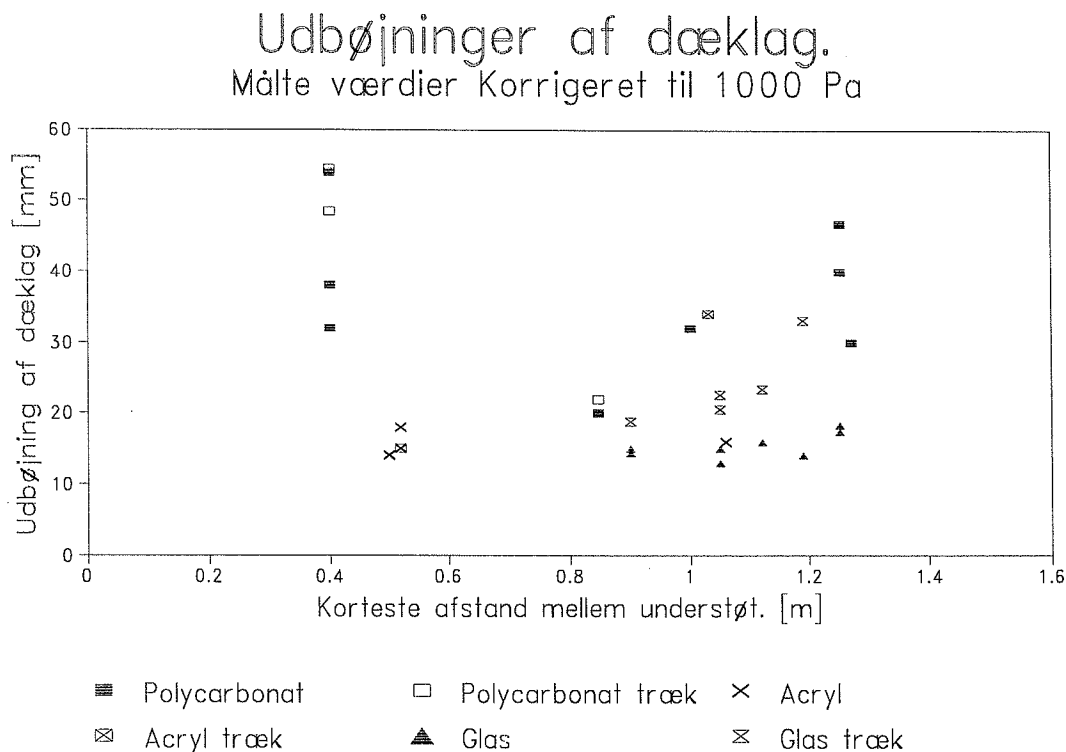
Først er her lige en kort beskrivelse, af hvordan den mekaniske prøve udføres. Den består af tre belastningsformer svarende til langvarig ballast på dæklaget, dæklagets bevægelser under kraftige vindstød og dæklagets holdbarhed under kortvarige ekstrembelastninger:

- 1) Snelast: Snelast svarer til en trykbelastning på 750 - 1000 Pa over en times konstant tryk. Der måles hvor meget dæklaget bøjer nedad. (1000 Pa svarer til 10 cm vandsøjle).
- 2) Dæklagsbevægelse: Der testes hvor meget dæklaget udbøjer. Udbøjningerne findes oftest i sammenhæng med de resultater, der fremkommer under regntæthedsprøvningerne og svarer til træk/tryk på 600 Pa. Disse test er udført i cykler på 60 gange og udført over fire timer. Andre af de maksimale værdier er fundet ved vindlastprøver, hvor dæklagene er testet for ekstreme lasttilfælde ved at udsætte dæklagene for stigende træk/tryk.
- 3) Vindlastprøve: Ekstreme belastninger påføres dæklaget for at vurdere, hvordan dæklaget klarer sig over for kraftige vindstød.

I denne rapport er udbøjningen grundet snelast og dæklagsbevægelser for forskellige dæklagsmaterialer behandlet, ud fra de resultater, der er fremkommet ved forsøg på forskellige solfangertyper. Figur 5-1 viser, hvor meget forskellige typer af dæklag udbøjer afhængigt af deres bredde, når de udsættes for belastninger, der svarer til realistiske danske vejrforhold. Figuren afbilder den samme belastning (1000 Pa), hvilket i enkelte tilfælde ikke har været den målte værdi. Her er der i stedet



beregnet, hvad udbøjningen, grundet forsøg med mindre belastning, ville svare til, hvis belastningen havde været 1000 Pa.



Figur 5-1. Udbøjning af dæklag som funktion af den korteste afstand mellem understøtninger. De viste punkter er målte udbøjninger ved det givne materiale og tryk eller træk.

Det ses, at udbøjningen er mindst for glas og højest for polycarbonat, mens akryl ligger imellem disse. Dette hænger sammen med materialernes elasticitet.

