

VOORDRACHT 4. *Cursus Stichting post-doctoraal onderwijs in de Bouw; De zon als verwarmingsbron, 31 maart en 1 april 1976*

DE POTENTIËLE WARMTEPRODUKTIE VAN DIVERSE TYPEN COLLECTOREN
IN NEDERLANDSE KLIMATOLOGISCHE OMSTANDIGHEDEN.

ir.C.den Ouden.

INHOUD

1.	Inleiding	4.1
2.	Rendementsformules vlakke-plaat-collectoren-theorie	4.1
3.	Rendement zonnecollectoren-praktijk	4.2
4.	Mogelijkheden tot verbetering van het rendement van zonnecollectoren	4.3
5.	Vergelijking van de gemiddelde jaarlijkse energieproduktie met diverse collectoren	4.4
6.	Invloed warmtecapaciteit van de collector op de invang	4.5
7.	Het thermische gedrag van een zonnewoning	4.6
	Bijlage 1. - Berekening van collectorrendement	4.10
	Literatuur	
	Tabellen 1 t/m 4	
	Figuren 1 t/m 9	

1. INLEIDING.

Na de energiecrisis is de belangstelling in vele landen zich gaan concentreren op een economische benutting van onder andere de zonne-energie als mogelijke vervanger van fossiele brandstof. Het blijkt dat zelfs in gebieden met een relatief laag aanbod in de vorm van zonne-energie de hoeveelheid zonne-energie ruim voldoende is om deze energievorm om te zetten in laag calorische warmte voor verwarmingsdoeleinden.

De grootste moeilijkheden ontstaan bij het ontwikkelen van warmte-opslagsystemen die de overschotten aan geabsorbeerde zonnewarmte moeten bewaren voor die momenten dat ze benut moeten worden, hetgeen zal blijken uit het laatste gedeelte van dit artikel. Het eerste gedeelte gaat in op de manier waarop met zonnecollectoren de zonne-energie kan worden omgezet in warmte en welke rendementen met diverse typen zonnecollectoren haalbaar zijn in Nederlandse klimatologische omstandigheden.

2. RENDEMENTSFORMULES VLAKE-PLAATCOLLECTOREN - THEORIE.

Een "klassieke" uitvoering van een vlakke-plaatcollector bestaat uit een zwarte vlakke metalen plaat, afgedekt door enkel- of dubbelglas (zie figuur 1).

De door de plaat geabsorbeerde zonnewarmte moet 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 in stationaire toestand worden berekend door het opstellen van de warmtebalans van de absorberende collectorplaat en de boven deze collectorplaat aangebrachte glasplaat(en). Een gedetailleerde beschrijving van deze rendementsberekening is gegeven in [1].

In bijlage 1 wordt nader op de principes van de rendementsberekeningen ingegaan. Het blijkt dat de netto warmtestroomdichtheid q_n , die door de plaat kan worden opgenomen, afhankelijk is van het temperatuursverschil Δt tussen plaat en buitenlucht. In goede benadering is af te leiden:

$$q_n = \eta_0 \cdot E_0 - C \cdot \Delta T \quad (1)$$

Hierbij is E_0 de opvallende energiestroomdichtheid (W/m^2). De waarde van η_0 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 bepaald door de totale warmteweerstand voor convection en warmtestraling van de collector. De term $C \cdot \Delta T$ geeft in feite het warmteverlies van de collector.

3. RENDEMENT ZONNECOLLECTOREN - PRAKTIJK.

In de praktijk zal een zonnecollector warmteverliezen naar de achterzijde en zijkanten vertonen, terwijl de warmte-overdracht van de absorberende collectorplaat naar het medium dat de warmte afvoert in de meeste gevallen niet optimaal is.

Het rendement van een collector onder stationaire omstandigheden wordt derhalve veelal als volgt weergegeven:

$$q_n = (a_z \cdot \tau) \cdot E_0 - C'(T_p - T_\ell) \quad (2)$$

met $C' =$ het warmteverlies van de collector per $^\circ C$, waarin begrepen de warmteverliezen door achter-en zijkant van de collector.

Aangezien de temperatuur van de collectorplaat niet homogeen is en bovendien moeilijk meetbaar, wordt in de praktijk meestal T_p vervangen door de gemiddelde temperatuur T_m van het medium dat de geabsorbeerde zonnewarmte afvoert, zodat vgl. (2) wordt:

$$q_n = F_r(\eta_0 E_0 - C'(T_m - T_\ell)) \quad (3)$$

hierbij is $T_m = (T_{in} + T_{uit})/2$

$$\text{en } F_r = \frac{\alpha_{pm}}{\alpha_{pm} + C'} \quad ; \quad \alpha_{pm} = \text{w.o. coëfficiënt van collectorplaat naar het medium.}$$

Vgl.(3) wordt meestal gebruikt bij het onderling met elkaar vergelijken van het praktijkrendement van zonnecollectoren.

De rendementsvergelijking ziet er dan als volgt uit:

$$\eta = \frac{q_n}{E_0} = F_r \cdot \eta_0 - F_r \cdot C' \cdot \frac{(T_m - T_\ell)}{E_0}$$

C' is bij benadering constant, zodat η als functie van $(T_m - T_\ell)/E_0$ een praktisch rechte lijn wordt, die de verticale as snijdt in het punt $\eta_0' = F_r \cdot \eta_0$ en de horizontale as in $(T_m - T_\ell)/E_0 = \frac{\eta_0}{C'}$. (zie figuur 2). Vrijwel alle eigenschappen van een collector kunnen in

zo'n $\eta \leftrightarrow \frac{(T_m - T_\ell)}{E_0}$ grafiek worden vastgelegd.

Ter illustratie is in figuur 2 van twee collectortypen het rendement η als functie van $(T_m - T_\ell)/E_0$ weergegeven, rendementscurve A is die van een collectortype voorzien van een zwart-absorberend oppervlak met een enkelglas afdekking (ZWE), rendementscurve B die van dezelfde collector afgedekt met dubbelglas (ZWD) ($F_r = 0.9$).

4. MOGELIJKHEDEN TOT VERBETERING VAN HET RENDEMENT VAN ZONNECOLLECTOREN.

Welke mogelijkheden beschikbaar zijn ter vergroting van het rendement van vlakke-plaatcollectoren kan worden afgeleid uit vgl.3.

In deze vgl. zijn F_r , η_0 en C' grootheden die beïnvloedbaar zijn.

De waarde van F_r kan vergroot worden door de warmteoverdracht van de plaat naar het medium dat de warmte van de plaat afvoert te verbeteren. Dit kan onder andere bereikt worden door een kanalsysteem in de collectorplaat op te nemen, zie figuur 3, en de geabsorbeerde zonnearmte met water af te voeren.

De grootte η_0 kan vergroot worden door:

- de doorlating van de glasplaat(en) voor zonlicht te vergroten, hetgeen mogelijk is door het toepassen van anti-reflectie coatings op het glas en het toepassen van ijzervrij glas.
- de absorptie van het collectoroppervlak voor zonlicht te vergroten.

De grootte C' kan verkleind worden door:

- het toepassen van spectraal selectieve lagen*) op het collectoroppervlak, hierdoor worden de verliezen in de vorm van warmtestraling verkleind.
- het toepassen van infrarood-reflecterende lagen op het glas.
- het aanbrengen van een zgn. 'honeycomb structuur' boven de collectorplaat ter verlaging van de convectieve verliezen en - in mindere mate - de stralingsverliezen.

*) 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 collector-temperatuur. Meer gegevens over dit soort lagen zijn te vinden in [2].

