

RECENTE ONTWIKKELINGEN BIJ HET VERVAARDIGEN VAN ZONNECOLLECTOREN MET EEN HOOG RENDEMENT

Ir. C. den Ouden

1. INLEIDING

De ontwikkeling van collectoren voor het opvangen van zonnewarmte heeft een nieuwe impuls gekregen als gevolg van de energiecrisis. De sindsdien, met name in de geïndustrialiseerde landen als de V.S. en W.-Duitsland, ontwikkelde 2e generatie 'vlakke-plaat'-collectoren worden in dit artikel aan de orde gesteld.

Een vergelijking tussen de energieproductie van deze collectoren en van de reeds 'klassieke' collectoren wordt gegeven bij toepassing onder Nederlandse klimatologische omstandigheden.

Een overzicht van de toepassingsmogelijkheden van de diverse collectortypen voor de komende 15 jaar wordt geschetst.

2. RENDEMENTSFORMULES VLAKKE-PLAATCOLLECTOREN

De meest 'klassieke' uitvoering van een zonnecollector bestaat uit een zwarte vlakke metalen plaat, afgedekt door dubbel glas (zie figuur 1). De in de plaat geabsorbeerde zonnewarmte moet d.m.v. een buizensysteem worden afgevoerd naar een opslagvat. De achterzijde en de zijkanten van de collector moeten goed geïsoleerd zijn.

Indien de warmte-overdracht van de plaat naar het medium dat de nuttige warmte opneemt goed is en de warmtecapaciteit per oppervlakte-eenheid van de collector niet te groot is, kan het rendement van zo'n collector worden berekend door het opstellen van de warmtebalans

van de absorberende collectorplaat en de boven deze collectorplaat aangebrachte glasplaten. Een gedetailleerde beschrijving van deze rendementsberekening is gegeven in [1].

Het blijkt dat de netto warmtestroomdichtheid q_n , die door de plaat kan worden opgenomen, afhankelijk is van het temperatuurverschil ΔT tussen plaat en buitenlucht.

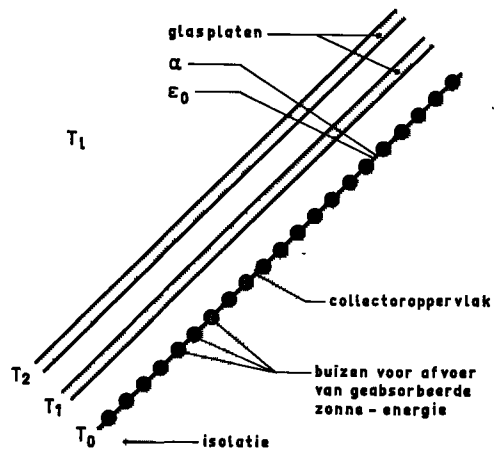
In goede benadering is af te leiden:

$$q_n = \eta_o \cdot E_o - C \cdot \Delta T \quad (1)$$

Hierbij is E_o de opvallende energiestroomdichtheid (W/m^2).

De waarde van η_o wordt voornamelijk bepaald door de transmissie van de glazen afdekking en de absorptiecoëfficiënt van het collectoroppervlak, beide voor zonlicht. De waarde van C wordt vooral be-

Fig. 1 Doorsnede van een standaardcollector met zwart absorberend collectoroppervlak, afgedekt met dubbel glas



paald door de totale warmteweerstand voor convectie en warmtestraling van de collector. De term $C \cdot \Delta T$ geeft in feite het warmteverlies van de collector.

3. ONTWIKKELINGEN VAN VÓÓR 1973 TER VERHOOGING VAN HET RENDEMENT

Voor de energiecrisis richtte het onderzoek ter verhoging van het rendement van zonnecollectoren zich met name op de volgende punten:

- het verbeteren van de warmteoverdracht van de absorberende collectorplaat naar het afvoermedium
- het verminderen van de stralingsverliezen door het toepassen van zgn. spectraalselectieve lagen*) op de collectorplaat
- het voorzien van één of meerdere glasplaten van een infrarood-reflecterende laag
- het aanbrengen van een zgn. 'honeycomb structuur' boven de collectorplaat ter verlaging van de convectieve verliezen en in mindere mate de stralingsverliezen.