Man kan ikke generalisere, hvor stor udbøjningen af dæklaget vil blive. Udbøjningerne er meget afhængige af dæklagets fastgørelse til rammen, og man må derfor betragte den enkelte solfangerkonstruktion og derudfra vurdere, om indspændingen vil reducere udbøjningen. En solid fastgørelse til rammen giver mindre udbøjning. Ligeledes vil en stiv ramme bevirke, at udbøjningerne bliver mindre.

For ribbeplader af polycarbonat er udbøjningen kraftig. Det kan derfor tilrådes at understøtte dæklaget på centrale steder for at mindske udbøjningen. Det er anbefalelsesværdigt at understøtte dæklaget, især fordi en meget varm absorber kan ødelægge dæklag af denne type, da polycarbonat ikke tåler temperaturer over 140°C. Dog er sammenfald mellem ekstremt varm absorber og snelasttryk umulig og sammenfald mellem ekstrem varm absorber og kraftig vindpåvirkning usandsynlig.

5.1 Sammenfatning af mekaniske belastninger

Ud fra praktisk udførte forsøg lavet på IBE er Figur 5-1 lavet. Denne figur viser, at udbøjning af dæklag i høj grad er afhængig af den enkelte solfangerkonstruktion. Figuren giver dog et fingerpeg om de forskellige dæklagmaterialers typiske udbøjninger og viser, at ved brug af plastmaterialer som dæklag skal der i konstruktionen af solfangeren overvejes understøtninger eller konsekvensen af store udbøjninger.



6. Konklusion

Der er i rapporten opstillet en del problemer, man som producent af solfangere bør være opmærksom på under fremstillingen. Det dominerende problem er de udvidelser der sker med materialerne når de udsættes for høje temperaturer. Endnu et væsentligt problem er materialernes holdbarhed ved de højere temperaturer samt holdbarhed ved det almindelige vejrlig.

Det er vigtigt, at solfangerne er mere eller mindre vedligeholdelsesfrie. Der bør i projekteringen tages hensyn til dette, således at væsentlige fejl helt undgås. Den væsentligste konklusion er at man så vidt muligt skal forsøge at sammensætte materialerne, så de har noget nær samme termiske udvidelseskoefficient eller i modsat fald gøre plads til udvidelserne. Med de store temperaturforskelle materialerne kan udsættes for, kan uheldig sammensætning forårsage utætheder, brud, udbøjning, mindsket effektivitet mm.

Der er i de enkelte afsnit beskrevet problemstillinger over solfangerkomponenter. Disse er forsøgt klarlagt, og der er lavet beregninger, som illustrerer, hvad solfangerdelene kan udsættes for under de værst tænkelige forhold. De fleste afsnit har desuden samlet de vigtigste oplysninger om det behandlede emne i en sammenfatning.

De mest markante ting, som der er fundet frem til under bearbejdelse af rapporten, er:

- De anvendte programmer Soleff og Heat2 kan bruges til analyse af denne type problemer.
- Almindelige solfangere med dobbelt dæklag bør have yderste glaslag af hærdet glas.
- Behovet for ydre dæklag af hærdet glas for low-flow kan ikke begrundes med termiske udvidelser.
- Stagnation kombineret med slagskygge kræver hærdet glas.
- Teflonfolie som inderste dæklag i solfangere med dobbelt dæklag giver gode resultater.
- Fugetykkelse og fugemateriale er essentielt for holdbarhed og tætheden af solfangerne.
- Der skal tages hensyn til absorberudvidelser i solfangerrammen.
- Man skal være påpasselig med brug af plastmateriale grundet deres store udvidelseskoefficient.
- Der skal tages hensyn til, at mange plastmaterialer ikke tåler temperaturer meget over 100°C.
- Tilkobling til manifoldrør er kritisk, specielt under situationer med delvis stagnation.
- For at kompensere for rørudvidelser er det vigtigt at indsætte lyrer eller muffe.
- Generalisering af dæklagsudbøjninger grundet mekaniske belastninger kan ikke foretages grundet solfangerkonstruktionens forskellige opbygninger.
- Der skal tages højde for dæklagsnedbøjninger grundet mekaniske belastninger, eventuelt ved at indsætte understøtninger mellem absorber og dæklag.