- het evacueren van de ruimte tussen de collectorplaat en 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 spectraal selectieve laag op het absorberende collectoroppervlak, hetzij een infrarood-reflecterende laag aan de binnenzijde van de glasafdichting.

In [3] worden een drietal geëvacueerde collectortypen beschreven.

5. VERGELIJKING VAN DE GEMIDDELDE JAARLIJKSE ENERGIEPRODUKTIE MET DIVERSE COLLECTORTYPEN.

Het effect van een aantal genoemde maatregelen ter verhoging van het rendement van collectoren is in figuur 4a en 4b 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. In tabel 1 zijn de aangehouden waarden voor a_z , ϵ , etc. (zie ook bijlage 1) weergegeven.

Duidelijk is te zien dat maatregelen ter verhoging van het rendement vooral efficiënter zijn bij het produceren van energie op een hoger temperatuurniveau. Figuur 4a geeft de rendementscurven bij een temperatuurverschil tussen opvangplaat en buitenlucht, ΔT van 50°C en figuur 4b bij een ΔT van 25°C .

Ter berekening van de gemiddelde jaarlijkse energieproduktie 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 5 uiteengezet. Voor elke maand uit de periode 1961-1970 is berekend het aantal uren dat het aanbod op de collector, 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 temperatuurniveaus (figuur 6).

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 2.

Bij een onderlinge vergelijking tussen diverse collectortypen dient eerst te worden vastgesteld voor welk doel de collectoren gebruikt gaan worden. Uit figuur 6 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 6 en tabel 2 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 door middel van 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 $50\ 000\ J/m^2K$.

In figuur 7 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 7 blijkt dat bij een hogere warmtecapaciteit het rendement lager is.

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.

Opmerkingen:

De berekeningen zijn uitgevoerd op een invangsniveau tussen 35°C 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 7.

7. HET THERMISCHE GEDRAG VAN EEN ZONNEWONING.

De in hoofdstuk 5 besproken berekeningswijze omtrent de mogelijke energieproductie met de diverse collectortypen impliceert dat onder alle omstandigheden gedurende een stookseizoen de zonnecollectoren de geabsorbeerde warmte bij één bepaald temperatuurniveau kunnen leveren. Of dit inderdaad mogelijk is wordt mede bepaald door het type en de grootte van het toegepaste opslagreservoir, het toegepaste verwarmingssysteem in de woning en de daarbij toegepaste regeling, alsmede door de thermische isolatie van de woning. Om dit te verduidelijken zal het thermische gedrag van één

ontwerp van een zonnewoning, voorzien van een zonneverwarmingsinstallatie nader worden uitgewerkt. Het gekozen ontwerp van de zonnewoning is weergegeven in figuur 8 (foto). In de woning is een zonneverwarmingsinstallatie ontworpen met 35 m^2 netto collectoroppervlakte (type ssek, zie tabel 2), gekoppeld aan een opslagreservoir (water) van 4 m^3 . Aan dit opslagreservoir is een lage temperatuur verwarmingssysteem gekoppeld met daarin een hulpstookinstallatie die in werking treedt indien de gemiddelde temperatuur van het water in het opslagreservoir lager wordt dan 30°C .

De buitenwanden van de woning zijn geïsoleerd volgens de klasse "goed" van NEN 1068, alle ramen zijn voorzien van dubbelglas en de begane grond vloer is zo geïsoleerd dat de k-waarde $0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ bedraagt. Het principe van de zonneverwarmingsinstallatie is geschetst in figuur 9. De uurlijkse berekeningen van de ingevangen zonne-energie, de aan het opslagvat toe- en afgevoerde energie afhankelijk van de warmtebehoefte van de woning of wel de buitencondities zullen kort worden besproken.

De warmtebalans voor het opslagreservoir is:

De verandering van de warmteinhoud van het voorraadvat = toegevoerde energie door middel van zonnecollectoren - afgevoerde energie ter compensatie van de warmteverliezen van de woning - verliezen door de wanden van het vat.

Deze warmtebalans is 24×365 keer doorgerekend met uurlijks gemeten weergegevens om een goed beeld te krijgen van de totale werking van de installatie gedurende één jaar.

Het resultaat van deze berekening voor 1962 is weergegeven in tabel 3. In deze tabel is voor 13 perioden van 28 dagen uitgezet:

- het totale aanbod in de vorm van zonne-energie op de zonnecollectoren (aanbod)
- de hoeveelheid warmte die door de zonnecollectoren naar het opslagreservoir is toegevoerd (invang)
- het rendement van de installatie (rendement)
- de warmtebehoefte van de woning (verbruik)
- het deel van de warmtebehoefte dat door middel van een hulpstookinstallatie geleverd moet worden (hulpstook)
- het deel van de warmtebehoefte dat betrokken wordt uit het opslagreservoir (uit opslag).

Gedurende de perioden 1 tot en met 5, 11 en 13 is het rendement van de totale installatie ca 40%, in dat geval is het energie-

verbruik van de woning duidelijk groter dan de nuttig ingevangen zonne-energie. Dit houdt in dat de temperatuur van het opslagreservoir relatief laag blijft met als resultaat een vrij behoorlijk totaal rendement van de zonneverwarmingsinstallatie.

Aan het einde van periode 5 tot periode 10 vraagt de woning praktisch geen warmte zodat de temperatuur van het opslagreservoir oploopt met als gevolg een aanzienlijke afname van het rendement van de installatie. (Integratie van de warmwatervoorziening in de totale installatie lijkt zinvol).

In de loop van periode 10 wordt de warmtebehoefte van de woning groter met als gevolg een temperatuurdaling van het opslagreservoir waardoor het rendement van de installatie weer omhoog gaat. Het aanbod in de vorm van zonne-energie bereikt in 1962 gedurende periode 12 een minimum met als gevolg dat ook het rendement weer afneemt (immers $\eta = \eta_0 - \frac{C \cdot \Delta T}{E_0}$, en door het geringe aanbod zal E_0 in deze periode gemiddeld laag zijn).

In tabel 4 is uitgezet de in hoofdstuk 5 berekende gemiddelde energieproduktie (1961-1970) per m^2 collectoroppervlak, bij verschillende temperatuurniveaus, voor het collectortype dat is toegepast in de zonnewoning. Eveneens is hier weergegeven de voor 1962 berekende energieproduktie per m^2 van de complete installatie. Duidelijk zijn de reeds hierboven genoemde effecten te onderkennen zoals:

- de gemiddelde lage temperatuur van het opslagreservoir in de perioden 2, 3, 11 en 13
- de afname van het rendement bij weinig aanbod in de vorm van zonne-energie in de perioden 1 en 12
- de toename van de temperatuur van het opslagreservoir bij dalende warmtebehoefte, zie perioden 4 tot en met 10.

Het zal duidelijk zijn dat het met behulp van een dergelijk rekenprogramma mogelijk is optimalisatieberekeningen uit te voeren naar de juiste onderlinge verhouding tussen de grootte en het type van de zonnecollectoren, de grootte van het opslagreservoir, de toe te passen isolatie van de woning e.d.

Door het variëren van deze parameters kan een indruk gekregen worden van het effect van het wijzigen van diverse componenten op de te verwachten energiebesparingen. Welke combinatie van componenten voor een bepaald ontwerp van een "zonnewoning" het meest in aan-

merking komt zal uiteindelijk niet alleen bepaald worden door de te bereiken energiebesparing, maar mede door de totale investering van de installatie. Deze totale investering wordt niet alleen bepaald door de kosten van de componenten maar zeker ook door de installatiekosten, vooral indien gedurende de eerste jaren van toepassing van dergelijke installaties nog weinig ervaring is met het inbouwen van zonneverwarmingsinstallaties in woningen.