In bepaalde gevallen kunnen de drie laatstgenoemde maatregelen ter vermindering van de warmteverliezen (C) van de collector een tweede glasruit overbodig of zelfs ongewenst maken. De investering voor het treffen van zo'n voorziening wordt dan geheel of gedeeltelijk gerechtvaardigd doordat met een enkele glasruit kan worden volstaan.

Andere mogelijkheden ter verhoging van het rendement van collectoren zijn:

- het toepassen van glasruiten met een laag ijzergehalte (verhoging η_o)
- het aanbrengen van anti-reflectielagen op het glas (verhoging η_o).

* Het begrip spectraal-selectief betekent hierbij dat het oppervlak een hoge absorptiecoëfficiënt voor kortgolvlige zonnestraling heeft, maar juist een lage emissiecoëfficiënt voor langgolvlige warmtestraling bij de collectortemperatuur. Meer gegevens over dit soort lagen zijn te vinden in [2].

Voor een overzicht van het effect van deze laatste maatregelen op het rendement wordt verwezen naar [3].

4. ONTWIKKELINGEN VAN DE LAATSTE TWEE JAREN

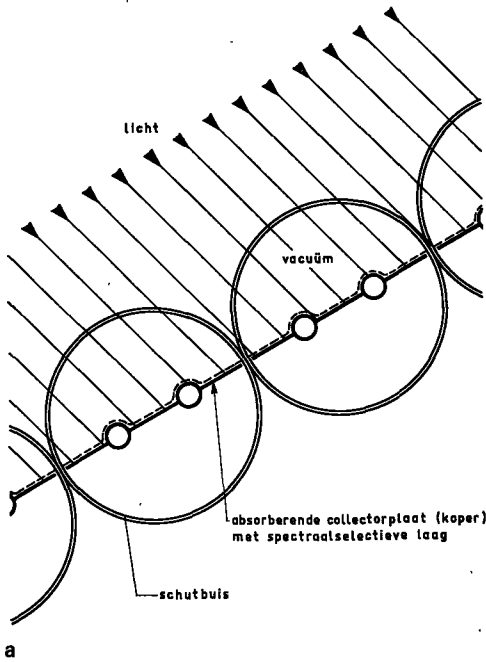
Sinds de energiecrisis en de daarmee gepaard gaande prijsverhoging van olie is de research ter verhoging van het rendement van collectoren tevens in research- en ontwikkelingsafdelingen van industriële laboratoria op gang gekomen. Zo is in een aantal gevallen een verdergaande vermindering van de convectieve verliezen door het evacueren van de ruimte tussen het collectoroppervlak en de glazen afdekking reeds gerealiseerd (figuur 2).

De door het evacueren optredende belasting van de glasafdekking kan worden opgevangen door een cilindrische vorm van de glasafdekking. Aangezien de stralingsverliezen van een collector groter zijn dan de convectieve verliezen, heeft evacueren slechts zin in combinatie met het toepassen van hetzij een spectraalselectieve laag op het absorberende collectoroppervlak (figuur 2a en 2c) hetzij een infraroodreflecterende laag aan de binnenzijde van de glasafdekking (figuur 2b).

De in figuur 2a geschetste uitvoering lijkt nog het meest op een vlakke-plaatcollector. Deze uitvoering bestaat uit een ca. 15 cm brede koperen opvangplaat voorzien van een spectraalselectieve laag, met daarin buizen voor de toe- en afvoer van het koelmedium, omgeven door een iets wijdere cilindrische glazen schutbuis welke geëvacueerd is. Door het aaneenschakelen van een aantal van deze buizen wordt het gewenste aantal m² collectoroppervlak verkregen.