7. Referenceliste

- /1/ Udvikling af tagsolfanger med glas : S. Ejsing m.fl. Juni 1995. LfV, DTU. Rapport 95-14.
- /2/ Facadefuger - udformning og materialer. SBI-anvisning 177. 1993.
- /3/ Utvendig fastlimt glass : T. Gjelsvik 1989. Norges byggforskningsinstitut anvisning 32.
- /4/ Glas i klimaskærmen - en udregning. SBI-meddelelse 107. 1995.
- /5/ Facader av glass og metall : T. Isaksen m.fl. 1990. Norges byggforskningsinstitut håndbog 41.
- /5a/ Termoruder i skrå tagflader : Glasindustriens Samarbejdsorganisation.
- /6/ Soleff. Dokumentation.
- /7/ Heat 2. Dokumentation.
- /8/ Fastgørelse og inddækning af dæklag i solfangeren : S. Svendsen og K. Tursø-Finnich, Marts 1994, LfV, DTU. Rapport 94-05.
- /9/ Teflon FEP flourcarbon film. Dupont. Brochure.
- /10/ Solfångares kvalitet och beständighet i Sverige. Del 2. Konvektionshinder av FEP-film - Skadesutredning. SP-rapport 1993:17. Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut.
- /11/ Plast i solvarmeanlæg. S. Nielsen og N.B. Andersen. Energiministeriets solvarmeprogram - Rapport 31.
- /12/ Handbook of plastics, elastomers and composites. 2nd ed. : Charles A. Harper. 1992. (10.38)
- /13/ Solar Engineering of Thermal Processes 2nd Edition : J. Duffie & W. Beckman.
- /14/ BPS-publikationen 94, 2. udgave, BPS-centret, 1994
- /15/ Databog - fysik/kemi, E.S. Andersen, P. Jespersgaard, O.G. Østergaard, 1994
- /16/ Dæklag, isolering og undertag til tagsolfangere, K.Tursø-Finnich, S. Svendsen, 1993

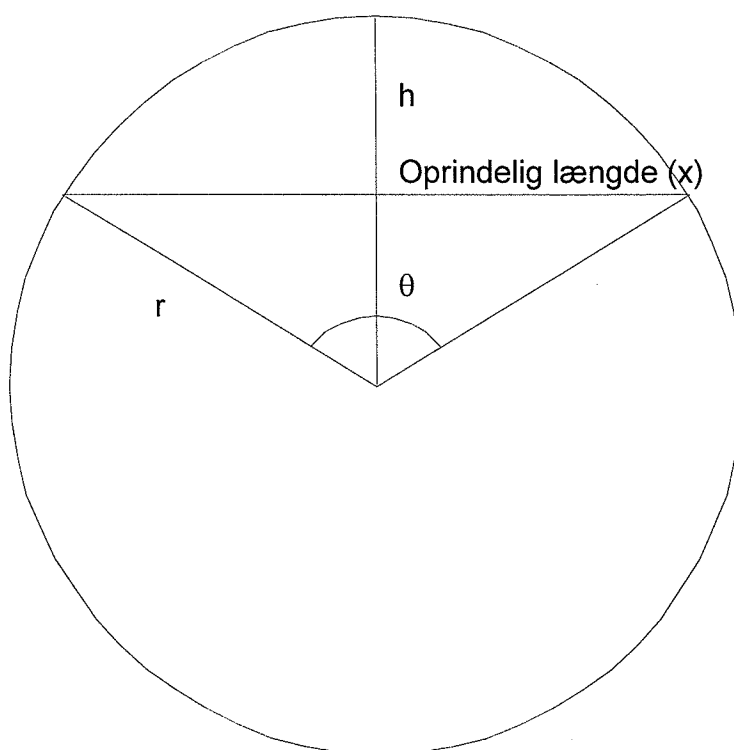


8. Bilag A - Beregning af udbøjning grundet termiske udvidelser

I det følgende antages det, at pladen er fastspændt i alle fire sider. Den maksimale udbøjning fås ved, at hele materialeudvidelsen kommer til udtryk i en udbøjning. Denne vil være kalotformet i midten af pladen, hvis denne er kvadratisk. Ved ikke kvadratiske fastspændte plader fås den maksimale udbøjning, som udbøjningen for den korteste side af pladen. Denne udbøjning vil være cirkelbueformet. Dvs. pladen kommer til at ligne en overskåret cylinder.

Der tages ikke hensyn til ribber i pladen, men de vil dog søge at mindske udbøjningen af pladen. For at udregne udbøjningen betragtes pladen som en bjælke med en længde svarende til den korte side af pladen.

Materialelængde efter udbøjning (s)



s fås som $\theta \cdot r$. (vinkelafsnit gange radius).

Deraf fås at $r = s/\theta$. **(f.1)**

Derudover er $s = \alpha' \cdot x$, hvor $\alpha' = 1 + \alpha \cdot \Delta T$. (Fås fra afsnit 2.4).

Som følge heraf er $x = s/\alpha'$. **(f.2)**

x kan også fås som værende lig med $2 \cdot r \cdot \sin(\theta/2)$. **(f.3)**

(Almindelig geometri i retvinklet trekant).