Ter afsluiting nog een tweetal opmerkingen:

- 1) Het besproken ontwerp van de zonneverwarmingsinstallatie produceert in 1962 zoals valt af te leiden uit tabel 4 ca 300 kWh per m² geïnstalleerd collectoroppervlak. De kosten voor zo'n totale installatie worden momenteel geschat op ca f.300,--/m², indien toegepast in een projekt van ongeveer 100 woningen.
- 2) Zoals reeds in de inleiding werd gezegd blijkt uit tabel 3 dat het zeker technisch mogelijk is een woning in ons klimaat volledig met behulp van zonne-energie te verwarmen. De warmte-opslagsystemen die noodzakelijk zijn om de overschotten aan energie gedurende de zomerperiode op te slaan worden dan wel aanzienlijk groter dan de 4 m³ en kunnen dan niet meer worden geïntegreerd in de woning.

BIJLAGE I.

Berekening van collectorrendement

Het opstellen van de vergelijkingen voor het collectorrendement berust op het toepassen van warmtebalansen voor de collectorplaat en de glasplaten. In principe is dit analoog aan wat Hottel en Woertz [5] reeds opzetten voor collectoren met zwarte oppervlakken. Voor de collectorplaat is de opgenomen nuttige warmte gegeven door:

$$q_n = a_z \cdot \tau_t \cdot E_o - \alpha_o(T_o - T_1) - q_{so} \quad (a.1.)$$

waarbij q_{so} de stralingsterm is gegeven door:

$$q_{so} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_o} + \frac{1}{\epsilon_g} - 1} (T_o^4 - T_2^4) \quad (a.2.)$$

De term $\alpha_o(T_o - T_1)$ geeft de warmtewisseling met de luchtlaag grenzend aan de collectorplaat. Hiervoor geldt als warmtebalans:

$$\alpha_o(T_o - T_1) = \alpha_1(T_1 - T_2) + m c_p \cdot \Delta T \quad (a.3.)$$

Hierin zijn α_o en α_1 resp. overdrachtscoëfficiënten van plaat → lucht en lucht → glas, die in het algemeen gelijk zullen zijn, maar bijv. verschillen als de plaat gegolfd is. De term $m c_p \cdot \Delta T$ geeft de door een eventuele luchtstroom opgenomen warmte, Dit is bij de veronderstelling dat $\Delta T \ll (T_o - T_1)$. In het geval van een vlakke collectorplaat en geen luchtstroom vinden wij:

$$T_o - T_1 = T_1 - T_2 \quad (a.3')$$

Voor de binnenste glaslaag geldt als warmtebalans voor het geval dubbelglas:

$$q_{so} + \alpha_1(T_1 - T_2) + (1 - \tau_2 - r_2) \tau_1 E_o = \frac{\alpha_2}{2} (T_2 - T_b) + \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_g} + \frac{1}{\epsilon_g} - 1} (T_2^4 - T_b^4) \quad (a.4.)$$

Hierbij slaat de index 2 in τ en r op de waarden voor de binnenste glaslaag en de index 1 voor de buitenste laag. De warmtedoorgangscoefficiënt ($\frac{\alpha_2}{2}$) is de totale coëfficiënt voor vrije convection tussen de glaslagen. T_b is de temperatuur van de buitenste glaslaag. Voor de buitenste glaslaag wordt gevonden voor dubbel glas:

$$(1-\tau_1-r_1)E_0 + \frac{\alpha_2}{2} (T_2-T_b) + \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_g} + \frac{1}{\epsilon_g} - 1} (T_2^4 - T_b^4) = a_\ell (T_b - T_\ell) + q_{s\ell} \quad (a.5')$$

Voor het geval van enkel glas vervalt (a.4) en is $T_2 = T_b$ dan:

$$(1-\tau_1-r_1)E_0 + \alpha_1 (T_1 - T_b) + q_{s0} = \alpha_\ell (T_b - T_\ell) + q_{s\ell} \quad (a.5'')$$

In (a.5') en (a.5'') geeft $q_{s\ell}$ de stralingsuitwisseling tussen de buitenste glaslaag en de atmosfeer. In afwijking van wat Hottel aanneemt, dient men hierbij met de atmosferische tegenstraling rekening te houden. Deze is van veel factoren, maar vnl. van de luchtvochtigheid en de bewolkingsgraad afhankelijk. Uit werk van de Nederlandse Heidemaatschappij [6] dat gebruik maakt van de formule van Brunt [7] blijkt voor Arnhem en omgeving als goede benadering te gelden voor het geval van heldere hemel:

$$q_{s\ell} = \epsilon_g \sigma [T_b^4 - (0.68 + 0.041 \sqrt{e}) T_\ell^4] \quad (a.6.)$$

met e de waterdampspanning in millibar en T_ℓ de luchttemperatuur beide op 2m boven het beschouwde oppervlak. Voor een gemiddelde winterconditie kan worden gesteld $T_\ell = 283^0K$ en $e = 9$ mb, dan is voor heldere hemel:

$$q_{s\ell} = \epsilon_g [73 + 5,1(T_b - T_\ell)] \quad (a.7.)$$

Het effect van de bewolkingsgraad wordt gegeven door:

$$q_{s\ell} = \epsilon_g [73(1 - 0,75N) + 5,1(T_b - T_\ell)] \quad (a.8.)$$

Voor de hier uitgevoerde berekeningen is een gemiddelde waarde voor $N = 0.6$ aangehouden. In werkelijkheid zal voor heldere hemel het stralingsverlies daarmee onderschat zijn, echter heeft dan meestal E_0 een hoge waarde en is de correctie relatief onbelangrijk.

Voor de berekeningen van de vrije convectie in de lagen tussen collector en glas en tussen het dubbelglas is gebruik gemaakt van relaties van Niemann [8] en De Graaf en Van der Held [9] voor spleten onder verschillende hellingshoeken.

Deze auteurs geven relaties voor de convectieve warmte-overdracht tussen spleten onder verschillende hellingshoeken. Aangezien tussen beide relaties onderlinge afwijkingen tot ca 20% voorkomen, is voor onze berekeningen de convectieve warmte-overdrachtscoëfficiënt uit beide relaties gemiddeld.

Door het oplossen van de gekoppelde vergelijkingen a.1, a.4 en a.5 kunnen de rendementscurven zoals onder andere getekend in fig.4a en 4b bepaald worden.

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 dd.18 november 1974.
- (3) Ouden, C.den - Recente ontwikkelingen bij het vervaardigen van zonnecollectoren met een hoog rendement.
TVVL/TNO-dag no.5, voordracht no.2.
- (4) Hoogendoorn, C.J. en Ouden, C.den - Het rendement van zonnewarmtecollectoren bij Nederlandse meteorologische condities.
Klimaatbeheersing 4 (1975), 4 (april) p.172-175.
- (5) Hottel, H.C. en Woertz, B.B. - The performance of Flat-plate Solar Collectors (Trans.ASME febr.1942, Vol.64, p.91-105).
- (6) Palland, C.L., Vossen G.H. van der, Wartena, L. - Arch.für Meteor. und Bioklima, Serie B, Wr.21 (1973) pp.335-338. --
- (7) Brunt, D. - Physical and Dynamical Meteorology, Cambridge Un.Press 1939.
- (8) Niemann, H. - Die Wärmeübertragung durch natürliche Konvektion in Spaltförmigen Hohlräumen.
Gesundheits Ingenieur, 69 (1948) 8, 224.
- (9) De Graaf, I.G.A. and van der Held, E.F.M. - The relation between the heat transfer and the convection phenomena in enclosed plane air layers.
Appl. Sci.Res., Section A, vol.3.