De in figuur 2b geschetste uitvoering bestaat eveneens uit een geëvacueerde glazen schutbuis, de binnenzijde hiervan is van boven voorzien van een infrarood-reflecterende laag, terwijl de onderste helft voorzien is van een zilverspiegel.

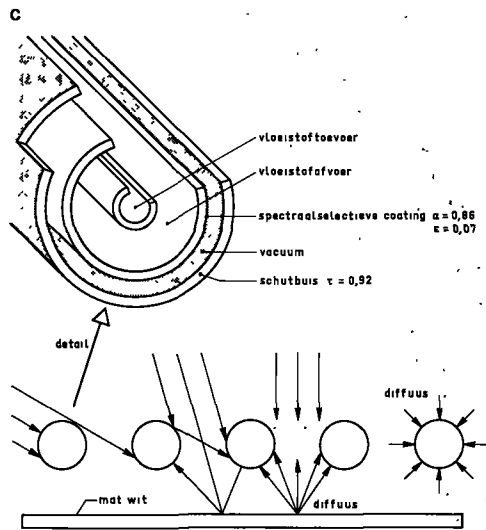
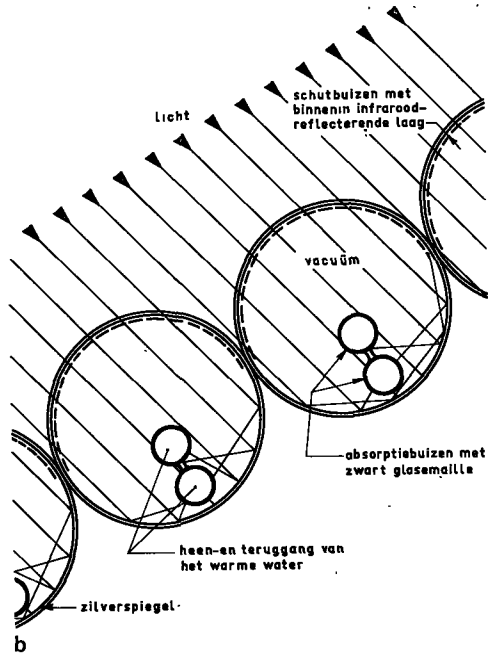
Fig. 2a, b en c
Drie uitvoeringsvormen van moderne zonnecollectoren



Deze zilverpiegel is noodzakelijk om ervoor te zorgen dat alle doorgelaten zonnestraling (direct + diffuus) uiteindelijk op de toe- en afvoerbuis komt. Aaneenschakeling van een aantal van deze buizen geeft wederom het gewenste collectoroppervlak.

De in figuur 2c geschetste uitvoering bestaat eveneens uit een glazen schutbuis, daarna een smalle geëvacueerde ruimte, gevolgd door een met koelmedium gevulde buis, aan de buitenzijde voorzien van een spectraalselectieve laag. In laatstgenoemde buis zit weer een dunnere buis voor de toevoer van het koelmedium.

Deze buizen worden niet aaneengeschakeld; tussen deze buizen wordt een ruimte opengelaten. Het directe zonlicht dat afhankelijk van het uur van de dag tussen twee opeenvolgende buizen door gaat, wordt door een matwitte onderplaat gereflecteerd en wordt grotendeels door de onderzijde van één of meer van de naburig gelegen buizen geabsorbeerd. De afstand tussen de buizen is zodanig geoptimaliseerd dat tevens een aanzienlijk gedeelte van de diffuse hemelstraling geabsorbeerd wordt.



Bij een onderlinge vergelijking van deze 2e generatie collectoren kunnen een aantal conclusies getrokken worden:

De in figuur 2a en b geschetste uitvoeringen zijn wat hun prestaties betreft, vergelijkbaar. Het rendement van het eerste type zal theoretisch iets hoger kun-

nen zijn omdat de doorlating van zonlicht van de schutbuis hoger is wegens het ontbreken van een infrarood-reflecterende laag. Daartegenover staat dat de warmtecapaciteit per m² collectoroppervlak van de in figuur 2b geschetste uitvoering lager is, hetgeen de opstartenergie 's morgens gunstig beïnvloedt. De in figuur 2c geschetste uitvoering zal per m² collectoroppervlak een iets lager rendement vertonen, omdat een geringere gedeelte van het zonlicht uiteindelijk wordt geabsorbeerd. Een ander nadeel van deze collector is zijn aanzienlijk grotere warmtecapaciteit per m² collector-

oppervlak als gevolg van de grote hoeveelheid koelvloeistof.