Kombineres f.1 med f.3 fås

$x = 2s/\theta \cdot \sin(\theta/2)$ og kombineres f.2 med dette fås

$2s/\theta \cdot \sin(\theta/2) = s/\alpha'$.

Heraf fås følgende relation (hvor $\beta = \theta/2$)

$\sin \beta = \beta/\alpha'$. **(f.4)**



f.4 løses analytisk for β i løbet af få iterationer.

Løsningen på f.4 kan nu benyttes i f.1, hvorved r kan udregnes.

Til slut udregnes h (pilhøjden/udbøjningen) ud fra f.5 (nedenfor)

$$h = r (1 - \cos(\theta/2)). \quad (\mathbf{f.5})$$

(Almindelig geometri i retvinklet trekant).

Sammenfattet :

$$\text{Løs } \sin \beta = \beta/\alpha'.$$

$$h = \alpha'/(2*\beta) * (1 - \cos \beta)*x.$$

Som det ses i formlen for h er denne proportional med x , og pilhøjden kan altså udregnes direkte ud fra kendskab til den oprindelige materialelængde, når først udbøjningskonstanten er fundet. Denne fås derfor som $\alpha'/(2*\beta) * (1 - \cos \beta)$.



9. Bilag B - Resultater af afprøvningsforsøg af dæklagstyper udført på IBE

IBE nr.	Størrelse	Lag	Understøtninger	Materiale	Snelast (tryk)	Max. tryk	Max trækk
259	2,01 m2 2,06*1,05	1	Kun fastholdt ved ramme	3 mm jernfattigt hærdet glas	1000 Pa : 13 mm		2000 Pa : 41 mm
271	2,02 m2 1,88*1,19	1	Kun fastholdt ved ramme	3 mm jernfattigt hærdet floatglas	1000 Pa : 14 mm		1000 Pa : 33 mm
285	1,79 m2 2,17*0,90	1	Kun fastholdt ved ramme	3,2 mm jernfattigt hærdet glas	1000 Pa : 15 mm	1600 Pa : 23 mm	1600 Pa : 30 mm
210	2,01 m2 1,05*2,05	1	Kun fastholdt ved ramme	4 mm alm. glas	750 Pa : 15 mm	750 Pa : 15 mm	600 Pa : 7 mm
228	2,75 m2 2,46*1,25	1	Kun fastholdt ved ramme	4 mm jernfrit glas	750 Pa : 13 mm	600 Pa : 11 mm	
233	2,19 m2 2,07*1,12	1	Kun fastholdt ved ramme	4 mm alm. glas	750 Pa : 12 mm	600 Pa : 4 mm	600 Pa : 14 mm
263	2,01 m2 2,06*1,05	1	Kun fastholdt ved ramme	4 mm jernfattigt hærdet glas	1000 Pa : 15 mm		1600 Pa : 36 mm 2000 Pa : 41 mm
268	3,00 m2 2,83*1,13	1	Kun fastholdt ved ramme	4 mm jernfattigt hærdet glas	1000 Pa : 20 mm		1000 Pa : 20 mm
231	1,98 m2 2,08*1,03	1	Fastholdt ved tre tvær- gående understøtninger	1 lag 3 mm acryl	750 Pa : 18 mm	600 Pa : 15 mm	600 Pa : 34 mm
222	1,00 m2 2,00*0,60	1	Fastholdt ved tre tvær- gående understøtninger	1 lag 5 mm acryl (Vedril)	750 Pa : 14 mm		
226	1,00 m2 2,00*1,06	1	Kun fastholdt ved ramme	1 lag 5 mm acryl (Vedril)		600 Pa : 16 mm	600 Pa : 15 mm
277	2,48 m2 2,28*1,19	1	Fastholdt ved ramme og punktunderstøttet 9 steder (3*3 punkter)	3 mm vakuumformet polycarbonat	1000 Pa : 54 mm	1600 Pa : 61 mm 2000 Pa : 64 mm	1600 Pa : 87 mm 2000 Pa : 97 mm
212	2,56 m2 2,30*1,25	1	Kun fastholdt ved ramme	10 mm ribbeblade af polycarbonat	750 Pa : 30 mm	600 Pa : 28 mm	600 Pa : 49 mm
273	2,87 m2 3,00*1,06	2	Understøttet ved ramme og på tværs i tredjedelspunkterne	10 mm ribbeblade af polycarbonat	1000 Pa : 32 mm		1000 Pa : 82 mm
282	2,96 m2 2,54*1,27		Understøttet ved ramme og i to punktunderstøtninger i tredjedelspunkterne	10 mm ribbeblade af acrylbelagt polycarbonat	1000 Pa : 30 mm	1000 Pa : 20 mm	1600 Pa : 35 mm 1600 Pa : 110 mm uden fastholdelse

Tabel 9-1. Kort beskrivelse af mekaniske test udført på IBE, DTU.