TABEL 1 Waarden van de diverse parameters van de collectoren waarvan de gemiddelde energieproduktie is berekend (tabel 2).

Enkelglas_collectoren

	a_z	ϵ_o	τ	r	α_1	α_l	ϵ_{g1}	ϵ_{g2}
ssek	0.94	0.1	0.86	0.08	var.	var.	0.95	0.95
ssev	0.96	0.95	0.75	0.08	1.0	var.	0.10	0.95

Dubbelglas_collectoren

	a_z	ϵ_o	τ_1	τ_2	τ_t	r_1	r_1	α_1	α_2	α_l	ϵ_{g1}
zwdb	0.96	0.95	0.86	0.86	0.74	0.08	0.08	var.	var.	var.	0.95
ssdb	0.94	0.1	0.86	0.86	0.74	0.08	0.08	var.	var.	var.	0.95

TABEL 2 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.

$T_o =$	35°C				45°C				60°C				80°C			
opper- vlak 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

ss = spectraal selectief

db = dubbel glas

ev = enkel glas + vacuum

TABEL 3 Warmtebalans van de "zonnewoning" in het jaar 1962.

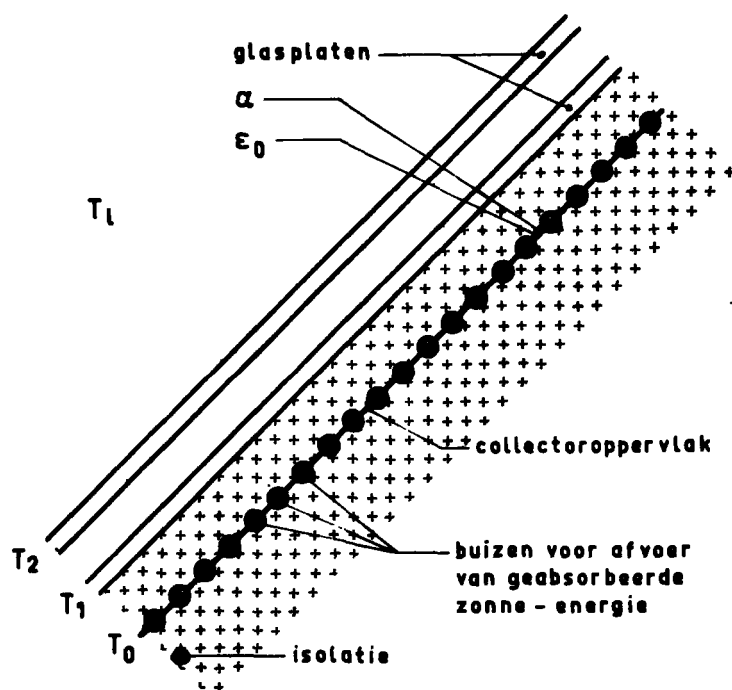
periode	aanbod (kWh)	invang (kWh)	rendement	verbruik (kWh)	uit op- slag (kWh)	hulpstook (kWh)
1	837	307	0.367	2.427	308	2.119
2	2.181	951	0.436	2.707	945	1.762
3	2.745	1.153	0.420	3.012	1.156	1.856
4	2.317	950	0.410	1.903	897	1.106
5	3.088	1.177	0.381	1.494	1.214	280
6	4.359	1.277	0.293	1.109	1.109	0
7	3.239	595	0.184	781	781	0
8	3.068	537	0.175	544	544	0
9	4.068	649	0.160	602	602	0
10	3.187	971	0.305	948	948	0
11	2.377	998	0.420	1.528	1.161	367
12	823	272	0.330	2.581	269	2.312
13	1.253	487	0.389	3.241	486	2.755
Totaal	33.541	10.324		22.877	10.320	12.557

TABEL 4 Vergelijking van de gemiddelde warmteproduktie (1961-1970) berekend volgens hoofdstuk 5 met de in 1962 berekende warmteproduktie met de totale installatie.

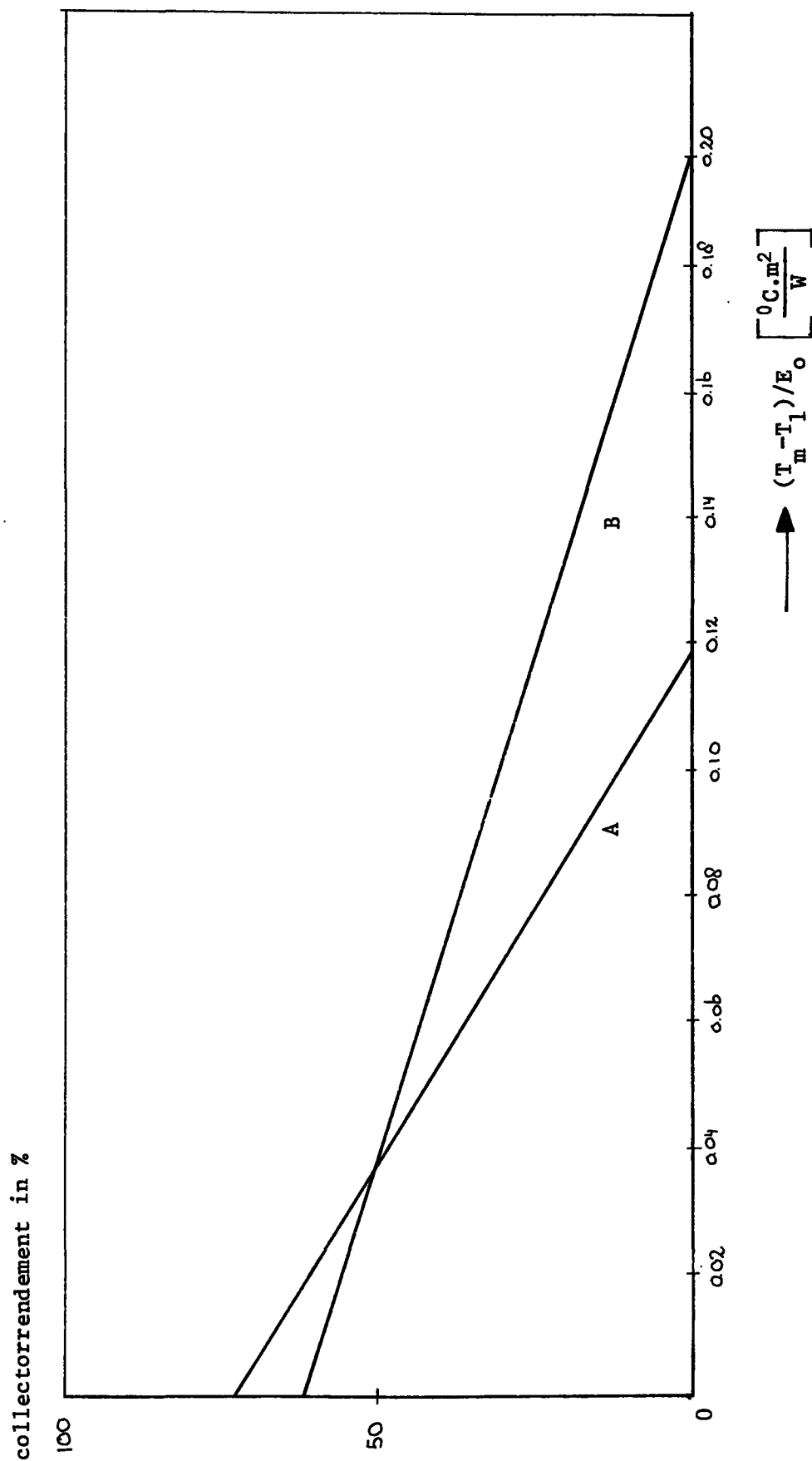
Temp. → periode	35 C kWh/m ²	45 C kWh/m ²	60 C kWh/m ²	80 C kWh/m ²	var. kWh/m ²
1	13.8	11.8	9.3	6.5	8.8
2	23.2	21.1	16.9	12.3	27.2
3	35.1	29.9	24.8	18.1	32.9
4	47.8	41.2	33.3	24.2	27.2
5	58.0	49.4	39.3	27.8	33.6
6	67.1	57.3	44.7	30.4	36.5
7	69.0	58.9	45.1	30.6	17.0
8	62.5	52.3	40.3	26.3	15.3
9	62.6	53.7	42.9	29.2	18.5
10	56.9	50.5	41.0	29.0	27.7
11	38.0	33.4	27.5	19.9	28.5
12	16.8	14.4	11.7	7.9	7.7
13	12.0	10.3	7.5	4.7	13.9