De invloed van een grotere warmtecapaciteit op het rendement gedurende een dag wordt verderop aan de orde gesteld. Bij een onderlinge vergelijking van zonnecollectoren is echter de energieproductie per jaar van de diverse typen in vergelijking tot de investeringskosten bepalend, alsmede uiteraard de levensduur en het onderhoud van de collectoren. Over met name de levensduur is momenteel nog weinig bekend.

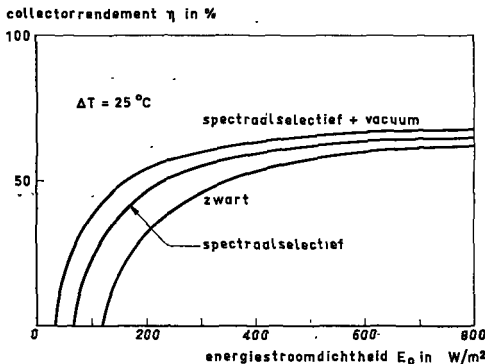
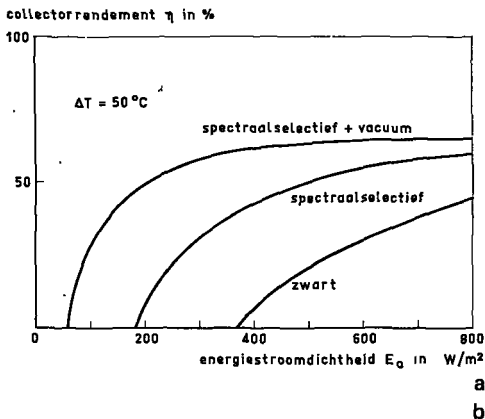
5. VERGELIJKING VAN JAARLIJKSE ENERGIEPRODUKTIE VAN DIVERSE COLLECTORTYPEN

Fig. 3a, b

Het verband tussen het collectorrendement en de energiestroomdichtheid van de opvallende straling bij twee waarden van het verschil ΔT in temperatuur van het collectormedium en de buitentemperatuur:

a bij $\Delta T = 50^\circ\text{C}$

b bij $\Delta T = 25^\circ\text{C}$



Het effect van een aantal genoemde maatregelen ter verhoging van het rendement van collectoren is in figuur 3a en 3b aangegeven. In deze figuren zijn de rendementscurven uitgezet als functie van de energiestroomdichtheid E_0 van 3 collectortypen: één collector met een zwart absorberend oppervlak voorzien van dubbel glas, één collector met een spectraalselectief oppervlak voorzien van dubbel glas en een geëvacueerde collector voorzien van een spectraalselectieve laag afgedekt met enkel glas.

Duidelijk is te zien dat maatregelen ter verhoging van het rendement vooral efficiënter zijn bij het produceren van energie op een hoger temperatuurniveau. Figuur 3a geeft de rendementscurven bij een temperatuurverschil tussen opvangplaat en buitenlucht, ΔT van 50°C en figuur 3b bij een ΔT van 25°C .

Ter berekening van de gemiddelde jaarlijkse energieproductie van de diverse typen collectoren is een computerprogramma ontwikkeld, dat een koppeling tot stand brengt tussen uurlijks berekende E_0 -gegevens met de bijbehorende rendementsetallen over zo'n uur. Het principe van deze berekening [1 en 4] is in figuur 4 uiteengezet. Voor elke maand uit de periode 1961-1970 is berekend het aantal uren dat het aanbod op de collector,

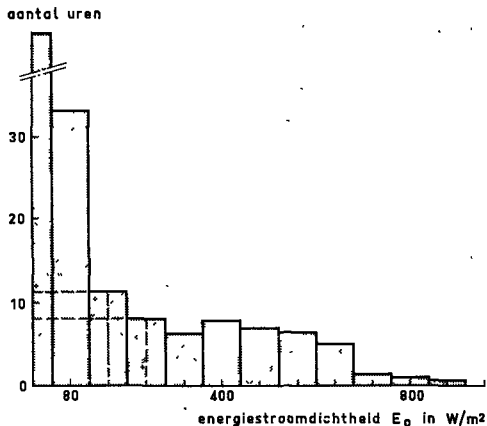
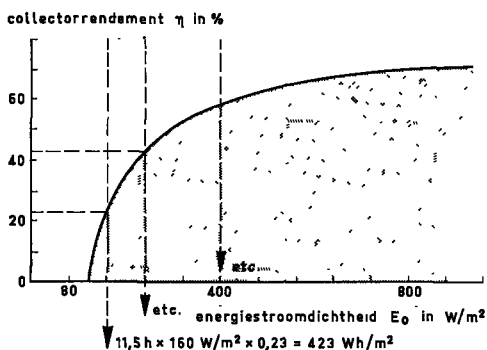


Fig. 4 Het aantal uren dat invallende straling beschikbaar is met verschillende energiestroomdichtheden, met een opgave van het daarbijbehorende collectorrendement



geplaatst onder een hoek van 60° met de horizon op het zuiden gericht, binnen bepaalde intervallen ligt van: $0-40 \text{ W/m}^2$, $40-80 \text{ W/m}^2$, $920-1000 \text{ W/m}^2$. Het rendement van de collectoren wordt eveneens berekend in deze intervallen, waarna een koppeling tot stand gebracht wordt.

Vervolgens is berekend het benodigde collectoroppervlak voor een gemiddeld opgenomen vermogen van 1 kW over een gemiddelde decembermaand – totale energie 744 kWh – bij diverse temperatuurniveau's (figuur 5).

Tevens is berekend het gemiddeld beschikbare vermogen, met het voor december berekende collectoroppervlak, in de andere maanden van het jaar. Het resultaat van deze berekening is gegeven in tabel 1.

Tabel 1

Het gemiddeld beschikbare collectorvermogen over de maanden van het jaar, ten opzichte van het in december beschikbare vermogen. Geheel onderaan het benodigde collectoroppervlak (m^2) voor het ontwikkelen van 1 kW in december

$T_0 =$	35°C				45°C				60°C				80°C			
oppervlak glas	zw db	ss db	ss ek	ss ev	zw db	ss db	ss ek	ss ev	zw db	ss db	ss ek	ss ev	zw db	ss db	ss ek	ss ev
jan	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,2	1,3	1,2	1,5	1,3	1,4	1,2
feb	2,2	2,2	2,2	2,1	2,3	2,2	2,3	2,1	2,6	2,2	2,4	2,1	3,5	2,4	2,8	2,1
mrt	3,3	3,1	3,3	3,0	3,4	3,1	3,3	3,0	3,9	3,2	3,6	3,0	5,3	3,5	4,2	3,0
apr	4,7	4,4	4,6	4,1	4,8	4,4	4,7	4,1	5,3	4,4	4,9	4,0	7,2	4,7	5,7	4,0
mei	5,5	5,1	5,4	4,7	5,4	5,0	5,4	4,6	5,8	5,0	5,6	4,6	7,6	5,1	6,2	4,5
jun	6,5	5,8	6,3	5,3	6,5	5,8	6,4	5,3	6,8	5,8	6,5	5,2	8,5	5,8	7,0	5,1
jul	5,4	5,0	5,4	4,5	5,3	4,9	5,3	4,5	5,3	4,7	5,3	4,4	6,3	4,6	5,4	4,2
aug	5,6	5,0	5,5	4,5	5,7	5,0	5,5	4,5	6,2	5,0	5,8	4,5	8,2	5,2	6,5	4,4
sep	5,2	4,6	5,0	4,2	5,4	4,7	5,2	4,2	6,1	4,8	5,6	4,2	8,4	5,2	6,5	4,2
okt	3,3	3,1	3,3	2,8	3,5	3,1	3,4	2,8	4,0	3,2	3,7	2,8	5,5	3,5	4,3	2,9
nov	1,4	1,3	1,4	1,3	1,4	1,3	1,4	1,3	1,5	1,3	1,5	1,3	1,8	1,4	1,6	1,2
dec	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
m^2/kW																
dec	70,9	58,7	58,3	48,7	87,1	65,8	68,3	51,7	129,4	79,5	90,5	56,5	279,9	108,3	145	64,4