Gemiddelde warmteproduktie (1961-1970) met collectortype ssek, zoals toegepast in ontwerp zonnwoning. Berekend volgens de in hoofdstuk 5 beschreven methode.

warmte-
produktie
van
installatie
in 1962.

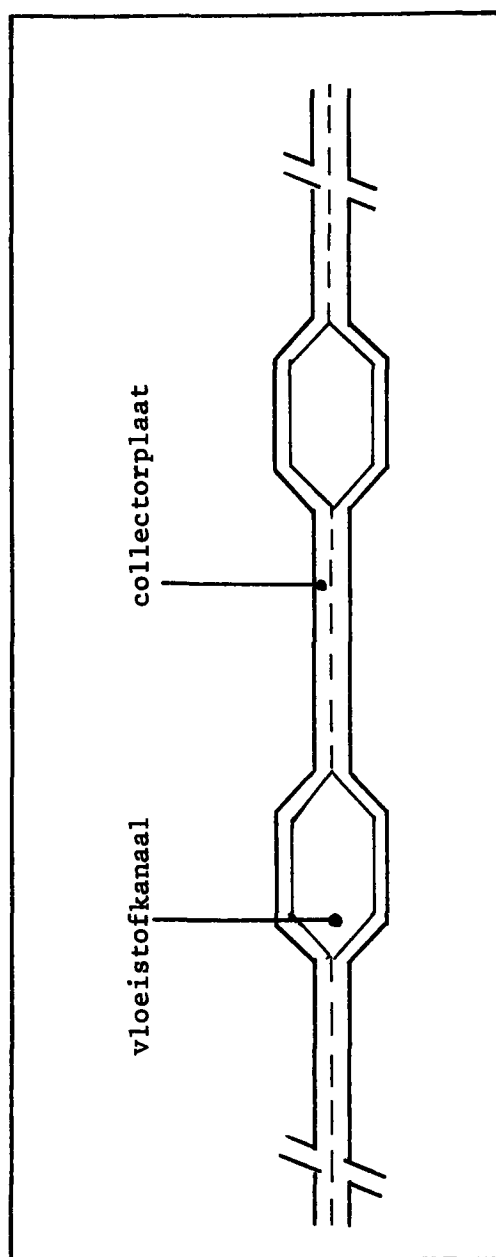


Figuur 1. Doorsnede van een standaardcollector met zwart absorberend collectoroppervlak, afgedekt met dubbel glas.

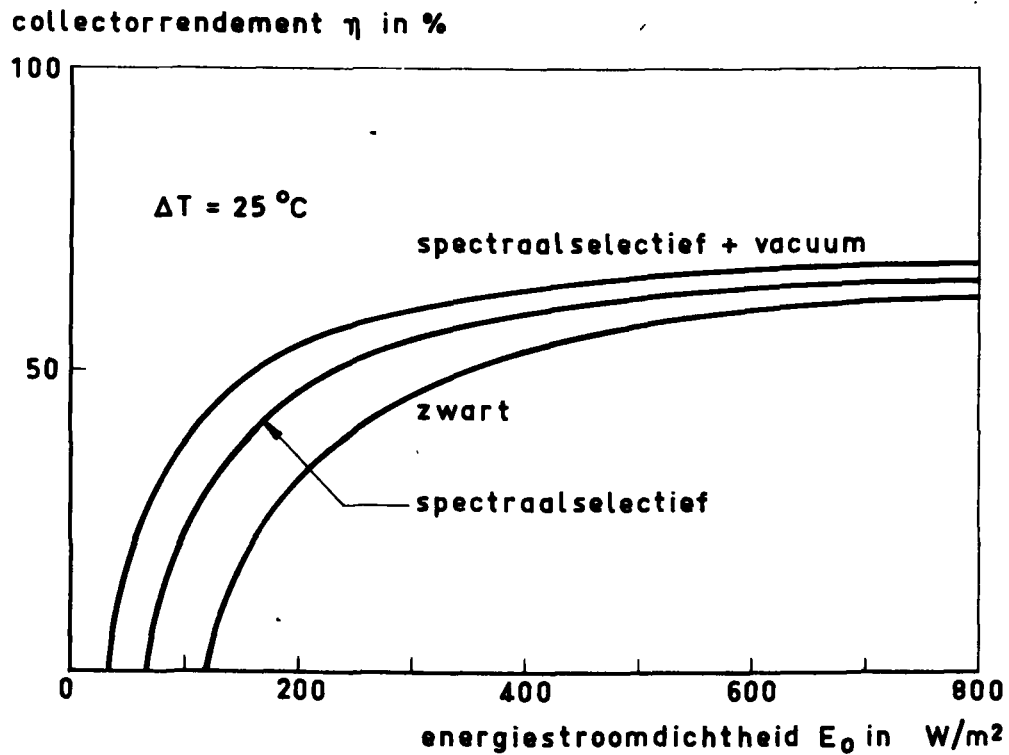
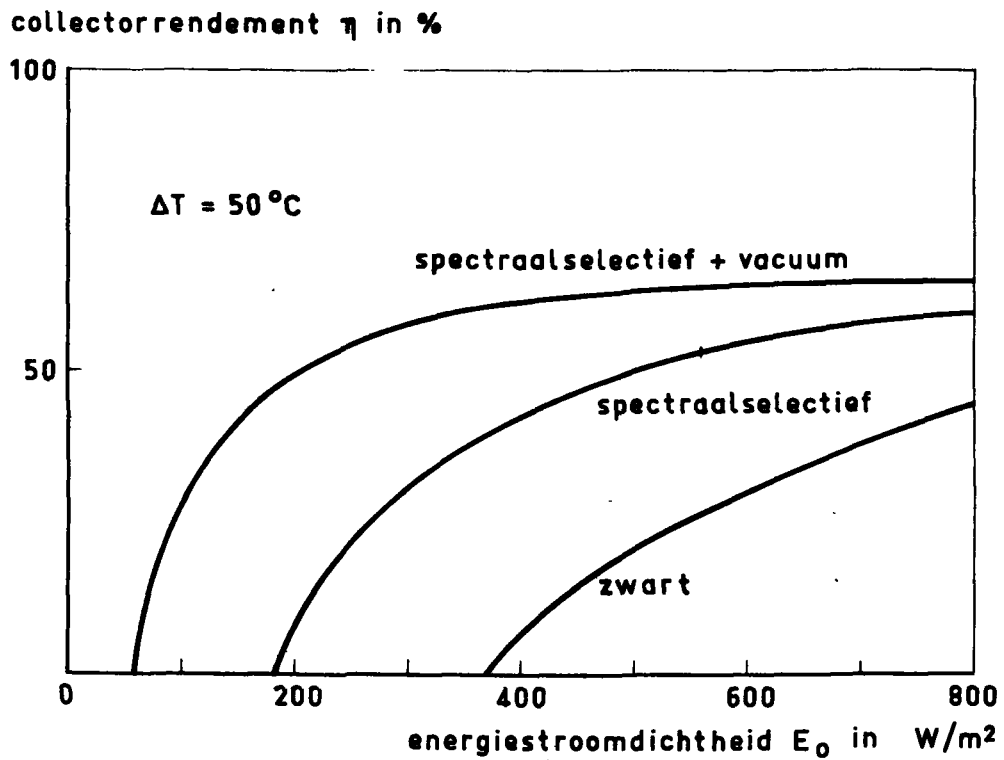


Figuur 2. Rendementscurven van 2 collectoren.