Collector op het zuiden, gericht op 30° hoogte boven de horizon. Getallen gebaseerd op weergegevens van De Bilt 1961-1970.

zw = zwart ek = enkel glas ev = enkel glas + vacuüm
 ss = spectraal selectief db = dubbel glas

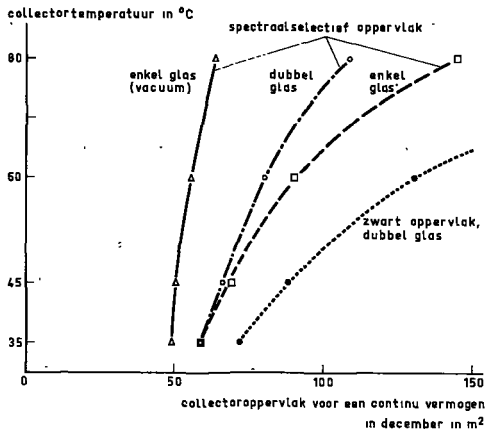


Fig. 5 Het collectoroppervlak benodigd voor een gemiddeld continu vermogen van 1 kW in december, bij verschillende collector temperaturen, voor vier verschillende collectorconstructies

Bij een onderlinge vergelijking tussen diverse collectortypen dient eerst te worden vastgesteld voor welk doel de collectoren gebruikt gaan worden. Uit figuur 5 valt af te leiden dat, indien voor een bepaalde toepassing warm water van bijv. 45°C noodzakelijk is, 1 m² van een geëvacueerde spectraalselectieve collector vervangen kan worden door 1,32 m² van een niet-geëvacueerde spectraalselectieve collector met enkel glas of 1,27 m² van een niet-geëvacueerde spectraalselectieve collector met dubbel glas of 1,68 m² van een zwarte collector met dubbel glas.

Indien voor een andere toepassing warm water van bijv. 80°C noodzakelijk is, dan kan men uit figuur 5 en tabel 1 eveneens de verhoudingen afleiden in de onderlinge prestaties van de diverse collectortypen. Bedacht moet worden dat collectoren een onderdeel uitmaken van een complete installatie met o.a. een opslagvat en een daaraan gekoppeld verwarmingssysteem. Indien een belangrijk onderdeel van zo'n totale installatie onjuist gedimensioneerd wordt dan kan dit tot gevolg hebben dat de bovengenoemde berekening niet meer opgaat.

Eveneens dient men zich te realiseren dat de onderlinge vergelijking zoals gegeven

in de tabel, slechts opgaat voor collectoren met een niet te grote warmtecapaciteit per m². Dit wordt d.m.v. de resultaten van de onderstaande berekening aangetoond.

6. INVLOED VAN DE WARMTECAPACITEIT VAN DE COLLECTOR OP DE INVANG

Met weergegevens van 9 dagen met uiteenlopend weertype is de invloed van de warmtecapaciteit van de collector op de invang nagegaan.

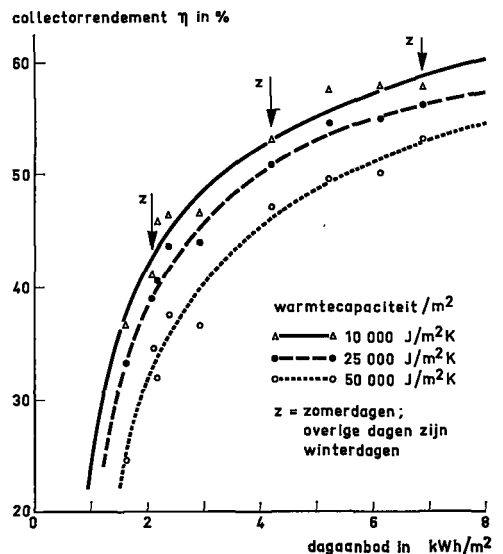
De berekeningen zijn uitgevoerd voor een warmtecapaciteit WCM 2 = 10 000, 25 000 en 50 000 J/m²K.

In figuur 6 is voor die 9 dagen het rendement van de collector uitgezet als functie van het dagaanbod. Het rendement is hierbij gedefiniëerd als:

$$\eta = \frac{\text{totale invang per dag}}{\text{totaal aanbod per dag}}$$

Uit figuur 6 blijkt dat bij een hogere warmtecapaciteit het rendement lager is.

Fig. 6 Het collectorrendement als functie van het dagaanbod van de opvallende straling en de warmtecapaciteit van de collector per m² (WCM2)



De oorzaken zijn:

- bij hogere warmtecapaciteit van de collector is de opstarttijd langer dan bij lagere warmtecapaciteit. De nuttige invang begint dan later
- door stijging van de temperatuur in het opslagvat gedurende de dag gaat ook de werktemperatuur van de collector omhoog. De energie die hierbij door de plaat wordt opgenomen, gaat verloren. Dit verlies is groter naarmate de warmtecapaciteit van de collector groter is. De invloed van de langere opstarttijd op de rendementsverlaging is het grootst. Deze invloed kan verkleind worden door op te starten met een lege collector, dit heeft echter een aantal praktische nadelen.

Opmerking:

de berekeningen zijn uitgevoerd op een invangniveau tussen 35° en 40°C. Bij een hoger invangniveau zal de invloed van de warmtecapaciteit nog groter zijn. Zie in verband hiermee ook het verschil tussen zomer- en winterdagen in figuur 6.

7. CONCLUSIES

- Bij een onderlinge vergelijking tussen diverse collectortypen dient eerst te worden vastgesteld voor welk doel de collectoren gebruikt gaan worden.
- Voor lagere temperatuurtoepassingen (tot ca. 60°C) komt naar verwachting

een collector voorzien van een spectraal-selectieve laag met enkel-glasafdekking in aanmerking. Als belangrijkste toepassingsgebieden kunnen genoemd worden: warmwatervoorziening en verwarming van individuele woonhuizen, verwarming zwembaden, verwarming utiliteitsgebouwen e.d.

- Voor hogere temperatuurtoepassingen (80°C–200°C) komen naar verwachting de in figuur 2 geschetste geëvacueerde collectortypen in aanmerking. Als belangrijkste toepassingsgebieden kunnen genoemd worden: koeling d.m.v. zonne-energie, industriële warmwaterproductie, air-conditioneringsinstallaties voor toepassing in utiliteitsgebouwen e.d.

8. LITERATUUR

- [1] Ouden, C. den – De mogelijkheden in Nederland voor het gebruik van zonne-energie voor ruimteverwarming en warmwatervoorziening. TPD-rapport no. 403–231 dd. 15 januari 1975.
- [2] Jong, J. de – Materialen voor opvang- en afdekplaten van zonnecollectoren. TPD-rapport no. 336-a.
- [3] Jong, J. de – Zonnewarmtecollectoren en de glasindustrie, Klei en Keramiek, 1975, 8 (aug.).
- [4] Hoogendoorn, C. J. en C. den Ouden – Het rendement van zonnewarmtecollectoren bij Nederlandse meteorologische condities. Klimaatbeheersing 4 (1975), 4 (april), p. 172–175.