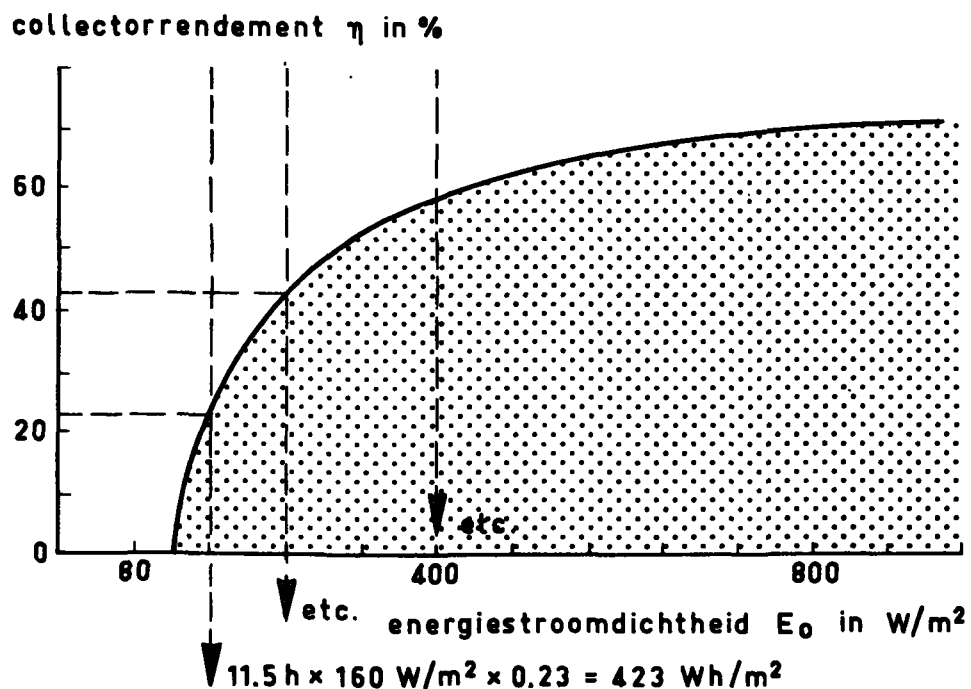
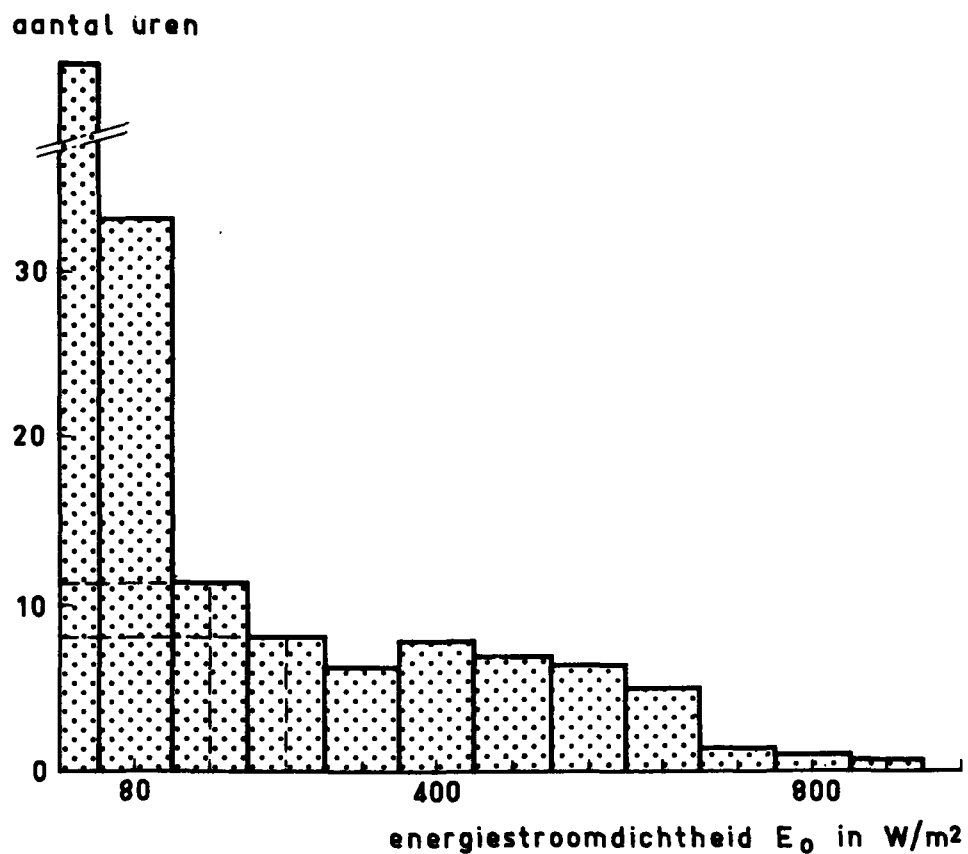
- (A) = collector met zwart absorberend oppervlak en enkelglas
- (B) = collector met zwart absorberend oppervlak en dubbelglas



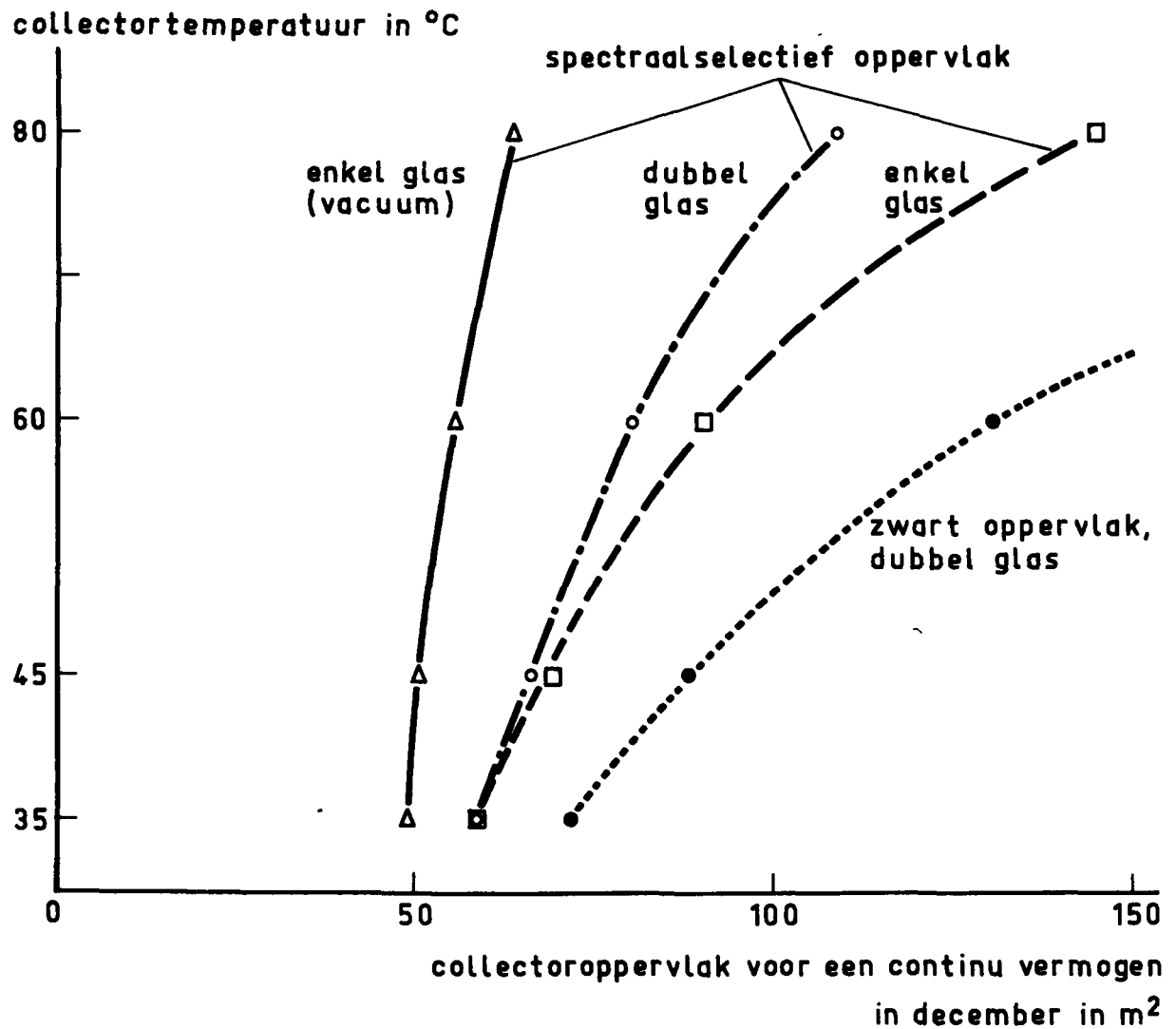
Figuur 3. Door het opnemen van een kanalsysteem in de collectorplaat wordt de warmte-overdracht verbeterd (F_R groter).



Figuur 4a en 4b Het verband tussen het collectorrendement en de energiestroomdichtheid (E_0) bij twee waarden van het verschil ΔT in temperatuur van de collectorplaat en de buitenlucht.

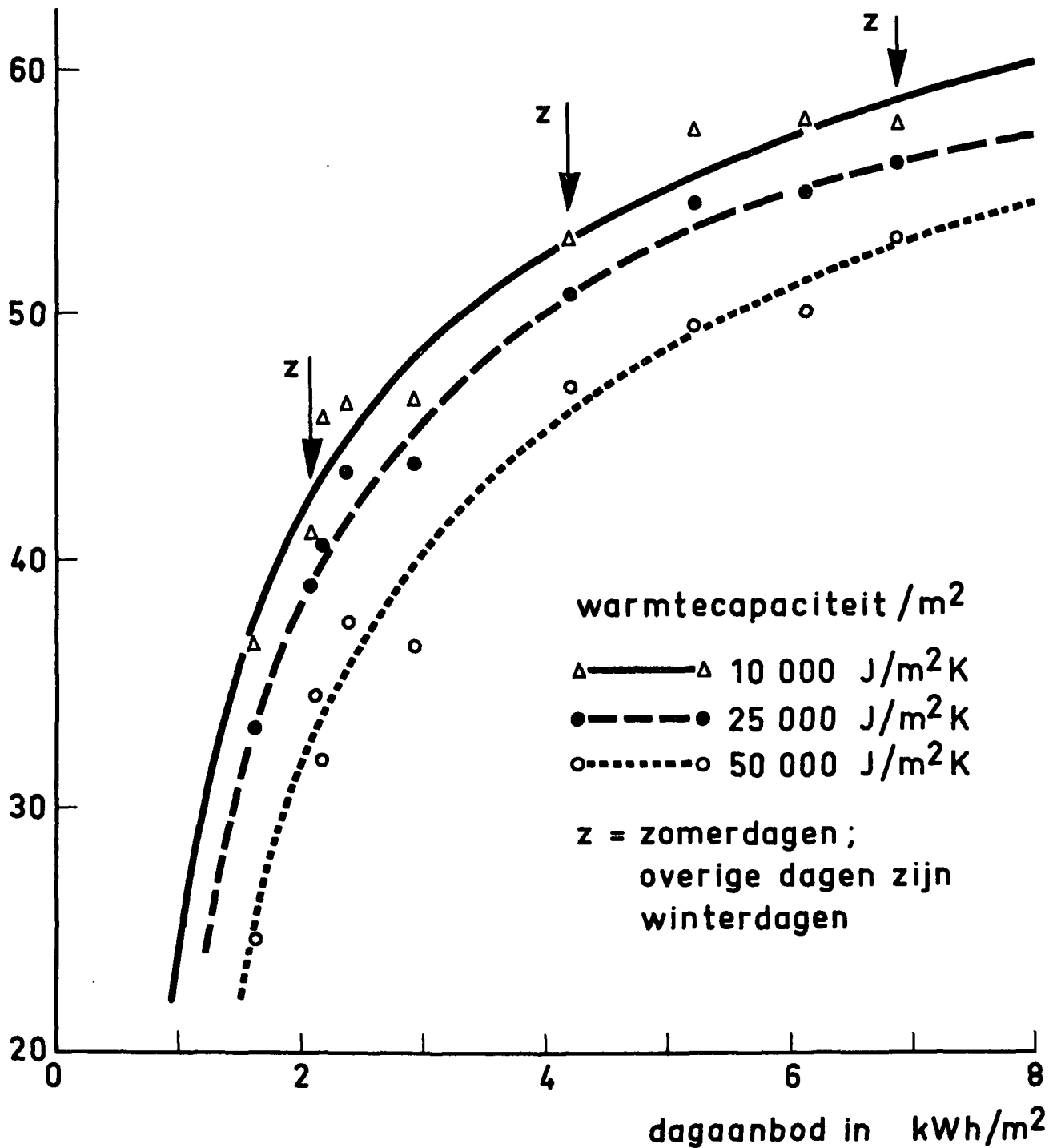


Figuur 5. Het aantal uren dat invallende straling beschikbaar is met verschillende energiestroomdichtheden, met opgave van het daarbij behorende collectorrendement.

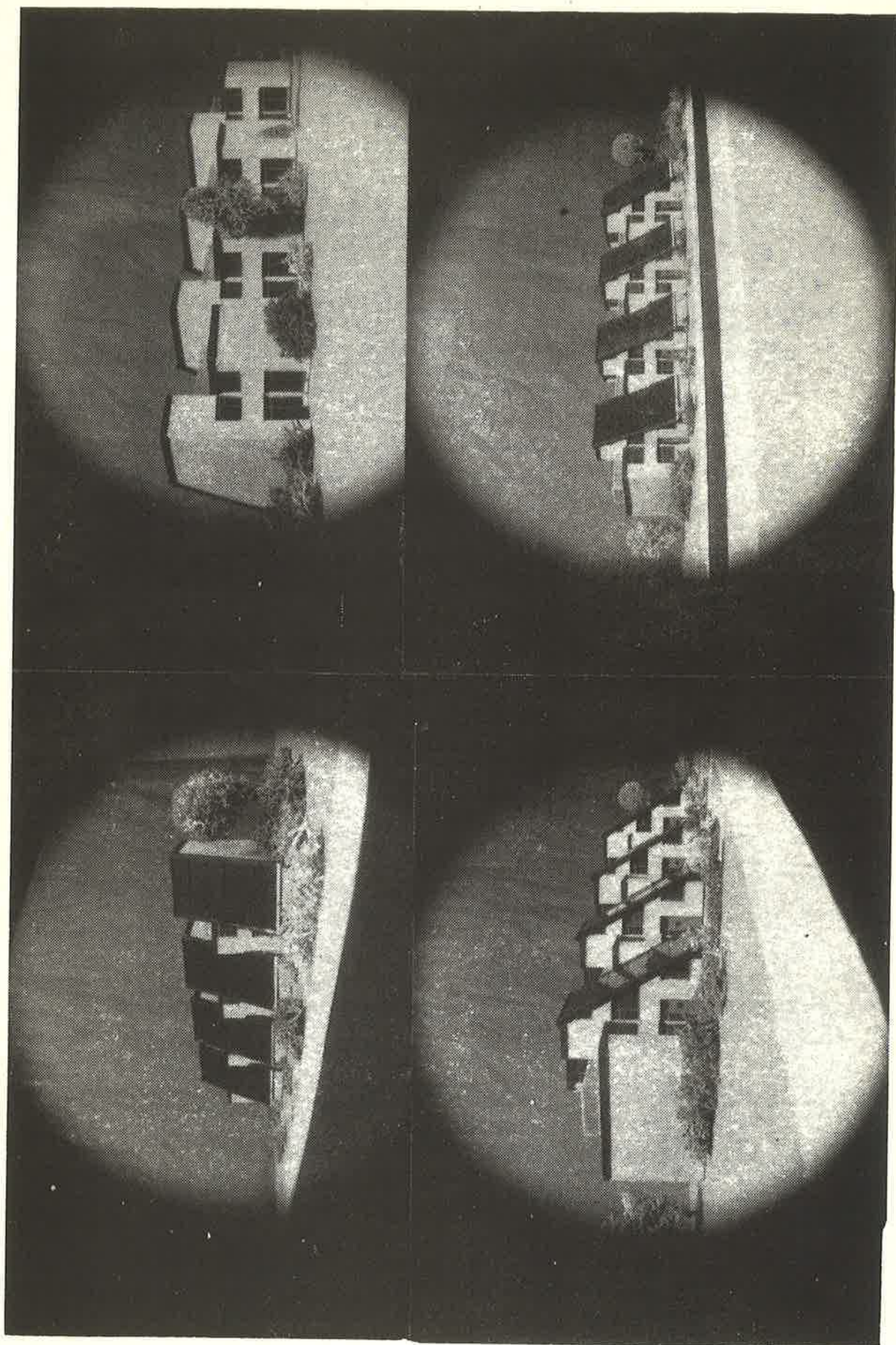


Figuur 6. Het collectoroppervlak benodigd voor een gemiddeld continu vermogen van 1 kW in december, bij verschillende collectortemperaturen, voor vier verschillende collectorconstructies.

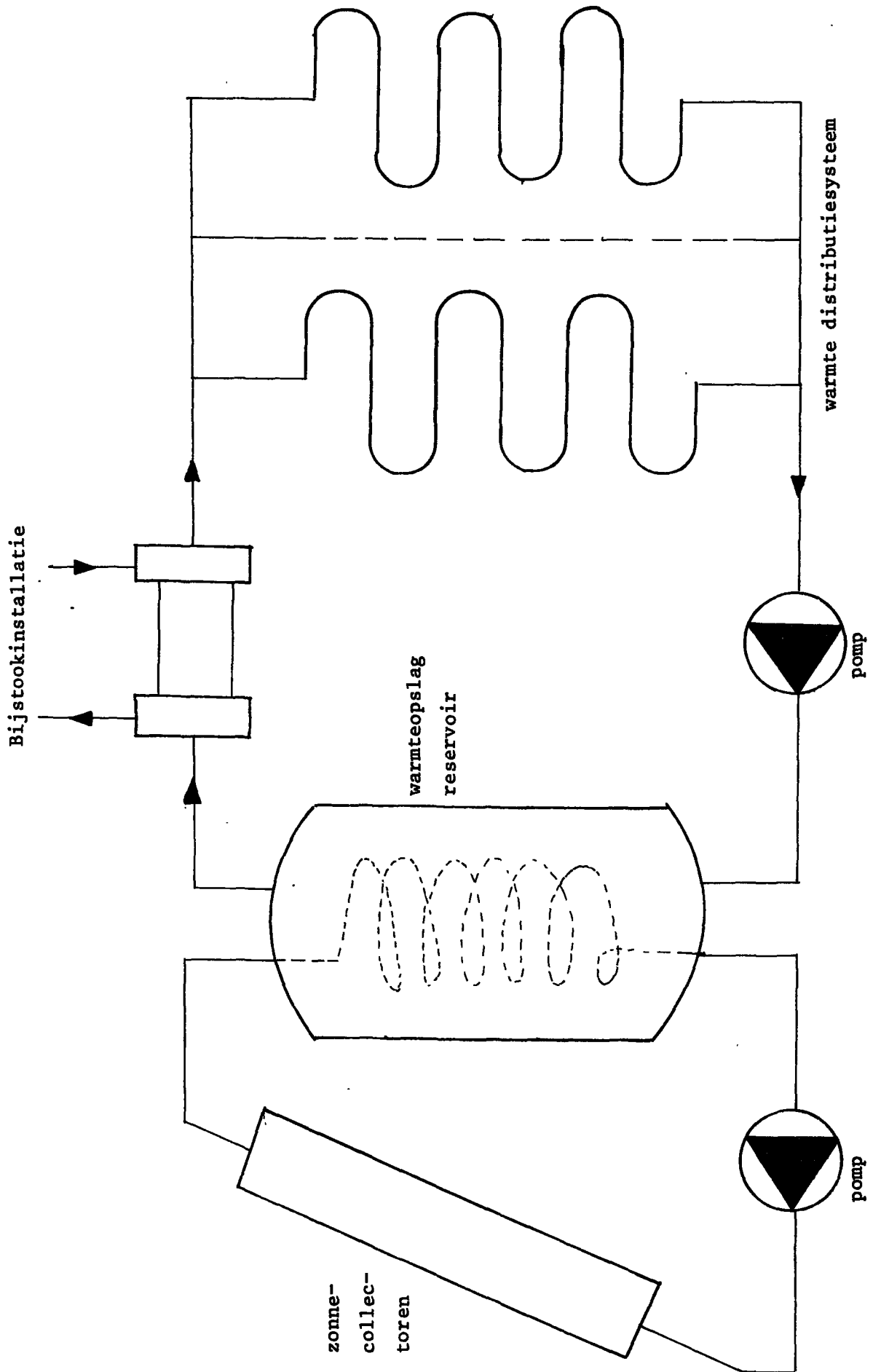
collectorrendement η in %



Figuur 7. Het collectorrendement als functie van het dagaanbod van de opvallende straling en de warmtecapaciteit van de collector per m^2 . (WCM^2).



Figuur 8. Ontwerp zonnwoning (Afdeling prototypen gebouwen -
Bouwcentrum Ratiobouw).



Figuur 9. Principe zonneverwarminginstallatie.